

04



São Paulo
2002

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL
PARA AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DA VIDA EM
FADIGA DE COMPONENTES MECÂNICOS

FERNANDO DE FREITAS

FERNANDO DE FREITAS

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL
PARA AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DA VIDA EM
FADIGA DECOMPONENTES MECÂNICOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

Area de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:

Prof. Livre-Docente

Gilberto Francisco Martha de Souza

São Paulo
2002

Dedico este trabalho a minha mãe e vô pelo apoio que sempre me deram em toda minha vida. Tudo que sou devo a elas. Também a minha namorada pelo carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Gilberto Francisco Martha de Souza pela oportunidade que me foi dada de poder trabalhar durante estes dois anos com ele.

A toda minha família que sempre me apoiou.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) que durante 1 ano e 4 meses concedeu bolsa de estudos para eu poder me dedicar integralmente neste trabalho.

Ao meu amigo Roberto Yukio Ihara pelas valiosas dicas que me deu em relação a programação computacional.

Ao meus amigos Ed Cláudio Bordinassi e Romy Calixto Carbonari pelo companheirismo durante estes dois anos na Escola Politécnica.

Ao Idelcio Alexandre Palheta Cardoso pelo incentivo e ajuda.

A todos meus outros amigos de São Paulo e de Catanduva que sempre torceram por mim.

A Deus.

SUMÁRIO

1	1. Introdução.....	1
1	1.1 Considerações Iniciais.....	1
6	1.2 Objetivo.....	6
7	1.3 Escopo do Trabalho.....	7
8	2. Análise de Fadiga.....	8
8	2.1 Fundamentos Básicos do Fenômeno de Fadiga.....	8
8	2.1.1 Mecanismos da Fadiga.....	8
8	2.1.1.1 Nucleação da Trinca.....	8
9	2.1.1.2 Crescimento da Trinca em Banda de Deslizamento.....	9
	2.1.1.3 Crescimento da Trinca nos Planos de Alta Tensão de Tração.....	9
10	2.1.1.4 Ruptura Final.....	10
11	2.1.2 Características Gerais.....	11
16	2.1.3 Fadiga de Alto Ciclo.....	16
18	2.1.4 Fadiga de Baixo Ciclo.....	18
23	2.1.5 Propagação de Trinca em Fadiga.....	23
27	2.1.6 Fatores que Afetam a Vida à Fadiga.....	27
29	2.1.6.1 Efeito da Tensão Média.....	29
36	2.1.6.2 Corrosão.....	36

37	2.1.6.3 Dispersão em Resultados Experimentais.....
39	2.1.6.4 Entalhes.....
41	2.1.6.5 Temperatura.....
41	2.1.6.6 Tamanho.....
42	2.1.6.7 Material.....
43	2.1.6.8 Superfície.....
44	2.1.6.9 Tensões Multiaxiais.....
	2.2 Critérios de Projeto para Componentes Sujitos a Apresentar Falha por Fadiga.....
45	2.2.1 Metodologia de Projeto.....
46	2.2.2 Método dos Estados Limites Aplicados à Fadiga.....
55	3. Fundamentos da Análise de Confiabilidade.....
55	3.1 Considerações Iniciais.....
60	3.2 Caracterização dos Métodos de Análise de Confiabilidade Estrutural.....
60	3.2.1 Nível I (Método Semi-Probabilístico).....
60	3.2.2 Nível II (Método Probabilístico Condicionado).....
61	3.2.3 Nível III (Método Probabilístico Puro).....
62	3.2.4 Nível IV.....
63	3.3 Método Probabilístico Condicionado.....
63	3.3.1 Método de Primeira Ordem.....
64	3.3.1.1 Valor Médio.....

69	3.3.1.2 Condicionado Avançado
74	3.3.2 Método de Segunda Ordem
76	3.4 Aplicação dos Métodos Probabilísticos na Análise de Fadiga
77	4. Características Gerais de Sistemas Especialistas
77	4.1 Definições Básicas
82	4.2 Estrutura de um Sistema Especialista
82	4.2.1 A Base de Conhecimento
83	4.2.2 A Máquina de Inferência
84	4.2.3 A Interface com o Usuário
	5. Sistema Computacional Aplicado no Estudo Probabilístico do Fenômeno da Fadiga
87	5.1 Características Gerais
89	5.2 Definição da Função de Estado Limite
94	5.3 Variáveis de Entrada e Saída
96	5.4 Algoritmo de Cálculo da Probabilidade de Falha
99	5.5 Limitações do Sistema Computacional
100	6. Implementação do Sistema
100	6.1 Seleção da Linguagem
102	6.2 Sub-Rotinas
103	6.3 Interface
111	6.4 Validação do Programa

7. Estudo de Caso.....	119
7.1 Descrição do Caso Exemplo.....	119
7.2 Análise do Caso Exemplo.....	121
7.3 Análise Probabilística do Caso Exemplo.....	129
8. Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros.....	136
8.1 Conclusões.....	136
9. Bibliografia.....	139

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

9	Figura 2.1 - (a) Formação de bandas de deslizamento. (b) Geração de intrusões e extrusões na superfície.....
10	Figura 2.2 - Mecanismo do crescimento da trinca.....
11	Figura 2.3 - Marcas de praia (concêntricas) e marcas de rio (radiais).....
12	Figura 2.4 - Estrias observadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), caracterizando a fadiga.....
13	Figura 2.5 - Esquema de fraturas por fadiga com carregamentos axiais e de flexão.....
13	Figura 2.6 - Crescimento de uma trinca causada pelo processo de fadiga.....
14	Figura 2.7 - Características de uma superfície fraturada por fadiga.....
15	Figura 2.8 - Exemplos de catástrofes causadas pelo fenómeno da fadiga.....
16	Figura 2.9 - Estágios de uma trinca gerada por fadiga.....
17	Figura 2.10 (a) - Esquema de tensões cíclicas.....
18	Figura 2.10 (b) - Esquema do ensaio de fadiga rotativa.....
19	Figura 2.11 - Diagramas <i>S-N</i> típicos para aço e alumínio obtidos através de ensaios com corpo de prova.....
22	Figura 2.12 - Curva de vida em fadiga de baixo ciclo mostrando a componente total, elástica e plástica da deformação.....

41	Figura 2.25 - Efeito da temperatura sobre a curva $S-N$ de uma liga de aço.....
40variação da geometria.....
	Figura 2.24 - Variação do coeficiente de concentração de tensões com a
39	Figura 2.23 - Curva $S-N$ para um corpo de prova com e sem entalhe.....
38	Figura 2.22 - Representação estatística dos dados de fadiga.....
36testada sob flexão rotativa.....
	Figura 2.21 - Efeitos da corrosão em uma curva $S-N$ de uma liga de aço
34Ciclos.....
	Figura 2.20 - Diagrama de Goodman Modificado para falha por fadiga em N
33tensão média.....
	Figura 2.19 - Ilustração das relações empíricas para estimar o efeito da
31	Figura 2.18 - Curva <i>Master</i> para uma liga de aço.....
30e baixo ciclo.....
	Figura 2.17 - Comparação do efeito da tensão média em falha por fadiga de alto
30tensão média.....
	Figura 2.16 - Dados de teste de fadiga de alto ciclo mostrando a influência da
26	Figura 2.15 - Fator Y para diversos tipos de configuração geométrica.....
25	Figura 2.14 - Modos de propagação de trinca.....
24aplicado ΔK
	da/dN e a amplitude do fator intensificador de tensão
	Figura 2.13 - Relação entre a razão de crescimento de uma trinca por ciclo

42..... Figura 2.26 - Efeito do tamanho na vida em fadiga.....

43..... Figura 2.27 - Variação do fator de superfície para diversos tipos de acabamento.....

47..... Figura 2.28 - Picos e vales encontrados em uma série temporal.....

Figura 2.29 - Um ciclo identificado através da combinação X-Y-Z do tipo

47..... vale-pico-vale ou pico-vale-pico quando $\Delta S_{YZ} \geq \Delta S_{XY}$

48..... Figura 2.30 - Procedimento (a) para contagem de ciclos.....

48..... Figura 2.31 - Procedimento (b) para contagem de ciclos.....

49..... Figura 2.32 - Procedimento (c) para contagem de ciclos.....

49..... Figura 2.33 - Procedimento (d) para contagem de ciclos.....

Figura 2.34 - Histograma da flutuação de tensão atuante em um componente

50..... Mecânico.....

Figura 2.35 - Utilização da curva S-N na determinação do dano conforme o

51..... critério de Palmgren-Miner.....

Capítulo 3

Figura 3.1 - Representação estatística entre resistência e solicitação,

56..... destacando-se a probabilidade de falha.....

Figura 3.2 - Representação gráfica do Método Semi Probabilístico ou de

60..... Nível I.....

Figura 3.3 - Representação gráfica do Método Probabilístico Condicionado

61..... ou de Nível II.....

68..... Figura 3.4 - Representação gráfica do índice de confiabilidade β

no componente para se obter um valor do índice de confiabilidade

Figura 6.4 - Tela do sistema no caso do usuário aceitar reduzir a tensão atuante

de confiabilidade.....105

Figura 6.3 - Primeira sugestão para a obtenção de um valor mais elevado do índice

confiabilidade.....105

Figura 6.2 - Questão referente à satisfação do projetista quanto ao valor do índice de

fadiga.....103

Figura 6.1 - Tela principal do sistema desenvolvido para cálculo de vida em

Capítulo 6

probabilidade de colapso.....98

Figura 5.4 - Fluxograma do algoritmo empregado na metodologia de cálculo da

Figura 5.3 - Fluxograma de raciocínio do sistema computacional.....95

um determinado número de ciclos.....92

Figura 5.2 - Distribuição das faixas das amplitudes de tensões que atuam por

conhecimento, ou especialista.....88

Figura 5.1 - Esquema da interação entre o algoritmo e o sistema baseado no

Capítulo 5

Figura 4.1 - Estrutura convencional de um Sistema Especialista.....82

Capítulo 4

da superfície de falha.....75

Figura 3.5 - Comparação entre a aproximação de primeira e segunda ordem

106	maior.....
106	Figura 6.5 - Ilustração do método utilizado na iteração de redução de valor da tensão.....
107	Figura 6.6 - Segunda sugestão para a obtenção de um valor mais elevado do índice de confiabilidade.....
107	Figura 6.7 - Tela do sistema no caso do usuário aceitar reduzir o número de ciclos de carregamentos no componente para se obter um valor do índice de confiabilidade maior.....
107	Figura 6.8 - Terceira sugestão para a obtenção de um valor mais elevado do índice de confiabilidade.....
108	Figura 6.9 - Tela do sistema no caso do usuário aceitar alterar o material de projeto para se obter um valor do índice de confiabilidade maior.....
109	Figura 6.10 - Caixa de diálogo informando que as sugestões chegaram ao fim.....
109	Figura 6.11 (a) - Tela onde o usuário fornece a faixa de valores de tensão que será analisada graficamente.....
110	Figura 6.11 (a) - Tela onde o usuário fornece a faixa de valores de ciclos que será analisada graficamente.....
110	Figura 6.12 (a), (b), (c) - Tipos de detalhes analisados para validar o sistema.....
112	112.....
113	Figura 6.13 - Detalhes da utilização do programa.....
113	Figura 6.14 - Tela do programa mostrando os materiais contidos em sua

115.....biblioteca.

116.....Figura 6.15 – Dados de entrada para a análise gráfica tensão x beta.

Figura 6.16 – Gráfico tensão x beta para o detalhe número 1 analisado

117.....entre 30 e 70 MPa.

117.....Figura 6.17 – Dados de entrada para a análise gráfica beta x ciclos.

Figura 6.18 – Gráfico beta x ciclos para o detalhe número 1 analisado

118.....entre 10^5 e 10^7 ciclos.

Capítulo 7

120.....Figura 7.1 – Esquema geral do eixo a ser analisado.

121.....Figura 7.2 – Reações de apoio.

122.....Figura 7.3 – Diagrama do corpo livre.

122.....Figura 7.4 – Diagrama dos esforços solicitantes.

Figura 7.5 – Gráfico do fator de concentração de tensões K_t para um eixo submetido

124.....a flexão.

125.....Figura 7.6 – Variação do fator de sensibilidade ao entalhe q .

Figura 7.7 – Diferença entre as curvas $S-N$ com e sem correção devido a concentração

127.....de tensão.

131.....Figura 7.8 – Tela principal do sistema na análise probabilística do eixo.

134.....Figura 7.9 – Gráfico tensão x beta para o eixo analisado entre 250 e 350 MPa.

Figura 7.10 – Gráfico beta x ciclos para o eixo analisado

135.....entre 8000 e 15000 ciclos.

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1 - Sumário das equações de falha para o método de Goodman

Modificado..... 35

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Relação entre vários tipos de função de estado limite com sua respectiva

média e desvio padrão..... 67

Capítulo 6

Tabela 6.1 - Variáveis em comum a todas as análises..... 111

Tabela 6.2 - Valores das probabilidades de falha obtidos para cada um dos detalhes

analisados..... 114

Tabela 6.3 - Valores dos índices de confiabilidade obtidos para cada um dos

materiais analisados..... 115

Capítulo 7

Tabela 7.1 - Dados de entrada do sistema computacional..... 129

Tabela 7.2 - Obtenção do índice de confiabilidade realizada para dois materiais..... 133

LISTA DE SÍMBOLOS

- a ... comprimento da trinca.
- A ... coeficiente determinado através do prolongamento da relação linear entre $\log \Delta K$ e $\log da/dN$ até $\Delta K = 1 \text{ MPa.m}^{1/2}$.
- b ... coeficiente angular.
- c ... expoente dúctil de fadiga.
- C_0 e C_1 ... constantes de integração.
- C_i ... derivada calculada em \bar{x}_i^* , g_i^* (\bar{x}^*).
- $Cov [x,y]$... covariância.
- D ... dano acumulado.
- D ... matriz derivada segunda ($n \times n$) da superfície do estado limite no espaço.
- padrão normal calculado no ponto de projeto para o método de segunda ordem.
- da/dN ... razão de crescimento de uma trinca por ciclo.
- e ... expoente de resistência de fadiga.
- E ... módulo de elasticidade.
- G ... limite de fadiga após o dano na teoria de Henry.
- G_0 ... limite de fadiga original na teoria de Henry.
- f ... fator associado a incertezas existentes na tensão equivalente.
- $f_z(x)$... representação de uma função da variável x .
- $f_x(x_i^*)$... magnitude da função densidade de probabilidade da variável básica x_i .
- $F_x(x_i^*)$... magnitude da função distribuição acumulada da variável básica x_i .
- calculada no ponto x_i^* .

$f(a)$... magnitude da função densidade de probabilidade normal reduzida,

calculada para o ponto \bar{a} .

$g(\cdot)$... função que relaciona as variáveis (x_j) .

$g'_i(\bar{x}^*)$... derivada calculada em \bar{x}^* .

$g''_i(\bar{x}^*)$... derivada segunda calculada em \bar{x}^* .

I ... matriz identidade.

K_a ... fator de acabamento superficial.

K_b ... fator de tamanho.

K_c ... intensificador de tensão crítico, ou tenacidade à fratura.

K_d ... fator de temperatura.

K_e ... fator de efeitos diversos.

K_f ... fator de concentração de tensão.

K_R ... fator de confiabilidade.

K_S ... coeficiente da curva $S-N$ que define a posição em que a reta encontra o eixo

$\log N$.

m ... coeficiente do método de Marco-Starkey.

m_1 ... valor esperado da variável básica x_1 .

m_1'' ... valor esperado corrigido da variável básica x_1 .

m_z ... valor esperado da função de estado limite Z .

n ... declividade da relação linear entre $\log \Delta K$ e $\log da/dN$ ou parâmetro de forma de

uma distribuição Gamma.

N ... número de ciclos.

$n!$... número de ciclos de carregamento com amplitude de tensão S_{mi} .

N_i ... número de ciclos admissíveis extraídos do gráfico $S-N$, para a tensão S_{mi} em

que os ciclos n_i foram aplicados.

$N(S_a)$... número de ciclos que o material suportaria sob ação da tensão cíclica S_a .

P ... comprimento característico.

P_F ... probabilidade de falha.

q ... fator de sensibilidade ao entalhe.

r ... raio na raiz do entalhe.

R ... resistência.

S ... solicitação.

S_a ... amplitude da tensão cíclica (tensão limite de resistência à fadiga, para um dado

número de ciclos N com tensão média de magnitude S_m)

$S_{a,eq}$... tensão alternada equivalente.

$S_{a,N}$... tensão limite de resistência à fadiga, para um dado número de ciclos (N)

com tensão média S_m igual a zero.

S_e ... limite de fadiga corrigido.

S_e' ... limite de fadiga obtido com o ensaio de corpos de prova em teste de fadiga

rotativo.

S_F ... flutuação total da tensão cíclica.

S_m ... tensão média.

S_{max} ... tensão máxima.

S_{min} ... tensão mínima.

$S_{m,eq}$... tensão média equivalente.

S_{nom} ... tensão nominal

S_u ... tensão limite de resistência à tração.

S_y ... limite de escoamento.

\bar{x} ... valor médio da variável aleatória.
 x_i ... variáveis básicas que influem no processo de colapso.
 \bar{x}^* ... vetor de variáveis básicas que indica o ponto em torno do qual a função está sendo linearizada.
 x_0 ... parâmetro de truncamento de uma distribuição de Weibull.
 Y ... fator que varia conforme a geometria do componente estudado e da própria trinca.
 Z ... função de estado limite.
 α_i ... constante de proporcionalidade.
 β ... índice de confiabilidade.
 δ ... dano acumulado em um ciclo com tensão cíclica de amplitude S_a .
 Δ ... valor crítico do dano acumulado para o qual ocorrerá falha por fadiga.
 ΔK ... amplitude do fator intensificador de tensão aplicado.
 $\Delta S/2$... amplitude de tensão.
 ΔS_i ... magnitudes das amplitudes de tensões atuantes no componente ao longo de N ciclos de carregamento.
 $\Delta \epsilon/2$... amplitude total de deformação.
 $\Delta \epsilon_e/2$... amplitude elástica de deformação.
 $\Delta \epsilon_p/2$... amplitude plástica de deformação.
 ϵ_f ... coeficiente ductil de fadiga.
 Φ ... função distribuição acumulada da distribuição normal reduzida.
 $\Phi^{-1}(b)$... valor da coordenada que corresponde a uma magnitude igual a \bar{b} para a função distribuição acumulada da distribuição normal reduzida.

η ... parâmetro de forma da distribuição de Weibull.

$\Gamma(\cdot)$... função Gamma.

λ_x ... desvio padrão do logaritmo natural da variável x .

ω_x ... taxa de falha da distribuição exponencial.

$(\theta - x_0)$... parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull.

ρ_{XY} ... coeficiente de correlação entre as variáveis básicas X e Y .

σ_f ... coeficiente de resistência de fadiga.

σ_i ... desvio padrão da variável básica x_i .

σ_i^n ... desvio padrão corrigido da variável básica x_i .

σ_x^2 ... variância da variável aleatória x em uma distribuição de Rayleigh.

σ_x ... desvio padrão da distribuição normal.

σ_z ... desvio padrão da função de estado limite Z .

ξ_x ... média do logaritmo natural da variável x .

ψ_x ... parâmetro de escala de uma distribuição Gamma.

RESUMO

O uso de técnicas probabilísticas em projetos de engenharia, já amplamente utilizadas na indústria naval, nuclear e aeroespacial, vem se tornando cada vez mais necessário em outros ramos, como por exemplo, na automobilística, elétrica e civil, visto a necessidade de se otimizar um projeto para redução de custos e garantir o perfeito funcionamento do produto.

Dentre as principais dificuldades em se aplicar tais técnicas pode-se citar o desconhecimento de métodos probabilísticos eficazes por parte do projetista, complexidade dos cálculos, aquisição de dados provenientes de ensaios laboratoriais ou de campo para alimentar o equacionamento e mudança paradigmática do enfoque de dimensionamento das pessoas envolvidas nos projetos.

Frente a estas dificuldades, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema computacional para realização de estudos de confiabilidade aplicados a um componente sujeito à falha por fadiga. Tal mecanismo de falha foi escolhido por apresentar elevada dispersão e por seu estudo ser de enorme importância na engenharia estrutural, já que a maioria das falhas ocorridas em componentes mecânicos tem como causa a falha por fadiga.

O código computacional emprega a função de estado limite baseada da lei de dano cumulativo proposta por Palmgren-Miner, considerando como variáveis aleatórias, representadas por suas funções densidade de probabilidade, as tensões dinâmicas atuantes no componente, o material do mesmo e o dano crítico. O código é capaz de executar análises de confiabilidade, fornecendo a probabilidade de falha para uma dada vida operacional, ou, fornecida a probabilidade de falha desejada, o código fornece o valor de tensão dinâmica admissível para o componente, a vida operacional recomendada para o mesmo, ou o material a ser empregado na sua fabricação, de modo que este atinja a confiabilidade desejada.

ABSTRACT

The use of probabilistic techniques in engineering design, widely used in the naval, nuclear and aerospace industry, has become more necessary in other engineering areas, such as automobile, electric and the civil engineering, aiming the optimization of a specific design and using as constraints the product reliability and the costs associated with design and manufacturing.

The main difficulties of applying such techniques as part of a design criteria are the unfamiliarity of efficient probabilistic methods for the designer, the complexity of the calculations, and the acquisition of laboratory or field to describe the uncertainties of the random variables considered as design parameters. Another important point is the training of the designer to understand this new reliability-based design approach.

In order to minimize these difficulties, this study proposes the development of software dedicated to reliability-based design of mechanical parts subject to fatigue failure. This failure mechanism is chosen due to the great dispersion associated with the materials fatigue resistance, increasing the uncertainty of the part operational life, making the fatigue failure the most common failure of mechanical parts or structures subject to dynamic loading.

The computer code uses a limit state function based on the Palmgren-Miner's cumulative damage rule, using as random variables, described by probability density functions, the critical damage, the fatigue resistance and the dynamic stress acting on the part. The code executes reliability analysis, checking the failure probability for a specific operational life, or, given a target failure probability, the code suggests the mean dynamic stress, the operational life or the part material, in order to fulfill the reliability requirement.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Fadiga é um dos mais importantes modos de falha a serem considerados em projetos mecânicos e estruturais. Estima-se que aproximadamente 80% de todas as falhas de serviço observadas em sistemas mecânicos e estruturais sejam causadas pelo mecanismo da fadiga, como descreve Sundararajan (1995). O processo de falha por fadiga envolve a nucleação de uma trinca e sua consequente propagação, até a ocorrência da fratura no componente mecânico ou estrutural, quando este é submetido a ação de tensões, cuja magnitude é variável ao longo do tempo. Tal falha normalmente é catastrófica, ocorrendo de forma repentina e sem um prévio sinal facilmente detectável do desenvolvimento deste mecanismo de falha, podendo provocar, em alguns casos, perda de vida humana.

Usualmente, no dimensionamento de componentes submetidos à ação de carregamento cíclico, o projetista busca definir a sua vida operacional, a qual corresponde ao período de utilização do componente sob condições especificadas de solicitação externa, sendo que as dimensões do componente devem ser tais que o mesmo não apresente falha por fadiga durante a vida operacional. O dimensionamento de componentes sujeitos a apresentar falha por fadiga é usualmente executado em conformidade com um critério de projeto específico, constituído de formulações, forma de representação de carregamento externo e coeficiente de segurança que garante ao componente uma reduzida possibilidade de apresentar falha ao longo da sua vida operacional. As variáveis que influenciam o mecanismo de falha por fadiga são consideradas determinísticas, e as incertezas associadas com as mesmas e com o próprio procedimento de cálculo da vida em fadiga são tratadas com o uso do coeficiente de segurança, visando a minimização da possibilidade de ocorrência de falha, mesmo que as variáveis, na situação real de uso, assumam magnitudes diferentes das utilizadas em projeto.

As incertezas no processo de análise do mecanismo da fadiga são, por exemplo:

i) Dispersão nos dados obtidos a partir de testes em laboratórios;

ii) Extrapolação de dados obtidos em testes para uso em projetos, utilizando-se usualmente valores recomendados por norma;

iii) Geometria do componente, como por exemplo, presença de defeitos e descontinuidades estruturais que dificultam a determinação do tempo de vida até a iniciação da trinca;

iv) Efeitos do meio ambiente, principalmente na forma de carregamentos não previstos durante a fase de projeto, cujas consequências na vida em fadiga não são bem definidas;

v) Carregamentos dinâmicos aleatórios;

vi) Incertezas na análise de tensões oscilatórias;

vii) Efeitos de temperatura;

viii) Corrosão.

Devido à grande quantidade de incertezas associadas ao fenômeno da fadiga, uma abordagem probabilística deve ser realizada para se obter um projeto confiável. Porém, para a aplicação de métodos probabilísticos ao projeto, algumas dificuldades são encontradas, como o desconhecimento de métodos de cálculo probabilísticos eficazes por parte do projetista, complexidade dos cálculos, aquisição de dados provenientes de ensaios laboratoriais, ou de campo, para alimentar o equacionamento e mudança paradigmática do modo de prever o dimensionamento de componentes por parte das pessoas envolvidas no projeto.

Os critérios probabilísticos para a análise ou síntese de componentes mecânicos ou estruturais sujeitos a apresentar falha por fadiga são constituídos de formulações e procedimentos de cálculo que permitem, considerando a natureza aleatória das variáveis que influenciam este mecanismo de falha, a determinação da probabilidade de haver falha por fadiga ao longo da vida operacional prevista para o componente em estudo. Nestas avaliações probabilísticas necessita-se a definição das

características probabilísticas das variáveis aleatórias, tais como média e desvio padrão, bem como de um algoritmo de cálculo que permita a avaliação da probabilidade de falha. A aplicação destas análises probabilísticas, em função de sua maior complexidade em comparação com os tradicionais métodos de análise determinística, tem sido restrita a algumas áreas da engenharia, tais como a civil, naval e oceânica, nuclear e aeronáutica, havendo ainda pouca aplicação na área de dimensionamento mecânico.

Atualmente, vários estudos relacionados aos métodos probabilísticos aplicados à engenharia estrutural, em particular a componentes sujeitos a apresentarem colapso por fadiga, têm sido realizados. Porém, observa-se que tal assunto ainda gera discussão em relação aos métodos a serem utilizados, mostrando que não se trata de um tema consumado.

No que diz respeito a qual formulação melhor representa o dano acumulado de um componente sujeito a fadiga, observa-se que a utilização do método proposto matematicamente por Miner para representar o conceito do dano linear de Palmgren, conhecido como regra de Palmgren-Miner, e detalhado no Capítulo 2, é quase uma unanimidade em todos os trabalhos atuais. Tal formulação sofreu várias modificações e adaptações durante os últimos anos para melhor representar casos específicos e complexos, como por exemplo, material não homogêneo. Como exemplo de formulações derivadas da regra de Palmgren-Miner pode-se citar o método de Marco-Starkey, de Henry, de Gatts, de Corten-Dolan, de Marin, de Manson, dentre outros citados em (COLLINS, 1993). De uma forma geral, pode-se dizer que há seis representações matemáticas usualmente empregadas na modelagem do dano acumulado causado pela ocorrência do processo de fadiga, como sugerido em (FATEMI, YANG, 1998):

i) Avaliação linear do dano;

ii) Curva de dano não linear e aproximação para a linearização em dois estágios;

- iii) Modificação na curva da vida para contabilizar interação do carregamento;
- iv) Aproximações baseadas no conceito de propagação de trinca;
- v) Modelos baseados em mecânica do dano a qual deriva-se de formulações da mecânica do contínuo;
- vi) Métodos baseados em energia.

Outra discussão importante no que tange este assunto é a que diz respeito ao tipo de distribuição associada a cada variável aleatória, e suas respectivas incertezas, tais como carregamento, representado na forma de tensão, comportamento mecânico do material, expresso na forma da curva $S-N$ e do índice de dano Δ . Ainda com base nas referências citadas anteriormente, pode-se observar que ainda não há um consenso total em relação a qual distribuição de probabilidade caracteriza melhor cada uma das variáveis acima citadas.

Sobre a análise de confiabilidade estrutural verificou-se que, na maioria dos problemas, utiliza-se o modelo de Nível II, denominado Método Probabilístico Condicionado, para a determinação da probabilidade de colapso, visto sua maior viabilidade e simplicidade em relação ao modelo de Nível III, denominado Método Probabilístico Puro, como citado em (SIDDIQUI; AHMAD, 2001) e (SOUZA, 1994). Sua formulação, detalhada no próximo capítulo, baseia-se na função de estado limite, na qual a falha ocorre quando a resistência requisitada em projeto da estrutura for menor ou igual à solicitação atuante sobre a mesma.

A aplicação da análise probabilística de fadiga deverá ser mais difundida, havendo alguns códigos de projeto que admitem análises probabilísticas. A maior difusão destes métodos certamente exigirá o desenvolvimento de ferramentas computacionais que permitam uma rápida avaliação da probabilidade de falha de elementos mecânicos ou estruturais, conforme diversos mecanismos, incluindo o de fadiga.

Para facilitar o projetista estrutural na execução das análises probabilísticas, no aspecto de reduzir o tempo de síntese da estrutura, podem ser empregados sistemas computacionais que possibilitem interagir com o usuário, fornecendo sugestões com respeito a possíveis alterações no projeto, visando que o mesmo atenda a um critério de projeto específico. Dentro desta classe de sistemas computacionais, têm-se os sistemas especialistas, os quais permitem que o conhecimento de um perito em uma determinada área seja armazenado e, posteriormente, disponibilizado para o usuário a fim de auxiliá-lo em seu projeto.

Dessa forma, o desenvolvimento de um sistema especialista que permita a execução de síntese estrutural, considerando o mecanismo de fadiga como modo de falha, e que utilize um critério de projeto baseado em um método de análise probabilístico, pode ser de grande valia para projetistas de estruturas e componentes mecânicos sujeitos a apresentar este modo de falha.

Durkin (1994) justifica o uso de sistemas especialistas nos seguintes casos: existência de peritos que dominem a área em estudo para aquisição de conhecimento; existência de tarefas que necessitem da participação de vários especialistas, que, isolados não possuam conhecimentos suficientes; existência de tarefas que requeram conhecimento de detalhes que, se esquecidos, afetarão no desempenho da resolução de tais tarefas; existência de tarefas que demonstrem grandes diferenças de conhecimento sobre elas entre os melhores e piores peritos; escassez de mão-de-obra especializada.

Por fim, em relação a sistemas especialistas aplicados ao estudo de componentes mecânicos sujeitos a apresentarem colapso por fadiga, observa-se que existe uma certa deficiência na publicação de artigos tratando deste tema. Pode-se citar o trabalho (HAN; LIU; DAI, 1998), porém este aborda o fenômeno de propagação da trinca, e não a fase de nucleação da mesma.

1.2 Objetivo

Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema computacional para a realização da análise probabilística do processo de fadiga em componentes sujeitos a apresentarem falha por fadiga de alto ciclo, cuja falha é representada pela nucleação da trinca, isto é, considera a estrutura inapta ao surgir a trinca. Tal sistema tem como principais características a capacidade de realização dos cálculos estatísticos e de tomar algumas decisões a partir de seus conhecimentos e regras. Suas respostas ao usuário são a probabilidade de falha do componente de interesse sob um dado carregamento e valor da tensão ou do número de ciclos admissível para o qual o componente poderá ser submetido a fim de apresentar uma probabilidade de falha desejada, especificada pelo usuário do sistema. Além disso, o sistema permite a troca do material do componente analisado para a obtenção de uma probabilidade de falha mais adequada ao projeto.

1.3 Escopo do Trabalho

Após breve introdução ao tema deste trabalho, executada neste capítulo, no Capítulo 2 é apresentada, de forma detalhada, a análise do fenômeno da falha por fadiga, destacando-se os fundamentos básicos e os critérios de projeto para componentes sujeitos a apresentar tal falha.

No Capítulo 3 são apresentados os fundamentos da análise de confiabilidade, o qual aborda os métodos de análise de confiabilidade estrutural, sendo o método probabilístico condicionado descrito de forma detalhada, bem como sua aplicação na análise do fenômeno de fadiga.

O Capítulo 4 mostra as características gerais de sistemas especialistas, suas definições básicas e a estrutura de um sistema deste tipo.

O Capítulo 5 aborda a aplicação de um sistema computacional no estudo probabilístico do fenômeno da fadiga, apresentando as características gerais deste sistema, a definição de estado limite utilizada, as variáveis de entrada e saída, o algoritmo de cálculo da probabilidade de falha, bem como suas limitações.

A implementação do sistema computacional para avaliação probabilística da vida em fadiga de componentes mecânicos é feita no Capítulo 6, onde a seleção da linguagem utilizada no desenvolvimento do sistema, suas sub-rotinas básicas de algoritmo e interfaces são apresentadas com detalhe. Neste capítulo também é feita a validação do programa.

Um estudo de caso para exemplificar a utilização prática do sistema desenvolvido é feito no Capítulo 7.

No Capítulo 8 encontram-se as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, a bibliografia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho é apresentada no Capítulo 9.

Este estágio trata do desenvolvimento inicial dos danos causados por fadiga, sendo este representado pela nucleação da trinca. Uma característica importante no mecanismo da fadiga é de que as trincas geralmente têm início em uma superfície livre. As trincas por fadiga podem ser formadas antes de se atingir 10% da vida total do componente, porém, a decisão de quando as deformações plásticas localizadas, geralmente concentradas em bandas, chamadas de bandas de deslizamento (DOWLING, 1999), deve ser considerada uma trinca pode ser bastante discutível, sendo esta decisão função do tipo de abordagem, mecânica ou metalúrgica, na qual baseia-se a análise. Sob o ponto de vista de uma abordagem mecânica, tal como

2.1.1.1 Nucleação da Trinca

As variações básicas das estruturas metalúrgicas em um metal sujeito a tensões cíclicas podem ser divididas de forma simplificada em quatro estágios: nucleação da trinca, crescimento da trinca na banda de deslizamento, crescimento da trinca nos planos de alta tensão de tração e ruptura final, segundo Dieter (1981).

2.1.1 Mecanismos da Fadiga

- i) Presença de tensões cíclicas;
- ii) Presença de tensões de tração;
- iii) Presença de deformações plásticas localizadas.

básicos, como descrito em (FUCHS; STEPHENS, 1980), sendo eles:

Para ocorrer o fenômeno da fadiga é necessária a existência de três fatores

ocasionar fatura, caso tal aplicação fosse feita estaticamente.

decorrente da aplicação de carregamentos dinâmicos repetidos ou flutuantes, de tensão ou deformação, que apresentem um valor inferior àquele necessário para Falha por fadiga de um componente ou estrutura mecânica é aquela

2.1 Fundamentos Básicos do Fenômeno de Fadiga

2. ANÁLISE DE FADIGA

adotada neste estudo, considera-se a existência de uma trinca quando a sua dimensão atinge um valor que pode ser detectado por algum processo de inspeção não destrutivo. Tipicamente, a trinca atinge esta dimensão ao longo da sua propagação nas bandas de deslizamento, processo discutido na sequência deste texto.

2.1.1.2 Crescimento da Trinca em Banda de Deslizamento

Diz respeito ao crescimento da trinca inicial nos planos de alta tensão cisalhante, sendo este estágio frequentemente chamado de estágio I de crescimento da trinca. As cargas alternadas, com flutuação de tensão representada pelo símbolo ΔS , geram a movimentação cíclica de discordâncias que se agrupam em células formando bandas de deslizamento como mostra a Figura 2.1 (a), as quais levam à geração de intrusões e extrusões na superfície do material, ilustradas na Figura 2.1 (b), que são classificadas como trincas superficiais.

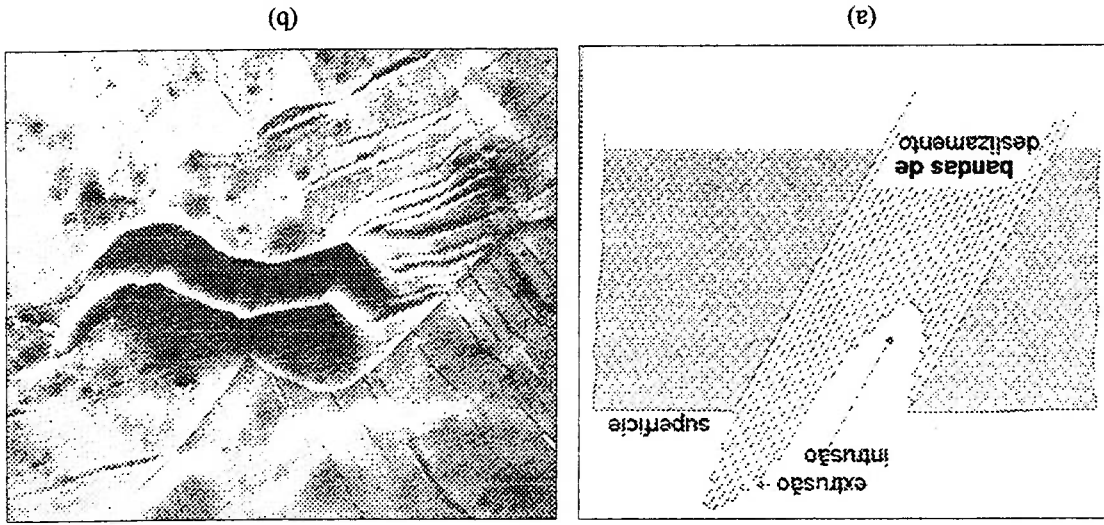


Fig. 2.1: (a) Formação de bandas de deslizamento. (b) Geração de intrusões e extrusões na superfície (PUC-RIO, 2000).

2.1.1.3 Crescimento da Trinca nos Planos de Alta Tensão de Tração

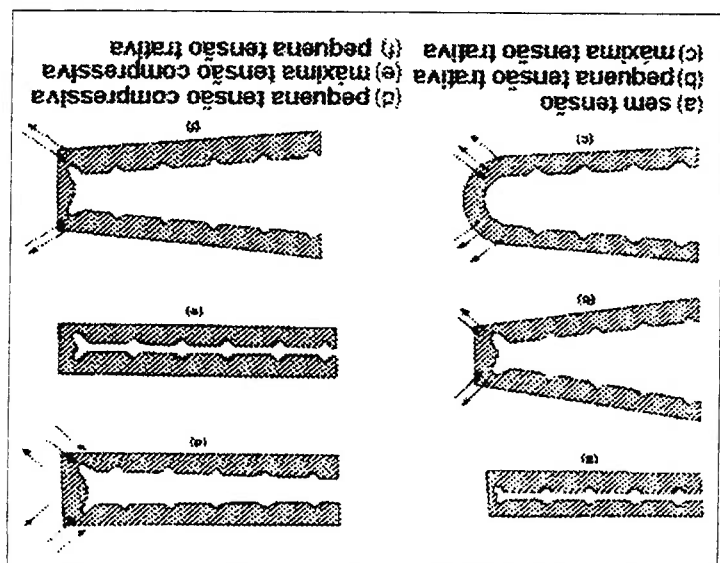
Envolve o crescimento de uma trinca em direção normal à tensão de tração máxima, sendo chamado de estágio II de crescimento da trinca. Este estágio ocorre por um processo plástico que torna a ponta da trinca rombuda, como ilustra a Figura 2.2.

Ocorre quando a trinca atinge um tamanho no qual a seção transversal do componente ou estrutura mecânica não apresenta mais a capacidade de suportar o carregamento atuante, provocando seu colapso por fratura frágil.

