

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SOFTWARE PARA ANÁLISE DE RESISTÊNCIA
DE PEÇAS E COMPONENTES MECÂNICOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

LUIS ARTURO OVAL GONZALEZ

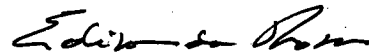
FLORIANÓPOLIS - S.C, MAIO DE 1988

SOFTWARE PARA ANÁLISE DE RESISTÊNCIA
DE PEÇAS E COMPONENTES MECÂNICOS

LUIS ARTURO OVAL GONZALEZ


ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO PROJETO,
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGE-
NHARIA MECÂNICA.



PROF. EDISON DA ROSA, M.SC.

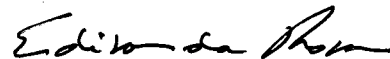
ORIENTADOR



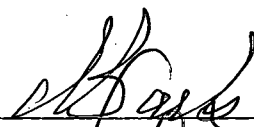
PROF. ARNO BLASS, PhD.

COORDENADOR DO CURSO

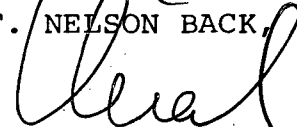
BANCA EXAMINADORA:



PROF. EDISON DA ROSA, M.SC.



PROF. NELSON BACK, Ph.D.



PROF. LONGUINHO DA COSTA M. LEAL, M.SC.

A minha querida esposa Galicia Inés e
a meus queridos filhos, Andrés Eduardo,
Carmen Paz e Pilar Inés, que com muito
sacrifícios e compreensão, sempre me
apoiaram nesta etapa da minha vida.

A meus pais,
e irmão.

AGRADECIMENTOS

À Universidad de Magallanes, Universidade Federal de Santa Catarina e MEC/CAPES, pela oportunidade incentivo e apoio financeiro para realizar os estudos de Pos-Graduação em Engenharia Mecânica.

À coordenação e professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, como também a meus companheiros de turma.

Ao Professor Edison da Rosa pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Em especial, ao graduando em Engenharia Mecânica, Willians L. Cavalcanti, por sua colaboração no desenvolvimento computacional do sistema.

Í N D I C E

NOTAÇÃO.....	i
RESUMO	vi
ABSTRACT.....	vii
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	001
CAPÍTULO 2: REVISÃO TEÓRICA.....	004
2.1. Teoria da mecânica da fratura.....	004
2.1.1. Fratura com plasticidade restrita.....	006
2.1.2. Estimativa da zona plástica segundo Irwin.....	006
2.1.3. Estimativa da zona plástica segundo Dugdale..	009
2.1.4. Propagação da trinca de fadiga.....	011
2.2. Fadiga.....	017
2.2.1. O diagrama σ -N (ou de Whöler).....	018
2.2.2. Fadiga de baixo ciclo.....	022
2.2.2.1. O conceito de deformação cíclica.....	022
2.2.2.2. Relação entre a curva deformação-vida e a fadiga de baixo ciclo.....	025
2.2.2.3. Influência das tensões e deformações médias distintas de zero.....	031
2.2.2.3.1. Tensão média σ_m distinta de zero.....	032
2.2.2.3.2. Deformação média ϵ_m distinto de zero.....	033
2.2.3. Fadiga de alto ciclo.....	035
2.2.3.1. O conceito de tensões cíclicas.....	035
2.2.3.2. Relação entre a curva tensão-vida e a fadiga de alto ciclo.....	036