2.1.1.4 Ruptura Final

No início do carregamento cíclico a ponta da trinca é aguda e à medida que o esforço de tração é aplicado o pequeno entalhe duplo na ponta da trinca concentra o deslizamento ao longo dos planos que fazem 45° com o plano da trinca. À medida que a trinca se alarga para a sua extensão máxima, ela caminha ainda mais por cisalhamento plástico ao mesmo tempo em que sua ponta torna-se rombuda. Quando a carga torna-se compressiva as direções de cisalhamento na extremidade são invertidas, sendo as faces compactadas e a nova superfície da trinca criada na tração é forçada para o plano da trinca, onde é parcialmente dobrada por flambagem formando uma nova ponta de trinca aguda novamente. Desta forma a trinca está pronta para avançar e se tornar rombuda no próximo ciclo. O crescimento da trinca dá-se a uma taxa crescente em cada ciclo de carregamento, sendo este estágio denominado de crescimento estável.

Fig. 2.2: Mecanismo do crescimento da trinca (PUC-RIO, 2000).



2.1.2 Características Gerais

As características macroscópicas mais comuns das trincas oriundas do mecanismo de fadiga são as ondulações superficiais concêntricas (“marcas de praia”) e radiais (“marcas de rio”) como mostra a Figura 2.3. As regiões que contêm as marcas de praia caracterizam a fase de crescimento estável da trinca, onde há a ocorrência de plastificação do material próximo à ponta da trinca, ao longo do processo de crescimento. Já as marcas de rio, características de uma superfície bastante rugosa, com reduzida deformação plástica, são típicas de uma fratura frágil, representam a região onde ocorre o crescimento instável da trinca.

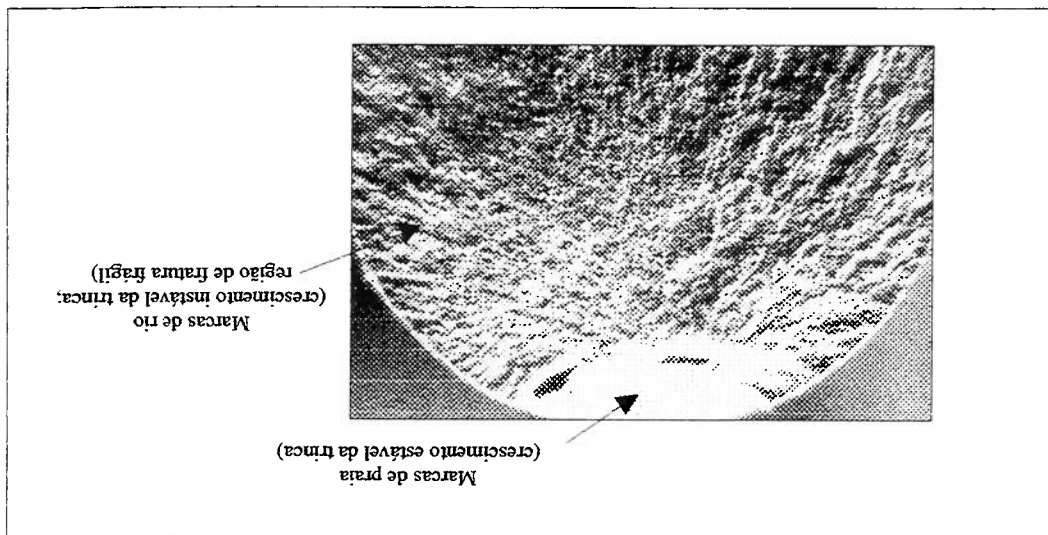
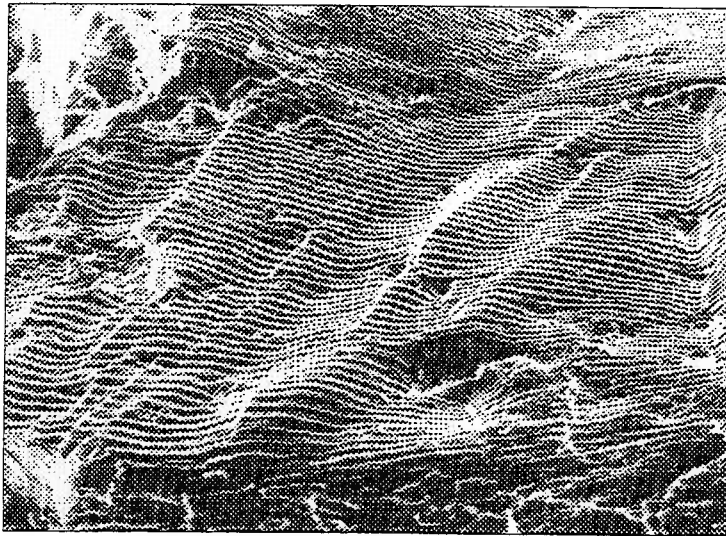


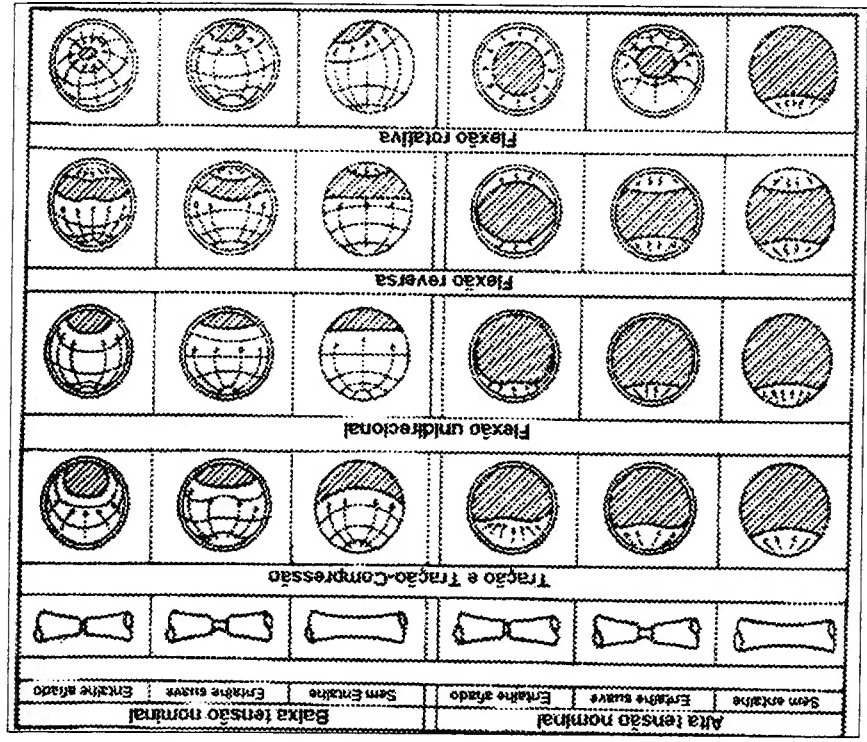
Fig. 2.3: Marcas de praia (concêntricas) e marcas de rio (radiais).

A principal característica microscópica das trincas de fadiga é a presença de estrias, visíveis apenas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), como ilustra a Figura 2.4. Tais estrias localizam-se na região onde o crescimento da trinca ocorre de forma estável, isto é, na região das marcas de praia.

A Figura 2.5 traz uma ilustração esquemática das características da fratura por fadiga de um corpo de prova quando submetido a diferentes carregamentos axiais e de flexão. Em cada caso a trinca inicia-se na superfície ou entalhe e propaga-se no plano de máxima tensão de tração. No caso de flexão reversa vertical-se o surgimento de trincas em lados opostos, devido à existência de tensão de tração em ambos os lados, ao contrário da flexão unidirecional que apresenta tensão trativa em apenas um dos lados. Outro fato interessante para todos os casos é de que quanto menor o nível da tensão nominal maior será a fase de propagação estável da trinca, já que demorará mais para se alcançar o tamanho crítico da trinca que, associado à magnitude da tensão nominal atuante no corpo, gerará um fator de intensificação de tensões que supera a tenacidade à fratura do material, causando a fratura frágil, que caracteriza o final de um processo de falha por fadiga.

Fig. 2.4:
Estrias observadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), caracterizando a fadiga (PUC-RIO, 2000).





Esquema de faturas por fadiga com carregamentos axiais e de flexão (FUCHS; STEPHENS, 1980).

A Figura 2.6 apresenta o processo do crescimento de uma trinca gerada pelo mecanismo de fadiga em função do número de ciclos de carregamento ao qual a peça é submetida. Verifica-se que a trinca cresce a uma taxa de crescimento por ciclo de carregamento variável ao longo do tempo, sendo esta crescente à medida que o comprimento da trinca aumenta de magnitude. Dessa forma, quanto maior a dimensão da trinca, maior será a sua taxa de crescimento em um ciclo de carregamento.

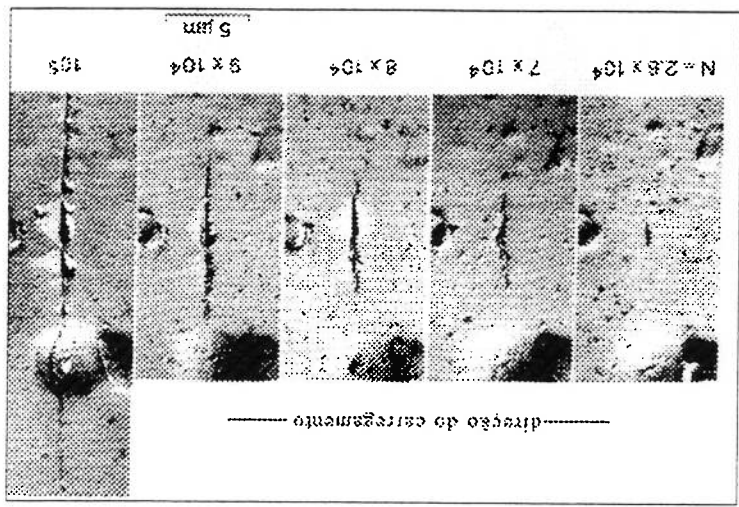


Fig. 2.6: Crescimento de uma trinca causada pelo processo de fadiga (FUC-RIO, 2000).

A superfície de fratura, em escala macroscópica é quase sempre normal à direção da tensão principal de tração. A superfície da fratura geralmente apresenta uma região lisa, decorrente da fricção entre as superfícies durante a propagação da trinca através da seção transversal do material, e uma região áspera, na qual ocorreu uma fratura frágil quando a seção já não era capaz de suportar o carregamento aplicado, como é observado na Figura 2.7.

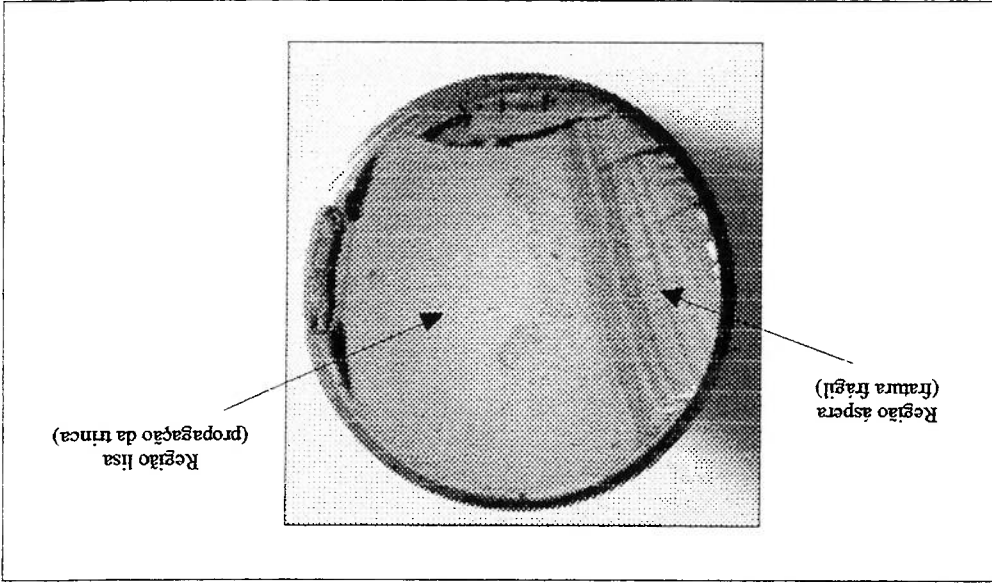


Fig. 2.7: Características de uma superfície fraturada por fadiga.

O progresso da fratura frequentemente é indicado por uma série de anéis que se desenvolvem do ponto de início da trinca para o interior da seção, tendo geralmente seu início em um ponto concentrador de tensão, como por exemplo, um canto vivo ou uma inclusão. Esta falha da origem a uma fratura de aparência frágil, sem a existência de deformações macroscópicas, tal como discutido em parágrafos anteriores deste texto.

Caso inspeções periódicas, com o intuito de se detectar uma trinca em um componente sujeito a apresentar falha por fadiga não sejam realizadas, esta poderá provocar uma falha súbita na estrutura, podendo levar a consequências catastróficas, como mostram as Figuras 2.8 (a), em que um *Boeing 737* da *Aloha Airlines* perdeu parte da fuselagem em pleno voo em 1988, e Figura 2.8 (b), que ilustra a região onde

ocorria falha por fadiga nos aviões *Comet*, que ocasionou a morte de diversas pessoas na década de 1950.

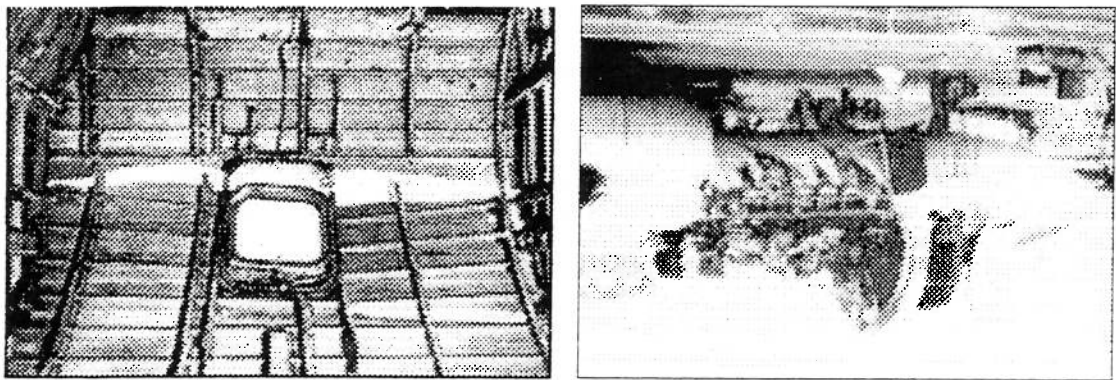


Fig. 2.8:

(a) Avião da *Aloha Airlines* que perdeu parte da fuselagem em pleno voo devido a falha por fadiga em 1988. (b) Região onde ocorreu falha por fadiga nos aviões *Comet*, ocasionando a morte de diversas pessoas.

O estudo da falha por fadiga pode ser dividido em duas partes, antes e após a formação da trinca, como mostra a Figura 2.9, ou seja, busca-se determinar o número de ciclos de carregamento necessário para nuclear a trinca e esta se propagar até atingir uma dimensão que possa ser detectada por um processo de inspeção não destrutivo, bem como o tempo necessário para esta trinca propagar-se estavelmente, até ser atingida a dimensão crítica que causa a ruptura da seção transversal do componente em análise.

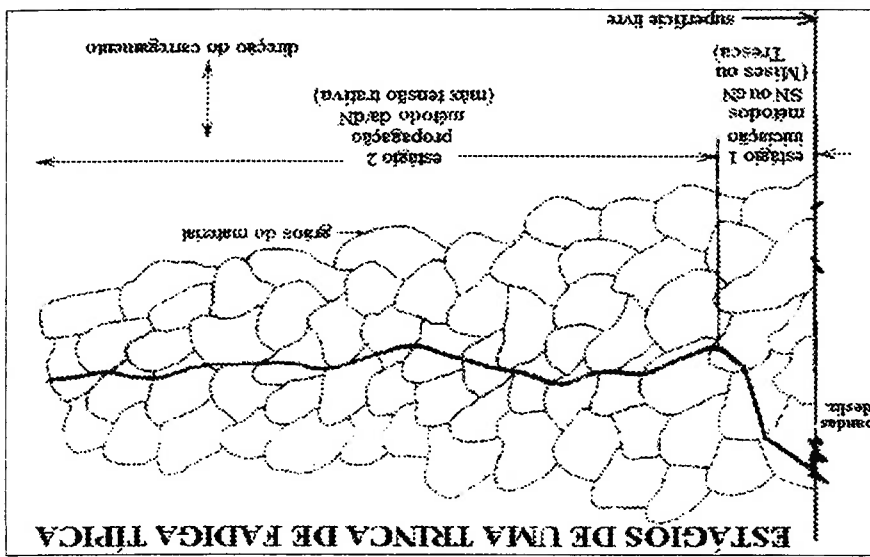
A definição dos tempos, representados em números de ciclos de carregamento associados com as fases de nucleação e propagação da trinca, podem ser calculados com o auxílio de métodos de análise baseados em dados experimentais, os quais são discutidos na sequência deste texto.

Considera-se fadiga de alto ciclo, em média, o processo no qual a falha ocorre para um número de carregamentos alternados acima de 10^4 ciclos (FUCHS; STEPHENS, 1980). A base para a aplicação do método de fadiga de alto ciclo é o diagrama tensão versus o número de ciclos para a falha ($S-N$), determinado através do ensaio de flexão rotativa (ensaio de Wohler), no qual um eixo é submetido a uma

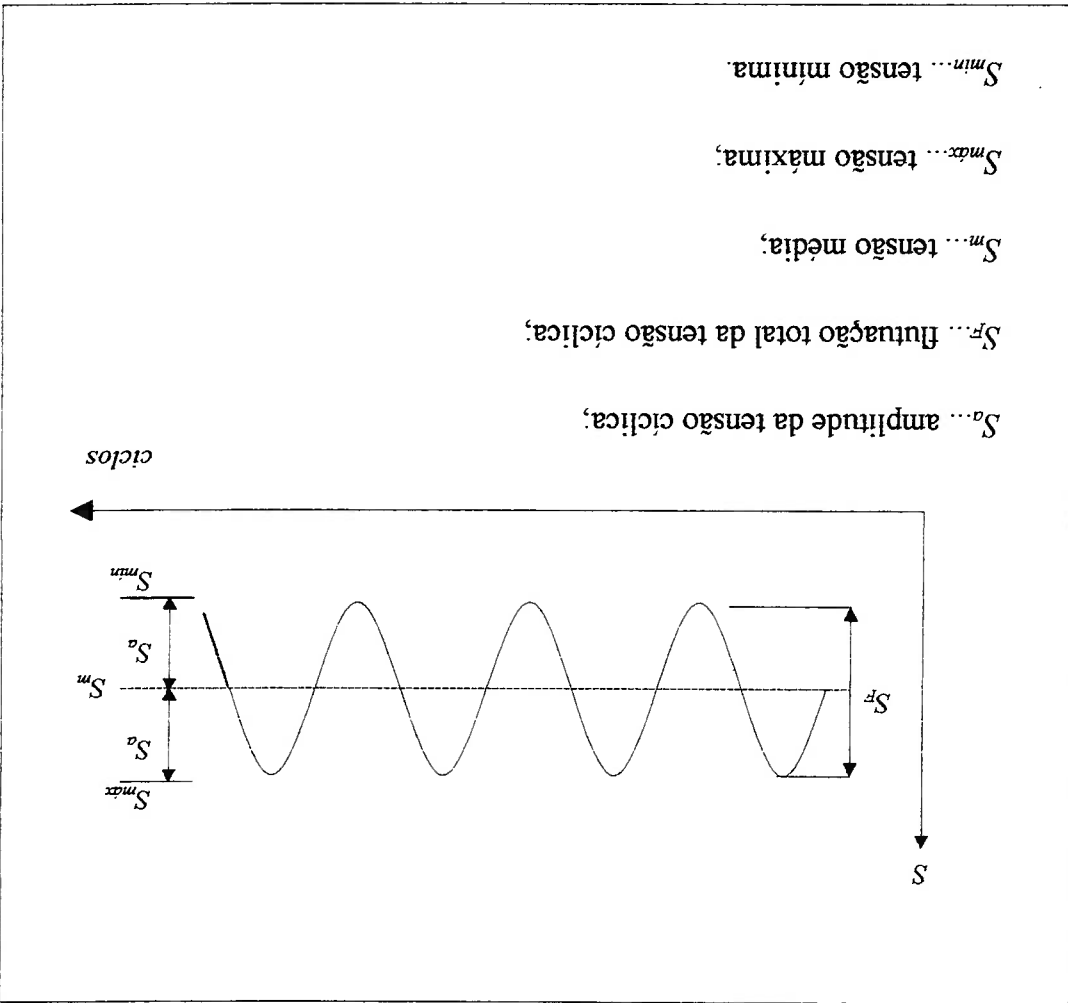
2.1.3 Fadiga de Alto Ciclo

O tempo necessário para a ocorrência da falha por fadiga, compreendendo as fases de nucleação, crescimento estável e crescimento instável da trinca, é dependente da magnitude da tensão atuante no componente, gerada pela ação do carregamento externo. Caso esta tensão atinja magnitude que induza a ocorrência de deformação plástica no componente, a nucleação e a propagação da trinca são aceleradas, sendo esta situação denominada fadiga de baixo ciclo. Já na situação inversa, onde não há a ocorrência de deformação plástica no componente, o período de nucleação e propagação da trinca é estendido, caracterizando a fadiga de alto ciclo. Tradicionalmente os componentes de máquinas ou detalhes estruturais são projetados para apresentarem uma vida operacional bastante elevada e, portanto, a falha por fadiga dos mesmos está associada ao processo de alto ciclo.

Fig. 2.9: Estágios de uma trinca gerada por fadiga (FUCHS; STEPHENS, 1980).



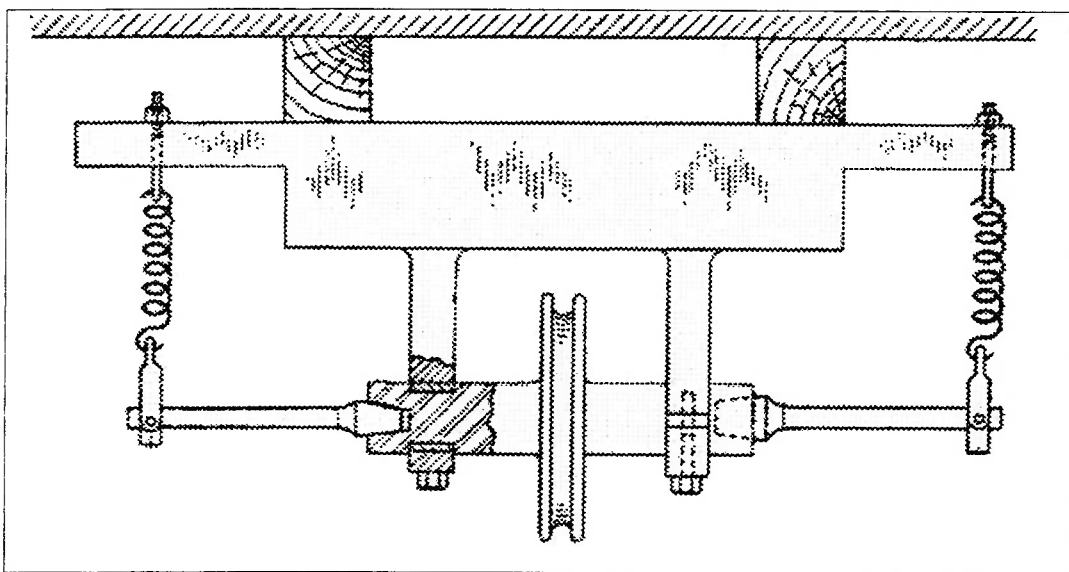
rotação com uma força perpendicular atuando sobre ele a qual gera tensões alternadas de amplitude constante como mostra a Figura 2.10 (a). Na Figura 2.10 (b) é mostrado o esquema do ensaio de fadiga rotativa. Para cada valor de carga, em função das características geométricas do corpo de prova, definidas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) através da norma técnica contida no *Handbook of Fatigue Testing* (STP-566, 1974), pode-se calcular a tensão de flexão máxima atuante no corpo de prova, a qual é empregada na definição da curva $S-N$.



Para a obtenção dos dados de toda a curva $S-N$ é feito um ensaio com uma tensão elevada, na qual se espera uma falha para um número reduzido de ciclos. Posteriormente esta tensão é diminuída de forma gradativa, até que a amostra não falhe para um determinado número de ciclos. Os dados são geralmente apresentados em gráfico bi-logarítmico (*log-log*), através de uma curva média, visto a característica de dispersão nos dados obtidos por este teste.

Para alguns materiais, como o aço ou o titânio, a curva $S-N$ torna-se horizontal em uma determinada tensão limite. Abaixo desta tensão limite, chamada de limite de fadiga, o material pode suportar um número infinito de ciclos sem romper. Já a maioria dos metais não ferrosos como o alumínio, magnésio e ligas de cobre apresentam uma curva $S-N$ que decresce continuamente com o aumento do número de ciclos. Estes materiais não apresentam um limite de fadiga, pois a curva $S-N$ nunca se torna horizontal. A Figura 2.11 ilustra tal comportamento.

Fig. 2.10 (b):
Esquema do ensaio de fadiga rotativa (DOWLING, 1999).



Através da curva $S-N$ não se pode fazer uma distinção entre as fases de propagação e de nucleação de uma trinca, visto que seu tempo de propagação é muito menor que o tempo decorrido até sua nucleação, em função das dimensões do corpo

b ... coeficiente angular da reta.

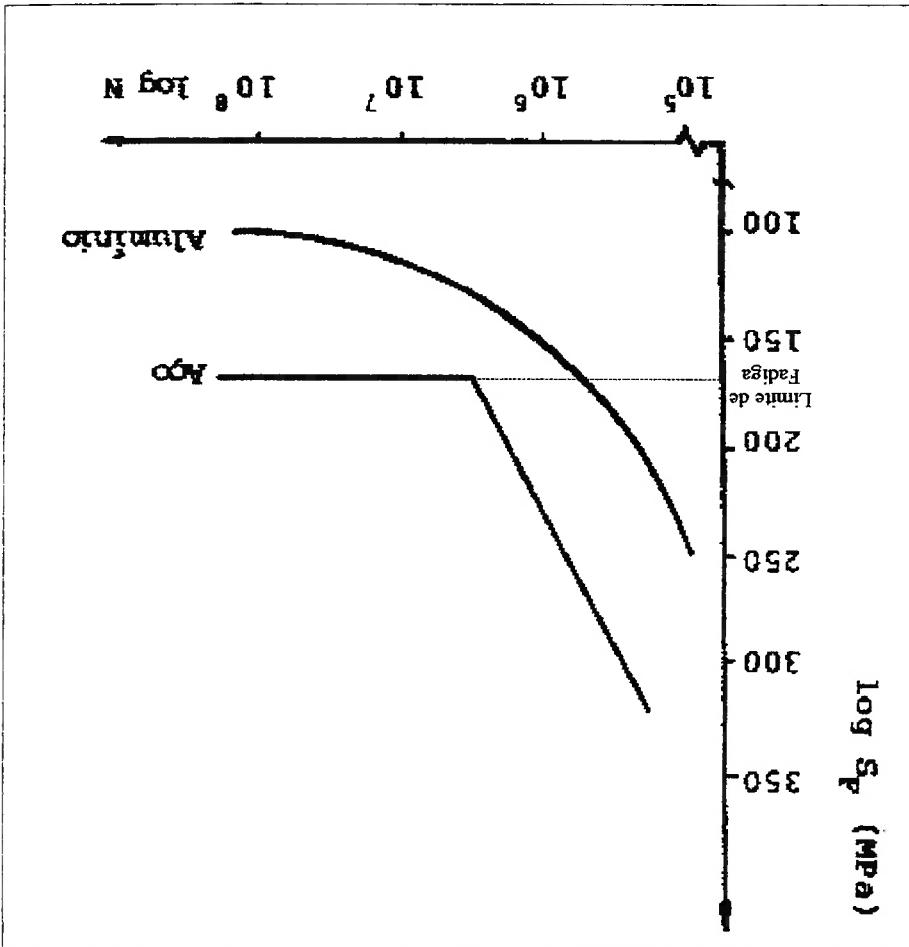
K_s ... constante que define a posição a qual se define a reta que corta o eixo $\log N$;

onde:

$$NS^b = K_s \quad (2.1)$$

A relação matemática entre tensão e número de ciclos para a curva $S-N$ é escrita como (SUNDARAJAN, 1995):

Fig. 2.11: Diagramas $S-N$ típicos para aço e alumínio obtidos através de ensaios com corpo de prova (SOUZA, 1994).



de prova. Por apresentar esta característica este método tem sido utilizado tradicionalmente em projetos de componentes mecânicos como eixos, engrenagens, rodas e outros, cujas dimensões são reduzidas, tendo em vista que o tempo necessário para a nucleação da trinca nos mesmos é significativamente superior ao tempo verificado na sua propagação.

2.1.4 Fadiga de Baixo Ciclo

Historicamente, os estudos de fadiga estão relacionados com condições de serviço nas quais a falha ocorria para ciclos de tensões superiores a 10^4 ciclos, porém existe um crescente interesse no estudo de falhas por fadiga que ocorrem para tensões relativamente altas e em um baixo número de ciclos. Pode-se citar como exemplo o estudo da falha de vasos de pressão para a indústria nuclear e de componentes de turbinas a vapor. As condições para ocorrer fadiga de baixo ciclo são frequentemente criadas quando as tensões cíclicas são de origem térmica e de magnitude elevada. Como na situação de magnitude de tensão elevada, com possibilidade de ocorrência de deformações plásticas, a variação na vida é extremamente sensível a qualquer variação de tensão, opta-se pela representação da vida em fadiga em termos da variação da deformação em função dos ciclos de carregamento.

O método de determinação da vida em fadiga de baixo ciclo está baseado na observação de que, em alguns componentes, a resposta do material em pontos críticos, como um entalhe, é dependente da deformação. Quando o nível de carregamento é baixo, tensões e deformações são linearmente relacionadas. Consequentemente, nesta faixa, testes com tensão ou deformação controlados apresentam resultados equivalentes. Já em níveis elevados de tensão, o comportamento do material é modelado de maneira mais precisa sob condições de deformação controlada, caracterizando a fadiga de baixo ciclo (até 10^4 ciclos). Neste caso considera-se as deformações elastoplásticas cíclicas atuantes no ponto crítico do componente, correlacionando-as com a vida de pequenos corpos de prova geralmente testados sob tração-compressão, estabelecendo uma relação entre a gama das deformações Le atuantes no ponto crítico da peça e o número de ciclos para iniciar a

trinca, N . Tal como observado para a curva $S-N$, a dimensão do corpo de prova é bastante reduzida, e, uma vez a trinca nucleada, a sua propagação é muito rápida, sendo, portanto, recomendável o uso da curva de formação *versus* número de ciclos de carregamento para definir a vida de um componente em função do número de ciclos de carregamento necessário para nuclear uma trinca.

A Figura 2.12 ilustra uma curva de vida em fadiga de baixo ciclo, na qual as deformações são traçadas em função do número de ciclos N ou reversões $2N$. A deformação total é resultado da soma das componentes de deformações elástica e plástica, analisadas a partir das curvas de histerese. Grandes deformações resultam em uma baixa vida do componente em estudo, predominando a componente plástica. Já para pequenas deformações se obtém uma vida elevada e, neste caso, a componente elástica é predominante.

As curvas elástica e plástica podem ser aproximadas por uma reta, quando o gráfico é traçado na escala bi-logarítmica, e os seus coeficientes angulares são respectivamente e e c .

$\Delta\epsilon/2$... amplitude total de deformação;

onde:

$$\Delta\epsilon = \frac{\sigma_f}{E} (2N)^e + \epsilon_f (2N)^e \quad (2.3)$$

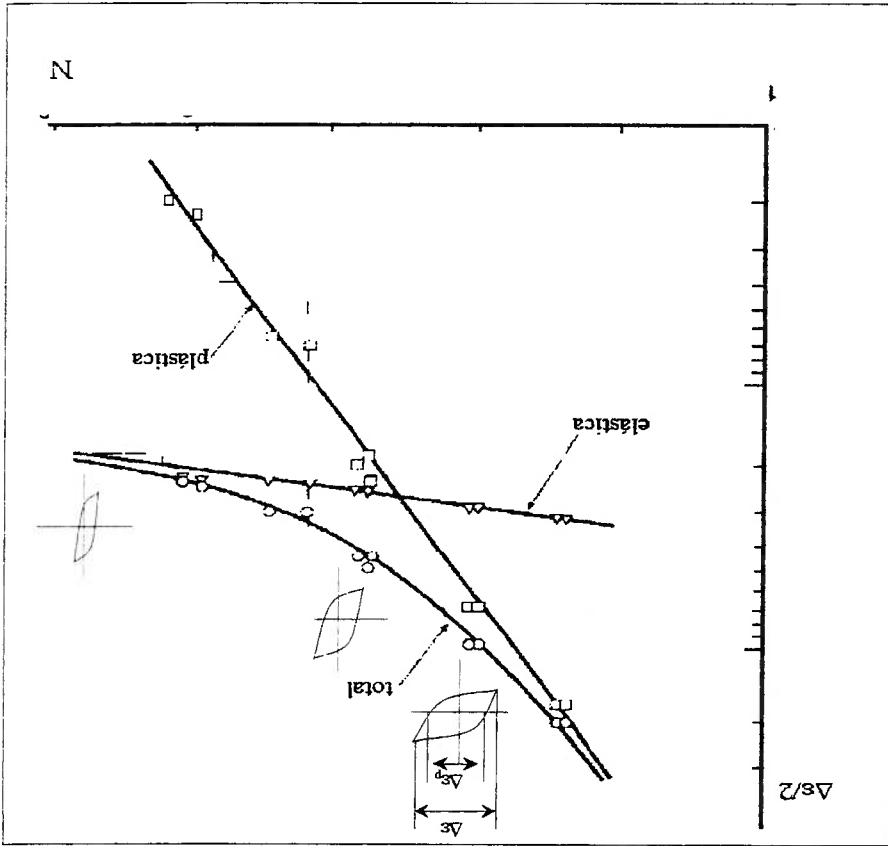
$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \quad (2.2)$$

da forma (FUCHS; STEPHENS, 1980):

A relação matemática entre deformação e número de ciclos pode ser expressa

Curva esquemática de vida em fadiga de baixo ciclo mostrando a componente total, elástica e plástica da deformação (FUCHS; STEPHENS, 1980).

Fig. 2.12:



$\Delta\epsilon/2$... amplitude elástica de deformação = $\Delta\sigma/2E = \sigma^a/E$;

$\Delta\epsilon_p/2$... amplitude plástica de deformação = $\Delta\epsilon/2 - \Delta\epsilon/2$;

ϵ_f ... coeficiente dúctil de fadiga;

c ... expoente dúctil de fadiga;

σ_f ... coeficiente de resistência de fadiga;

e ... expoente de resistência de fadiga;

E ... módulo de elasticidade;

$\Delta S/2 = S$... amplitude de tensão.

O comportamento da curva elástica pode ser expresso pela lei de Basquin-

Morrow através da fórmula abaixo:

$$\Delta S/2 = S_a = \sigma_f^c (2N)^e \quad (2.4)$$

e a relação entre deformação plástica e número de ciclos é:

$$\Delta\epsilon_p/2 = \epsilon_f^c (2N)^e \quad (2.5)$$

sendo esta a primeira relação de Coffin-Manson proposta em torno de 1960.

2.1.5 Propagação de Trinca em Fadiga

Em muitos casos na engenharia, a presença de uma trinca em uma estrutura é inevitável, sendo necessária a determinação da carga e do comprimento máximo admissível da trinca para que não ocorra falha por fadiga em um tempo de serviço previamente estimado.

A Figura 2.13 mostra a relação entre a razão de crescimento de uma trinca por ciclo da/dN e a amplitude do fator intensificador de tensão aplicado ΔK , sendo a o comprimento da trinca. A amplitude da tensão ΔS e o tamanho da trinca a estão incluídos em ΔK . Portanto, usando o fator intensificador de tensão para um dado

componente e trinca, pode-se determinar a vida como o número de ciclos de carregamento necessário para o crescimento da trinca até um tamanho crítico que causa falha por fadiga de componentes mecânicos ou estruturais, de grandes dimensões em relação à dimensão inicial da trinca, submetidos a uma flutuação de tensão de magnitude constante ao longo de sua vida operacional.

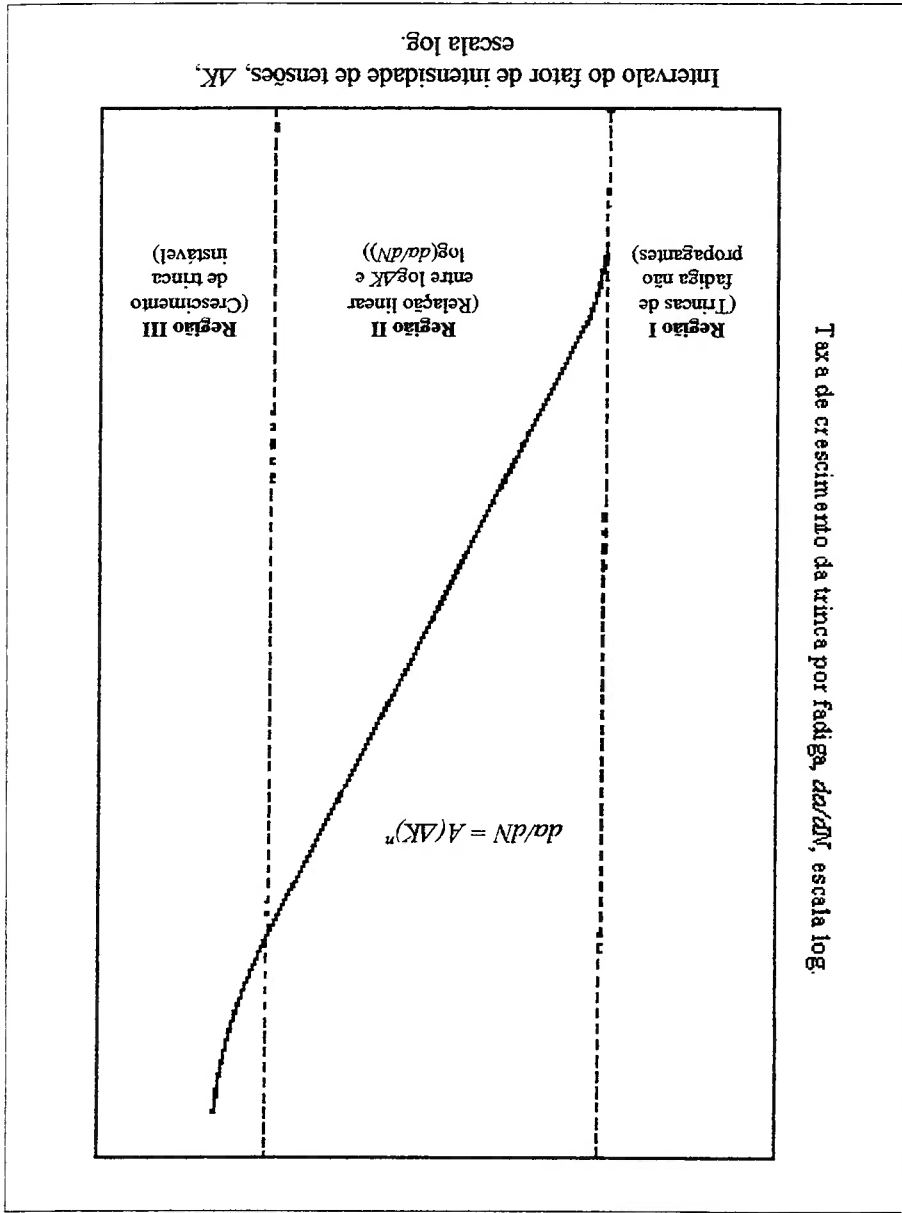


Fig. 2.13: Relação entre a razão de crescimento de uma trinca por ciclo (da/dN) e a amplitude do fator intensificador de tensão aplicado (ΔK) (DIETER, 1981).

Uma trinca pode se propagar de três modos diferentes (FUCHS; STEPHENS, 1980), ilustrados na Figura 2.14, sendo eles:

- i) Modo I: Caracterizado pela abertura da trinca, sendo o modo mais comum em fadiga e também o mais crítico;
- ii) Modo II: É o modo cisalhante ou de deslizamento;
- iii) Modo III: Pode ser chamado de modo de rasgo, corte ou antiplano.

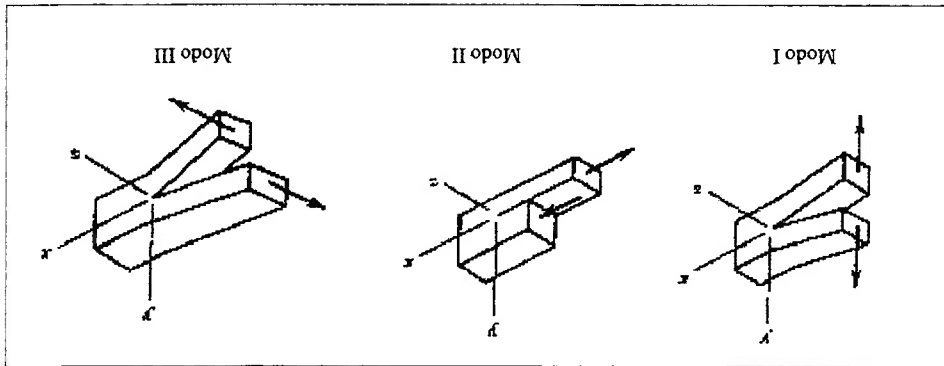


Fig. 2.14: Modos de propagação de trinca (FUCHS; STEPHENS, 1980).

Os tamanhos de trinca críticos, que causam a fratura do componente, estágio final do processo de fadiga, podem ser estimados a partir do intensificador de tensão crítico K_{IC} , chamado de tenacidade à fratura. Para um nível de tensão elevado, a vida de um componente, que possui uma trinca inicial, é baixa, sendo a vida total à fratura dependente do tamanho inicial da trinca, da amplitude da tensão e da tenacidade à fratura do material.

A relação matemática que caracteriza o fator intensificador de tensão segundo a mecânica da fratura linear elástica é definida como:

$$K = S\sqrt{aY} \quad (2.6)$$

onde o fator Y varia conforme a geometria do componente estudado e da própria trinca, como ilustrado na Figura 2.15.

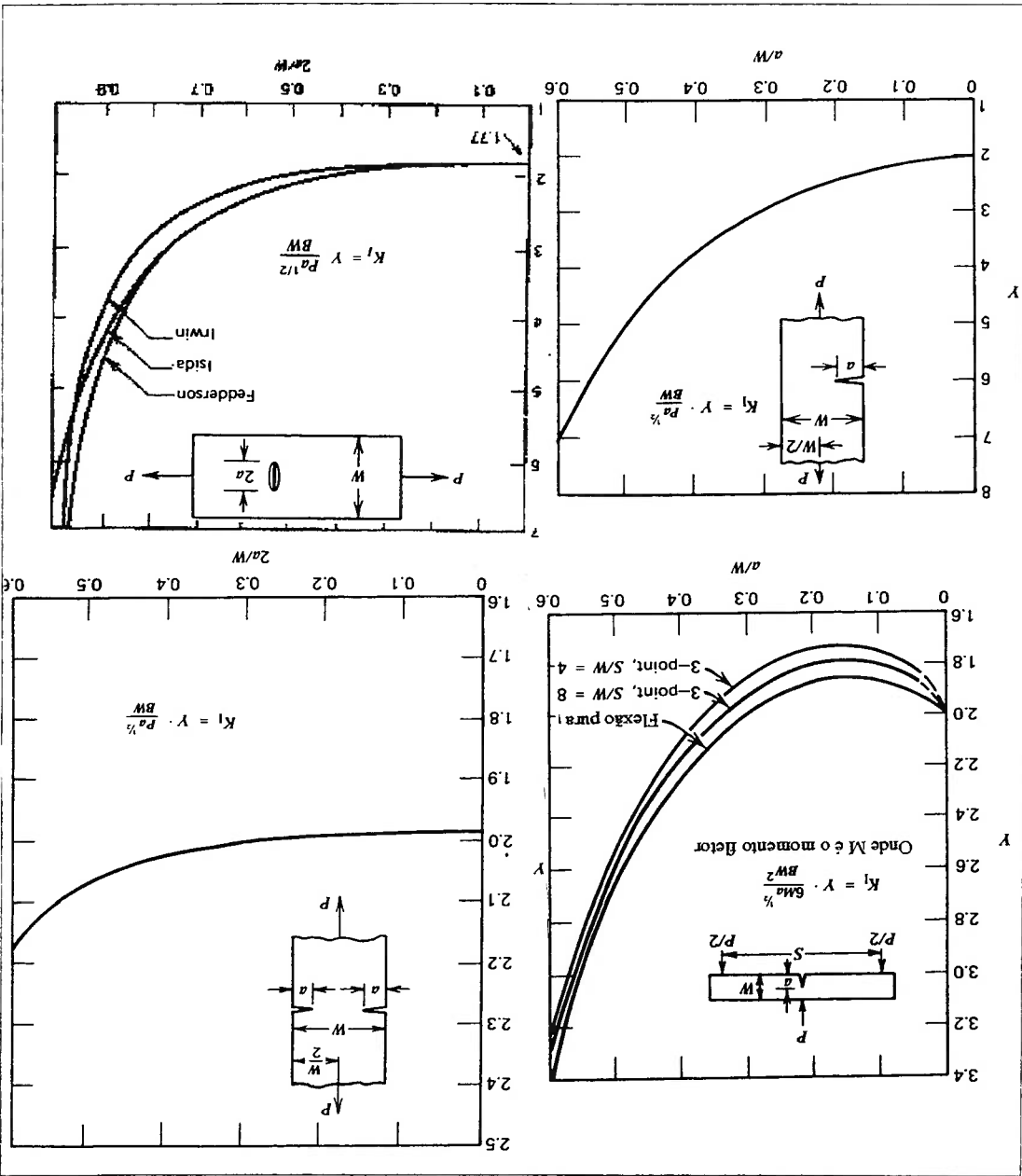


Fig. 2.15:

Fator Y para diversos tipos de configuração geométrica (FUCHS; STEPHENS, 1980).

A referência mais comum do valor de K é dado para uma trinca central de tamanho $2a$ em uma placa infinita sujeita a uma tensão uniforme de tração S , sendo sua formulação descrita como:

rotativa.

No estudo do fenômeno da fadiga de alto ciclo de componentes mecânicos, efeitos como a tensão média, meio ambiente de operação, dispersão dos dados obtidos em testes, possíveis entalhes presentes na estrutura, tamanho do componente em estudo, eventual ação de tensões multiaxiais e ação de temperatura elevada devem ser considerados, pois são fatores que alteram o comportamento mecânico do material, expresso com o auxílio da curva $S-N$ levantada através do ensaio de fadiga

2.1.6 Fatores que Afetam a Vida em Fadiga

da equação em referência.

Como dificuldade neste processo, pode-se citar a eventual complexidade da formulação de ΔK , que pode implicar no uso de métodos numéricos para integração da trinca e a dimensão crítica da mesma, que induz a ocorrência de fratura frágil. expressa na eq.(2.8), considerando como extremos de integração a dimensão inicial A vida operacional do componente é definida pela integração da lei de Paris,

de fratura frágil.

Na região III, apresentada na Figura 2.13, a propagação da trinca se dá de maneira muito rápida se comparada com as outras regiões, caracterizando o processo

1981) correspondendo à região onde a propagação da trinca é estável.

prolongamento da reta até $\Delta K = 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, e n é a declividade da reta (DIETER, que é a relação sugerida por Paris, no qual A é um coeficiente determinado através do

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \quad (2.8)$$

$\log K$ é linear e a qual corresponde à seguinte equação:

qual não se observa o crescimento da trinca. Na região II a relação entre $\log(da/dN)$ e

Na Figura 2.13 a região I apresenta um valor limiar ΔK (*threshold*) abaixo do

$$K = S\sqrt{\pi a} \quad (2.7)$$

2.1.6.1 Efeito da Tensão Média

A maioria dos dados de fadiga coletados em testes de laboratório é para tensões alternadas completamente reversas, isto é, com tensão média igual a zero. Porém a maioria das aplicações práticas envolve ciclos de tensões no qual a tensão média é diferente de zero. Por esta razão é muito importante o projetista conhecer a influência da tensão média no fenômeno da fadiga para que dados de laboratório com tensões alternadas completamente reversas possam ser utilizados em projetos de elementos de máquinas submetidos a ciclos de tensões que apresentem tensão média diferente de zero.

Dados coletados de uma série de experimentos de fadiga de alto ciclo, a fim de se investigar combinações de amplitudes de tensões alternadas S_a e tensões médias S_m são caracterizados na Figura 2.16 para uma vida de N ciclos. Diferentes gráficos S_a versus S_m podem ser obtidos para diferentes vidas N . Por definição a resistência em fadiga S_{aN} para N ciclos é plotado no eixo S_a , onde S_m é zero. Como mostrado, os pontos tendem a uma curva que cruza o eixo S_m na tensão limite de resistência a tração, S_u . A influência da tensão média na falha por fadiga é diferenciada quando as tensões médias são compressivas ou trativas. Na região de tensão média trativa a falha é muito sensível em relação à magnitude da tensão média, enquanto que na região de tensão média compressiva a falha é pouco sensível em relação à magnitude da tensão média. A influência da tensão média na região compressiva é maior para fadiga de baixo ciclo ($\epsilon-N$) que para fadiga de alto ciclo ($S-N$), como mostra a Figura 2.17.

Caso o projetista disponha de dados suficientes sobre o comportamento em fadiga de um determinado material sob tensão média diferente de zero, estes devem ser usados. Tais dados são apresentados nos chamados Diagramas *Masters* do

Fig. 2.17: Comparação do efeito da tensão média em falha por fadiga de alto e baixo ciclo (COLLINS, 1993).

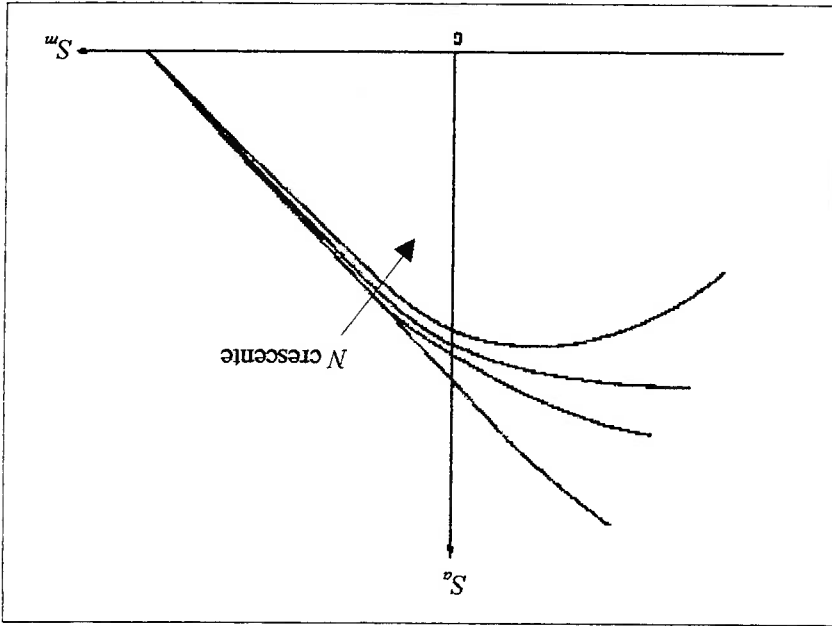
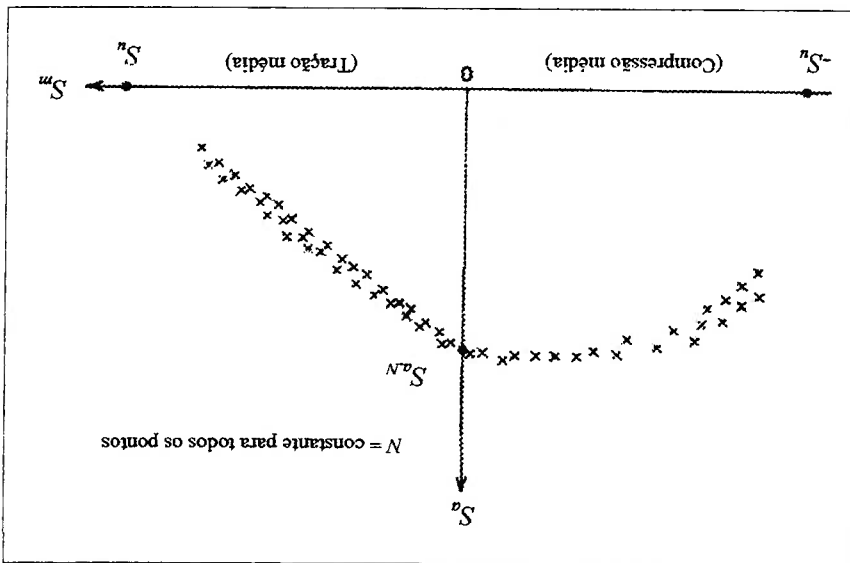


Fig. 2.16: Dados de teste de fadiga de alto ciclo mostrando a influência da tensão média (COLLINS, 1993).



material. A Figura 2.18 mostra um exemplo de um destes gráficos para uma liga de aço.

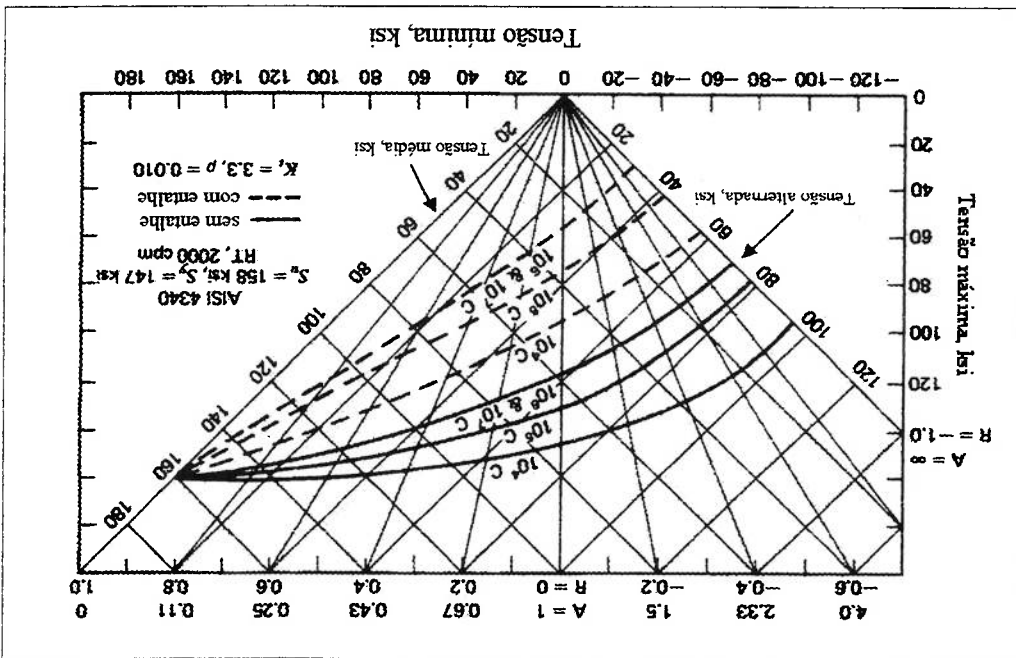


Fig. 2.18: Curva Master para uma liga de aço AISI 4340 (COLLINS, 1993).

Porém se o projetista não dispuser estes dados, deve-se estimar a influência da tensão média através de equações empíricas que relacionem a vida de um componente sob tensão média diferente de zero com a vida deste mesmo componente sob tensões cíclicas com média igual a zero. Historicamente, os gráficos de amplitude de tensão alternada *versus* tensão média tem sido objeto de numerosas propostas empíricas de qual a curva mais adequada.

As propostas de maior sucesso resultaram em quatro relações matemáticas, nomeadas:

Goodman Modificada:

$$S_a = S_{a,N} \left(1 - \frac{S_m}{S_u} \right) \quad (2.10)$$

Estas quatro relações podem ser melhor representadas em um gráfico normalizado $S_a - S_m$ como mostra a Figura 2.19.

S_y ... limite de escoamento.

S_n ... tensão limite de resistência à tração;

com tensão média S_m igual a zero;

S_{aN} ... tensão limite de resistência à fadiga, para um dado número de ciclos (N)

com tensão média de magnitude S_m ;

S_a ... tensão limite de resistência à fadiga, para um dado número de ciclos (N),

onde:

Elíptica:

$$S_a = S_{aN} \sqrt{1 - \left(\frac{S_m}{S_n}\right)^2} \quad (2.13)$$

Gerber:

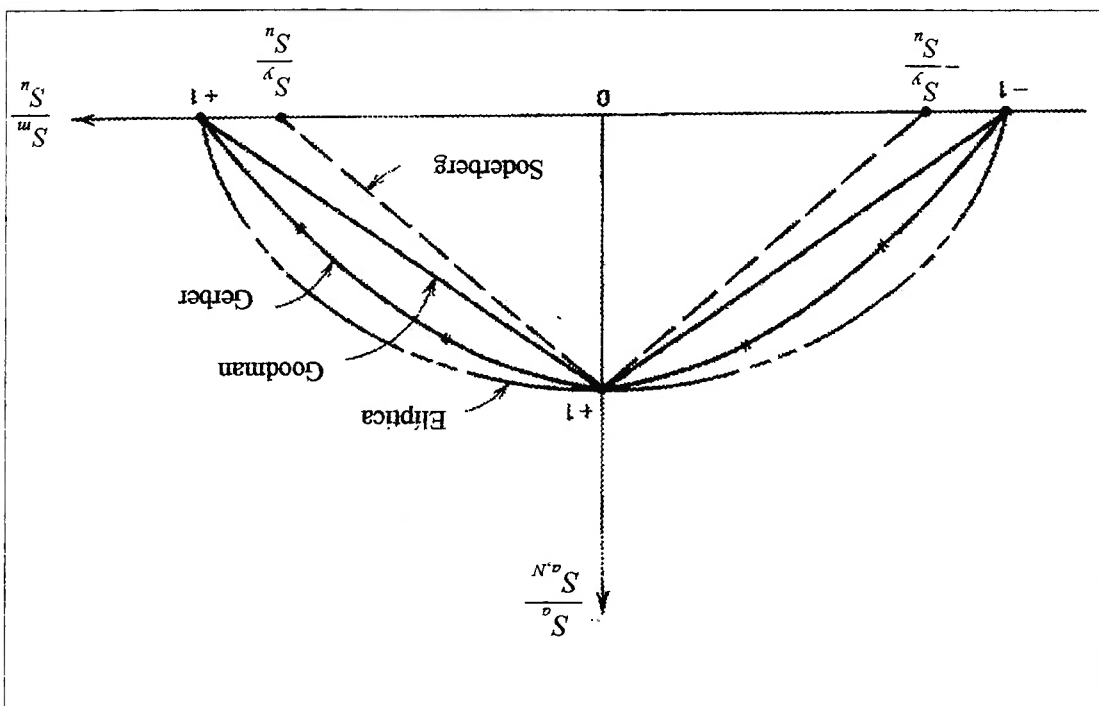
$$S_a = S_{aN} \left[1 - \left(\frac{S_m}{S_n}\right)^2 \right] \quad (2.12)$$

Soderberg:

$$S_a = S_{aN} \left(1 - \frac{S_m}{S_y} \right) \quad (2.11)$$

Uma forma modificada da relação de Goodman é recomendada para usos gerais em condições de fadiga de alto ciclo. Para o desenvolvimento das equações desta relação um diagrama de faixa de tensões é mostrado na Figura 2.20, na qual tensões específicas são plotadas no eixo vertical *versus* a tensão média no eixo horizontal. O diagrama da Figura 2.20 é construído para uma única vida em fadiga de N ciclos.

Fig. 2.19: Ilustração das relações empíricas para estimar o efeito da tensão média (COLLINS, 1993).



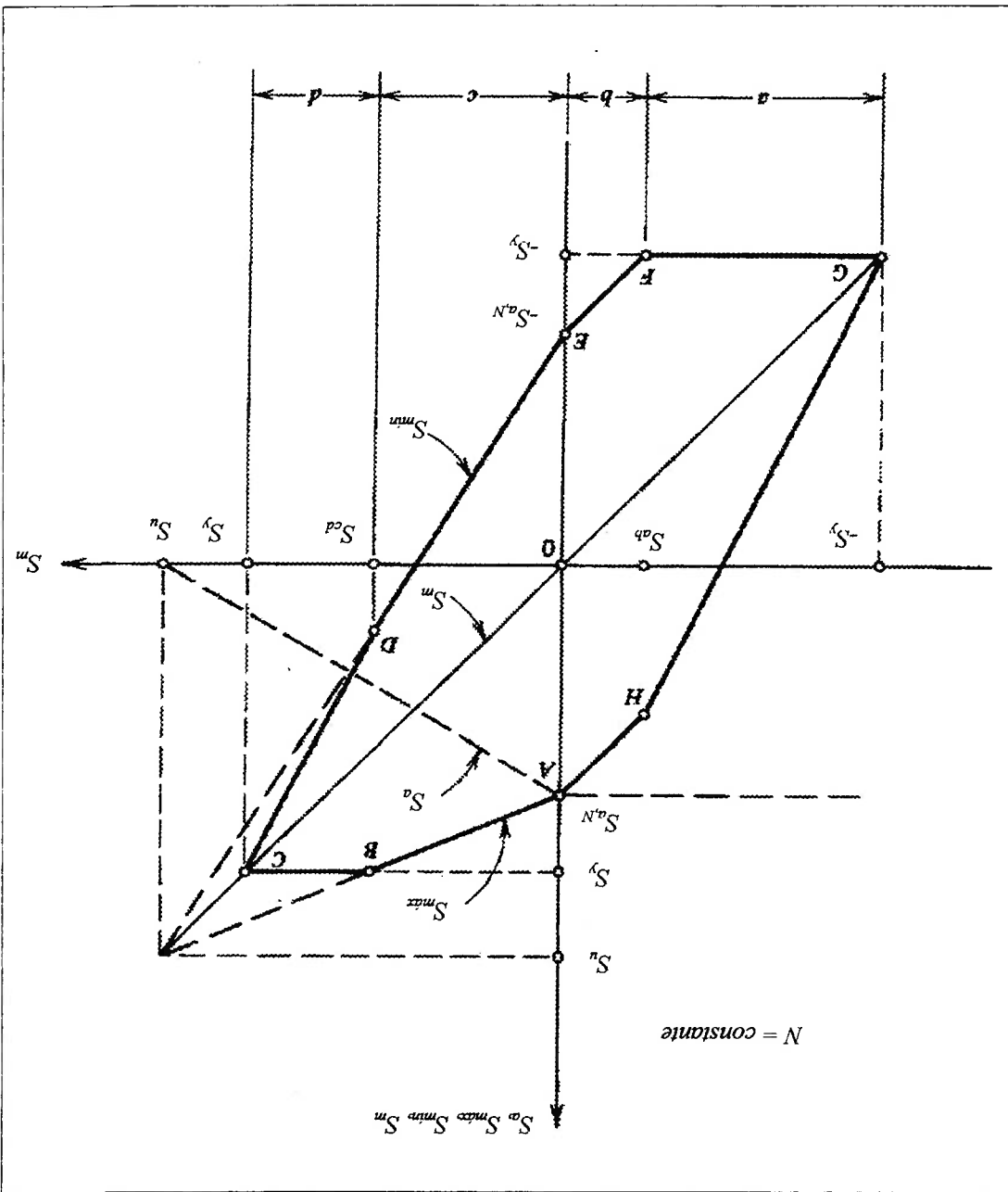


Fig. 2.20: Diagrama de Goodman Modificado para falha por fadiga em N ciclos em (COLLINS, 1993).

Sendo, como definido anteriormente:

S_a ... tensão limite de resistência à fadiga, para um dado número de ciclos (N), com tensão média de magnitude S_m ,

$S_{a,N}$... tensão limite de resistência à fadiga, para um dado número de ciclos (N) com tensão média S_m igual a zero;

S_n ... tensão limite de resistência à tração;

S_y ... limite de escoamento.

As equações de falha para este método de correção do efeito da tensão média e suas respectivas regiões de validade são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1:

Sumário das equações de falha para o método de Goodman Modificado (COLLINS, 1993).

Região	Equação de Falha (falha é estimada para ocorrer se:)	Limites de Validade das Equações
b	$S^{max} - S_m \geq S_{aN}$	$(S_{aN} - S_y) \leq S_m \leq 0$
c	$S^{max} - (1 - n) S_m \geq S_{aN}$	$0 \leq S_m \leq \left(S_y - S_{aN} \right) \frac{1 - n}{n}$
d	$S^{max} \geq S_y$	$\left(S_y - S_{aN} \right) \frac{1 - n}{n} \leq S_m \leq S_y$

Portanto, utilizando os resultados da Tabela 2.1, o projetista poderá estimar quando a falha irá ocorrer em um componente sob qualquer condição de tensão média diferente de zero conhecendo-se a tensão de escoamento, a tensão de ruptura e a resistência à fadiga para tensão média igual a zero do material em estudo.

Este estudo considera que a tensão limite de escoamento do material não será atingida, sendo assim, os componentes analisados trabalharão em regime de proporcionalidade, não ocorrendo o efeito de encruamento sobre as tensões de escoamento e limite de resistência à tração. Deste modo as correções para a curva S-N, apresentadas acima, podem ser aplicadas de forma segura no cálculo da vida em fadiga.

2.1.6.2 Corrosão

Vários componentes mecânicos e estruturais operaram sob ação do ar, da água ou da água salgada, o que pode provocar um ataque corrosivo. A ação simultânea de um carregamento cíclico e de um ataque corrosivo em uma estrutura conhecida como corrosão em fadiga, sendo o dano resultante maior que o produzido pelos dois fatores atuando isoladamente.

O aparecimento de *pites* na superfície dos metais, em conjunto com tensões cíclicas atuantes em um componente mecânico, apresenta uma taxa de ocorrência mais acelerada que em um ataque corrosivo sem a presença de tensões, sendo este um caso particular, e o mais severo, do fenômeno de fadiga em meio corrosivo. Tais *pites* atuam como entalhes, concentrando tensão, propiciando assim a nucleação da trinca e, consequentemente, reduzindo a resistência à fadiga do material. A Figura 2.21 mostra um exemplo de redução de vida em fadiga quando o material está sob ataque corrosivo (COLLINS, 1993).

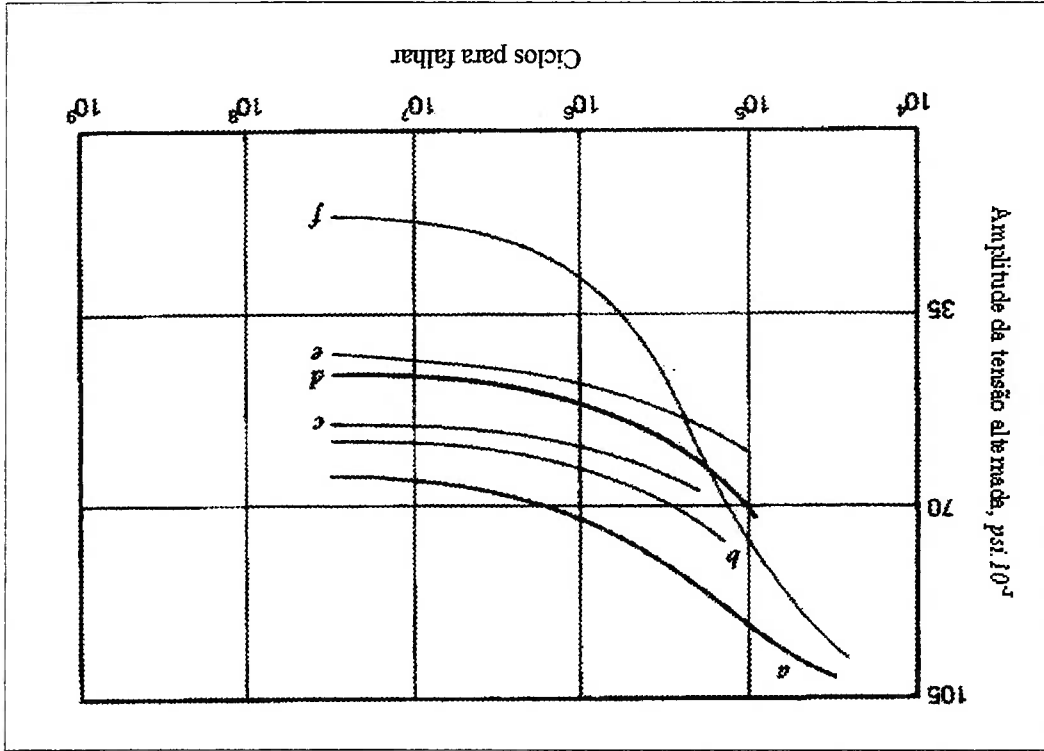


Fig. 2.21:

Efeitos da corrosão em uma curva *S-N* de uma liga de aço testada sob flexão rotativa. (a) Sob ação do ar. (b) Pré-corroído por um dia em água. (c) Pré-corroído por dois dias em água. (d) Pré-corroído por seis dias em água. (e) Pré-corroído por dez dias em água. (f) Imerso em água. Obs: água de torneira (COLLINS, 1993).

Há evidências de que mesmo ensaios realizados em ar na temperatura ambiente sofrem influências de fadiga por corrosão. Ensaios realizados em vácuo mostram que os valores de vida em fadiga encontrados sob esta condição são maiores que ensaios realizados em ar. A umidade relativa é uma variável a ser considerada neste tipo de ensaio, já que o vapor de água age como catalisador diminuindo a resistência à fadiga do material. Materiais que, quando ensaiados em ar e na temperatura ambiente, apresentaram limite à fadiga definido, passam a não apresentar este limite quando o ensaio é feito em meio corrosivo. Conclui-se, portanto, que o ataque corrosivo sob tensões cíclicas deve ser minimizado ao máximo para, conseqüentemente, aumentar a vida de uma estrutura sujeita ao fenômeno da fadiga.

2.1.6.3 Dispersão em Resultados Experimentais

Como os resultados da resistência à fadiga dos materiais são obtidos através de ensaios com corpos de prova, tem-se que estes apresentam uma variabilidade, representada pela dispersão dos resultados experimentais em relação a um valor médio. Ressalta-se que os resultados dos ensaios de fadiga são os que apresentam grande dispersão, em função da grande quantidade de fatores que influenciam o processo de nucleação da trinca.

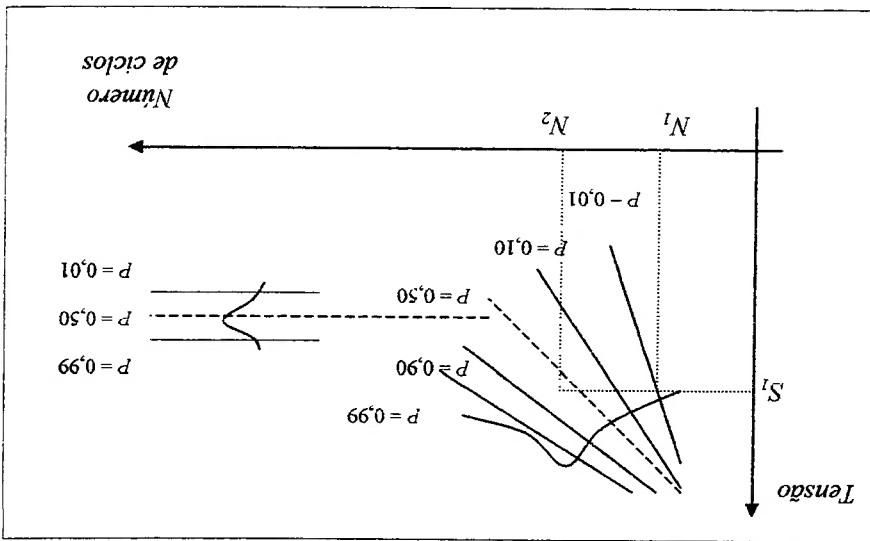
Uma vez que a vida em fadiga e o limite de fadiga são quantidades estatísticas, deve-se esperar que ocorra um desvio em relação a uma curva média levantada com alguns corpos de prova. A representação bidimensional entre tensão, número de ciclos para a fratura e probabilidade da falha é mostrada na Figura 2.22.

Visando a consideração do efeito desta dispersão no dimensionamento de componentes sujeitos a apresentar falha por fadiga, propõe-se o uso do fator de correção de confiabilidade, que tem por objetivo expressar a variação da resistência à fadiga de um material em função do controle da probabilidade do limite de resistência à fadiga, para um dado número de ciclos de carregamento, ou de limite de fadiga, ser superior a um certo valor. Para uma probabilidade de 50% emprega-se $K_R = 1,0$, já para uma probabilidade de 90% emprega-se $K_R = 0,897$, reduzindo-se, portanto, a resistência à fadiga do material quando do dimensionamento ou análise

logarítmica.

Nesta figura esta ilustrada esquematicamente uma distribuição de vida em fadiga sob tensão constante onde foram desenhadas curvas de probabilidade de ruptura constante. Assim para S_1 pode-se esperar que 1% dos corpos de prova rompessem com N_1 ciclos e que 50% dos corpos de prova rompessem com N_2 ciclos. A Figura 2.22 indica ainda um decréscimo da dispersão na medida em que se aumenta a tensão. Esta distribuição tem a característica de ser log-normal (SUNDARARAJAN, 1995), ou seja, assume a forma normal quando os dados de tensão alternada e número de ciclos para falha são apresentados em escala

Fig. 2.22: Representação estatística dos dados de fadiga (DIETER, 1981).



do componente. Estes valores são definidos considerando a validade da distribuição log-normal para representação dos dados de resistência à fadiga.

2.1.6.4 Entalhes

O efeito de entalhes tem sido a "chave" do problema no estudo do fenômeno de fadiga a mais de 100 anos atrás quando Wohler mostrou que adicionando material em um eixo de trem podia se tornar fraco ao fenômeno da fadiga. Ele notou que o ratio de concordância entre o maior e o menor diâmetro é de suma importância na influência da vida em fadiga de eixos, além de concluir que a trinca inicia-se na transição entre os diâmetros, já que é uma região de concentração de tensão. Apesar disto, os entalhes não podem ser abolidos dos componentes de máquinas e estruturas mecânicas em geral, sendo necessário uma clara compreensão de seus efeitos para um adequado dimensionamento.

A Figura 2.23 mostra uma curva $S-N$ esquemática para um corpo de prova com e sem entalhe, evidenciando seu efeito.

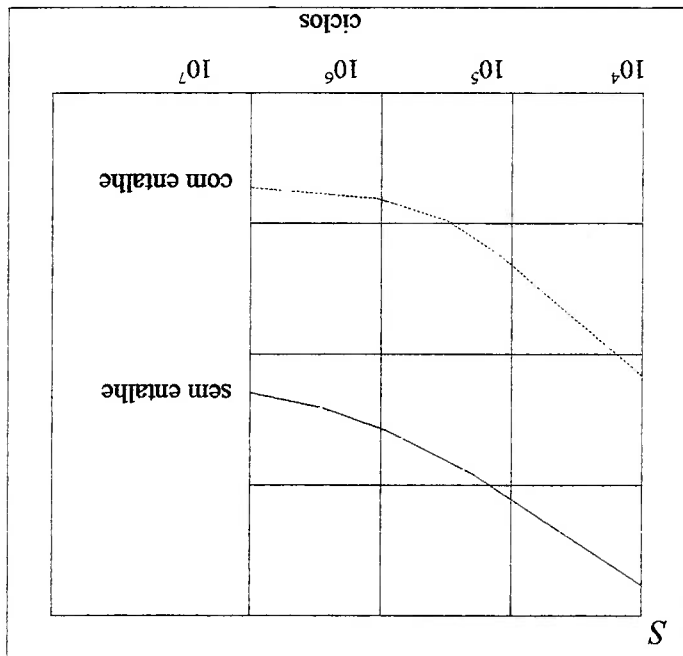


Fig. 2.23: Curva $S-N$ para um corpo de prova com e sem entalhe (COLLINS, 1993).

Entalhes, como dito anteriormente, concentram tensões e deformações, sendo que o coeficiente de concentração de tensão K_t no regime elástico é dado pela relação entre os valores máximos de tensão ou deformação e os valores nominais:

$$K_t = S_{max} / S_{nom} = \epsilon_{max} / \epsilon_{nom} \quad (2.14)$$

A Figura 2.24 mostra um exemplo da variação do coeficiente de concentração de tensões com a variação da geometria de um componente para um tipo de solicitação, no caso uma solicitação de flexão simples.

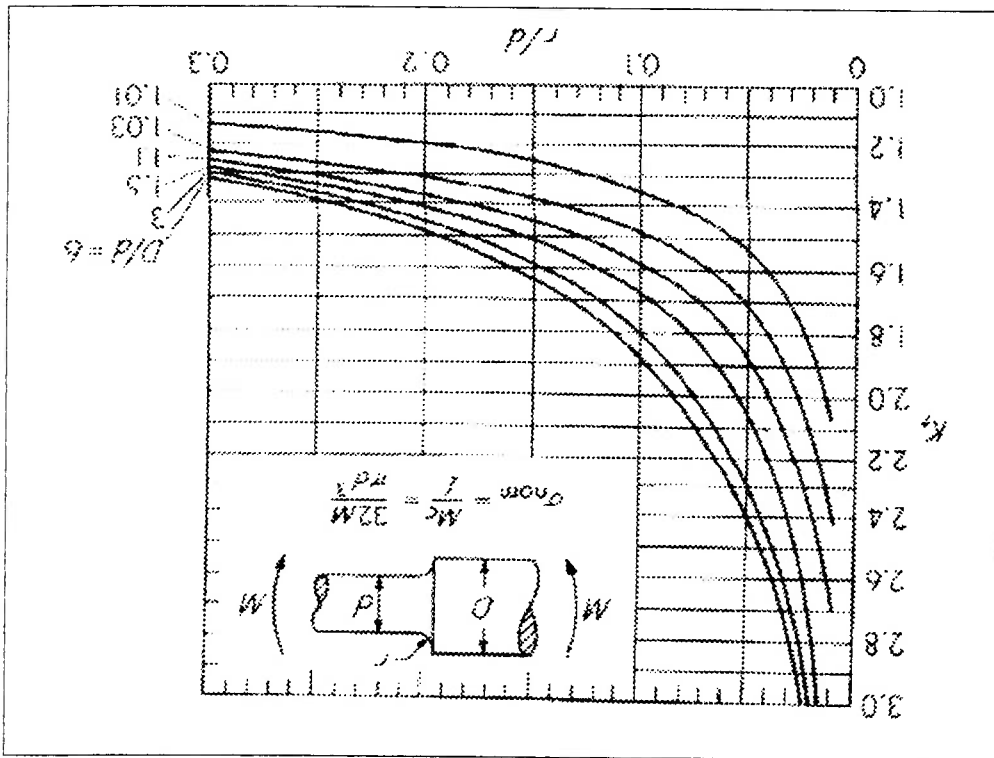


Fig. 2.24:

Varição do coeficiente de concentração de tensões com a variação da geometria (PUC-RIO, 2000).

Para o cálculo da vida em fadiga deve-se usar o fator de entalhe à fadiga K_f expresso da seguinte forma segundo (DIETER, 1981):

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (2.15)$$

sendo o fator de sensibilidade ao entalhe $q = 1/[1+(p/r)]$, onde r é o raio na raiz do entalhe e p um comprimento característico, conforme descreve Peterson (1974).

Esse fator visa expressar a redução da resistência à fadiga do material em função da presença de entalhe, considerando os dados obtidos nos ensaios com corpos de prova.

2.1.6.5 Temperatura

Ensaio de fadiga em metais a temperaturas superiores à ambiente mostram que a resistência à fadiga aumenta com o decréscimo da temperatura (COLLINS, 1993). A Figura 2.25 ilustra este comportamento.

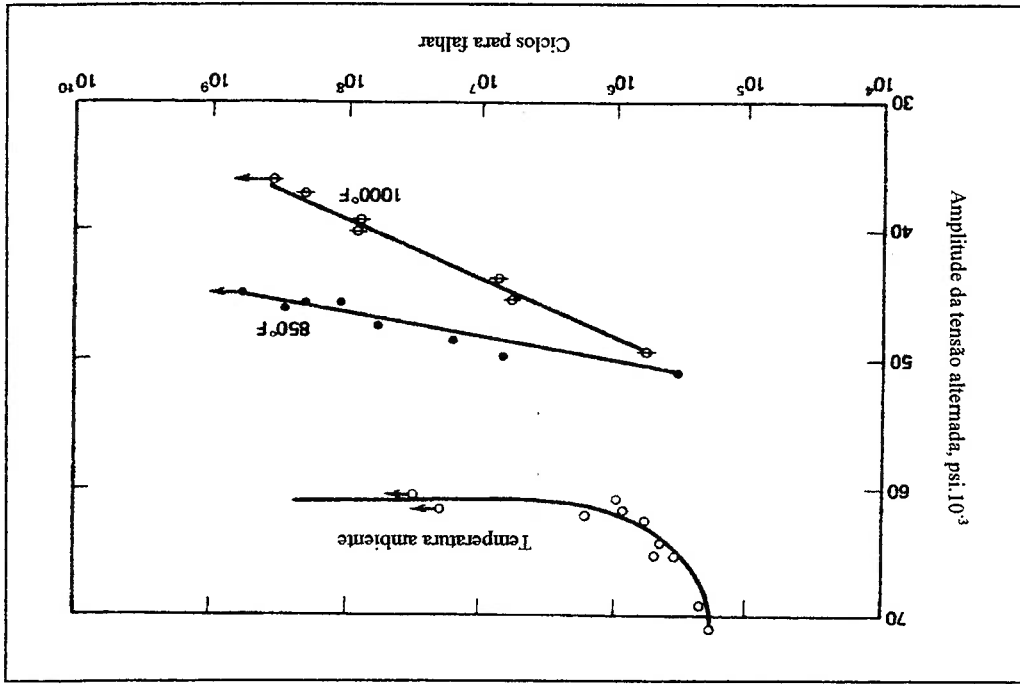


Fig. 2.25:

Efeito da temperatura sobre a curva S-N de uma liga de aço (COLLINS, 1993).

2.1.6.6 Tamanho

A previsão do desempenho em fadiga de grandes componentes a partir de ensaios realizados em laboratórios com amostras pequenas e obtidas do ensaio de corpos de prova com dimensões reduzidas, constitui um problema prático de grande importância. Na maioria dos casos existe um efeito do tamanho, isto é, a resistência à fadiga de componentes grandes é inferior à das amostras pequenas. A Figura 2.26 ilustra este efeito.

Os efeitos dessa variação dimensional são usualmente considerados sobre a resistência à fadiga com o uso de um coeficiente de correção, cuja formulação é detalhada em literatura referente ao projeto de componentes mecânicos, tal como (SHIGLEY, 1984)

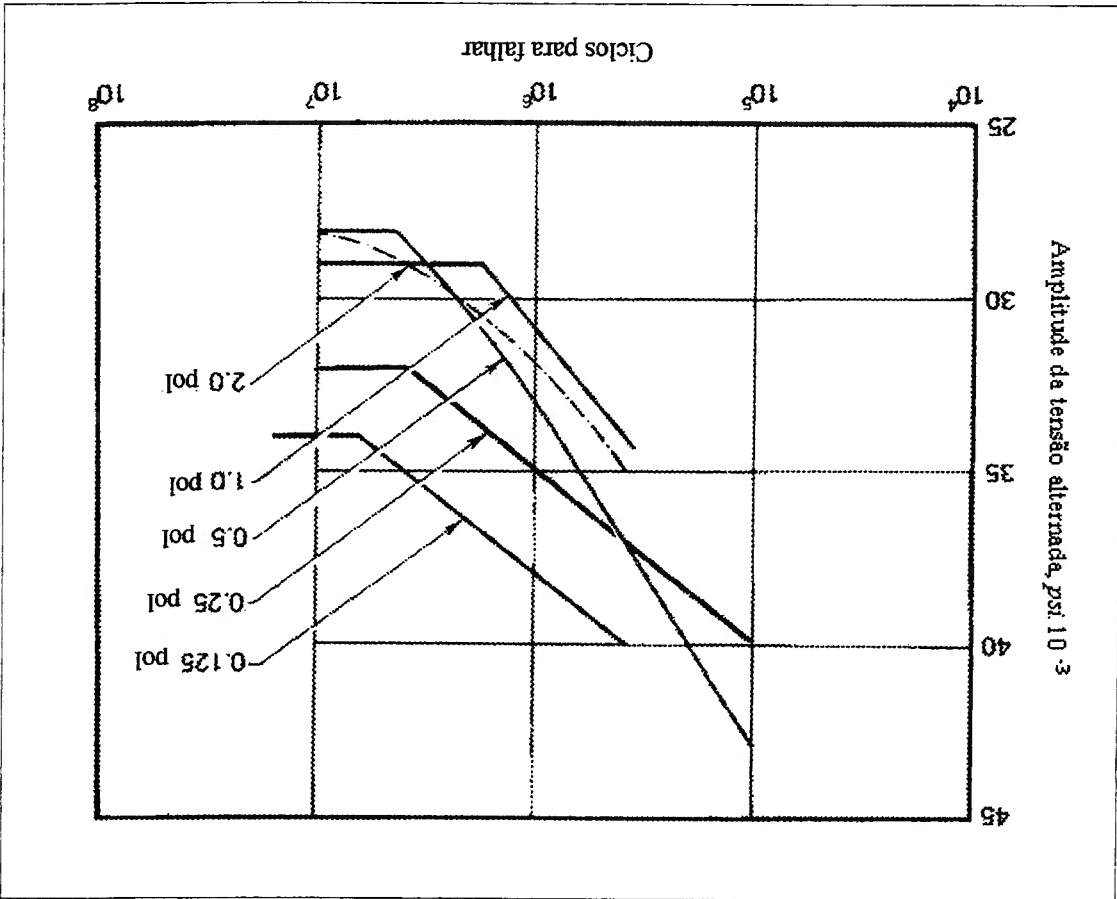


Fig. 2.26: Efeito do tamanho na curva S-N de um corpo de prova de aço SAE 1020, testado em flexão rotativa (COLLINS, 1993).

2.1.6.7 Material

Normalmente os materiais ferrosos, como por exemplo, o aço, apresentam a característica de possuírem um limite de fadiga, no qual para tensões menores que este limite o material apresenta vida infinita. Materiais não ferrosos, como por exemplo, o alumínio, magnésio e liga de cobre, não possuem esta característica, portanto em sua curva S-N não há o trecho horizontal. A Figura 2.11 ilustra esta explicação.

2.1.6.8 Superfície

A resistência à fadiga de um material depende também do acabamento superficial do componente em estudo, pois a formação de uma trinca está intimamente ligada a este fator. A Figura 2.27 mostra a variação do fator de superfície para diferentes tipos de acabamento superficial (DIETER, 1981), (FUCHS; STEPHENS, 1980) e (SHIGLEY, 1984), o qual é empregado na correção da resistência à fadiga do material obtida com o ensaio de corpos de prova. Verifica-se que quanto melhor é o acabamento superficial, menor é a redução da resistência à fadiga.

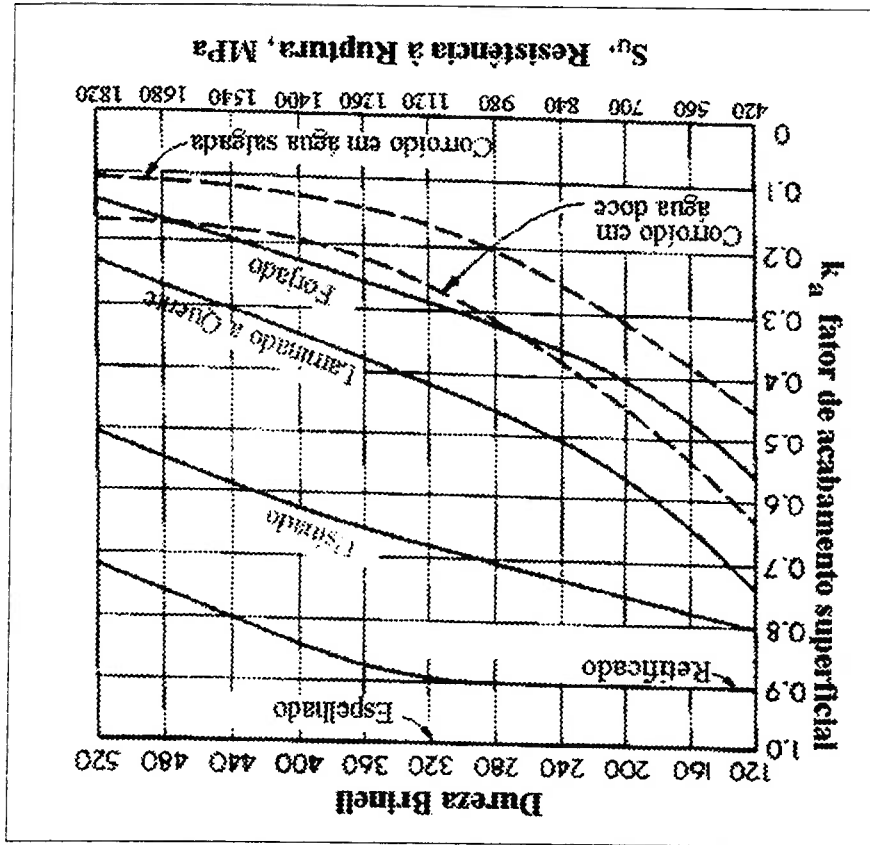


Fig. 2.27: Variação do fator de superfície para diversos tipos de acabamento (DIETER, 1981).

2.1.6.9 Tensões Multiaxiais

Tensões multiaxiais são muito comuns em casos reais de operação de componentes mecânicos, como rotação de eixos, estruturas automotivas, aeronáuticas, dentre outros. Devido à complexidade e custos para se levantar dados de fadiga sob ação deste tipo de carregamento, propõe-se correções aproximadas, porém muito aceitas em projetos. Várias propostas são discutidas como a de Spagnoli (2001), que propõe um novo critério para a determinação da tensão equivalente, aplicado quando o estado de tensões for bi-axial e fora de fase. Este método realiza uma combinação não-linear da tensão normal máxima com a amplitude da tensão de cisalhamento agindo no plano crítico.

Um dos métodos mais utilizados é o de Sines, como visto em (FUCHS; STEPHENS, 1980) e aplicado por Santana (2000), na qual a tensão alternada equivalente é escrita da seguinte forma:

$$S_{a,eq} = \frac{\sqrt{2}}{\left[(S_{a1} - S_{a2})^2 + (S_{a2} - S_{a3})^2 + (S_{a3} - S_{a1})^2 \right]^{1/2}} \quad (2.16)$$

onde:

S_{a1}, S_{a2} e S_{a3} ... tensões principais alternadas.

A tensão média equivalente é a somatória das três tensões médias normais perpendiculares entre si.

$$S_{m,eq} = S_{mx} + S_{my} + S_{mz} \quad (2.17)$$

Após o cálculo de $S_{a,eq}$ e $S_{m,eq}$ a vida em fadiga esperada é determinada através dos diagramas de $S-N$ ou das fórmulas aplicadas aos casos uniaxiais, onde $S_{a,eq}$ substitui a tensão alternada S_a e $S_{m,eq}$ a tensão média S_m .

2.2 Critérios de Projeto para Componentes Sujitos a Apresentar Falha por Fadiga

2.2.1 Metodologia de Projeto

Em um projeto deve-se definir qual a metodologia de dimensionamento mais adequada que governará a integridade do componente em estudo quando submetido às condições de carregamento definidas para a operação do mesmo. Os dois principais métodos são o das tensões admissíveis e o dos estados limites.

No Método das Tensões Admissíveis a estrutura ou componente mecânico será considerada inapta para uso quando as tensões atuantes sobre ela ultrapassarem as pré-estabelecidas como máximas admissíveis. A variação das tensões apresenta regime linear. Os elementos estruturais ou componentes mecânicos que compõe equipamentos mecânicos em geral, bem como estruturas mecânicas navais, aeronáuticas e civis são tradicionalmente dimensionalmente em conformidade com este método.

Já no Método dos Estados Limites, uma estrutura, ou parte dela é considerada inapta para uso quando um estado particular, chamado de estado limite, é excedido além de um critério pré-estabelecido que governa sua performance ou uso, como definido em (AUGUSTI; BARATTA; CASCIATI, 1984). Neste caso, a relação entre carregamento e tensões pode ser linear ou não-linear. Dai; Wang (1992) distinguem três casos de estado limite:

- i) Estado Limite Último: corresponde ao colapso ou a uma deformação extremamente elevada, sendo necessário o reparo da estrutura.
- ii) Estado Limite de Dano: corresponde a danos prematuros ou excessivos em uma estrutura ou componente mecânico, como por exemplo, uma trinca.
- iii) Estado Limite de Utilização: corresponde a uma discrepância do funcionamento normal de uma estrutura, como por exemplo, excesso de vibração.

A formulação que define o método dos estados limites pode ser matematicamente escrita, de forma geral, através da seguinte função (SUNDARARAJAN, 1995):

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{2.18}$$

sendo $g(\cdot)$ uma função que relaciona as variáveis x_i que influem no processo de colapso em estudo. As variáveis x_i , denominadas de variáveis básicas, no caso do desenvolvimento de um modelo probabilístico, são aleatórias.

A superfície de falha ou função desempenho do estado limite de interesse pode então ser definido como a região em que $Z = 0$. Este é o limite entre as regiões seguras e inseguras no projeto, sendo também o estado além do qual a estrutura não mais poderá cumprir a função para qual foi designada. A função de estado limite, ou função desempenho, representa um papel importante no desenvolvimento de métodos de análise estrutural. Uma função de estado limite pode ser uma função explícita ou implícita das variáveis básicas, podendo ser simples ou complexa.

A formulação que define o método dos estados limites, considerando as variáveis de resistência e solicitação, pode ser escrita através da seguinte relação:

$$Z = R - S \tag{2.19}$$

onde:

R ... resistência;

S ... solicitação.

Da mesma forma a falha ocorrerá quando $Z = 0$.

2.2.2 Método dos Estados Limites Aplicados à Fadiga

O ensaio de fadiga convencional submete um corpo de prova a uma tensão com amplitude fixa até que ele se rompa. Os ensaios podem ser feitos para vários valores de tensão a fim de se determinar a curva $S-N$, mas sempre o carregamento cíclico senoidal é mantido constante. No entanto existem muitas aplicações práticas

nas quais a amplitude da tensão que atua sobre o componente não permanece constante, variando entre valores acima ou abaixo do previsto. Além disso, há aplicações em que uma determinação exata das tensões médias atuantes no componente torna-se muito difícil, como por exemplo, um automóvel sobre um piso irregular, estruturas sob ação do vento, dentre outras. Neste caso é possível identificar ciclos de tensão, sendo que para cada um destes ciclos, com valor acima do limite de fadiga do material, um dano é introduzido no componente.

Tais ciclos podem ser determinados através de métodos de contagem, como o *Rain Flow*. A Figura 2.28 mostra os picos e vales, excursões simples (*simple ranges*) e excursões completas (*overall ranges*) encontradas em uma série temporal. Uma combinação X-Y-Z do tipo vale-pico-vale ou pico-vale-pico contém um ciclo quando $\Delta S_{YZ} \geq \Delta S_{XY}$, como ilustra a Figura 2.29.

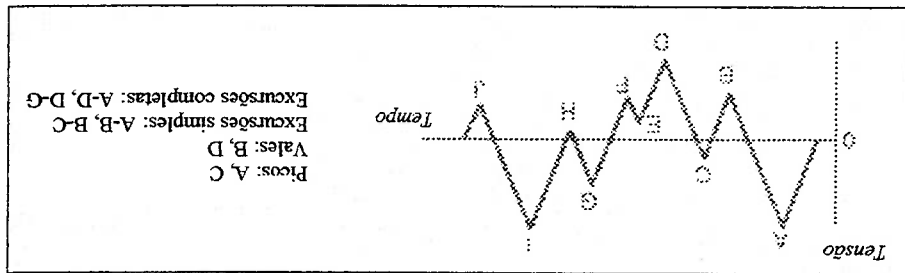


Fig. 2.28: Picos e vales encontrados em uma série temporal (DOWLING, 1999).

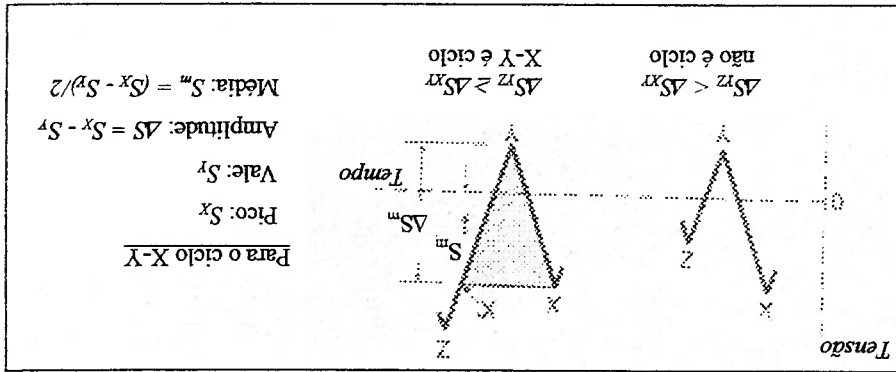


Fig. 2.29: Um ciclo identificado através da combinação X-Y-Z do tipo vale-pico-vale ou pico-vale-pico quando $\Delta S_{YZ} \geq \Delta S_{XY}$.

Para o ciclo X-Y
Pico: S_x
Vale: S_y
Amplitude: $\Delta S = S_x - S_y$
Média: $S_m = (S_x + S_y)/2$

O procedimento para a contagem de ciclos do tipo *Rain Flow* pode ser descrito como:

(a) Assumir que o histórico de carregamento será aplicado repetidamente, de forma a se poder escolher arbitrariamente o pico ou o vale inicial, Figura

2.30;

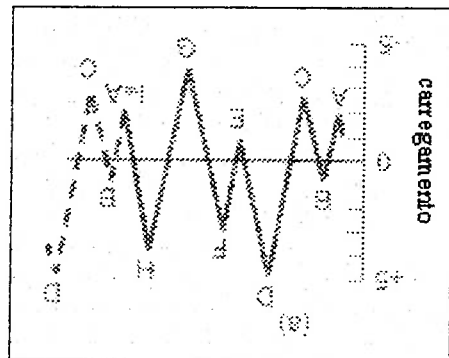


Fig. 2.30:

Procedimento (a) para contagem de ciclos, (DOWLING, 1999).

(b) Escolher como pico ou vale inicial aquele que tiver o maior valor absoluto de

tensão. Mover a parte do carregamento que estava antes do pico inicial para o

final, Figura 2.31;

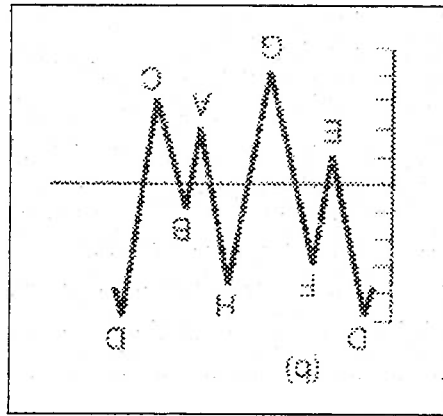


Fig. 2.31:

Procedimento (b) para contagem de ciclos, (DOWLING, 1999).

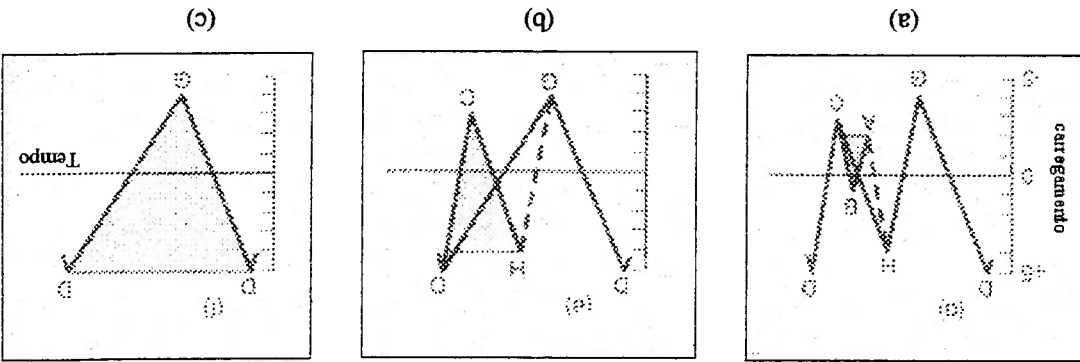
(c) Contar os ciclos a partir do início do histórico, utilizando o critério definido

anteriormente, Figura 2.32;

Considerando-se um histórico temporal de tensões atuantes em um componente mecânico ou estrutural, ao longo de um período de tempo pré-determinado t , pode-se definir um histograma da flutuação de tensão atuante no mesmo. Tal histograma, como ilustrado na Figura 2.34, mostra o número de ciclos de carregamento, n_i , com flutuação de tensão, S_{Fi} , aos quais o componente é submetido no período de tempo t .

Portanto, no exemplo mostrado acima na descrição do método, foram extraídos quatro ciclos, sendo eles E-F, A-B, H-C e D-G.

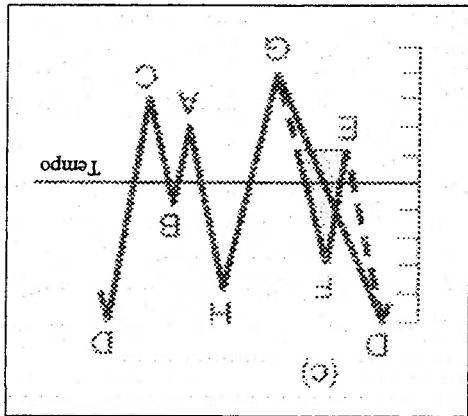
Fig. 2.33: Procedimento (d) para contagem de ciclos, (DOWLING, 1999).



(b) e (c);

(d) Após cada ciclo contado, o pico e o vale correspondentes deverão ser removidos, e a contagem reiniciada a partir do primeiro pico, Figura 2.33 (a).

Fig. 2.32: Procedimento (c) para contagem de ciclos, (DOWLING, 1999).



Considerar D igual a 1 é uma hipótese simplificada, visto que este valor apresenta variações de 0,7 a 2,2 (SHIGLEY, 1984), dependendo do tipo de material.

em que os ciclos n_i foram aplicados.

N_i ... número de ciclos admissíveis extraídos do gráfico $S-N$, para a tensão S_{ai}

n_i ... número de ciclos de carregamento com amplitude de tensão S_{ai} ;

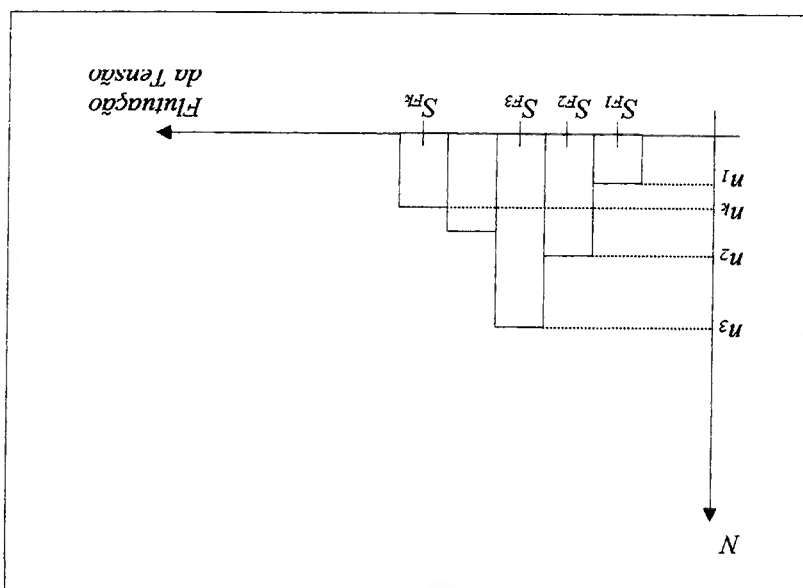
sendo:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{n_i} = 1 \quad (2.20)$$

sua formulação será:

absorvida pelo material, ocorrerá quando D assumir valor maior que 1, tem-se que fadiga. Assumindo que a deterioração total da resistência, proporcional à energia geralmente utilizada para representar o dano acumulado de um componente sujeito à consumida por cada ciclo de tensão aplicado. A formulação de Palmgren-Miner é sujeito a este tipo de carregamento pode ser estimada através da porcentagem da vida de magnitude igual a metade da flutuação de tensão. A vida total de um componente A cada flutuação de tensão pode-se associar uma amplitude de tensão cíclica,

Fig. 2.34: Histograma da flutuação de tensão atuante em um componente mecânico.



A Figura 2.35 mostra uma curva $S-N$ exemplificando a teoria do dano acumulado detalhada acima.

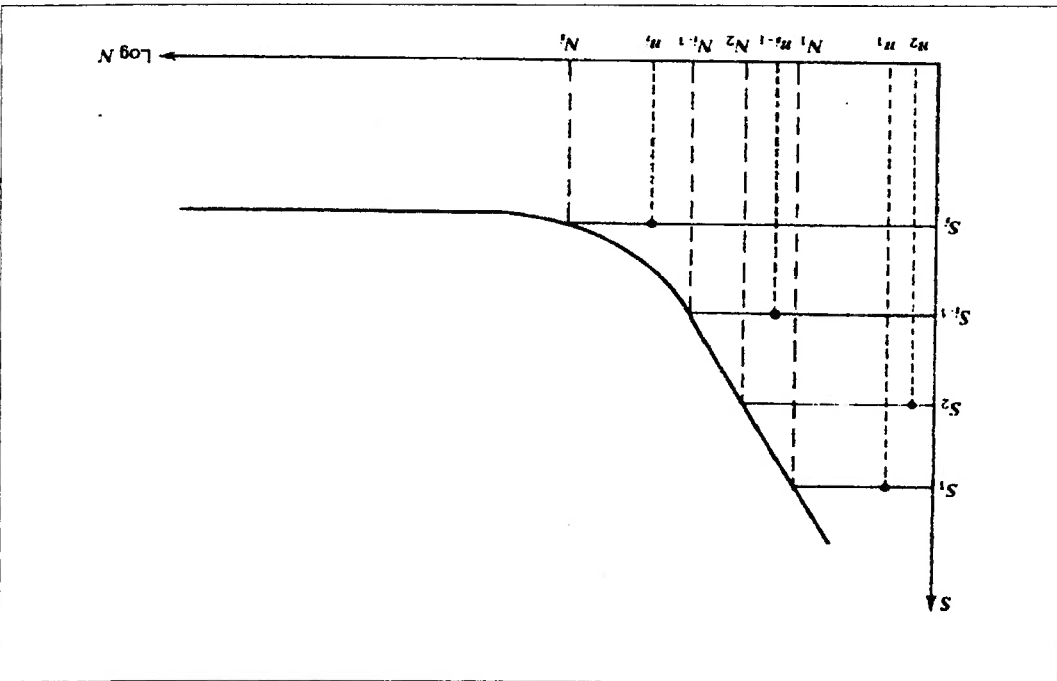


Fig. 2.35: Utilização da curva $S-N$ na determinação do dano conforme o critério de Palmgren-Miner (COLLINS, 1993).

Observa-se também que tal formulação foi aperfeiçoada para melhor representar casos específicos e complexos. A seguir são citados alguns exemplos de formulações, derivadas da teoria clássica de Palmgren-Miner (COLLINS, 1993):

Teoria de Marco-Starkey

Esta foi uma das primeiras teorias desenvolvidas sobre dano acumulado não linear e é baseada nos seguintes postulados:

i) A curva do dano para cada nível de amplitude de tensão senoidal completamente reversa, isto é, para cada nível de ciclos de diferentes amplitudes de tensão, pode ser definida pela seguinte equação:

$$D = \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_i}{m_i} \right)^m = 1 \quad (2.21)$$

maneira:

Combinando as Equações 2.22 e a 2.23, o dano será escrito da seguinte

$$G = \frac{S \left(1 - \frac{N}{n}\right)}{\left(\frac{S - G_0}{G_0}\right) + \left(1 - \frac{N}{n}\right)} \quad (2.23)$$

O limite à fadiga após o dano pode ser escrito através da seguinte relação:

G_0 ... limite de fadiga após o dano.

G_0 ... limite de fadiga original;

D ... dano;

onde:

$$D = \frac{G_0}{G_0 - G} \quad (2.22)$$

virgem, que é:

A teoria proposta por Henry baseia-se no conceito de que a curva $S-N$ é alterada em relação ao dano acumulado por fadiga e que este dano pode ser definido como a razão da redução no limite à fadiga pelo limite à fadiga original do material

Teoria de Henry

ii) Um componente mecânico, sujeito a qualquer sequência de ciclos senoidais completos de tensão, irá falhar quando D assumir valor unitário.

m, \dots função do nível de tensão, isto é, o ciclo de tensão atuante no componente pode assumir uma não linearidade, ao contrário da teoria linear de Palmgren-Miner, e, para uma razão m/N apresentar danos acumulados D diferentes do esperado para o caso linear, dependendo da amplitude do nível de tensão atuante.

onde:

$$\gamma = S / S_{e0}$$

constante;

S_e ... limite de fadiga, uma função do histórico do ciclo de tensão, não uma

S_{e0} ... limite de fadiga quando $n = 0$;

S ... amplitude da tensão cíclica aplicada;

onde:

$$\gamma = \left[1 - \frac{\left(\frac{n}{N}\right)^{1-C} + \frac{1-C}{\gamma} \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{\gamma-1}}{1} \right] \quad (2.25)$$

Existem algumas similaridades entre a teoria postulada por Gatts e a teoria de Henry apresentada anteriormente. Gatts, contudo, postulou que a resistência à fadiga e o limite de fadiga altera-se continuamente com a aplicação dos ciclos de tensões, e que esta mudança é proporcional para algumas funções de amplitudes de tensões.

Teoria de Gatts

N ... número de ciclos para ocorrer a falha em uma amplitude de tensão S ;

S ... amplitude da tensão aplicada;

n ... número de ciclos aplicados em uma amplitude de tensão S ;

D ... Fração do dano;

onde:

$$D = \frac{\left(\frac{n}{N}\right)^{1-C} + \frac{1-C}{\gamma} \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{\gamma-1}}{\left(\frac{n}{N}\right)^{1-C} + \frac{1-C}{\gamma} \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{\gamma-1}} \quad (2.24)$$

$$\gamma_e = S_e / S_{e0}$$

n ... número de ciclos aplicados em uma amplitude de tensão S ;

N ... número de ciclos para ocorrer a falha em uma amplitude de tensão S .

De acordo com a literatura, constata-se que o modelo mais utilizado para descrever o acúmulo do dano linear em um componente sujeito a falhar por fadiga é a formulação clássica de Palmgren-Miner.

3. FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

3.1 Considerações Iniciais

Representando probabilisticamente as variáveis aleatórias envolvidas na equação de estado limite, estas passam a ser representadas por funções densidade de probabilidade, e a função densidade de probabilidade conjunta das variáveis é $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, sendo a probabilidade de falha escrita como:

$$P_f = \int_{\Omega} f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (3.1)$$

onde:

Ω ... domínio de falha, isto é, onde $Z \leq 0$.

Considerando agora as variáveis probabilísticas R e S representadas respectivamente pelas funções de densidade de probabilidade $f_R(\cdot)$, que caracteriza um limite de resistência do material e $f_S(\cdot)$, que deve ser obtida através de análise de tensões que leve em consideração as características geométricas da estrutura, as propriedades mecânicas dos materiais e as condições de carregamento em que a estrutura é submetida (SOUZA, 1994), a falha, como dito anteriormente, ocorrerá quando a solicitação exceder a resistência, sendo sua probabilidade expressa, neste caso, como:

$$P_f = P(R \leq S) \quad (3.2)$$

$$P_f = P(Z \leq 0) \quad (3.3)$$

Esta probabilidade de colapso pode ser calculada através da resolução da seguinte integral:

$$P_f = P(R \leq S) = \iint_{R \leq S} f_{S,R}(S, R) dS dR \quad (3.4)$$

Desenvolvendo a eq.(3.4) chega-se à seguinte expressão:

Pode-se ilustrar a probabilidade de falha expressa pela integral acima, para o método dos estados limites, através do volume em destaque na Figura 3. 1, no qual a solicitação torna-se maior que a resistência, ou seja, a região onde $g(\cdot) \leq 0$.

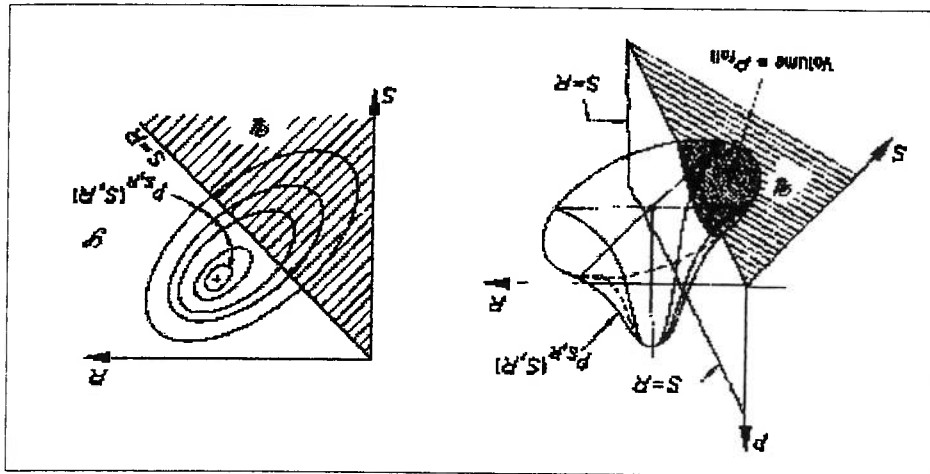


Fig. 3.1:

Representação estatística entre resistência e solicitação, destacando-se a probabilidade de falha (AUGUSTI, BARATTA, CASCIATI, 1984).

Caso as funções de densidade de probabilidade tenham suas funções analíticas plenamente conhecidas, a resolução da integral apresentada na eq.(3.5) pode ser feita através de técnicas de integração numérica ou até analiticamente, obtendo assim um alto grau de precisão. Tais funções assumem distribuições de vários tipos, sendo os principais: Normal (Gaussiana), Log-Normal, Exponencial, Rayleigh, Gamma e Weibull, estando suas formulações apresentadas abaixo:

Normal

$$f^x(x) = \frac{1}{\sigma^x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu^x}{\sigma^x} \right)^2 \right]; \quad (-\infty < x < \infty) \quad (3.6)$$

σ_x^2 ... variância da variável aleatória x .

onde:

$$f_x(x) = \left(\frac{\sigma_x}{x} \right)^2 \exp\left(\frac{-2\sigma_x^2}{x^2} \right); \quad (0 \leq x < \infty) \quad (3.9)$$

Rayleigh

$\nu_x = (L/\bar{x})$, denominado taxa de falha.

onde:

$$f_x(x) = \nu_x \exp(-\nu_x^2 x^2); \quad (0 \leq x < \infty) \quad (3.8)$$

Exponencial

λ_x ... desvio padrão do logaritmo natural da variável x .

ξ_x ... média do logaritmo natural da variável x .

onde:

$$f_x(x) = \frac{x \xi_x \sqrt{2\pi}}{1} \exp\left[-\frac{2\xi_x^2}{1} (\ln x - \lambda_x)^2 \right]; \quad (x > 0) \quad (3.7)$$

Log-Normal

σ_x ... desvio padrão.

\bar{x} ... valor médio da variável aleatória;

x ... variável aleatória (tensão ou resistência, por exemplo);

onde:

Porém, na maioria dos casos, a determinação analítica das funções de densidade de probabilidade é muito difícil, principalmente a da solicitação, a qual normalmente é composta de variáveis independentes, que se multiplicam ou dividem, tornando-a não linear. Para superar a dificuldade da modelagem probabilística de todos os fatores que influenciam um determinado tipo de colapso de uma estrutura ou componente mecânico, tendo em vista a determinação das funções densidade de probabilidade da solicitação e resistência, foram desenvolvidos alguns métodos de análise de confiabilidade, utilizando aproximações, para simplificar o modelo analisado. Estes métodos de análise de confiabilidade estrutural são divididos em quatro categorias chamadas de Nível I, II, III e IV, no qual há um aumento na

η ... parâmetro de forma.

$(\theta - x_0)$... parâmetro de escala;

x_0 ... parâmetro de truncamento;

onde:

$$f_x(x) = \frac{\eta(x - x_0)^{\eta-1} \exp\left(-\left(\frac{x - x_0}{\theta - x_0}\right)^\eta\right)}{\left(\frac{\theta - x_0}{x - x_0}\right)^\eta} \quad ; \quad (x \geq x_0 \geq \theta) \quad (3.11)$$

Weibull

$I(\cdot)$... função Gamma.

n ... parâmetro de forma;

ψ ... parâmetro de escala;

onde:

$$f_x(x) = \frac{\Gamma(n)}{\psi^n x^{n-1} \exp(-\psi x)} \quad ; \quad (n > 0, \lambda x < 0, 0 \leq x < \infty) \quad (3.10)$$

Gamma

complexidade do modelo em função do aumento do valor que caracteriza o nível (AUGUSTI, BARATTA, CASCIATI, 1984), (MADSEN, KRENK, LIND, 1986) e (SOZA, 1994). A seguir estes métodos são descritos com detalhe.

3.2 Caracterização dos Métodos de Análise de Confiabilidade Estrutural

3.2.1 Nível I (Método Semi-Probabilístico)

A principal característica deste método é a utilização de fatores de segurança parciais relativos às variáveis que governam o processo de colapso em estudo. Usualmente são empregados fatores de segurança, determinados de forma empírica, para propriedades mecânicas dos materiais, limite de carregamento aplicado à estrutura, defeitos introduzidos pelos processos de utilização, dentre outros.

Tais fatores de segurança servem para diminuir a chance da solicitação ultrapassar a resistência da estrutura, ou seja, evitar que haja uma intersecção das curvas das funções densidade de probabilidade, como mostra a Figura 3.2.

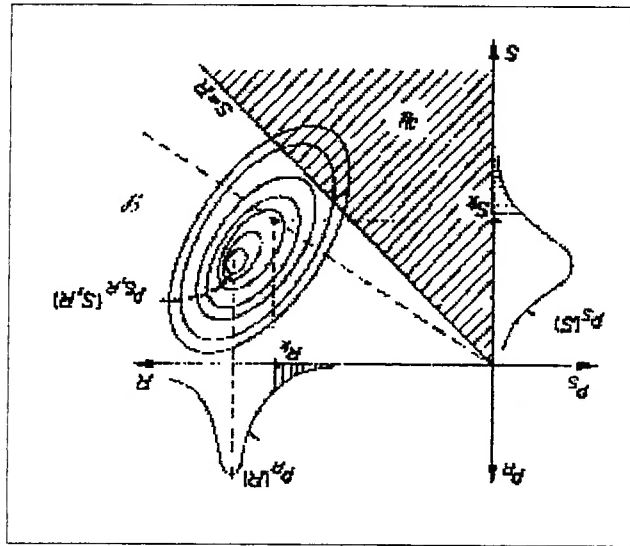


Fig. 3.2:

Representação gráfica do Método Semi-Probabilístico ou de Nível I (AUGUSTI, BARATTA, CASCIATI, 1984).

3.2.2 Nível II (Método Probabilístico Condicionado)

Este método avalia o processo de colapso da estrutura através da formulação de estado limite que o descreva, sendo esta a mesma formulação utilizada no cálculo determinístico do colapso. Admite-se que a configuração para a qual ocorrerá o colapso é aquela definida pelas teorias determinísticas, calculando-se a probabilidade de ocorrência da mesma. As variáveis que definem a função de estado limite são

representadas pelas funções densidade de probabilidade, que podem ser conhecidas ou estimadas, porém estas funções normalmente são caracterizadas apenas por dois valores para cada variável aleatória, a média e a variância. Na área estrutural normalmente estas funções representam o carregamento externo, as propriedades mecânicas dos materiais e algumas características geométricas. Tal processo consiste em determinar qual a probabilidade de estado limite ser menor ou igual a zero, sendo a probabilidade de falha da estrutura representada através do volume em destaque mostrado na Figura 3.1. Graficamente o índice de confiabilidade β pode ser determinado como sendo a distância entre o ponto médio e o limiar da região de falha, como mostra a Figura 3.3.

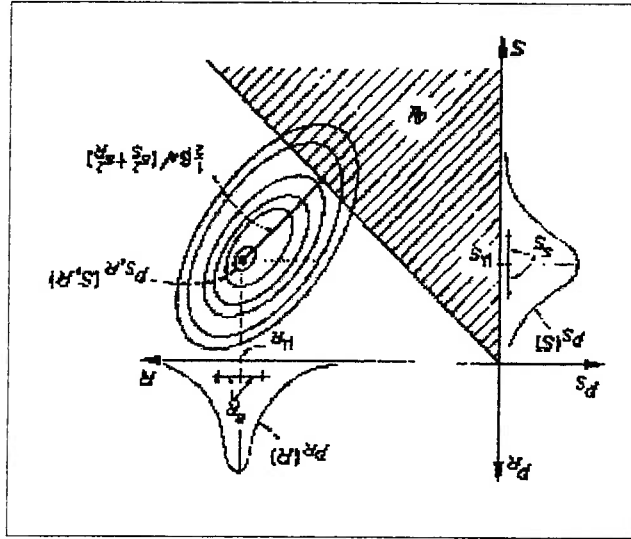


Fig. 3.3: Representação gráfica do Método Probabilístico Condicionado ou de Nível II (AUGUSTI, BARATTA, CASCIATI, 1984).

3.2.3 Nível III (Método Probabilístico Puro)

Este método considera, no cálculo da probabilidade de falha da estrutura, todas as configurações de colapsos possíveis devido à aleatoriedade das características mecânicas e geométricas da estrutura, e não apenas considerando a configuração de colapso determinada a partir de uma análise determinística. Neste

Este método compara uma perspectiva estrutural com uma perspectiva de referência de acordo com os princípios de análise de engenharia econômica sob incertezas, considerando custos e benefícios de construção, manutenção, reparo e consequências de falha.

3.2.4 Nível IV

caso, todas as variáveis são tratadas de forma probabilística, sendo que as funções de probabilidade das variáveis envolvidas no modelo devem ser conhecidas de maneira exata. Com este modelo determina-se as funções de densidade de probabilidade de resistência e solicitação para o processo de colapso em estudo, possibilitando o cálculo exato da probabilidade de falha da estrutura e, consequentemente, sua confiabilidade. Porém este método é extremamente complexo, dificultando seu uso.

3.3 Método Probabilístico Condicionado

O Método Probabilístico Condicionado (Nível II) pode ser dividido em dois tipos, chamados de Método de Confiabilidade de Primeira e de Segunda Ordem sendo indicados pelas siglas em inglês *FORM* e *SORM* (*First Order Reliability Methods* e *Second Order Reliability Methods*, respectivamente).

3.3.1 Método de Primeira Ordem

Este método pode ser usado para resolver a integral apresentada na eq.(3.1) quando as seguintes hipóteses forem válidas:

- i) Função de estado limite linear ou função de estado limite não linear representada por aproximação de primeira ordem (linear);
- ii) Composta de variáveis não correlacionadas;
- iii) Distribuição das variáveis do tipo normal.

Nos casos em que estas hipóteses não forem satisfeitas, deverão ser aplicadas as devidas correções para este método ser válido.

Dentre os principais modelos deste método destacam-se o *First Order Second Moment* (SUNDARARAJAN, 1995 apud CORNELL, 1969), método de Hazofer-Lind (1974), método de Rackwitz-Flessler (1976) e método de Chen-Lind (1982), sendo os dois últimos métodos também chamados de Método Probabilístico Condicionado Avançado (MADSEN; KRENK; LIND, 1986) e (SUNDARARAJAN, 1995). Estes modelos diferem entre si pelas correções impostas ao primeiro modelo proposto, que admitia distribuição normal para as variáveis aleatórias e variáveis não correlacionadas, ou independentes, entre si.

Como visto anteriormente, o método probabilístico condicionado foi desenvolvido no intuito de se obter uma simplificação na determinação do índice de confiabilidade e probabilidade de falha. Devido a dificuldade, em vários casos, de se conhecer com exatidão as funções densidade de probabilidade, este método baseia-se apenas no uso da média (valor esperado) e da variância, em conjunto com a função

de estado limite que governa a estrutura, que pode ser uma função linear ou não linear das variáveis básicas. Portanto, os dados de entrada e saída serão expressos em função apenas da média e do desvio padrão das variáveis aleatórias. Daí a origem da sigla *FOSM (First Order Second Moment* – função de estado limite linear usando-se a média e a variância).

3.3.1.1 Valor Médio

Como expresso pela eq.(2.18) a função de estado limite é escrita na forma $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$, onde as variáveis básicas normalmente representam carregamento externo, propriedades mecânicas dos materiais, dimensões estruturais, entre outros, como dito anteriormente.

Uma aproximação linearizada da função de estado limite pode ser feita expandindo-a em uma série de Taylor, na qual se seleciona os termos de primeira ordem:

$$Z = g(\bar{x}) \tag{3.12}$$

onde:

\bar{x} ... vetor de variáveis básicas de ordem n .

Expandindo em série de Taylor tem-se:

$$Z = g(\bar{x}_*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(\bar{x}_*)}{\partial x_i} (x_i - x_i^*) + \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 g(\bar{x}_*)}{\partial x_i \partial x_j} (x_i - x_i^*)(x_j - x_j^*) + \dots + \sum_{i=1}^n \frac{\partial^m g(\bar{x}_*)}{\partial x_i^m} (x_i - x_i^*)^m + \dots \tag{3.13}$$

sendo:

$\bar{x}_* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$... vetor de variáveis básicas que indica o ponto em torno do qual a função está sendo linearizada;

constante.

sendo que C_0 e C_i são constantes, já que o ponto de linearização da função é

$$C_i = g'_i(\bar{x}^*)$$

$$C_0 = g(\bar{x}^*) - \sum_{i=1}^n x_i^* g'_i(\bar{x}^*)$$

onde:

$$Z \equiv C_0 + \sum_{i=1}^n C_i x_i^* \quad (3.17)$$

ou de forma simplificada:

$$Z \equiv g(\bar{x}^*) - \sum_{i=1}^n x_i^* g'_i(\bar{x}^*) + \sum_{i=1}^n x_i^* g'_i(\bar{x}^*) \quad (3.16)$$

Os termos da expressão acima podem ser reagrupados da seguinte maneira:

$$Z \equiv g(\bar{x}^*) + \sum_{i=1}^n x_i^* g'_i(\bar{x}^*) - \sum_{i=1}^n x_i^* g'_i(\bar{x}^*) \quad (3.15)$$

A eq. (3.14) pode ser aberta na forma:

$$Z \equiv g(\bar{x}^*) + \sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i^*) g'_i(\bar{x}^*) \quad (3.14)$$

a expressão da função de estado limite é aproximada por:

Seccionando os termos de primeira ordem e desprezando os termos cruzados,

$\partial g / \partial x_i \dots$ derivada parcial da função $g(\bar{x}^*)$

$g''_{ij}(\bar{x}^*) = \frac{\partial^2 g}{\partial x_i \partial x_j} \dots$ derivada segunda calculada em $\bar{x} = \bar{x}^*$;

$g'_i(\bar{x}^*) = \frac{\partial g}{\partial x_i} \dots$ derivada calculada em $\bar{x} = \bar{x}^*$;

$g(\bar{x}^*) = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \dots$ função $g(x)$ calculada em $\bar{x} = \bar{x}^*$;

Com a eq.(3.17) linear pode-se aplicar as propriedades de cálculo do valor esperado e da variância de uma função linear de variáveis aleatórias, definindo o valor esperado e o desvio padrão da função Z para variáveis independentes através das seguintes equações:

$$m_z = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i m_i \quad (3.18)$$

$$\sigma_z = \left[\sum_{i=1}^n C_i^2 \sigma_i^2 \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

onde:

m_z ... valor esperado da função de estado limite Z ;

σ_z ... desvio padrão da função de estado limite Z ;

m_i ... valor esperado da variável básica x_i ;

σ_i ... desvio padrão da variável básica x_i ;

$C_i = g_i'(\bar{x}^*)$ com $\bar{x}^* = (m_1, m_2, \dots, m_n)$.

Ou seja, a função Z é linearizada em um ponto equivalente à média das variáveis básicas envolvidas no problema.

O índice de confiabilidade β pode ser definido como a relação entre o valor esperado e o desvio padrão da função Z .

$$\beta = m_z / \sigma_z \quad (3.20)$$

Para um caso em que haja apenas duas variáveis básicas aleatórias, como por exemplo, resistência R e carregamento na forma de tensão S a função de estado limite será $Z = g(R,S) = R - S$.

Tabela 3.1: Relação entre vários tipos de função de estado limite com sua respectiva média e desvio padrão (DAL; WANG, 1992).

Função	Média	Desvio Padrão
$Z = a$	a	0
$Z = ax$	$a\mu_x$	$a\sigma_x$
$Z = a + x$	$a + \mu_x$	σ_x
$Z = x \pm y$	$\mu_x \pm \mu_y$	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$
$Z = xy$	$\mu_x \mu_y$	$\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2 + \mu_x^2 \sigma_y^2 + \mu_y^2 \sigma_x^2}$
$Z = x/y$	μ_x / μ_y	$\frac{\mu_x^2}{\mu_y^2} \sqrt{\mu_x^2 \sigma_y^2 + \mu_y^2 \sigma_x^2}$
$Z = I/x$	I / μ_x	σ_x / μ_x^2
$Z = \sqrt{x}$	$\left(\frac{1}{2} \sqrt{4\mu_x^2 - 2\sigma_x^2}\right)^{1/2}$	$\left(\mu_x - \frac{1}{2} \sqrt{4\mu_x^2 - 2\sigma_x^2}\right)^{1/2}$
$Z = x^2$	$\mu_x^2 + \sigma_x^2$	$\sqrt{4\mu_x^2 \sigma_x^2 + 2\sigma_x^4}$
$Z = x^3$	$3\mu_x^3$	$3\mu_x^2 \sigma_x$

A Tabela 3.1 relaciona alguns tipos de funções de estado limite com suas respectivas médias e desvios padrão, em valores aproximados, onde a é uma constante e x e y são variáveis aleatórias independentes. A partir dela tem-se que:

$$\mu_z = \mu_x - \mu_y \quad (3.21)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3.22)$$

Portanto:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3.23)$$

Esta fórmula assume que ambas variáveis, R e S , são normalmente distribuídas. Nesta dedução a distribuição de probabilidade não foi especificada, sendo β dependente apenas da média e do desvio padrão na função de estado limite, como dito anteriormente. A Figura 3.4 ilustra graficamente o índice de confiabilidade β que é a distância entre a origem ($Z = 0$) e o valor esperado m_z da função Z expresso em termos de unidades de desvio padrão. Por fim a probabilidade de colapso é calculada através da seguinte formulação:

onde:

$$P_F = \Phi(-\beta) \quad (3.24)$$

P_F ... probabilidade de colapso da estrutura;

Φ ... função distribuição acumulada da distribuição normal reduzida.

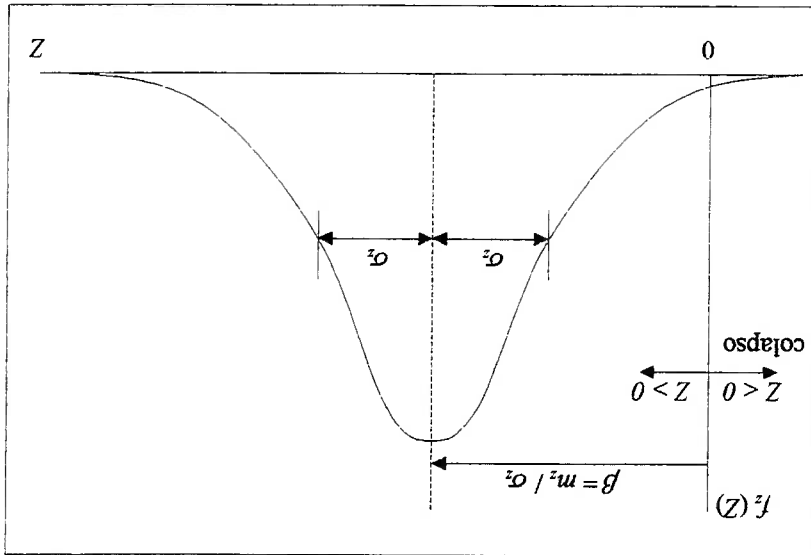


Fig. 3.4: Representação gráfica do índice de confiabilidade β .

Porém, pode-se citar uma importante desvantagem do método *FOSM* pelo valor médio (DAI; WANG, 1992):

- i) Na maioria dos problemas de confiabilidade estrutural o ponto médio é uma certa distância de $g(\cdot) = 0$, assim a função $g(\cdot)$ é linearizada no valor médio da variável x , e erros significantes podem ser introduzidos quando $g(\cdot)$ for não linear.

3.3.1.2 Condicionado Avançado

Uma imprecisão no método dos valores médios deve-se ao procedimento de linearização da função estado limite, pois como o ponto de correspondente ao vetor formado pelo valor médio das variáveis básicas situa-se em uma região do espaço para $Z > 0$, sabe-se que quanto maior for a distância deste ponto à superfície $Z = 0$ maior será o erro cometido no cálculo do índice de confiabilidade. Com o intuito de solucionar este problema desenvolveu-se o Método Probabilístico Condicionado Avançado (*Advanced First Order Second Moment - AFOSM*), no qual o ponto escolhido para a linearização da função de estado limite deve ser tal que a probabilidade de falha na estrutura seja maximizada, ou seja, aproximar-se ao máximo de $Z = 0$.

Definindo-se a função de estado limite, já linearizada, da seguinte forma:

$$Z \equiv g(\bar{x}^*) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) g_i'(\bar{x}^*) \quad (3.25)$$

tem-se que o valor esperado da função Z é expresso por:

$$m_z \equiv g(\bar{x}^*) + \sum_{i=1}^n (m_i - x_i^*) g_i'(\bar{x}^*) \quad (3.26)$$

e seu desvio padrão escrito como:

$$\sigma_z \equiv \left[\sum_{i=1}^n (g_i'(\bar{x}^*))^2 \sigma_i^2 \right]^{1/2} \quad (3.27)$$

Neste método, o desvio padrão da função do estado limite linearizado é expresso a partir de uma combinação linear dos desvios padrões das variáveis básicas envolvidas no problema da seguinte maneira (DAI, WANG, 1992) e (SOUZA, 1994):

$$\sigma_z = \left[\sum_n^{i=1} \alpha_i g_i'(\bar{x}^*) \sigma_i \right] \quad (3.28)$$

sendo o valor da constante de proporcionalidade α_i , referente a cada variável básica, determinado pela relação:

$$\alpha_i = \frac{\left[\sum_n^{j=1} (g_j'(\bar{x}^*) \sigma_j)^2 \right]^{1/2}}{g_i'(\bar{x}^*) \sigma_i} \quad (3.29)$$

Sabendo-se que o ponto de linearização encontra-se sobre a superfície definida por $Z = 0$, e aplicando-se as Equações 3.26 e 3.27 para definir o índice de confiabilidade, tem-se:

$$\beta = \frac{\sum_n^{i=1} \alpha_i g_i'(\bar{x}^*) \sigma_i}{\sum_n^{i=1} (m_i - x_i^* g_i'(\bar{x}^*) \sigma_i)} \quad (3.30)$$

Neste método é fundamental a definição do ponto de linearização da função de estado limite, o qual pode ser determinado através da solução da eq.(3.31), obtida a partir de um reagrupamento dos termos da eq.(3.30).

$$x_i = m_i - \alpha_i \beta \sigma_i \quad (3.31)$$

Verifica-se que o conjunto dos pontos $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ define o ponto de linearização da função de estado limite.

Para a solução da eq.(3.31) é necessário adotar um valor inicial para o índice de confiabilidade β , e, posteriormente, usar um algoritmo para definir o ponto de

linearização \bar{x}^* e o valor de β para o qual a função de estado limite se anula, isto é, o ponto que define a falha.

As referências (DAI, WANG, 1992), (SOUZA, 1994) e (SUNDARARAJAN, 1995) sugerem um procedimento para a determinação do ponto de linearização, descrito abaixo:

- a) Adotar um valor para β ;
- b) Adotar inicialmente $x_i^* = m_i$, para todas as variáveis básicas envolvidas no problema;
- c) Calcular a derivada $g_i'(\bar{x}^*)$ para as n variáveis básicas;
- d) Calcular o valor da constante de proporcionalidade α_i para as n variáveis básicas, aplicando-se a eq.(3.29);
- e) Calcular um novo ponto de linearização \bar{x}^* , através da aplicação da eq.(3.31) para as n variáveis básicas;
- f) Repetir os procedimentos c a e até que o ponto de linearização se mantenha constante;
- g) Calcular o valor da função de estado limite em x^* ($Z = g(\bar{x}^*)$);
- h) Variar o valor de β , repetindo os passos c a h , até obter-se um valor nulo para a função de estado limite ($Z = 0$);
- i) Determinar a probabilidade de colapso através da relação $P_F = \Phi(-\beta)$.

Além de uma linearização da função de estado limite otimizada é necessário verificar qual o tipo de distribuição que as variáveis básicas possuem, visto que este método só é válido para distribuições normais não correlacionadas. Caso as variáveis básicas sejam correlacionadas ou possuam outro tipo de distribuição, o modelo acima discutido deverá sofrer correções visando a melhoria da estimativa de seu valor. No caso de alguma variável apresentar distribuição não normal e conhecendo-se a função densidade de probabilidade que melhor descreve cada uma das variáveis

Estes valores devem ser empregados no cálculo das constantes de proporcionalidade α_i das variáveis básicas, eq.(3.29), bem como na definição do

reduzida.

para a função distribuição acumulada da distribuição normal

$\Phi^{-1}(b)$... valor da coordenada que corresponde a uma magnitude igual a \bar{b}

calculada para o ponto \bar{a}

$f'(a)$... magnitude da função densidade de probabilidade normal reduzida,

calculada no ponto $x_i = x_i^*$;

$F_{x_i}(x_i^*)$... magnitude da função distribuição acumulada da variável básica x_i

básica x_i , calculada no ponto $x_i = x_i^*$;

$f_{x_i}(x_i^*)$... magnitude da função densidade de probabilidade da variável

σ_i^n ... desvio padrão corrigido da variável básica x_i ;

m_i^n ... valor esperado corrigido da variável básica x_i ;

onde:

$$\sigma_i^n = \frac{f_{x_i}(x_i^*)}{f_n \{ \Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)] \}} \quad (3.33)$$

$$m_i^n = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)] \sigma_i^n \quad (3.32)$$

A correção é feita através das seguintes funções:

funções calculadas para a distribuição normal.

que realmente descrevem o comportamento da variável e os valores destas mesmas entre os valores das funções densidade de probabilidade e distribuição acumulada desvio padrão das variáveis básicas, procurando obter no valor x_i^* , uma equivalência Rackwitz, para o qual introduz-se uma correção no cálculo do valor esperado e do (SOUZA, 1994) e (SUNDARARAJAN, 1995) sugerem a aplicação do método de básicas envolvidas no problema em estudo, as referências (DAI, WANG, 1992),

ponto de linearização, eq.(3.31), utilizados no procedimento de cálculo do índice de confiabilidade, de acordo com o método probabilístico condicionado avançado.

Todos os métodos apresentados até o momento sugerem independência entre as variáveis básicas aleatórias. Nos casos em que as variáveis básicas, que definem a função de estado limite, sejam correlacionadas, deve-se inserir correções no cálculo do ponto de linearização desta função através do coeficiente de correlação, determinado da seguinte forma, considerando apenas duas variáveis básicas (AUGUSTI, BARATTA, CASCIATI, 1984):

$$\rho_{xy} = \frac{Cov[x,y]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.34)$$

onde:

ρ_{xy} ... coeficiente de correlação entre as variáveis básicas x e y;

$Cov[x,y]$... covariância;

σ_x, σ_y ... desvio padrão das variáveis básicas x e y.

Portanto deve-se corrigir a variância devido à influência da covariância. Caso haja mais de duas variáveis básicas, o equacionamento torna-se uma matriz de covariâncias e a correlação será feita duas a duas:

$$[C] = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & Cov(x_1, x_2) & \dots & Cov(x_1, x_n) \\ Cov(x_2, x_1) & \sigma_{x_2}^2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(x_n, x_1) & Cov(x_n, x_2) & \dots & \sigma_{x_n}^2 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Definindo a variável reduzida x'_i como:

$$x'_i = \frac{\sigma_{x_i}}{\mu_{x_i}} x_i; \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.36)$$

a matriz de covariâncias das variáveis reduzidas é escrita da seguinte forma:

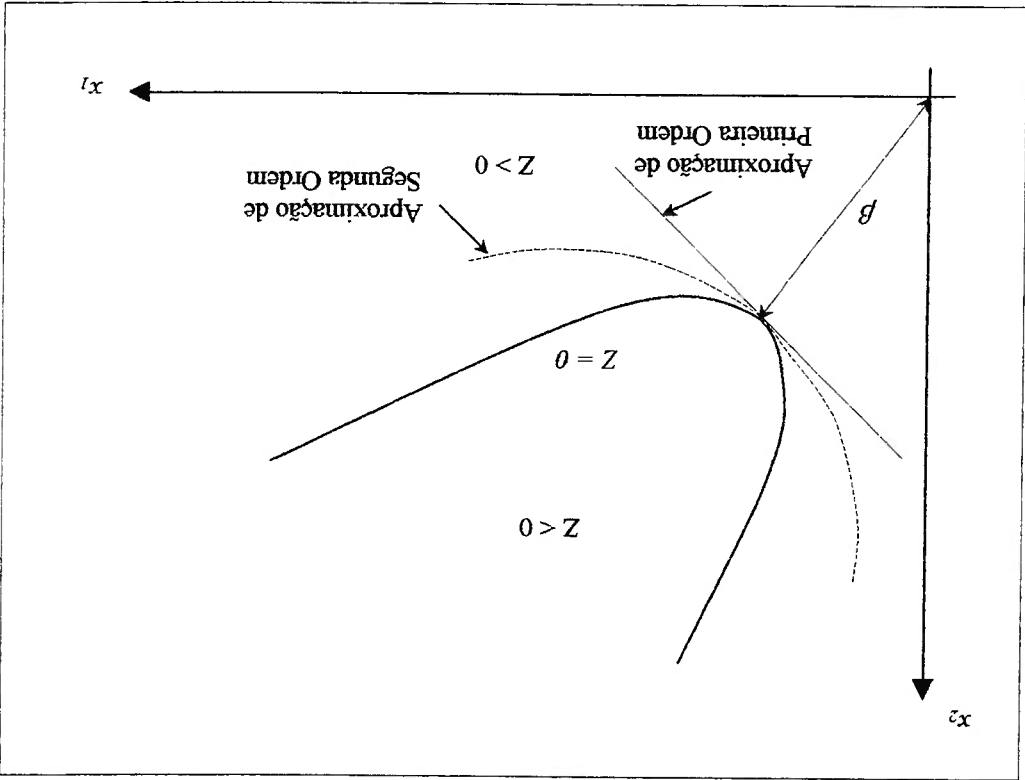
3.3.2 Método de Segunda Ordem

onde $\rho_{x_i x_j}$ é o coeficiente de correlação das variáveis básicas x_i e x_j .

$$[C'] = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{x_1 x_2} & \dots & \rho_{x_1 x_n} \\ \rho_{x_2 x_1} & 1 & \dots & \rho_{x_2 x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{x_n x_1} & \rho_{x_n x_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Quando a função de estado limite apresenta um alto grau de não linearidade ou quando as variáveis básicas envolvidas no problema não possuem distribuição normal, a superfície de falha torna-se não linear. Neste caso, o método de segunda ordem oferece uma aproximação mais precisa da superfície de falha que o método de primeira ordem, isto porque tal aproximação é feita por meio de uma superfície parabólica, quadrática ou de um polinômio de grau mais elevado, com a mesma curvatura que a função de estado limite no ponto de projeto, como mostra a Figura 3.5. Isto acarreta um maior grau de acuracidade em relação ao modelo de primeira ordem, mas, geralmente, não é necessário para a maioria das aplicações de engenharia, visto que para estes casos o método de primeira ordem fornece uma boa aproximação (SWINDEN TECHNOLOGY CENTRE, 2001). Alguns dos principais métodos de segunda ordem, tais como o de Breitung (1984), Der Kiureghian (1987), Ditlevsen (1979), Flessler (1979) e Tvedt (1983, 1990), são descritos com detalhe em (SUNDARARAJAN, 1995).

Fig. 3.5: Comparação entre a aproximação de primeira e segunda ordem da superfície de falha (HAMED; BEDIENT, 1999).



3.4 Aplicação dos Métodos Probabilísticos na Análise de Fadiga

Como a função de densidade de probabilidade conjunta das variáveis básicas é desconhecida, o método probabilístico condicionado avançado de primeira ordem pode ser utilizado de maneira satisfatória para a resolução de estado limite, definindo a probabilidade de falha por fadiga, expressa em termos do índice de confiabilidade, como proposto por Assakkaf, Ayyub (1999), Souza (1994) e Wirsching (1984), visando a análise de falha por fadiga de estruturas navais e oceânicas. Também livros que discutem a análise de confiabilidade estrutural citam a aplicação deste método probabilístico na análise de fadiga (DAI, WANG, 1992) e (SUNDARARAJAN, 1995).

4. CARACTERÍSTICAS GERAIS DE SISTEMAS ESPECIALISTAS

4.1 Definições Básicas

Sistemas especialistas são programas de computador planejados para adquirir e disponibilizar o conhecimento operacional de um especialista humano, sendo uma aplicação da inteligência artificial. São tradicionalmente vistos como sistemas de suporte à decisão, pois são capazes de tomar decisões como especialistas em diversas áreas. Sua estrutura reflete a maneira como o especialista humano arranja e faz inferência sobre o seu conhecimento. De um modo geral, sempre que um problema não pode ser algoritmizado, ou sua solução conduza a um processamento muito demorado, os sistemas especialistas podem ser uma saída, pois possuem o seu mecanismo apoiado em processos heurísticos.

Ao contrário dos sistemas especialistas, sistemas convencionais são baseados em um algoritmo, que, passo a passo, após um tempo aceitável, conduz a uma resposta, sendo projetados para sempre terminarem emitindo um resultado final correto e processar volumes de dados de maneira repetitiva.

Um processo heurístico normalmente conduz a soluções de maneira rápida, porém, pode não conduzir a solução alguma. Assim, pode-se afirmar que um sistema especialista pode chegar ou não a solução do problema, encontrar uma solução distorcida, isto é, pode errar, porém seu erro ocorre dentro de determinadas circunstâncias que são justificadas pelo próprio sistema e, por fim, este tipo de sistema processa conhecimento e não dados. O conhecimento é armazenado em uma base de conhecimentos e os dados são ajustados contra ela. O processamento é feito em cima desses conhecimentos não existindo processamento de dados.

Para que um sistema seja considerado especialista, alguns componentes são essenciais à sua caracterização, como define Crippa (2002):

i) Linguagem: expressão dos conhecimentos fornecidos pelos especialistas;

- ii) Base de Conhecimentos: armazena o conhecimento específico de determinada aplicação, que pode ser diretamente fornecido por um especialista, ou acumulado pelo sistema ao fim de experimentos empregados para o seu treinamento;

- iii) Máquina de Inferência: programa relativamente geral que explora o conhecimento da base precedente, considerando-a como fonte de informações, assim suscetível a mudanças.

Entende-se então que os sistemas especialistas são construções de *software*, os quais os peritos de campos específicos enriquecem com seu conhecimento. Destilando sua perícia em grupos de leis e inserindo-as nos sistemas, os peritos produzem programas de aplicações que auxiliam os não-peritos a resolver problemas especialistas, respondendo a perguntas deste programa.

Pode-se classificar os sistemas especialistas quanto às características do seu funcionamento, de um modo geral, como (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ, 2002):

Interpretação

São sistemas que inferem descrições de situações a partir da observação de fatos fazendo uma análise de dados e procurando determinar as relações e seus significados. Devem considerar as possíveis interpretações, descartando as que se mostrarem inconsistentes.

Diagnósticos

São sistemas que detectam falhas oriundas da interpretação de dados. A análise dessas falhas pode conduzir a uma conclusão diferente da simples interpretação de dados. Detectam os problemas escondidos por falhas dos equipamentos e falhas do próprio diagnóstico, que este não detectou por ter falhado. Estes sistemas já têm embutidos o sistema de interpretação de dados.

Este sistema tem características parecidas com as do planejamento, e deve-se confeccionar especificações tais que sejam atendidos os objetivos dos requisitos

Projeto

Neste caso, o sistema prepara um programa de iniciativas a serem tomadas para se atingir um determinado objetivo. São estabelecidas etapas e sub-etapas e, em caso de etapas conflitantes, são definidas as prioridades. Possui características parecidas com o sistema para a predição e normalmente opera em grandes problemas de solução complexa. O princípio de funcionamento, em alguns casos, é por tentativas de soluções, cabendo a análise mais profunda ao especialista que trabalha com esse sistema. Enfoca os aspectos mais importantes e particiona de maneira coerente um problema em subproblemas menos complexos, estabelecendo sempre o relacionamento entre as metas destes subproblemas e a meta principal.

Planejamento

A partir de uma modelagem de dados do passado e do presente, este sistema permite uma determinada previsão do futuro. Como ele baseia sua solução na análise do comportamento dos dados recebidos no passado, deve ter mecanismos para verificar os vários futuros possíveis, a partir da análise do comportamento desses dados, fazendo uso de raciocínios hipotéticos e verificando a tendência de acordo com a variação dos dados de entrada.

Predição

Interpreta as observações de sinais sobre o comportamento monitorado. Tem de verificar continuamente um determinado comportamento em limites pré-estabelecidos, sinalizando quando forem requeridas intervenções para o sucesso da execução. Um sinal poderá ser interpretado de maneiras diferentes, de acordo com a situação global percebida naquele momento, e a interpretação varia de acordo com os fatos que o sistema percebe a cada momento.

Monitoramento

É um sistema que governa o comportamento geral de outros sistemas (não apenas de computação). É o mais completo, de um modo geral, pois deve interpretar os fatos de uma situação atual, verificando os dados passados e fazendo uma predição do futuro. Apresenta os diagnósticos de possíveis problemas, formulando

Controle

O sistema de instrução possui mecanismos para verificar e corrigir o comportamento do aprendiz dos estudantes. Normalmente, incorporam como subsistemas um sistema de diagnóstico e de reparo, e tomam por base uma descrição hipotética do conhecimento do aluno. Seu funcionamento consiste em ir interagindo com o treinando, em alguns casos, apresentando uma pequena explicação e, a partir daí, ir sugerindo situações para serem analisadas pelo treinando. Dependendo do comportamento deste, se vai aumentando a complexidade das situações e encaminhando o assunto, de maneira didática, até o nível intelectual do treinamento.

Instrução

Este sistema desenvolve e executa planos para administrar os reparos verificados na etapa de diagnóstico. Um sistema especialista para reparos segue um plano para administrar alguma solução encontrada em uma etapa do diagnóstico. São poucos os sistemas desenvolvidos, porque o ato de executar um conserto em alguma coisa do mundo real é uma tarefa complexa.

Reparo

Trata-se de sistemas que possuem mecanismos para fornecerem soluções para o mau funcionamento provocado por distorções de dados. Provê, de maneira automática, verificações nas diversas partes, incluindo mecanismos para ir validando cada etapa necessária em um processo qualquer.

Depuração

É um sistema capaz de justificar a alternativa tomada para o projeto final, e de fazer uso dessa justificativa para alternativas futuras.

um plano ótimo para sua correção. Este plano de correção é executado e monitorado para que o objetivo seja alcançado.

Como dito anteriormente, os sistemas especialistas são programas de Inteligência Artificial (IA) que capacitam um computador a auxiliá-lo num processo de tomada de decisão. O *know-how* do perito humano é utilizado para instruir o computador a resolver um problema ou a tomar uma decisão. A máquina pode auxiliar ou aconselhar outros usuários na resolução do mesmo problema através do conhecimento especializado do usuário humano e da habilidade do computador de armazenar grandes quantidades de textos e dados, considerando todas as possibilidades de alta velocidade.

De acordo com Choratas (1988) o computador interage com as perguntas do usuário e chega a uma conclusão baseada nas respostas. O usuário pode perguntar ao computador por que ele quer certa informação e o sistema especialista explicará sua necessidade dos dados e como eles serão utilizados. O mais importante é que o sistema dirá como chegou a suas conclusões não dando somente conselhos, mas também justificativas a respeito da opinião que oferece.

Os sistemas especialistas são diferentes das aplicações típicas por causa de sua arquitetura. Um dos princípios fundamentais no projeto de sistemas especialistas é a separação do conhecimento de domínio (medicina, geologia, engenharia, dentre outros) dos programas que raciocinam com este conhecimento. Portanto, existe uma distinta divisão entre o componente de conhecimento do sistema e o componente de raciocínio ou máquina de inferência. A máquina de inferência é bem generalizada e usualmente poderá trabalhar com diferentes conjuntos de conhecimento.

O componente de conhecimento e o componente de raciocínio são as chaves de qualquer sistema que refleta inteligência. Portanto, a única maneira destes sistemas apresentarem um comportamento inteligente é através de mecanismos formais para a representação do conhecimento e a utilização de técnicas de inferência.

4.2 Estrutura de um Sistema Especialista

Um modelo básico da arquitetura dos sistemas especialistas pode ser apresentado através de três componentes, a base de conhecimento, a máquina de inferência, e a interface com usuário (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2001), como mostra a Figura 4.1.

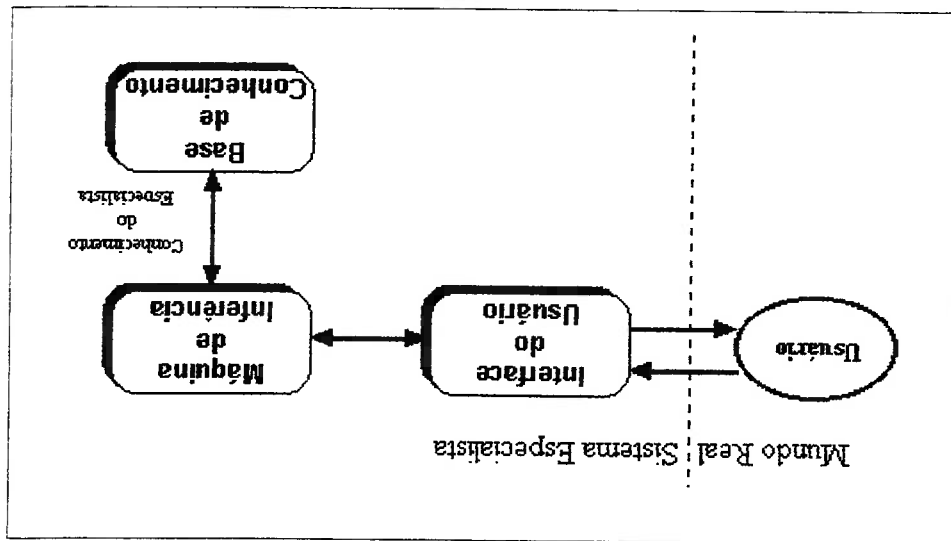


Fig. 4.1: Estrutura convencional de um Sistema Especialista.

4.2.1 A Base de Conhecimento

A marca principal de um sistema especialista é o uso do conhecimento específico de seu domínio de aplicação através de um programa de raciocínio relativamente simples. Neste sentido, o termo base de conhecimento é utilizado para significar a coleção de conhecimento do domínio, ou seja, as informações, como as de um especialista, necessárias para resolver problemas de um domínio específico. Portanto, este conhecimento precisa ser organizado de uma maneira adequada para que a máquina de inferência consiga tratá-lo convenientemente. O conhecimento em um sistema especialista consiste de fatos e heurísticas. Os fatos constituem as informações que estarão sempre disponíveis para serem compartilhadas e atualizadas pelo especialista do domínio. As heurísticas são regras práticas que caracterizam o nível de tomada de decisão do especialista em um domínio. Portanto, uma base de

conhecimento pode ser vista como um conjunto de regras, cada qual podendo ser validada independentemente da estrutura de controle.

Um dos problemas mais sérios, e, ao mesmo tempo muito comum, encontrado na implementação de sistemas especialistas é que usualmente parece impossível fornecer um conhecimento completo sobre o tema no qual o sistema vai operar. Assim, o nível de desempenho de um sistema especialista está relacionado ao tamanho e à qualidade de sua base de conhecimento.

4.2.2 A Máquina de Inferência

“O conhecimento é útil somente quando podemos explorá-lo para ajudar a alcançarmos nossos objetivos”, define Minsky (1989). Nos sistemas especialistas, a máquina de inferência cumpre este papel, representando o meio pelo qual o conhecimento é manipulado, utilizando-se das informações armazenadas na base de conhecimento, para resolver problemas. Para isto, deve haver uma linguagem ou um formato específico no qual o conhecimento possa ser expresso para permitir o raciocínio e inferência. Métodos de inferência são necessários para fazer uso apropriado e eficiente dos itens em uma base de conhecimento para alcançar alguns propósitos.

A máquina de inferência, de certo modo, tenta imitar os tipos de pensamento que o especialista humano emprega quando resolve um problema, ou seja, ele pode começar com uma conclusão e procurar uma evidência que a comprove, ou pode iniciar com uma evidência para chegar a uma conclusão. Em sistemas especialistas, estes dois métodos são chamados de encadeamento para trás (*backward chaining*), o mais comum e encadeamento para frente (*forward chaining*), respectivamente. Nem todos os sistemas utilizam a mesma abordagem para a representação do seu conhecimento, portanto, a máquina de inferência deve ser projetada para trabalhar com a representação de conhecimento específica utilizada.

4.2.3 A Interface com o Usuário

A interface com o usuário tem como objetivo facilitar a comunicação entre o sistema especialista e o usuário, permitindo a interação com o sistema através da entrada de fatos e dados, e através da saída em forma de perguntas, conclusões e explicações. Muitos princípios baseados nas teorias cognitivas têm sido propostos para projetos de interface, como resultado de pesquisas na área de interação homem-máquina. Uma das considerações principais no projeto de qualquer interface homem-máquina deve ser a facilidade de uso, reduzindo ao máximo a carga cognitiva sobre o usuário. Para que um sistema especialista seja eficaz, as pessoas têm de ser capazes de interagir com ele facilmente. Para facilitar esta interação os sistemas devem ser capazes de explicar seu raciocínio, pois em muitos dos domínios nos quais os sistemas especialistas operam, as pessoas não aceitarão resultados se não estiverem convencidas da precisão do processo de raciocínio que produziu aqueles resultados. Conseqüentemente o processo de raciocínio deve proceder em etapas compreensíveis em que o meta-conhecimento (conhecimento sobre o processo de raciocínio) esteja disponível para que as explicações dessas etapas possam ser geradas. Além disso, os sistemas especialistas devem adquirir conhecimento novo e modificar o conhecimento antigo, visto que estes derivam da riqueza das bases de conhecimento que eles exploram, sendo extremamente importante que essas bases de conhecimentos sejam as mais completas e precisas possíveis. Normalmente não existe nenhuma codificação padrão para esse conhecimento, existindo apenas nas mentes dos especialistas humanos. Uma maneira de colocar esse conhecimento em um programa é através da interação com o especialista humano, outra maneira é fazer com que o programa aprenda o comportamento especialista a partir de dados brutos.

Um sistema especialista emite respostas utilizando três modos diferentes:

- 1) Primeiro modo: O sistema determina um universo onde a resposta poderia ser encontrada, por exemplo, uma empresa que esteja interessada em pesquisar petróleo. Pelas características geológicas gerais dos continentes, um sistema especialista pode determinar, de maneira geral, onde o

petróleo poderá ser encontrado, sem afirmar de maneira precisa exatamente em quais regiões se encontrará o petróleo. A primeira informação serve apenas para identificar, de maneira ampla, onde será possível encontrar a resposta, isto é, a resposta não estará fora deste universo.

ii) Segundo modo: O sistema é mais preciso e determina um resultado final, enfocando um valor ou um pequeno número de respostas no conjunto de valores possíveis.

iii) Terceiro modo: O sistema não emite resultado nenhum, apenas interage com o profissional que o está usando. O funcionamento é como em um diálogo de dois profissionais, obrigando o primeiro a ir refletindo sobre determinadas consequências, que serão produtos de sua determinada decisão.

Inicialmente, cada sistema especialista era criado a partir do zero, em geral na linguagem *LISP*. Porém, após vários sistemas serem desenvolvidos, ficou claro que estes tinham muito em comum, em particular, o fato de serem constituídos como um conjunto de representações declarativas (em suas maioria, regras) combinadas com um interpretador dessas representações, sendo possível separar o interpretador do conhecimento específico do domínio da aplicação e assim criar um sistema que poderia ser usado para elaborar novos sistemas especialistas através da adição de novos conhecimentos, correspondentes ao novo domínio do problema. Os interpretadores resultantes são chamados de *shells*. Um exemplo influente de *shell* é o *EMYCIN*, derivado do *MYCIN*.

Atualmente existem vários novos *shells* comercialmente disponíveis, que servem de base para muitos sistemas especialistas que estão sendo desenvolvidos. Com esses *shells*, a representação do conhecimento e o raciocínio são muito mais flexíveis do que no *MYCIN*. Eles tipicamente suportam regras, *frames*, sistemas de manutenção da verdade e uma série de outros mecanismos de raciocínio.

Os primeiros *shells* de sistemas especialistas ofereciam mecanismos para a representação do conhecimento, raciocínio e explicações. Mais tarde foram acrescentadas ferramentas para a aquisição de conhecimento. Mas, com o aumento das experiências destes sistemas para solucionar problemas do mundo real, ficou claro que os *shells* dos sistemas especialistas precisavam fazer algo a mais, como facilitar a integração dos sistemas especialistas com outros tipos de programas. Os sistemas especialistas não podem operar no vazio, como também não podem os humanos. Eles precisam acessar bancos de dados, e esse acesso precisa ser controlado como em outros sistemas, estando, em geral embutidos em programas aplicativos maiores, que usam basicamente técnicas de programação convencional. Então, uma das características importantes que um *shell* precisa ter é uma interface entre o sistema especialista, escrita com o *shell* e que seja fácil de usar, e um ambiente de programação maior e provavelmente mais convencional.

5. SISTEMA COMPUTACIONAL APLICADO NO ESTUDO PROBABILÍSTICO DO FENÔMENO DA FADIGA

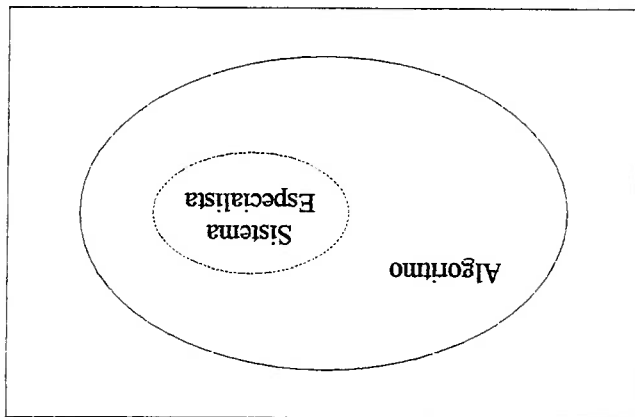
5.1 Características Gerais

Programas para a avaliação da propagação da trinca em fadiga e determinação da probabilidade de falha, sem a implementação de uma inferência, são mais comuns de serem encontrados, como visto em (DILLSTROM, 2000) e em (HAN; LIU; DAI, 1998). Já este estudo desenvolve, um sistema capaz de calcular a probabilidade de falha de componentes mecânicos sujeitos a falharem por fadiga, abordando de maneira probabilística as variáveis básicas inerentes ao fenômeno. Além da probabilidade de falha à fadiga, este sistema fornece o valor da tensão ou do número de ciclos admissível ao qual o componente poderá ser submetido para uma probabilidade de falha desejada, bem como permite a troca do material do componente analisado para a obtenção de uma probabilidade de falha mais adequada ao projeto.

De acordo com as definições descritas anteriormente, o sistema computacional desenvolvido é classificado como um sistema especialista de projeto, de segundo modo e com encadearamento para frente. Deve-se salientar que este sistema pode ser subdividido em duas partes, sistema convencional, ou algoritmizado, e o sistema especialista propriamente dito, sendo que este último atua dentro do primeiro, como esquematisa a Figura 5.1. Isto porque, para a obtenção da probabilidade de falha de uma estrutura, como apresentado no Capítulo 2, a equação de estado limite deve ser solucionada utilizando o método probabilístico condicionado, necessitando-se assim de um algoritmo.

Para o desenvolvimento do sistema em estudo verificou-se que não seria necessário o uso de um *shell* para realizar a implementação das regras e conhecimentos inerentes ao tema, já que estes se apresentam em um número reduzido, sendo perfeitamente possível executar esta tarefa de forma automatizada. Outra questão que deve ser ressaltada é que a aquisição do conhecimento do sistema, como por exemplo, dados de materiais, não poderá ser feita de forma iterativa, sendo possível somente com uma intervenção em seu código fonte. Tais considerações não influem na caracterização do sistema como sendo especialista, apesar de se tornar relativamente simplificado, pois este possui uma grande quantidade de conhecimentos de um especialista humano e realiza inferências especializadas sobre um determinado assunto, no caso vida em fadiga, mesmo que sejam automatizadas.

Fig. 5.1: Esquema da interação entre o algoritmo e o sistema baseado no conhecimento, ou especialista.



5.2 Definição da Função de Estado Limite

Para um ciclo de carregamento o dano pode ser expresso pela seguinte

formulação:

$$\delta = \frac{1}{N(S_a)} \quad (5.1)$$

onde:

δ ... dano acumulado em um ciclo com tensão cíclica de amplitude S_a ;

$N(S_a)$... número de ciclos que o material suportaria sob ação da tensão cíclica

S_a .

Considerando a curva $S-N$ na formulação do dano δ pode-se escrever a

relação abaixo:

$$\delta = \frac{K_s}{S_a^b} \quad (5.2)$$

sendo b o coeficiente angular da reta, ou seja, a inclinação da curva $S-N$ no domínio

logarítmico.

Considerando-se a tensão atuante na estrutura variável ao longo do tempo,

pode-se afirmar que o dano acumulado na estrutura ao longo de n ciclos de tensão de

amplitude S_{ai} será:

$$\Delta\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (5.3)$$

onde:

$$\delta = \frac{K_s}{S_a^b}$$

Por fim, aplicando-se o critério de falha linear do dano acumulado, tem-se

que a estrutura falharia quando:

$$1 - \frac{1}{S_a^b} \sum_{i=1}^n K_s \leq 0 \quad (5.4)$$

Levando-se em conta a natureza probabilística das variáveis envolvidas na equação acima, tem-se que a função de estado limite que governa o fenômeno do colapso por fadiga pode ser escrita na forma:

$$Z^s = g^s(x) = \Delta - \frac{1}{I} \sum_p^i S_m^s K^s \quad (5.5)$$

considerando as seguintes variáveis probabilísticas aleatórias:

Δ ... valor crítico do dano acumulado para o qual ocorrerá falha por fadiga;

K^s ... coeficiente da curva $S-N$;

$\sum^i S_m^s$... somatória de amplitude de tensões atuantes na estrutura no período

estudado.

Justifica-se tal consideração pois, a partir dos dados experimentais utilizados para definição da curva $S-N$, pode-se realizar um estudo estatístico visando a definição do intervalo de confiança para a regressão utilizada na representação do diagrama $S-N$. Porém, para realizar a análise de confiabilidade através da aplicação dos métodos de nível II avançados é necessário estimar a função densidade de probabilidade das variáveis envolvidas no equacionamento da função de estado limite.

Souza (1994) cita um procedimento empregado na definição da função densidade de probabilidade relacionada a uma determinada curva $S-N$, sendo este baseado na hipótese de que o coeficiente angular b da reta $\log N \times \log S$ é constante, sendo toda a variabilidade da curva associada a constante K^s e assume-se sua função de densidade de probabilidade como log-normal, caracterizado por um valor esperado e uma variância.

O valor crítico do dano acumulado Δ e a tensão equivalente atuante também são tratados como variáveis aleatórias visto sua característica de apresentar dispersões em suas magnitudes.

Portanto, a estrutura ou componente mecânico irá falhar por fadiga quando:

$$g_s(x) \leq 0 \quad (5.6)$$

Aplicando-se o método probabilístico condicionado avançado, como explicado anteriormente, é possível determinar a probabilidade de falha da estrutura, através de seu índice de confiabilidade, bem como sua vida, expressa em número de ciclos de carregamento, ou ainda o máximo carregamento admissível, caso seja fixado um índice de confiabilidade alvo, para definir a vida operacional do componente.

Para a análise de confiabilidade deve-se, preferencialmente, considerar as tensões atuantes na estrutura como uma variável aleatória, à qual pode ser associada uma função densidade de probabilidade. Dessa forma, a somatória de tensões que representa o dano acumulado, na eq.(5.5), pode ser representada por uma distribuição normal, cujos parâmetros são definidos a partir da função densidade de probabilidade da amplitude da tensão.

Uma segunda forma de representar esta somatória é transformá-la em uma tensão equivalente, definida a partir do histograma de amplitude de tensões atuantes no componente em estudo, ao longo de um determinado número de ciclos de carregamento, tal como indicado na Figura 5.2. Essa análise é válida para a definição da tensão média, baseando-se na hipótese de que o carregamento externo tenha natureza estacionária.

Vale salientar que o sistema que será desenvolvido não realizará este cálculo, sendo do usuário o programa a responsabilidade de determinar a amplitude de tensão equivalente, que será utilizada nos estudos probabilísticos. Após as considerações descritas acima, a equação de estado limite que governa o fenômeno de fadiga de um componente, considerando o processo de alto ciclo, pode ser escrita da seguinte maneira (ASSAKKAF, AYYUB, 1999):

$$N^{eq} = \sum N_i$$

N_i ... número de vezes em que se observa a ocorrência de ΔS_i , sendo

longo de N ciclos de carregamento.

ΔS_i ... as magnitudes das amplitudes de tensões atuantes no componente ao

sendo:

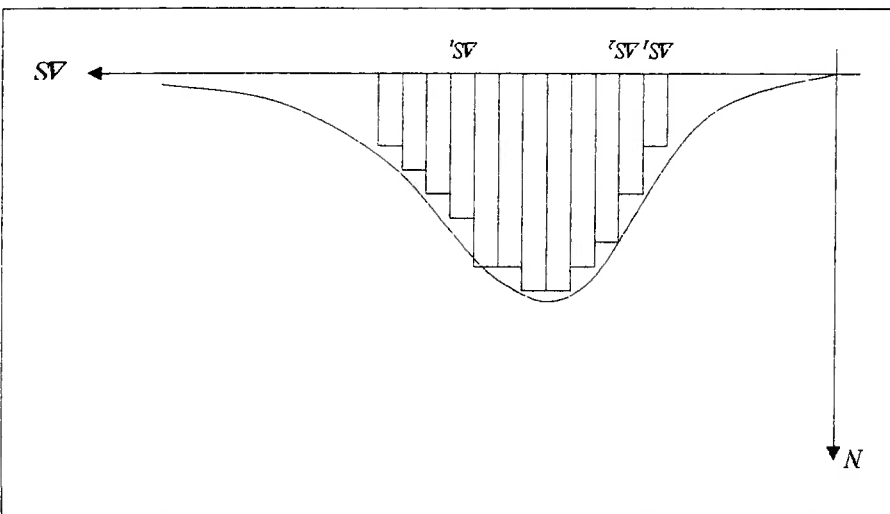
$$\Delta S^{eq} = \sqrt[b]{\sum N_i \Delta S_i^b} \quad (5.7)$$

seguinte forma:

A equação para o cálculo desta amplitude de tensão equivalente é escrita da

Distribuição das faixas das amplitudes de tensões que atuam por um determinado número de ciclos.

Fig. 5.2:



onde f é um fator associado a incertezas existentes na tensão equivalente que atua na estrutura, advindo de incertezas associadas ao próprio carregamento, bem como ao método de avaliação das tensões.

$$Z_s = g_s(x) = \frac{\Delta K_s}{N} - \frac{f S_b}{q} \quad (5.8)$$

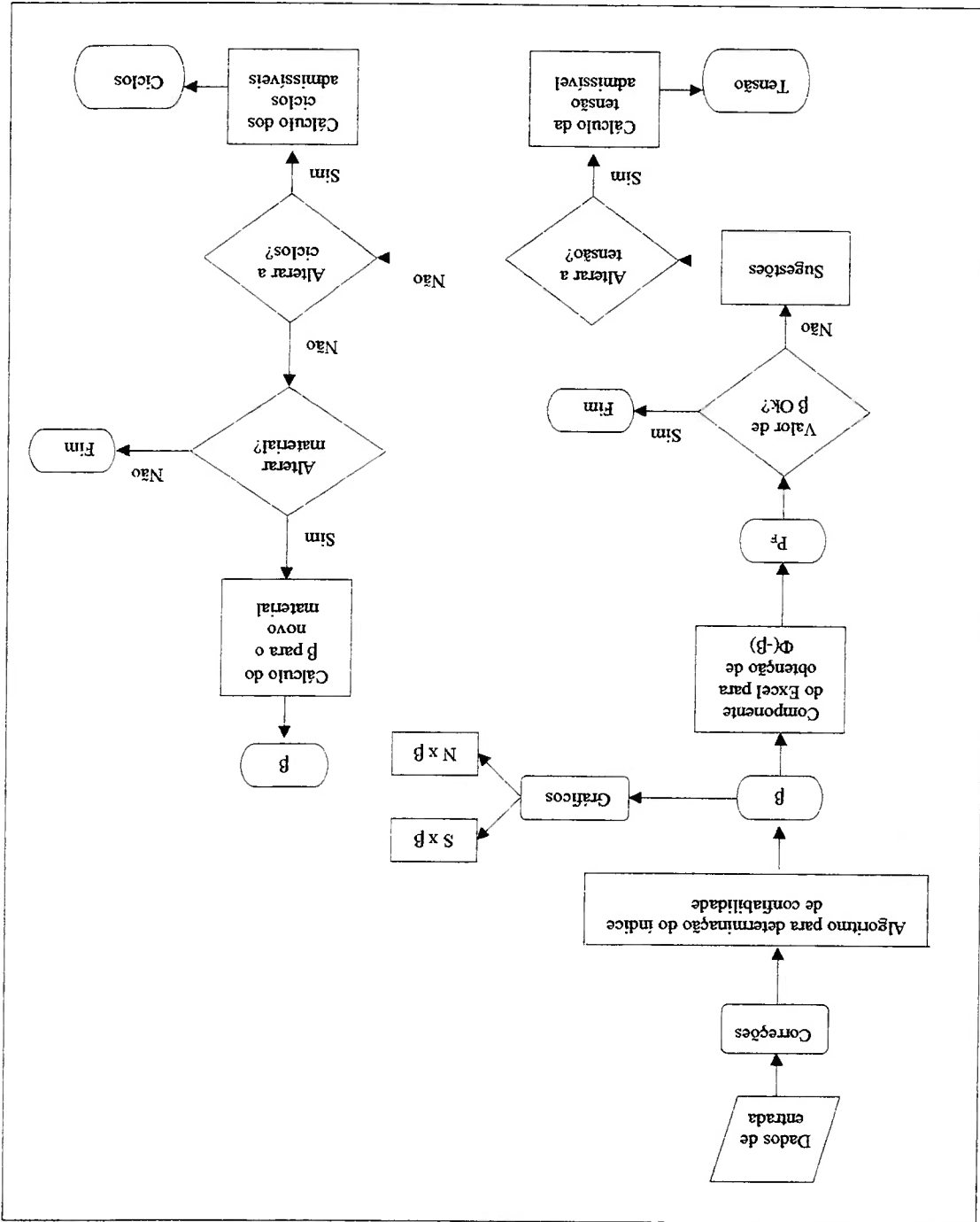
5.3 Variáveis de Entrada e Saída

As variáveis de entrada deste sistema serão o valor crítico do dano Δ , a constante da curva $S-N$ do material K_S , o coeficiente angular da reta b , o carregamento, na forma de tensão equivalente S_{eq} , o fator f que associa incertezas à tensão equivalente e o número de ciclos de carregamento N ao qual a estrutura analisada estará submetida. Cada uma das variáveis é expressa através de suas médias e desvios padrão, excetuando-se o número de ciclos, que é considerado um valor determinístico.

O sistema fornecerá, como variáveis de saída, o índice de confiabilidade β , a probabilidade de falha, a tensão e o número de ciclos admissíveis para um valor pré-estabelecido de β e gráficos ilustrando a relação entre a probabilidade de falha ao decorrer dos ciclos de carregamento ou entre a tensão atuante no componente e o índice de confiabilidade.

A Figura 5.3 apresenta o fluxograma de raciocínio do sistema especialista em questão para uma melhor visualização do que foi detalhado acima.

Fig. 5.3: Fluxograma do de raciocínio do sistema computacional.



5.4 Algoritmo de Cálculo da Probabilidade de Falha

A partir do que foi apresentado nos itens anteriores, pode-se agora definir quais métodos serão empregados na implementação do sistema computacional para a determinação da probabilidade de falha de um componente mecânico sujeito a apresentar falha por fadiga. Será considerado neste trabalho o processo de fadiga de alto ciclo por ser um método bem abrangente no campo da engenharia mecânica, como descrito em detalhe no Capítulo 2.

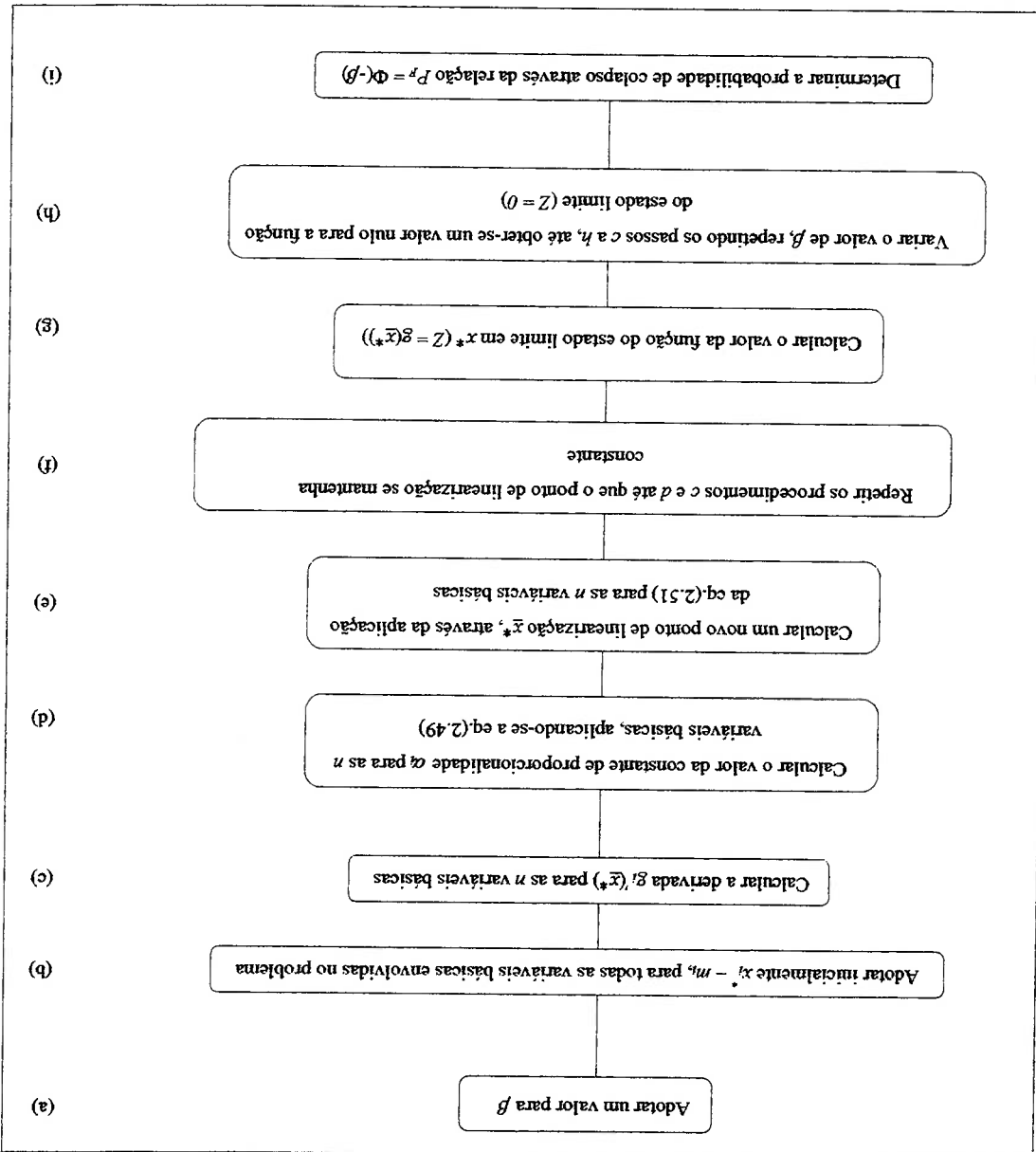
Para representar o acúmulo de dano em fadiga será considerada a forma tradicional da regra de Palmgren-Miner, baseada na avaliação linear do dano, levando-se em conta as possíveis variações do valor médio do dano acumulado crítico, que representa a condição de falha por fadiga, tradicionalmente considerado como sendo igual a 1, visto esta ser uma maneira ainda muito utilizada na representação do efeito do dano causado pelo fenômeno da fadiga, como se observa em (ANG, 2001), (COLOMBI, DOLINSKI, 2001), (SIDDIQUI, AHMAD, 2001), (TOVO, 2000), (TOVO, 2001), e (XIE, 1999). Devido à dificuldade em se determinar e implementar computacionalmente os fatores de correção para todos os efeitos que influem na vida em fadiga de um componente, este estudo considerará apenas a correção quanto a dispersão dos dados, ficando a cargo do projetista realizar, fora do programa, as demais correções que sejam relevantes ao seu estudo.

A equação de estado limite utilizada no desenvolvimento do algoritmo do sistema computacional para avaliação da probabilidade de falha por fadiga é a proposta por Assakkaf, Ayyub (1999), mostrada no item 5.2, pois esta atribui maior estabilidade na convergência do algoritmo, evitando, por exemplo, divisões por zero ou números muito próximos de zero.

No que diz respeito ao tipo de distribuição das variáveis envolvidas no cálculo da probabilidade de falha, o sistema desenvolvido neste trabalho utilizará apenas as distribuições Normal e Log-Normal para caracterizá-las, visto que estes dois tipos de distribuição representam, de forma satisfatória, boa parte dos casos (WIRSCHING, 1984).

De acordo com as referências (ANG et al., 2001), (CASTILLO et al., 1999), (MADSEN; KRENK; LIND, 1986), (MELCHERS, 1987), (SHEN, 1999), (SOUZA, 1994) e (SUNDARARAJAN, 1995) observa-se que o modelo probabilístico de Nível II é o mais utilizado na determinação da confiabilidade de problemas de colapso estrutural, sendo sua resolução relativamente simples. Portanto, para a resolução numérica da equação de estado limite e obtenção do ponto de mínima distância da superfície da falha, será utilizado o método probabilístico condicionado avançado de primeira ordem, juntamente com as devidas correções para quando as variáveis não apresentarem distribuições normais, sendo seu algoritmo visto no item 3.3.1.2 e ilustrado na Figura 5.4 em forma de fluxograma. Ressalta-se que as variáveis básicas que regem o fenômeno da fadiga de estruturas mecânicas não são correlacionadas entre si, portanto esta correção não será incluída neste trabalho (SOUZA, 1994).

Fluxograma do algoritmo empregado na metodologia de cálculo da probabilidade de colapso. Fig. 5.4:



5.5 Limitações do Sistema Computacional

Uma ressalva importante a ser feita é de que este sistema não permitirá que o usuário tenha a liberdade de escolher qual distribuição descreverá cada uma das variáveis básicas envolvidas no cálculo do índice de confiabilidade, sendo imposto a ele a distribuição normal para o fator f , que associa incertezas à tensão equivalente, e a distribuição log-normal para o valor crítico do dano Δ , para a constante da curva $S-N$ do material K_S e também para a tensão equivalente S_{eq} , isto porque, de uma forma geral, estas distribuições representam bem estes tipos de variáveis que descrevem o fenômeno da fadiga, sendo usualmente empregadas em referências bibliográficas que tratam da análise probabilística do colapso por fadiga, tais como (SOUZA, 1994) e (WIRSCHING, 1984).

Outra deficiência que deve ser comentada deste sistema é em relação aos problemas de *over-flow*, isto é, estouro de memória, que ocorrem principalmente quando o número de ciclos, ou de tensão, atuante na estrutura apresenta um valor muito elevado.

Em sistemas especialistas, o componente do programa responsável pela geração das inferências relativas às respostas obtidas pelo usuário é chamado de *shell*. No início deste estudo seria usado o *shell Sima*, desenvolvido pela Universidade Federal do Ceará (2001), em conjunto com o *Delphi*. Porém, após definir o *Visual Basic* como linguagem de programação, foi visto a possibilidade de se utilizar o *shell Clips*. Por outro lado, detectou-se que seria possível realizar inferências (sugestões) sem o uso de um *shell*, o que facilitaria de certa forma a elaboração do sistema computacional, já que as regras seriam colocadas diretamente no código do sistema. Desta forma é relevante ressaltar que as inferências tornam-se

porém este cairia no mesmo caso citado anteriormente para o *Matlab*. instalado em seu computador. Testou-se também o emprego do *software Excel*, empregar o *software Matlab*, haveria a necessidade do usuário possuir tal programa um *software* executável para utilização em qualquer computador, e, no caso de se porém, esta opção divergiria do propósito inicial deste trabalho que é a concepção de a possibilidade de utilizar o *software Matlab* em conjunto com a linguagem C++, respeito aos comandos matemáticos, como a função exponencial. Estudou-se também apresentou algumas dificuldades em sua utilização, principalmente no que diz que outras de sua categoria como, por exemplo, a linguagem *Delphi 6*, que *Basic 6*. Tal linguagem se mostrou mais adequada às necessidades deste trabalho do tarefa foi desenvolvido na linguagem de programação orientada a objeto *Visual O sistema para determinar a vida de componentes sujeitos a falharem por*

linguagem do algoritmo quanto para o *shell* do sistema especialista. MADEY, 1995). Portanto foram verificadas inúmeras possibilidades, tanto para a escolha errada poderá trazer resultados indesejáveis (STYLIANOU; SMITH, ser utilizado no sistema é uma das principais decisões a serem feitas, pois uma algoritmizado e no *shell* no qual será feito o sistema especialista. A escolha do *shell* a programação mais adequada que é utilizada no desenvolvimento do sistema Neste estudo, algo importante de ser salientado, é a escolha da linguagem de

6.1 Seleção da Linguagem

6. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

dependentes do algoritmo, ao contrário do caso de serem feitas em um *shell*. Justifica-se não usar um *shell* neste sistema, pois, o número de regras colhidas com um especialista humano para a realização das inferências é baixo, como descrito no capítulo anterior. Caso o usuário não esteja satisfeito com o valor da probabilidade de falha obtido em seu projeto e queira reduzi-la, este poderá decidir dentre três opções. A primeira opção sugere uma redução do valor da tensão atuante na estrutura, que implicará ou em uma diminuição do carregamento externo aplicado sobre a mesma, o que não é interessante em um projeto, já que se supõe que tais cargas são requisitos pré-fixados, ou em um incremento dimensional do componente, que provavelmente será a solução mais coerente. A segunda opção é diminuir o número de ciclos ao qual a estrutura estará submetida à tensão atuante, o que consequentemente acarretará em uma redução da vida do componente. Por fim, a última opção do projetista é a alteração do material utilizado na estrutura, porém, tal decisão afetará no custo envolvido no projeto, visto que materiais mais resistentes apresentam, geralmente, valores mais elevados.

6.2 Sub-Rotinas

A resolução do método probabilístico condicionado avançado de primeira ordem (FOSM), bem como suas respectivas correções para variáveis que apresentam distribuições não normais, são realizadas internamente no programa através do algoritmo que foi apresentado no Capítulo 3, e detalhado pelo fluxograma mostrado na Figura 5.4.

A pesquisa da normal reduzida Φ do negativo do índice de confiabilidade $-\beta$, que tem como finalidade a determinação da probabilidade de falha, é feita através de um componente do *software Excel* aplicado ao *Visual Basic*.

A implementação gráfica é realizada através de ferramentas disponíveis na linguagem de programação *Visual Basic 6*.

6.3 Interface

A interface com o usuário foi desenvolvida de forma que a utilização do sistema seja a mais intuitiva e clara possível. Além disso, são apresentados gráficos para que o usuário disponha de dados que ilustrem ao máximo o seu projeto, como por exemplo, probabilidade de falha *versus* o número de ciclos. Como já foi citado, este tipo de sistema apresenta uma interação constante com o usuário, o que reforça a necessidade de se ter uma boa interface. A seguir, cada uma das telas que compõe o sistema é apresentada juntamente com suas características e funções mais importantes.

A tela principal do sistema para calcular vida em fadiga, desenvolvido neste trabalho, é apresentada em detalhe na Figura 6.1. Nota-se em seu *layout* uma divisão entre dados de entrada e dados de saída, visando facilitar a compreensão do usuário.

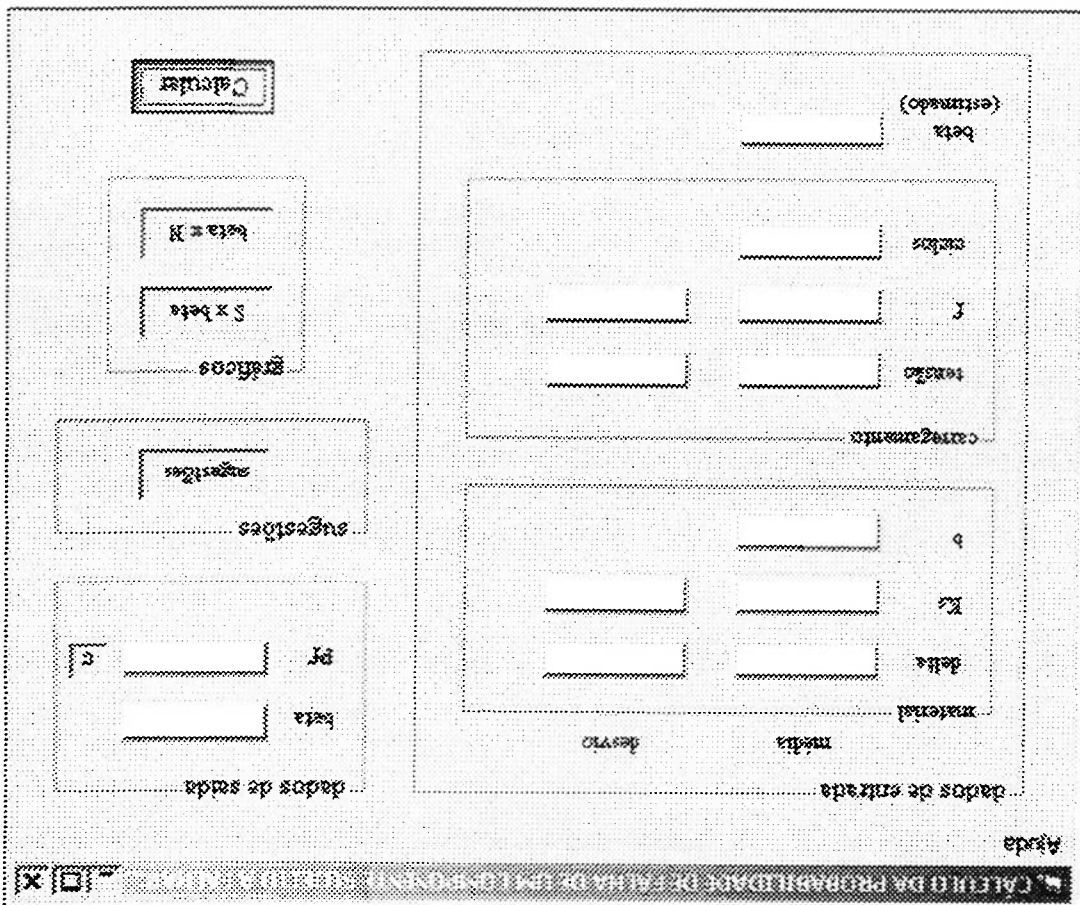


Fig. 6.1: Tela principal do sistema desenvolvido para cálculo de vida em fadiga.

Os dados de entrada são subdivididos em relação ao material e ao carregamento atuante na estrutura, ambos na forma de média e desvio padrão, pois, como visto no item 3.3, são os dados necessários para se realizar o cálculo da vida em fadiga através do método probabilístico condicionado avançado. No que se refere aos dados de entrada do material o usuário deverá fornecer ao programa as médias e os desvios padrão do valor crítico do dano Δ da constante da curva tensão *versus* o número de ciclos K_S , bem como o coeficiente angular da reta b , sendo este último tratado como uma constante, como dito anteriormente no item 5.2. Já no que se refere ao carregamento, os dados que o usuário deverá fornecer são as médias e desvios da tensão equivalente atuante S_{eq} , do fator f que associa incertezas à tensão equivalente e o número de ciclos N ao qual a estrutura analisada estará submetida. Ressalta-se que este programa não verifica se a tensão equivalente fornecida está abaixo do limite de fadiga, bem como possíveis alterações na curva $S-N$ em função do tempo, como por exemplo, a influência da corrosão, sendo de responsabilidade do usuário a realização destas análises. Além disso, o programa necessita de uma estimativa do valor do índice de confiabilidade β para iniciar a iteração que determinará o valor de β o qual ocorrerá a falha, como detalhado no fluxograma apresentado na Figura 5.4. Deve-se deixar claro que quanto melhor for esta estimativa inicial, isto é, mais próxima do valor de β o qual ocorre a falha, mais rapidamente ocorrerá a convergência do programa. Normalmente, os valores de β encontram-se em uma faixa que varia de -10 a $+10$, sendo aconselhável que a estimativa inicial também esteja entre estes valores.

Para o sistema calcular o valor de β , após o usuário ter fornecido os dados de entrada listados acima de forma adequada, principalmente no que diz respeito às unidades, deve-se clicar no botão *Calcular*. Rapidamente o programa fornecerá, nos campos localizados nos dados de saída, os valores do índice de confiabilidade e , clicando no botão c , a probabilidade de falha correspondente. Após o sistema determinar o valor do índice de confiabilidade e de sua respectiva probabilidade de falha, o usuário poderá optar em receber sugestões do programa, para obter possíveis melhorias no projeto, clicando no botão *Sugestões*. Posteriormente aparecerá na tela o primeiro questionamento do sistema ao usuário como mostra a Figura 6.2. Tal

questão refere-se à satisfação do projetista quanto ao valor do β determinado para a condição fornecida.

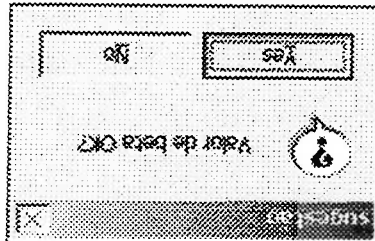


Fig. 6.2:

Questão referente à satisfação do projetista quanto ao valor do índice de confiabilidade.

Como visto na Figura 6.2, o usuário terá duas possibilidades de resposta à pergunta que lhe foi feita sobre o valor de β . Caso a resposta seja positiva, isto é, o projetista esteja satisfeito com o valor apresentado de β , o programa voltará à tela principal e não fará mais inferências sobre a análise. Por outro lado, se a resposta for negativa, isto é, o valor do índice de confiabilidade não satisfaz as condições de segurança para a aplicação do componente em estudo, o sistema irá sugerir a primeira possibilidade de alteração no projeto para se obter um valor mais elevado de β , que é a redução da tensão, como mostra a Figura 6.3.

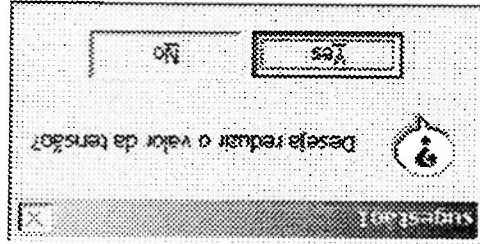


Fig. 6.3:

Primeira sugestão para a obtenção de um valor mais elevado do índice de confiabilidade.

O usuário terá a liberdade, então, de aceitar ou recusar a sugestão de se reduzir a tensão atuante no componente em estudo. Caso a resposta seja afirmativa, uma nova tela se abrirá, como ilustra a Figura 6.4. Nesta tela, o projetista terá que informar ao sistema qual o valor do índice de confiabilidade desejado para o projeto, e, então, clicar no botão *Ok* para a realização do cálculo da amplitude da tensão equivalente admissível para se obter o valor de β desejado.

Por outro lado, se o usuário não concordar em reduzir a tensão equivalente atuante no componente do projeto, o sistema realizará outra sugestão, que é a de reduzir o número de ciclos ao qual a estrutura estará sob ação da tensão original fornecida na tela principal, como mostra a Figura 6.6.

Fig. 6.5: Ilustração do método utilizado na iteração de redução de valor da tensão.

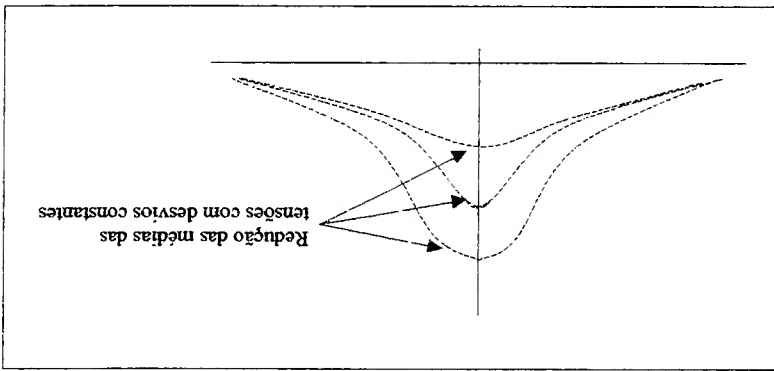
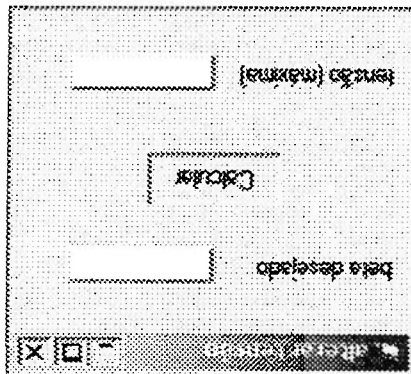


Figura 6.5.

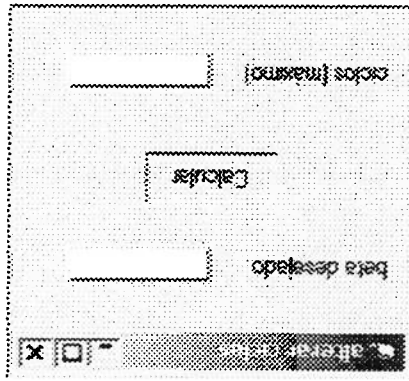
Observa-se que, neste caso em que o sistema realiza a redução da tensão equivalente a cada iteração, até se obter o valor de β desejado, o desvio padrão da tensão não se altera, assumindo, portanto, uma dispersão constante como mostra a

Fig. 6.4: Tela do sistema no caso do usuário aceitar reduzir a tensão atuante no componente para se obter um valor do índice de confiabilidade maior



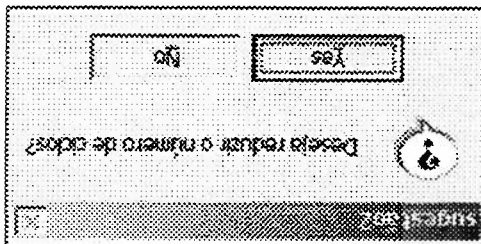
Se o usuário não concordar em reduzir o número de ciclos de carregamento, o sistema irá sugerir a troca do material do componente para tentar elevar o valor de β , como ilustra a Figura 6.8.

Fig. 6.7: Tela do sistema no caso do usuário aceitar reduzir o número de ciclos de carregamentos no componente para se obter um valor do índice de confiabilidade maior.



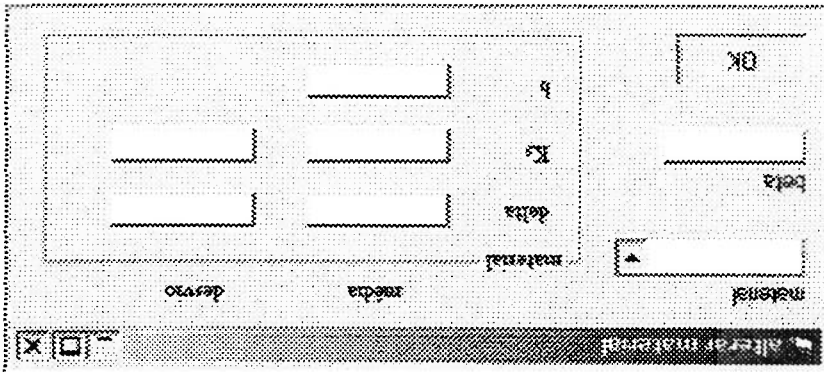
Novamente, se o usuário concordar com a sugestão fornecida pelo sistema, uma nova tela aparecerá, conforme a Figura 6.7. Como no caso anterior, o usuário terá que informar ao sistema qual o valor do índice de confiabilidade desejado para que o mesmo calcule o número máximo de ciclos admissíveis para que se atinja este valor de β , dada uma tensão equivalente. Para dar início ao cálculo basta clicar no botão *Ok*, da mesma forma que no caso anterior.

Fig. 6.6: Segunda sugestão para a obtenção de um valor mais elevado do índice de confiabilidade.



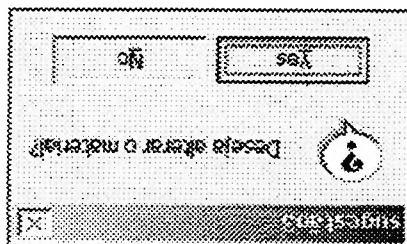
Por fim, caso o projetista não concorde com nenhuma das sugestões dadas pelo sistema, o mesmo fornecerá uma caixa de diálogo informando que não há mais sugestões a serem dadas, como esta ilustrado na Figura 6.10 e o programa se encerrará, retornando à tela principal.

Fig. 6.9: Tela do sistema no caso do usuário aceitar alterar o material de projeto para se obter um valor do índice de confiabilidade maior.



Caso a resposta do projetista seja *Sim*, a tela mostrada na Figura 6.9 aparecerá para que seja selecionado um material disponível na biblioteca do sistema na tentativa de se elevar o valor do índice de confiabilidade do projeto. Para se efetuar o cálculo e obter o novo valor de β basta clicar em *Ok*. Vale ressaltar que, neste caso, o usuário deverá ficar atento às unidades utilizadas pelo programa para descrever os dados dos materiais para que não sejam obtidos resultados incoerentes.

Fig. 6.8: Terceira sugestão para a obtenção de um valor mais elevado do índice de confiabilidade.



No que diz respeito aos gráficos, o usuário seleciona uma das duas opções disponíveis na tela principal, número de ciclos ou tensão *versus* o índice de confiabilidade β , e, em seguida, fornece a faixa de valores de tensão ou ciclos, para desajuda em sua análise, como mostra a Figura 6.11 (a) e (b) respectivamente, para posteriormente obter a visualização gráfica do projeto.

Fig. 6.10: Caixa de diálogo informando que as sugestões chegaram ao fim.

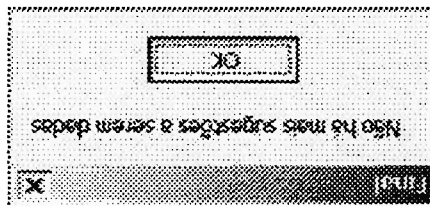


Fig. 6.11 (a): Tela onde o usuário fornece a faixa de valores de tensão que será analisada graficamente.

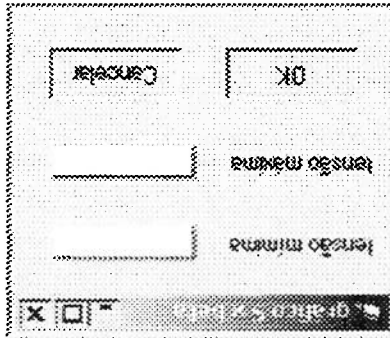
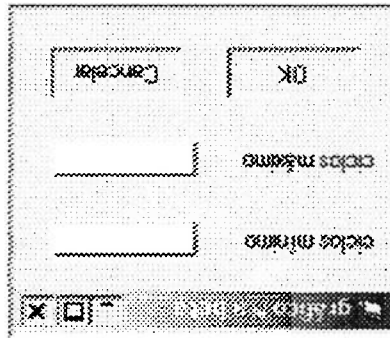


Fig. 6.11 (b): Tela onde o usuário fornece a faixa de valores de ciclos que será analisada graficamente.



É de suma importância ressaltar que os gráficos gerados por este sistema são plotados a partir de 11 pontos dentro da amplitude fornecida pelo usuário. Outro detalhe importante é de que a dispersão das variáveis permanece constante. A visualização do gráfico em si é feita através de um caso exemplo, apresentado no próximo subcapítulo.

6.4 Validação do Programa

Para validar o sistema computacional desenvolvido neste trabalho, o qual aplica-se o método probabilístico condicionado avançado para a determinação da probabilidade de falha em projetos mecânicos sujeitos a sofrerem colapso por fadiga, foram realizadas três análises comparativas, baseadas no trabalho de Assakkaf; Ayub (1999), o qual estuda probabilisticamente detalhes estruturais encontrados em projetos navais. Os dados inerentes aos detalhes analisados, tais como as características dos materiais, foram extraídos do *Ship Structure Committee – SSC 318 (MUNSE, 1983)*.

Os dados em comum utilizados nas análises são o número de ciclos ao qual o carregamento estará aplicado N , o valor da estimativa inicial de β , as médias do valor crítico do dano Δ e do fator de incerteza da tensão atuante f , bem como seus respectivos desvios padrão. Os valores das variáveis em comum citados acima são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1:
Variáveis em comum a todas as análises.

Variáveis	Média	Desvio Padrão
Δ	1	0,48
f	1	0,10
N (ciclos)	10^5	***
β	1	***

Os valores médios utilizados para Δ e para o fator de incerteza f , bem como seus desvios padrão, foram adotados segundo o trabalho de Souza (1994). Já as médias e desvios padrão da tensão S e da constante do material K_S , bem como o número de ciclos N e o valor do coeficiente angular da curva da fadiga b foram extraídos do trabalho de Assakkaf, Ayub (1999). As Figuras 6.12 (a), (b) e (c)

mostram os detalhes a serem analisados bem como seus respectivos dados. Vale salientar que o coeficiente de variação da constante K_S é igual para todos os casos e tem valor igual a 0,4.

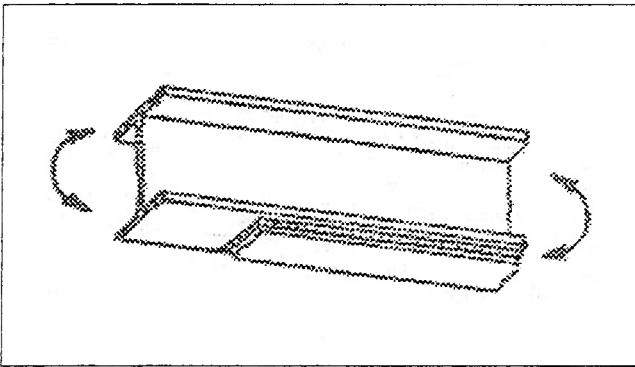


Fig. 6.12 (a):
 Detalhe 1: $b = 3,278; K_S = 2,504 \cdot 10^{12}; \sigma_K = 1,002 \cdot 10^{12}, S = 48,00 \text{ MPa}; \sigma_S = 4,80 \text{ MPa}$.

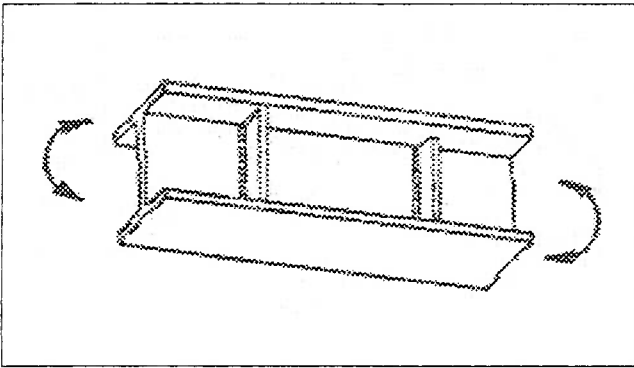


Fig. 6.12 (b):
 Detalhe 2: $b = 4,172; K_S = 9,085 \cdot 10^{14}; \sigma_K = 3,634 \cdot 10^{14}, S = 54,81 \text{ MPa}; \sigma_S = 5,48 \text{ MPa}$.

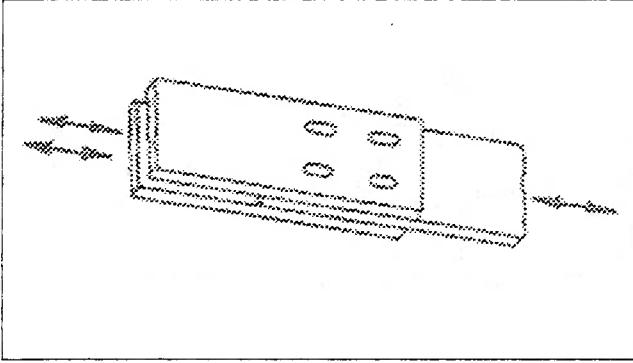


Fig. 6.12 (c):
 Detalhe 3: $b = 5,277; K_S = 3,054 \cdot 10^{16}; \sigma_K = 1,222 \cdot 10^{16}, S = 62,95 \text{ MPa}; \sigma_S = 6,29 \text{ MPa}$.

Feito a definição das variáveis de cada detalhe, o sistema está pronto para determinar a probabilidade de falha associada a cada um destes tipos de detalhes estruturais. A Figura 6.13 ilustra a tela principal do sistema computacional para a análise do detalhe mostrado na Figura 6.12 (a).

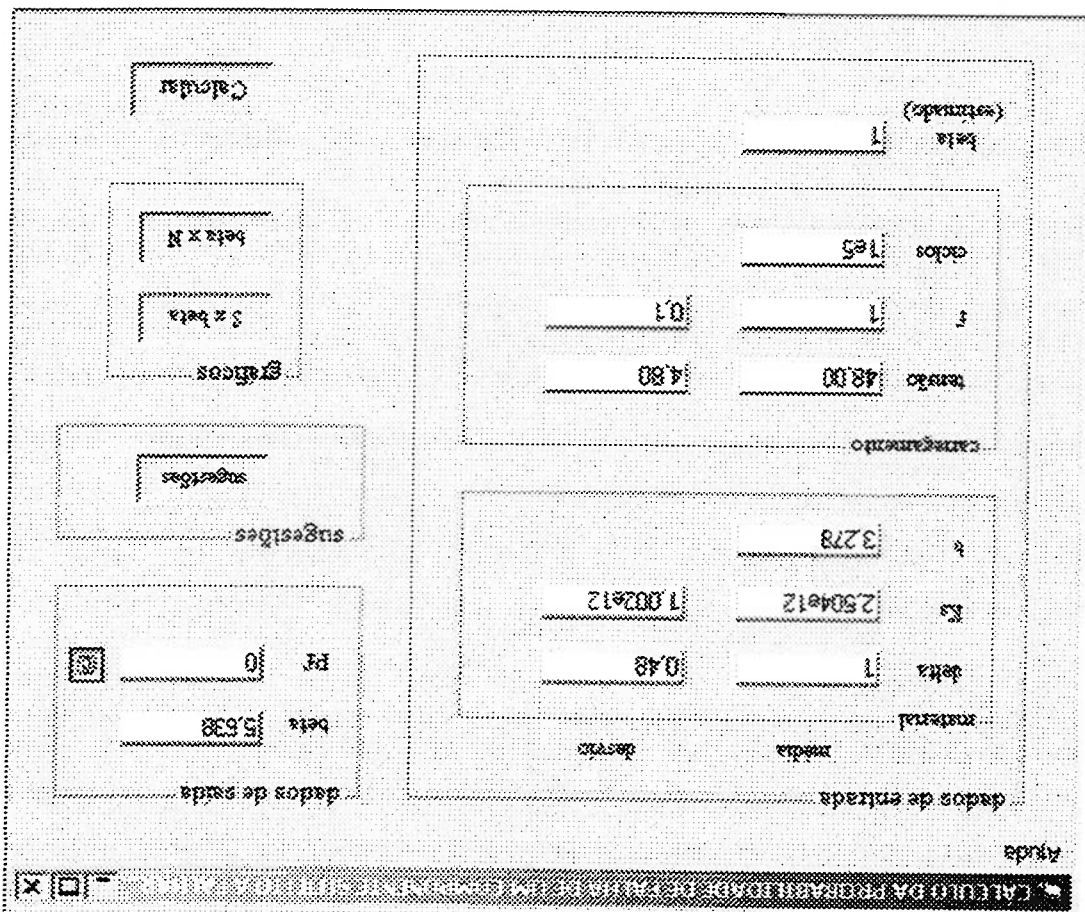


Fig. 6.13: Detalhes da utilização do programa.

A Tabela 6.2 apresenta os valores do índice de confiabilidade β , obtidos através das análises para cada um dos tipos de detalhes apresentados anteriormente, bem como seus erros em relação aos resultados apresentados no estudo de Assakkaf, Ayyub (1999).

Caso o projetista escolha reduzir a tensão atuante, que é a primeira sugestão oferecida, o sistema especialista retornará um valor de tensão de 40,54 MPA ao invés dos 54,81 MPA iniciais. Porém, se a opção escolhida for a redução do número de ciclos de carregamento, o programa fornecerá um valor de 3623720 ciclos, que é o

de ciclos em que a tensão inicial atua ou alterar o material do componente. Para que todos os recursos do sistema sejam validados, será realizada uma análise completa no detalhe número 2. Supondo agora que o número de ciclos ao qual este detalhe estará submetido seja elevado para um valor de 10000000, isto é, 100 vezes maior que o inicial, e que a tensão mantenha o valor de 54,81 MPA. Para estas condições o novo índice de confiabilidade será de 1,76, o que significa uma probabilidade de falha de 3,90%. Caso este valor de probabilidade de falha não satisfaga as condições impostas pelo projeto, o programa, então, é capaz de realizar determinadas inferências para se obter as melhorias desejadas. Por exemplo, se o valor de beta desejado para este detalhe for 3,00, isto é, uma probabilidade de falha de 0,13% o projetista poderá reduzir a tensão atuante na estrutura, reduzir o número

erros. Conclui-se, portanto, que os resultados obtidos pelo sistema computacional desenvolvido neste estudo estão de acordo com os valores apresentados por Assakkaf, Ayyub (1999), conforme se observa através dos reduzidos valores dos

Detalhe	β (sistema)	β (Assakkaf, Ayyub)	Erro (%)
1	5,64	5,60	0,04
2	7,47	7,50	0,01
3	4,79	4,80	0,00

Tabela 6.2: Valores das probabilidades de falha obtidos para cada um dos detalhes analisados.

número máximo ao qual a estrutura suportará o carregamento aplicado de 54,81 MPa mantendo uma probabilidade de falha de 0,13 %.

O usuário também poderá realizar a alteração do material do componente analisado utilizando a biblioteca disponível no sistema a fim de se obter o índice de confiabilidade desejado. A Figura 6.14 mostra a tela do programa com os materiais disponíveis para escolha.

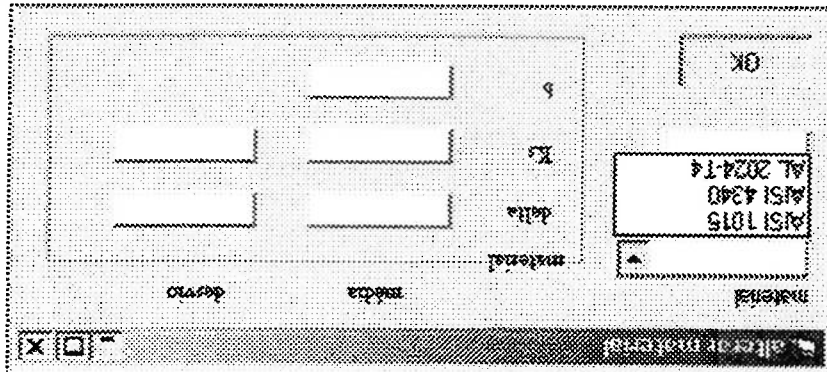


Fig. 6.14: Tela do programa mostrando os materiais contidos em sua biblioteca.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados dos índices de confiabilidade obtidos da análise realizada para os três materiais disponíveis na biblioteca do sistema

Tabela 6.3:

Valores dos índices de confiabilidade obtidos para cada um dos materiais analisados.

material	índice de confiabilidade
ALSI 1015	3,18
ALSI 4340	13,08
AL 2420-T4	7,45

Como dito anteriormente, este sistema dispõe de recurso gráfico para uma melhor visualização da variação da tensão atuante no componente ou do número de

ciclos *versus* o índice de confiabilidade β . Caso o usuário queira, neste caso, realizar uma análise gráfica da variação da tensão em função de β , em uma faixa de 30 MPa a 70 MPa, este deverá fornecer ao sistema os dados através da seguinte tela, como

ilustra a Figura 6.15.

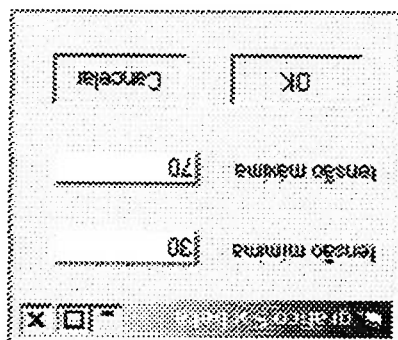


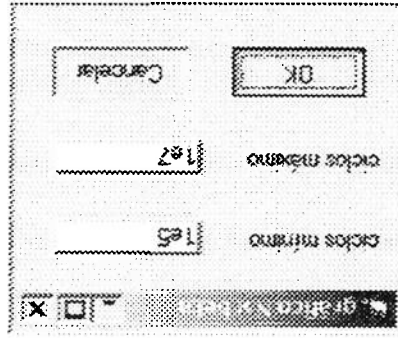
Fig. 6.15:

Dados de entrada para a análise gráfica tensão x beta.

Para estes valores fornecidos pelo usuário, o sistema retorna o gráfico

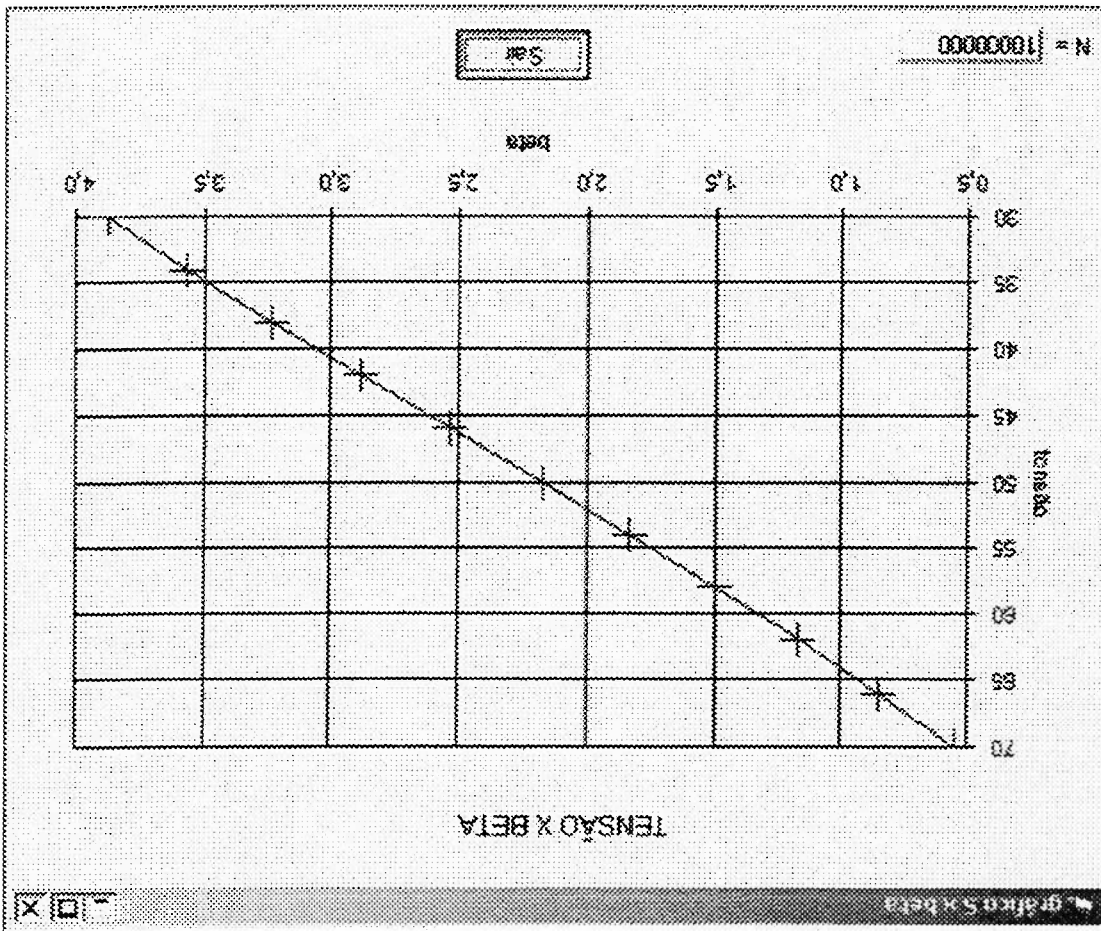
representado na Figura 6.16.

Fig. 6.17: Dados de entrada para análise gráfica beta x ciclos



Por fim, se a análise gráfica de interesse for a de número de ciclos entre 10^5 e 10^7 versus β , o usuário entrará com estes valores da mesma forma que no caso anterior, como mostra a Figura 6.17.

Fig. 6.16: Gráfico tensão x beta para o detalhe número 1 analisado entre 30 e 70 MPa.



Este exemplo mostra claramente a utilidade e importância de se efetuar uma abordagem probabilística em um projeto estrutural sujeito a falhar por fadiga, pois permite que o projetista tenha mais conhecimento das consequências que uma alteração causará ao comportamento da estrutura, fazendo com que este alcance de forma mais segura as metas estabelecidas inicialmente no projeto.

Fig. 6.18: Gráfico beta x ciclos para o detalhe número 1 analisado entre 10^5 e 10^7 ciclos.

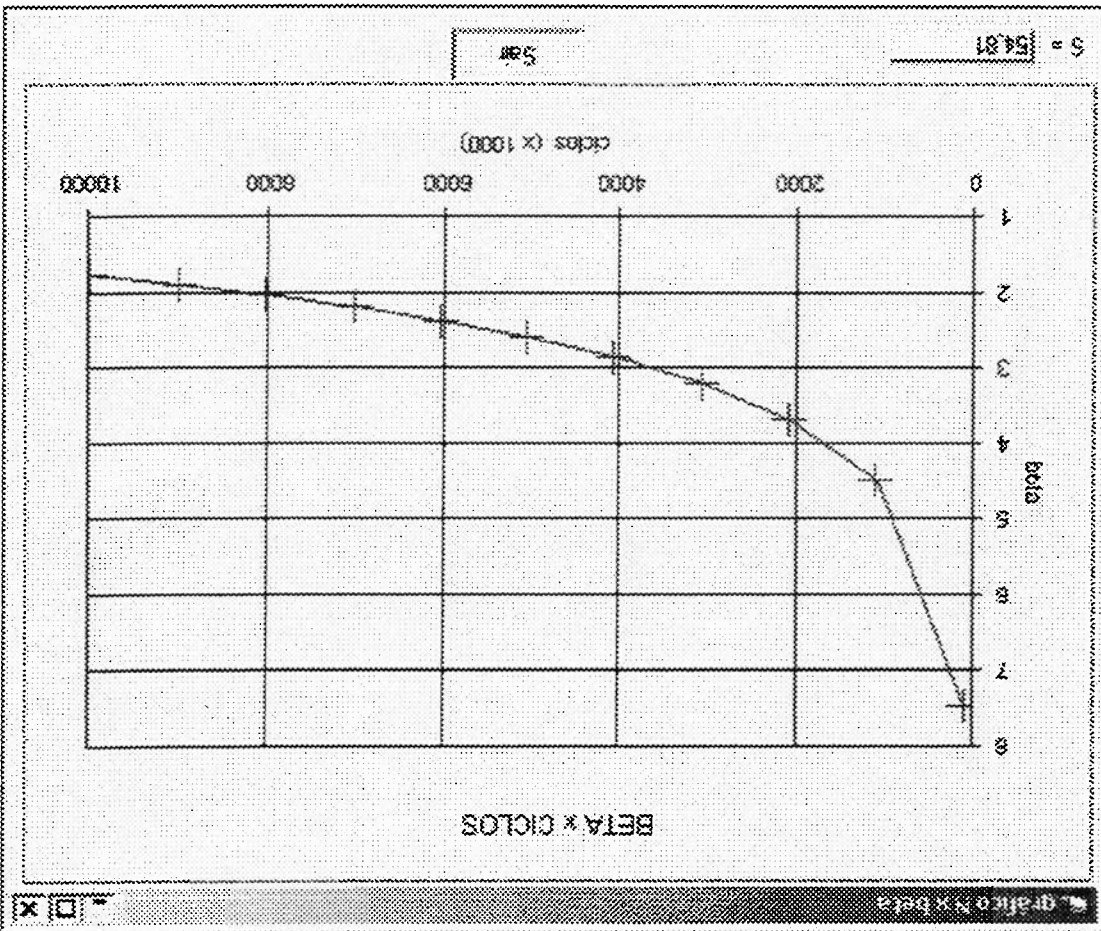


Figura 6.18. Após realizar o processamento, o sistema retornará o gráfico ilustrado na

7. ESTUDO DE CASO

Para mostrar a aplicação do sistema computacional desenvolvido neste trabalho será analisado um componente mecânico de grande aplicação no projeto de máquinas: um eixo. A escolha do eixo está relacionada, além da sua grande utilização, com o fato do critério de projeto do mesmo estar relacionado com a vida operacional definida pela falha por fadiga.

Visando a comparação entre o método de análise probabilística apresentado neste estudo e o tradicional método de cálculo da vida de eixos, é feita a análise da vida operacional de um eixo, e, com a aplicação do sistema computacional desenvolvido neste estudo, define-se a probabilidade de falha do mesmo. Adicionalmente executa-se um estudo da variação da probabilidade de falha em função da extensão da vida operacional.

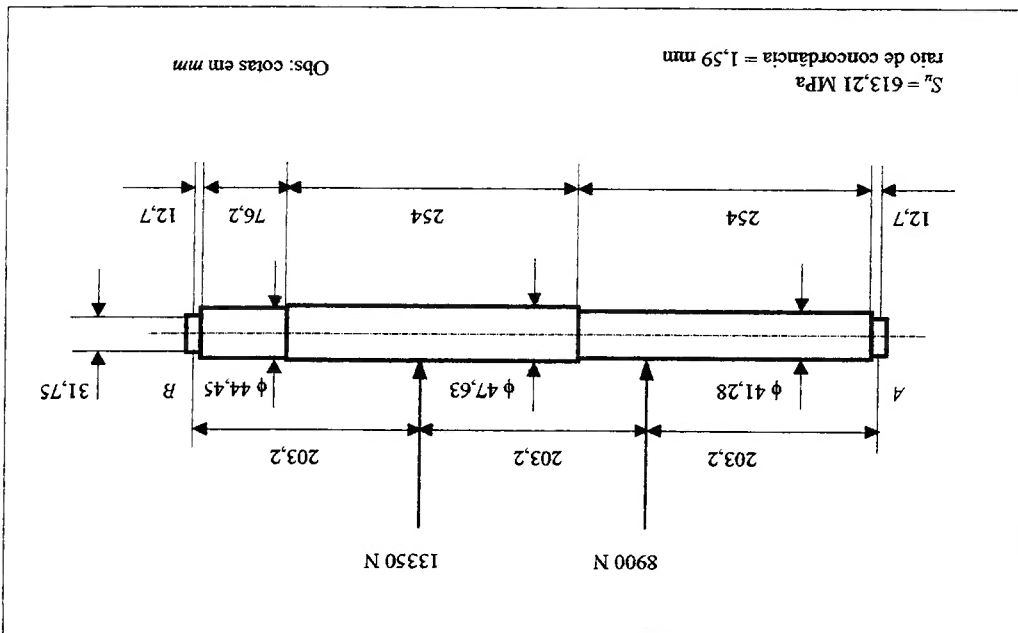
7.1 Descrição do Caso Exemplo

Como caso exemplo emprega-se o eixo indicado na Figura 7.1, o qual é submetido a um carregamento lateral, representando cargas concentradas em pontos localizados do eixo, de magnitude 8900 N e 13350 N. Este eixo está apoiado em dois mancais de rolamento, montados nas extremidades do eixo, sendo suas linhas de centro indicadas nas posições *A* e *B* da Figura 7.1. O eixo executa um movimento de rotação, com velocidade angular constante e é fabricado com um aço cujo limite de resistência à tração é 613,21 MPa.

No tradicional processo de cálculo da vida em fadiga de um eixo, deve-se definir a denominada seção crítica do mesmo, a qual está submetida a tensões de flexão de elevada magnitude. Especificamente no caso em estudo, o eixo está submetido a tensões de flexão pura.

A fim de definir a vida em fadiga do eixo, deve-se comparar a magnitude de tensão cíclica com a curva $S-N$ do material, e, a partir desta, define-se a vida do eixo. Para definição da curva $S-N$ devem ser consideradas as correções do limite de fadiga do material, tal como citado no item 2.1.6 deste texto.

Fig. 7.1: Esquema geral do eixo a ser analisado.



7.2 Análise do Caso Exemplo

Inicialmente será executada a tradicional análise determinística do eixo, a qual visa a determinação do número de ciclos de carregamento que o mesmo pode ser submetido até a ocorrência de falha por fadiga.

Inicialmente são calculadas as reações de apoio do eixo, como detalhado a seguir e ilustrado na Figura 7.2. Considera-se o eixo como uma viga bi-apoiada, submetida à ação de carregamento lateral, sendo as reações de apoio também atuantes na direção vertical.

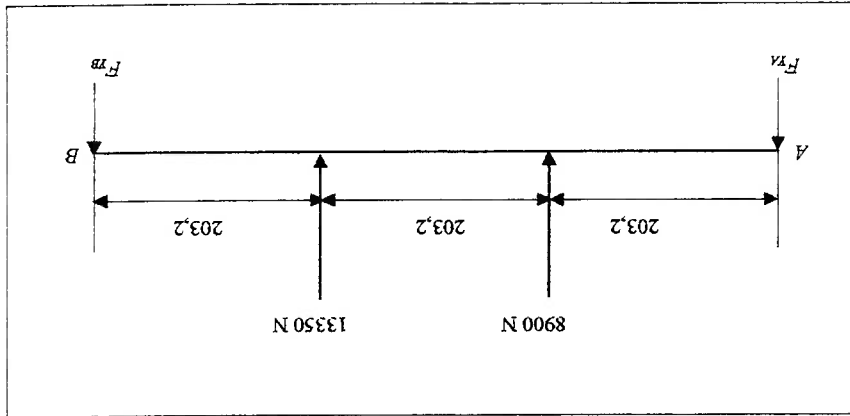


Fig. 7.2: Reações de apoio.

As reações de apoio são definidas pelo equilíbrio da viga, com o emprego das equações abaixo:

$$\sum F_y = 0 \quad (7.1)$$

$$F_{yA} + F_{yB} - 8900 - 13350 = 0 \rightarrow F_{yA} + F_{yB} = 22250 \text{ N}$$

$$\sum M_{Fy, A} = 0 \quad (7.2)$$

$$\therefore 8900 \cdot 203,2 + 13350 \cdot 406,4 - F_{yB} \cdot 609,6 = 0$$

$$F_{yB} = 11866,67N$$

$$F_{yA} = 10383,33N$$

Pode-se desenhar o diagrama de corpo livre, como ilustrado na Figura 7.3.

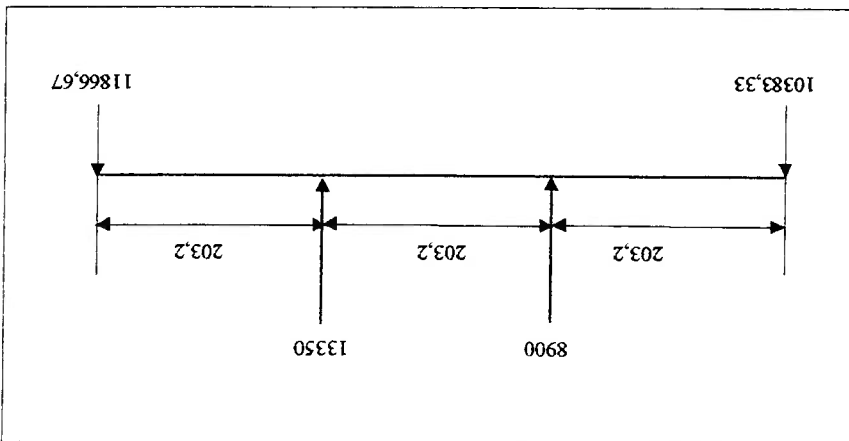


Fig. 7.3:
Diagrama do corpo livre.

Com o auxílio do diagrama de corpo livre é possível determinar os diagramas de esforços solicitantes atuantes no eixo, ilustrados na Figura 7.4.

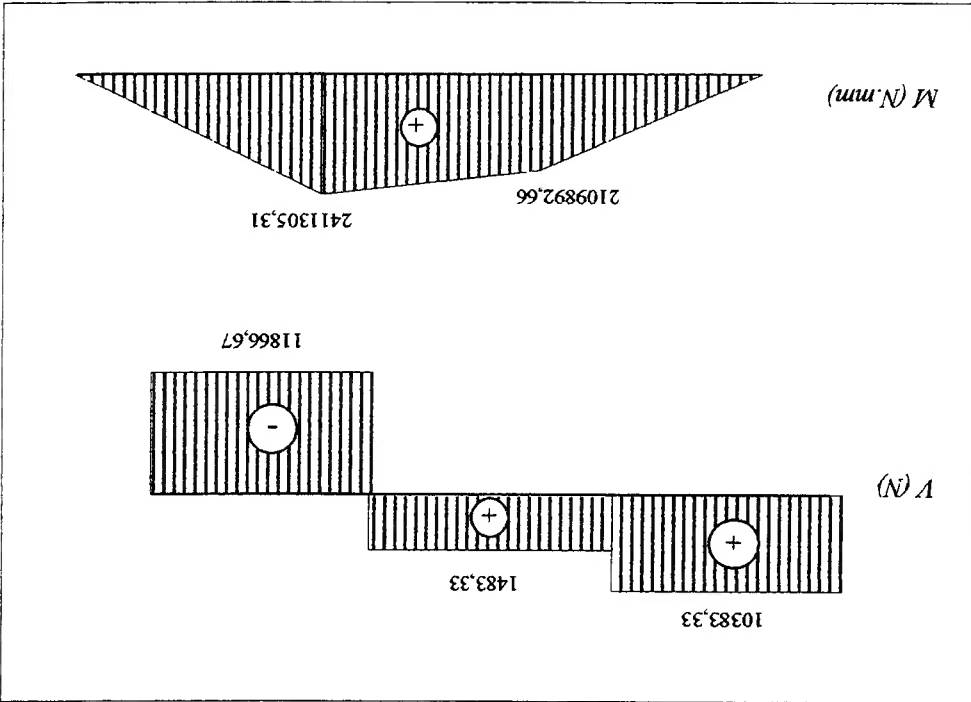


Fig. 7.4:
Diagrama dos esforços solicitantes.

Analisando o diagrama de esforços solicitantes atuantes no eixo verifica-se que o máximo momento fletor, com magnitude de 2411305,51 N ocorre no ponto de aplicação da carga de 13350 N. Entretanto, nesta posição o eixo tem diâmetro constante. Em seções do eixo submetidas a momentos fletores de menor magnitude existem transições de diâmetros, sendo que estas transições induzem a ocorrência de concentração de tensões, que aumentam as magnitudes das tensões nominais. Verifica-se também que as falhas por fadiga usualmente ocorrem em regiões de concentração de tensões e, portanto, deve-se analisar a possibilidade de falha nestas transições. Os momentos fletores nas transições são:

$$\text{Transição } \phi 41,28 - \phi 47,63 \text{ mm}$$

$$M = 2204084,11 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$\text{Transição } \phi 47,63 - \phi 44,45 \text{ mm}$$

$$M = 1054944,93 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

Portanto, a seção crítica a ser analisada no eixo em questão é a da região da transição $\phi 41,28 - \phi 47,63$, cujo momento fletor é de 2204084,11 N·mm. A tensão alternada nominal S_{nom} atuante na seção crítica do eixo é obtida através das equações abaixo:

$$(7.3) \quad S_{nom} = \frac{M}{W}$$

$$S_{nom} = 319,16 \text{ N/mm}^2$$

$$(7.4) \quad W = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

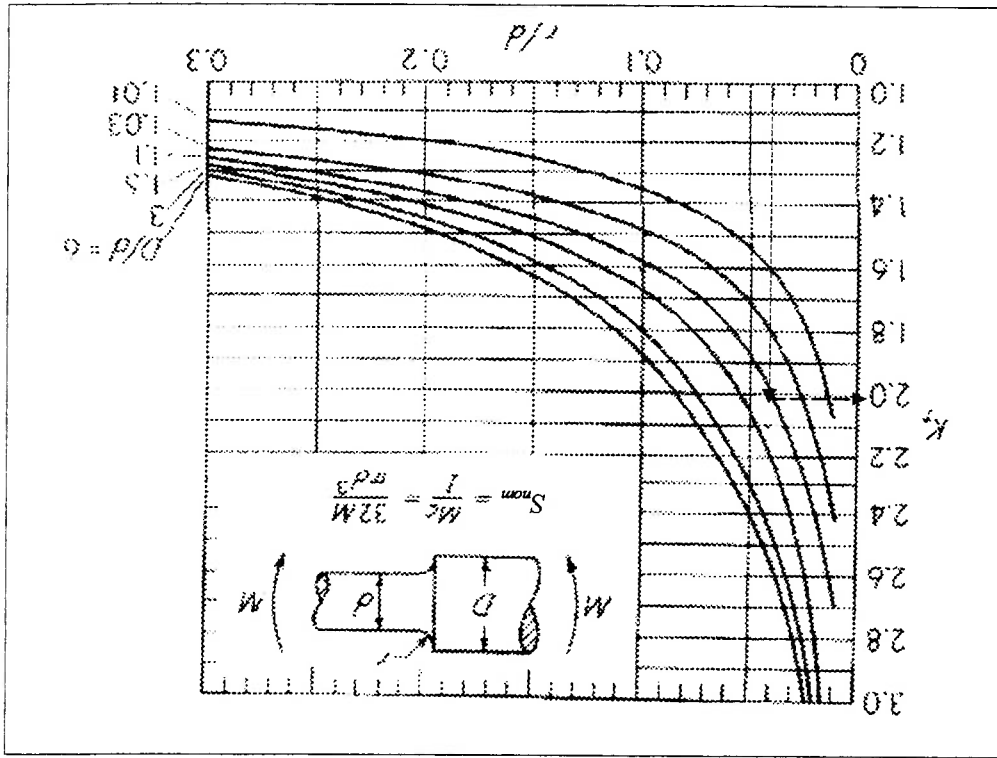
$$W = 6905,88 \text{ mm}^3$$

sendo W o módulo de resistência da seção transversal, na região do eixo de menor diâmetro.

O fator de concentração de tensões de fadiga K_f , empregado na correção das tensões cíclicas na transição, é determinado através da seguinte relação (SHIGLEY, 1984):

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (7.5)$$

O fator de concentração de tensões K_t utilizado na eq. (7.5) é determinado, para este caso, através do gráfico ilustrado na Figura 7.5.



O fator q representa o fator de sensibilidade ao entalhe, utilizado para corrigir o fator de concentração de tensões K_t , a fim de considerar a ação das tensões cíclicas, sendo obtido com o auxílio do gráfico da Figura 7.6.

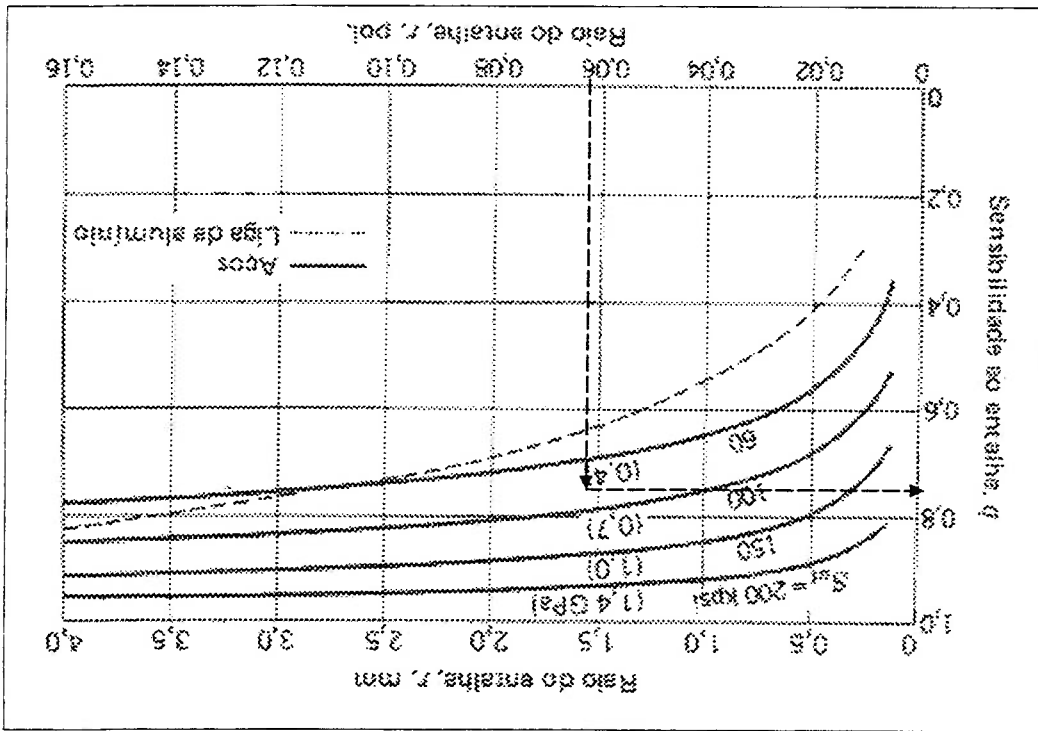


Fig. 7.6: Variação do fator de sensibilidade ao entalhe q (DOWLING, 1999).

Portanto, através das seguintes relações para o eixo em estudo, determina-se os valores de K_t e q como indicado nas Figuras 7.5 e 7.6:

$$r = 1,59 \text{ mm (0.063 pol.)} \quad d = 41,28 \text{ mm} \quad D = 47,63 \text{ mm}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{r}{D} = 0,039 \\ \frac{d}{D} = 1,15 \end{array} \right\} \text{: gráficos} \rightarrow K_t = 2,0; q = 0,76$$

O fator de concentração de tensões de fadiga, calculado através da eq. (7.5), será:

$$K_f = 1,76$$

É a tensão cíclica real S_a atuante na transição do eixo é determinada com o emprego da eq. (7.6), ou seja, a tensão nominal é multiplicada pelo fator de concentração de tensões:

$$S_a = K_f S_{nom} \quad (7.6)$$

$$S_a = 561,72 \text{ MPa.}$$

O limite de fadiga do material é calculado com o emprego dos fatores de correção descritos no item 2.1.6 deste texto. Para determinação do limite de fadiga do material, obtido em corpos de prova, utiliza-se a relação proposta por Shigley (1984), que afirma a proporcionalidade entre o limite de fadiga e o limite de resistência à tração. O limite de fadiga considerado no estudo é:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e (0,504 S_u) \quad (7.7)$$

onde:

$$k_a = 1,58 (S_u)^{-0,085} \quad (7.8)$$

$$k_b = 0,916$$

$$k_p = \left(\frac{p}{7,62} \right)^{-0,133} \quad (7.9)$$

$$k_p = 0,826$$

$$k_c = k_d = k_e = 1,0$$

$$k_r = 1,0 (\text{confiabilidade} = 50\%)$$

$$\therefore S_e = 233,84 \text{ MPa}$$

sendo os coeficientes k_i apresentados no item 2.1.6. Empregou-se o coeficiente de confiabilidade de 50%, sendo este relacionado com a dispersão da resistência à fadiga do material.

Como S_a assume valor maior que o de S_e , o eixo terá vida finita, sendo necessário determinar qual será esta vida. A equação que representa a curva $S-N$ é escrita da seguinte maneira (SHIGLEY, 1984):

$$S_a N^b = C N^b \quad (7.10)$$

$$C = \frac{S_e}{(0,9 S_n)^2} \quad (7.11)$$

$$b' = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{S_e}{0,9 S_n} \right) \quad (7.12)$$

sendo:

b' ... inclinação da curva de fadiga (em relação a N).

Neste caso, a nova curva $S-N$ é bastante influenciada pelo limite de fadiga, o qual deve incorporar a correção devido a concentração de tensões, já que, fisicamente, a curva $S-N$ para um corpo com concentração de tensão é diferente da $S-N$ para a situação sem concentração de tensão, tal como indicado na Figura 7.7.

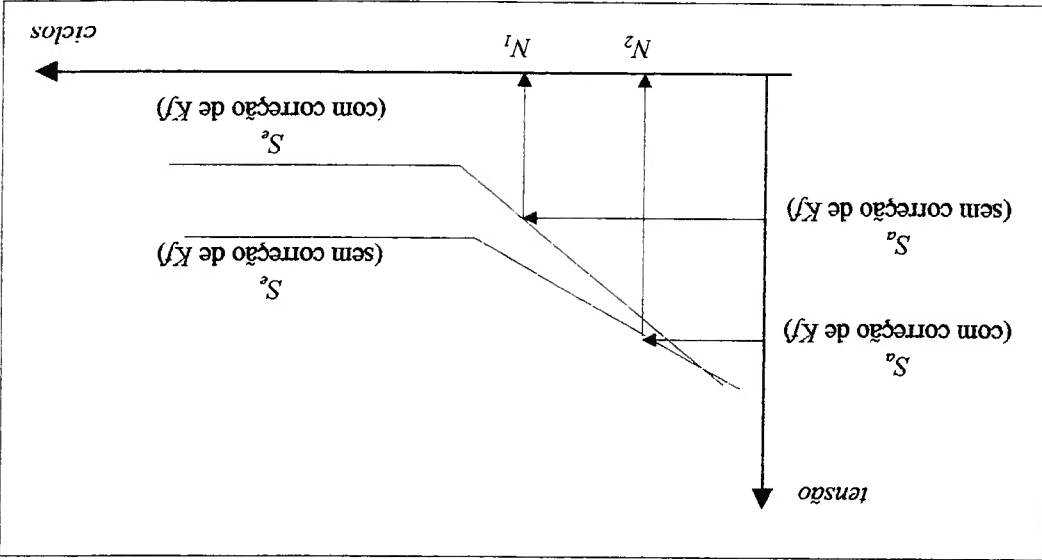


Fig. 7.7:

Diferença entre as curvas $S-N$ com e sem correção devido a concentração de tensão.

Em função do tipo de correção da curva $S-N$, se esta for definida com K_f e a S_a sem K_f , a vida N_1 é maior que a vida N_2 , definida para a curva $S-N$ sem correção de K_f e S_a com K_f , como mostra a Figura 7.7. Conforme indicado em livros de projetos de máquinas, tal como Shigley (1984), deve-se considerar, quando da avaliação da vida em fadiga, a curva $S-N$ definida a partir do limite de fadiga corrigido com o efeito do entalhe, a qual representa a curva obtida com um corpo de prova entalhado. No cálculo da fadiga, portanto, deve-se empregar:

$$S_e = \frac{S_e}{K_f} \quad (7.13)$$

$$S_e = 132,86MPa$$

$$S_a = 319,16MPa$$

As constantes da curva $S-N$, determinadas pelas eq. (7.11) e (7.12), são:

$$C = 2292,50$$

$$b = -0,206$$

É a equação da curva de fadiga:

$$S_{nom} = 2292,50.(N)^{-0,206}$$

Podem-se, então, realizar o cálculo da vida em fadiga, considerando a ação da tensão nominal, já que a correção da concentração de tensão foi incorporada no cálculo da curva $S-N$, sendo daí obtida a vida em fadiga do eixo (N):

$$S_a = 319,16 = S_{nom} = 2292,50.(N)^{-0,206}$$

$$N = 14348,3 \text{ ciclos}$$

7.3 Análise Probabilística do Caso Exemplo

Após realizar os cálculos determinísticos, a análise probabilística do eixo é feita com o auxílio do sistema computacional desenvolvido neste estudo, o qual determinará a probabilidade de falha do componente para os dados apresentados na Tabela 7.1. Para a determinação dos desvios padrão das variáveis Δ , S , e f envolvidas na análise é utilizado um coeficiente de variação de pequena magnitude, de valor igual a 0,01 para garantir uma baixa dispersão dos dados, validando as hipóteses do cálculo determinístico. A média da variável K_s é determinada pela eq. (7.12), e seu desvio padrão determinado através de um coeficiente de variação de valor igual a 0,08, como recomenda Shigley (1984). As variáveis b e N assumem valores constantes.

b ... coeficiente angular da curva de fadiga.

sendo:

$$b = \left| \frac{1}{b'} \right| \quad (7.15)$$

$$K_s = \left(\frac{1}{C} \right)^b \quad (7.14)$$

Como ilustra a Figura 7.8, para estes dados, o valor obtido do índice de confiabilidade β é de -0,10, o que representa uma probabilidade de falha de 53,98%. Verifica-se que este valor esta coerente com o calculo determinístico, pois a seleção do coeficiente de confiabilidade, empregado na seleção da curva $S-N$, foi feita supondo-se uma confiabilidade de 50%, ou seja, ha uma chance de 50% da resistência à fadiga ser inferior ao valor calculado. Nesta situação, sendo as demais variáveis determinísticas, a probabilidade de falha do eixo esta diretamente relacionada com a confiabilidade aplicada à curva $S-N$, ou seja, a probabilidade do eixo seria de 50%.

Desvio padrão	Média	
Δ	1	0,01
K_S	$2,052 \cdot 10^{16}$	$1,642 \cdot 10^{15}$
b	4,854	***
S	319,16	3,19
f	1	0,01
N	14348	***

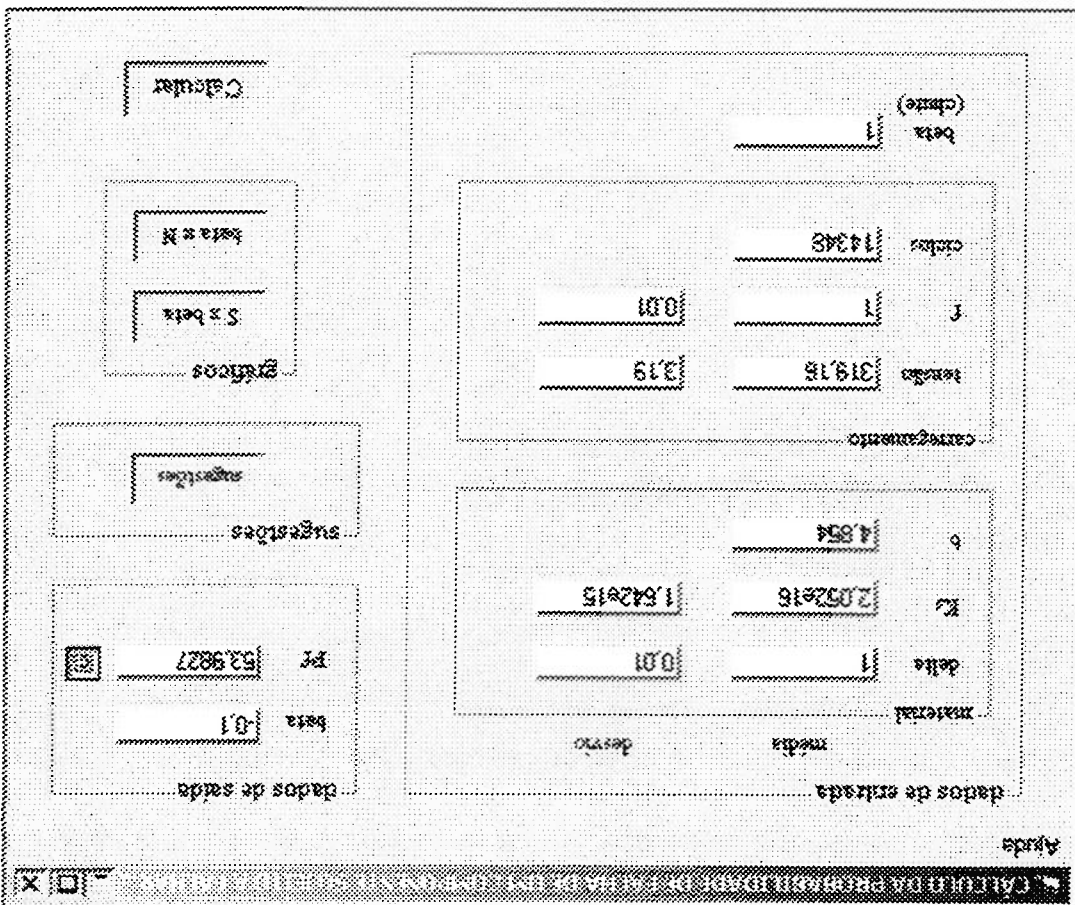
Tabela 7.1: Dados de entrada do sistema computacional.

O valor da tensão máxima obtida pelo sistema computacional com os dados de entrada acima fornecidos, para um índice de confiabilidade de 3,0, é de 297,47 MPa. Porém, para se obter esta tensão, inferior à tensão original, ou o carregamento atuante tem que ser reduzido, o que não é interessante para o projeto, ou o diâmetro do eixo tem que ser aumentado. Recalculando o diâmetro do eixo

1) Reduzir a Tensão

Supondo que o valor do índice de confiabilidade desejado neste projeto seja de 3,0, isto é, uma probabilidade de falha de 0,13%, o programa permitirá, como visto no Capítulo anterior, reduzir a tensão, o número de ciclos ou alterar o material. A seguir é apresentada a análise de cada uma das possibilidades apresentadas ao projetista.

Fig. 7.8: Tela principal do sistema na análise probabilística do eixo.



necessário para se obter a tensão de 297,47 MPa, através da eq. (7.14), chega-se ao seguinte valor:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M}{\pi \cdot \sigma_r}}$$

$$d = 42,26 \text{ mm}$$

Porém, quando se faz uma alteração no diâmetro, o fator de concentração de tensões também é modificado, sendo necessário realizar um processo iterativo, como mostrado a seguir.

$$r = 1,59 \text{ mm}$$

$$d = 42,26 \text{ mm}$$

$$D = 47,63 \text{ mm}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{r} = 0,037 \\ \frac{d}{D} = 1,13 \end{array} \right. \quad Kt \cong 2,0; q = 0,76$$

$$Kf = 1 + q \cdot (Kt - 1)$$

$$Kf = 1,76$$

Outro fator que é influenciado pelo diâmetro é o fator de tamanho k_b ,

calculado através da seguinte fórmula:

$$k_b = \left(\frac{d}{7,62} \right)^{-0,1133}$$

$$k_b = 0,824$$

Neste caso, como os valores de K_f e k_p se mantiveram praticamente constantes após o aumento do diâmetro do eixo, não será necessário prosseguir a análise, pois os valores não sofreriam alterações significativas. Porém, caso K_f e k_p fossem alterados de forma significativa, todo o cálculo realizado anteriormente deveria ser feito. Portanto, o novo valor do diâmetro do eixo, necessário para se obter a tensão de 297,47 MPa e atingir o índice de confiabilidade desejado de 3,0, será de 42,26 mm.

2) Reduzir o Número de Ciclos

Com o auxílio do sistema desenvolvido, o número de ciclos máximo ao qual o eixo poderá ser submetido, mantendo-se a tensão original de 319,16 MPa, para uma probabilidade de falha de 0,13 % será de 10402 ciclos.

3) Alterar o Material

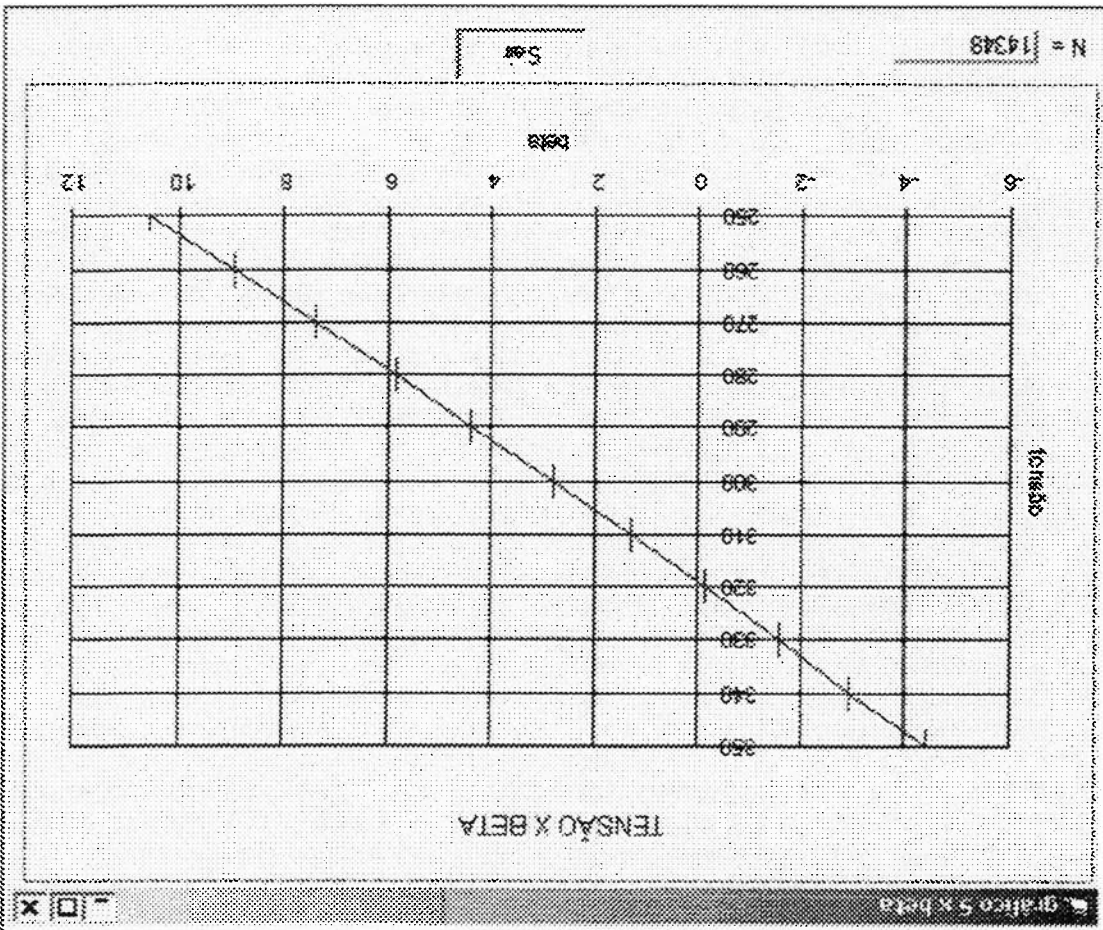
Abaixo, na Tabela 7.2 é apresentada a análise feita com dois tipos de materiais para obtenção do índice de confiabilidade, sendo um deles o aço AISI 4340, de elevada resistência mecânica, pois dependendo da condição de tratamento térmico o mesmo pode apresentar limite de resistência mecânica superior a 900 MPa, e uma liga de alumínio, material considerado de baixa resistência à tração, com magnitude da tensão limite de resistência inferior a 100 MPa. Nota-se claramente que, mantidos os coeficientes de variação empregados nesta análise, o aumento da resistência mecânica do material implica em sensível melhoria do índice de confiabilidade.

Tabela 7.2:

Obtenção do índice de confiabilidade realizada para dois materiais.

Índice de confiabilidade	Material	AISI 4340	AL 2024-T4
		11,42	-0,45

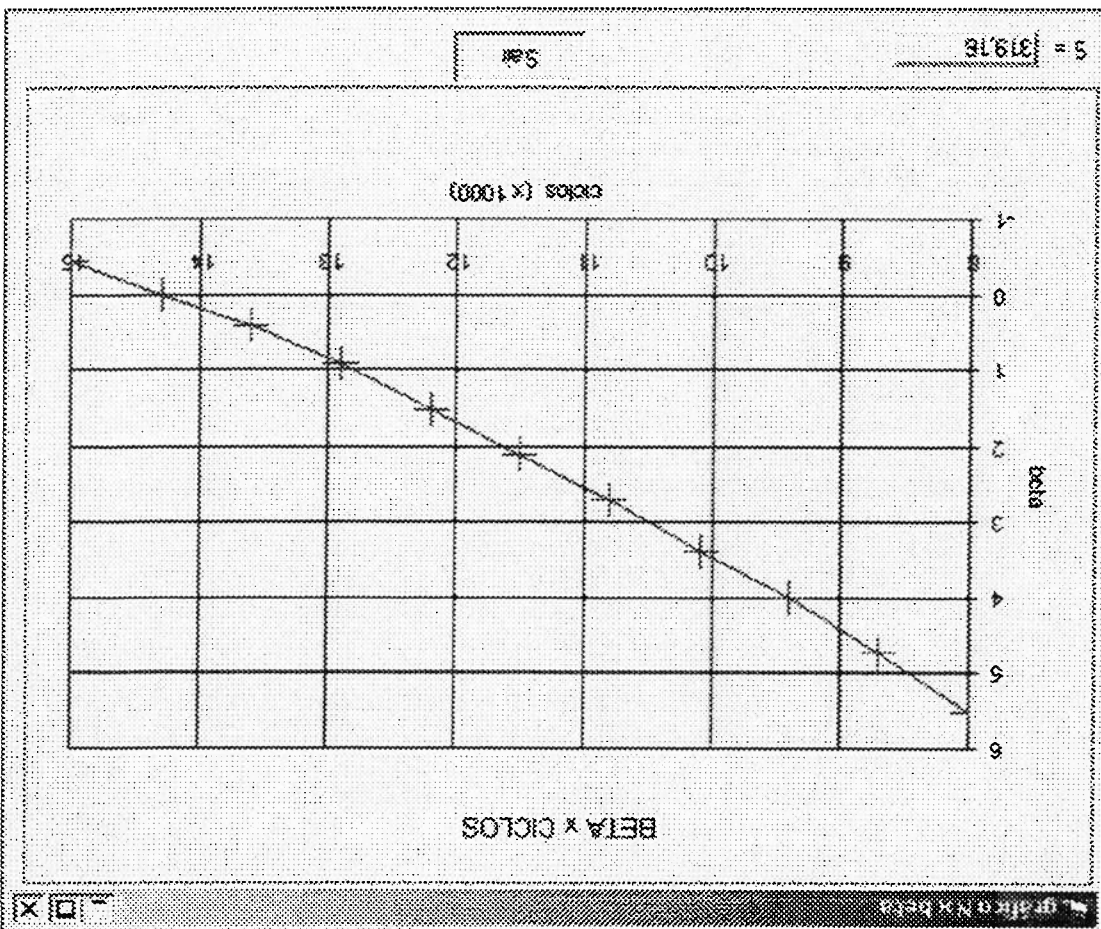
Supondo que o projetista esteja interessado em realizar uma análise gráfica para uma melhor compreensão do problema em questão, este deverá fornecer para o sistema as faixas de interesse de análise. Supondo que a faixa de interesse da tensão esteja entre 250 e 350 MPa e do número de ciclos de interesse entre 8000 a 15000, os seguintes gráficos são obtidos, mostrados na Figura 7.9 e 7.10.



O gráfico mostrado na Figura 7.9 comprova a importância do projetista dispor de um mecanismo de avaliação probabilística para a execução de um projeto, visto a sensibilidade do valor do índice de confiabilidade em relação à variação da tensão. Nota-se que um pequeno incremento no valor da tensão diminui de maneira significativa o índice de confiabilidade, elevando a probabilidade de falha do eixo projetado.

Novamente, na Figura 7.10, verifica-se a sensibilidade de variação do índice de confiabilidade, neste caso, em função do número de ciclos. Este recurso permite ao projetista determinar e visualizar de maneira mais segura e precisa a vida do eixo para uma probabilidade de falha desejada.

Fig. 7.10: Gráfico beta x ciclos para o eixo analisado entre 8000 e 15000 ciclos.



De acordo com as obras citadas na referência bibliográfica observa-se que os métodos teóricos utilizados neste trabalho estão sendo usados atualmente, portanto trata-se de um estudo atual. Além disso, notou-se uma escassez de trabalhos publicados a respeito de sistemas especialistas que tratam do fenômeno da fadiga de

Através do caso exemplo analisado no Capítulo 7 deste trabalho, pode-se verificar que este sistema, além de estar de acordo com resultados obtidos da literatura, fornece ao projetista uma visão que não se consegue quando o mesmo executa apenas a tradicional análise determinística, propiciando uma maior rapidez e precisão na avaliação de alguma alteração realizada no projeto.

Este programa, além de realizar o cálculo do índice de confiabilidade e da probabilidade de falha, também oferece ao projetista as sugestões especializadas mais relevantes para se obter um índice de confiabilidade maior, estando a cargo do mesmo aceitar ou não tais sugestões, o que o torna um programa flexível.

Nota-se que com o auxílio de um programa capaz de realizar tal tarefa, o paradigma de não se desenvolver projetos mecânicos considerando as dispersões estatísticas de cada uma das variáveis envolvidas é quebrado, o que permite que o projetista, de certa forma, tenha maior domínio e percepção sobre as consequências que alguma alteração em uma das variáveis ocasionará no comportamento da estrutura. Isto significa a possibilidade de se realizar um projeto bem dimensionado, otimizado e seguro.

O sistema desenvolvido neste trabalho mostrou ser de fundamental importância para auxiliar usuários que estejam envolvidos em projetos nos quais a falha por fadiga é estudada e em que se leva em conta também a dispersão das variáveis envolvidas. Isto porque, sem o auxílio de um sistema automatizado, torna-se praticamente impossível o projetista fazer uso das técnicas do método probabilístico condicionado avançado, apresentadas neste trabalho.

8.1 Conclusões

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

alto ciclo. Portanto, pesquisas a respeito das técnicas de implementação e desenvolvimento de sistemas especialista, bem como a utilização de métodos mais eficazes na determinação da vida à fadiga de um componente mecânico continuarão sendo feitas.

8.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Futuramente poderia ser implementada a verificação da tensão equivalente atuante fornecida pelo usuário em relação ao limite de fadiga, bem como a influência de fatores como a corrosão na curva $S-N$.

A implementação de diferentes tipos de distribuições probabilísticas para as variáveis envolvidas na análise de fadiga, permitindo ao usuário escolher qual o melhor para representar seu modelo, tornaria o programa mais flexível e abrangente.

O desenvolvimento de um banco de dados dinâmico, no qual o usuário pudesse armazenar dados dos seus materiais sem a necessidade de ter que alterar o código do programa seria de imensa importância.

Por fim, a implementação de regras heurísticas obtidas de especialistas humanos através de um *shell*, permitindo uma maior quantidade de inferências e tornando este programa um sistema especialista de fato, seria de suma utilidade no auxílio de projetos que consideram métodos probabilísticos associados ao fenômeno da fadiga.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] ANG, A. H. S., CHEUNG, M. C., SHUGAR, T. A., FERNIE, J. D.
Reliability-based fatigue analysis and design of floating structures.
Marine Structures, vol. 14 (2001), pp. 25-36.
- [2] ASSAKKAF, I. A., AYYUB, B. M. Reliability-Based Design for Fatigue of
Marine Structures. Proceedings of the Third International Workshop on
Very Large Floating Structures, vol. 1, Honolulu, USA, 1999. p. 388-397.
- [3] AUGUSTI, G., BARATTA, A., CASCIATI, F. Probabilistic Methods in
Structural Engineering. Chapman and Hall, 1984.
- [4] CASTILLO, E., SARABIA, J. M., SOLARES, C., GÓMEZ, P. Uncertainty
analyses in fault trees and Bayesian networks using FORM/SORM
methods. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 65 (1999), pp. 29-
40.
- [5] CHORAFAS, D. N. *Sistemas especialistas*. São Paulo, McGraw-Hill, 1988.
- [6] COLLINS, J. A. *Failure of Materials in Mechanical Design*. John Wiley
& Sons, 2^o ed., 1993.
- [7] COLOMBI, P. & DOLINSKI, K. Fatigue lifetime of welded joints under
random loading: rainflow cycle vs. cycle sequence method. *Probabilistic
Engineering Mechanics*, vol. 16 (2001), pp. 61-71.
- [8] CORNELL, C. A. A Probability-Based Structural Code. *Journal of the
American Concrete Institute*. Proc. 62 (12), 1969.

- [9] CRIPPA, M. Universidade do Estado de Santa Catarina - ESAG/UDESC. Sistemas Especialistas: A Engenharia do Conhecimento Aplicada às Organizações. Disponível em: <http://n27.udesc.br/demo/trabalhos/alunos/mc/se.html>. Acesso em: 2002.
- [10] DAI, S. & WANG, M. **Reliability analysis in engineering applications**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
- [11] DIETER, G. E. **Metallurgia Mecânica**. Guanabara Koogan, 2ª ed., 1981.
- [12] DILLSTROM, P. ProSINTAP - A probabilistic program implementing the SINTAP assessment procedure. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 67 (2000), pp. 647-668.
- [13] DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials**. 2ª ed. Prentice-Hall, New Jersey, 1999.
- [14] DURKIN, J. **Expert systems design and development**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- [15] FATEMI, A. & YANG, L. **Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials**. *International Journal of Fatigue*, vol. 20 (1998), pp. 9-34.
- [16] FUCHS, H. O. & STEPHENS, R. I. **Metal Fatigue in Engineering**. John Wiley & Sons, 1980.
- [17] HAMED, M. M. & BEDIENT, P. B. **Reliability-Based Uncertainty Analysis**

- of Groundwater Contaminant Transport and Remediation. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-99/028, June, 1999.
- [18] HAN, Y. L., LIU, X., DAI, S. H. Fatigue life calculation of flawed structures –based on artificial neural network with special learning set. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75 (1998), pp. 263–269.
- [19] *Handbook of Fatigue Testing*, ASTM Committee E-9 on Fatigue. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1974. ASTM Special Technical Publication; 566.
- [20] MADSEN, H. O., KRENK, S., LIND, N. C. *Methods of Structural Safety*. 1^o ed., Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1986.
- [21] MELCHERS, R. E. *Structural reliability: analysis and prediction*. Ellis Horwood, New York, Wiley, 1987.
- [22] MINSKY, M. L. *A sociedade da mente*. Rio de Janeiro, Francisco Alves, 1989.
- [23] MUNSE, W. H. *Fatigue Characterization of Fabricated Ship Details for Design. Ship Structure Committee – SSC 318*. 1983.
- [24] PETERSON, R. E. *Stress concentration factors*. New York, Wiley, 1974.
- [25] PUC-RIO – Departamento de Engenharia Mecânica. O Projeto à Fadiga sob Carregamentos Complexos Segundo o Método S-N. Disponível em: <http://www.mec.puc-rio.br/~edcmm/sn/index.htm>. Acesso em: 2000.

- [26] SANTANA, A. F. **Análise de fadiga de rodas para veículos de transporte de carga.** São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [27] SCHAEFFER, M. The Comet. Disponível em: www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/8803/p5cyp07.jpg. Acesso em: 2002.
- [28] SHIGLEY, J. E. **Elementos de máquinas.** Livros Técnicos e Científicos, 1984.
- [29] SHEN, M. H. H. **Reliability assessment of high cycle fatigue design of gas turbine blades using the probabilistic Goodman Diagram.** *International Journal of Fatigue*, vol. 21 (1999), pp. 699–708.
- [30] SIDDIQUI, N. A. & AHMAD, S. **Fatigue and fracture reliability of TLP tethers under random loading.** *Marine Structures*, vol. 14 (2001), pp. 331-352.
- [31] SOUZA, G. F. M. **Análise de confiabilidade estrutural à fadiga de “risers” rígidos.** São Paulo, 1994. 295 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [32] SPAGNOLI, A. **A new high-cycle fatigue criterion applied to out-of-phase biaxial stress state.** *International Journal of Mechanical Sciences*, vol 43 (2001), pp. 2581–2595.
- [33] STYLIANOU, A. C., SMITH, R. D., MADEY, G. R. **An empirical model for an evaluation and selection of expert system shells.** *Expert Systems with*

- [34] SUNDARAJAN, C. R. Probabilistic Structural Mechanics Handbook. Chapman & Hall, 1995.
- [35] SWINDEN TECHNOLOGY CENTRE - Corus UK Limited Methods, Applications and Software for Structural Reliability Assessment. Report SL/WEM/R/M8663/5/01/C, ago. 2001.
- [36] TOVO, R. On the fatigue reliability evaluation of structural components under service loading. *International Journal of Fatigue*, vol. 23 (2001), pp. 587-598.
- [37] TOVO, R. A damage-based evaluation of probability density distribution for rain-flow ranges from random processes. *International Journal of Fatigue*, vol. 22 (2000), pp. 425-429.
- [38] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ - Departamento de Informática. Sistemas Especialistas. Disponível em: <http://www.din.uem.br/~ia/especialistas/>. Acesso em: 2002.
- [39] UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - Laboratório de Inteligência Artificial - Departamento de Computação. Expert SINTADISE. Soluções para Desenvolvimento Integrado de Sistemas Especialistas. Disponível em: <http://www.lia.ufc.br/~bezerra/exsinta/>. Acesso em: 2001.
- [40] UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - CCE. Inteligência Artificial na Educação. Disponível em: <http://www.cce.ufpr.br/~hamilton/>. Acesso em:

<http://www.disastercity.com/ft243>. Acesso em: 2002.

[43] HAWAIIAN STEAM ENGINEERING. Disponível em:

Structural Engineering, ASCE 108(10), 1984, p. 2340-2356.

[42] WIRSCHING, P. H. **Fatigue Reliability of Offshore Structures**. Journal of

(1999), pp. 267-273.

prediction. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 76

[41] XIE, L. **Equivalent life distribution and fatigue failure probability**

2001.