2.2.3.3. Fatores que afetam a tensão limite de resistência à fadiga.....	037
2.2.3.3.1. Fator de superfície (k_1).....	038
2.2.3.3.2. Fator de tamanho (k_2).....	039
2.2.3.3.3. Fator de confiabilidade (k_3).....	040
2.2.3.3.4. Fator de temperatura (k_4).....	041
2.2.3.3.5. Fator de concentração de tensões (k_5)....	042
2.2.3.3.6. Fator de efeitos diversos (k_6).....	045
2.2.3.4. Influência das tensões médias distintas de zero.....	046
2.2.4. Determinação das tensões e deformações locais em peças entalhadas.....	049
2.2.4.1. Regra linear.....	051
2.2.4.2. Regra de Neuber.....	052
2.2.4.3. Dano acumulado.....	053
2.2.4.4. Contagem de ciclo.....	055
2.2.5. Carregamento de fadiga.....	057
2.2.5.1. Carregamento em bloco.....	057
2.2.5.2. Carregamento aleatório por tabela de pontos fornecidos pico a pico.....	058
2.2.5.3. Carregamento aleatório por densidade espectral.....	059
2.3. Análise estática.....	060
2.3.1. Modos de falha.....	060
2.3.1.1. Início do escoamento.....	060
2.3.1.2. Plastificação total.....	060
2.3.1.3. Fratura.....	061

2.3.2.	Teorias de falha.....	061
2.3.2.1.	Teoria da máxima tensão normal.....	061
2.3.2.2.	Teoria da máxima tensão de cisalhamento....	062
2.3.2.3.	Teoria da máxima energia de distorção.....	062
2.3.3.	Determinação das tensões locais.....	063
CAPÍTULO 3: SISTEMA COMPUTACIONAL.....		065
3.1.	Estrutura do sistema.....	065
3.2.	Descrição do sistema.....	066
3.2.1.	Seleção do tipo de material.....	067
3.2.2.	Seleção do tipo de geometria.....	068
3.2.3.	Seleção do tipo de análise.....	068
3.2.3.1.	Análise dinâmica.....	069
3.2.3.1.1.	Seleção do tipo de carregamento.....	069
3.2.3.1.2.	Determinação das tensões e deformações locais.....	069
3.2.3.1.3.	Determinação da variação e médias das deformações para cada ciclo ou bloco.....	070
3.2.3.1.4.	Determinação da vida em baixo ciclo.....	070
3.2.3.1.4.1.	Nucleação.....	070
	a. Determinação da vida.....	070
	b. Determinação do dano acumulado.....	071
	c. Determinação do término da nucleação..	071
3.2.3.1.4.2.	Propagação.....	072
3.2.3.1.4.3.	Vida total.....	073
3.2.3.1.5.	Determinação da vida em alto ciclo.....	074
3.2.3.1.5.1.	Determinação do dano acumulado.....	074
3.2.3.1.5.2.	Efeitos da tensão média em alto ciclo..	075

3.2.3.2.	Análise Estática.....	076
3.2.3.2.1.	Determinação das tensões locais.....	076
3.2.3.2.2.	Determinação do coeficiente e margem de segurança.....	076
3.2.3.2.3.	Falha em componente com defeitos.....	077
3.2.4.	Relatório de saída.....	077
3.2.4.1.	Entrada ao sistema.....	077
3.2.4.2.	Saídas do sistema.....	078
3.3.	Operação do Sistema.....	079
3.4.	Equipamento.....	079
CAPÍTULO 4:	RESULTADOS.....	080
4.1.	Resultados obtidos das provas feitas nas prin- cipais rotinas do sistema.....	080
4.1.1.	Obtenção das tensões e deformações locais...	080
4.1.2.	Determinação da vida em baixo ciclo.....	081
4.1.3.	Determinação da vida e o efeito das tensões médias em alto ciclo.....	081
4.1.4.	Determinação da vida na propagação.....	081
4.2.	Resultados do Sistema.....	082
4.2.1.	Exemplo G1.....	082
4.2.2.	Exemplo G2.....	083
4.3.	Conclusões.....	083
4.3.1.	Sugestões.....	084

BIBLIOGRAFIA	085
APÊNDICE A PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	089
APÊNDICE B GEOMETRIAS DISPONÍVEIS.....	096
APÊNDICE C FLUXOGRAMA GERAL.....	136
APÊNDICE D ALGORÍTMOS.....	139
APÊNDICE E RESULTADOS DAS PROVAS FEITAS NAS PRINCIPAIS ROTINAS DO SISTEMA.....	153
APÊNDICE F OPERAÇÃO DO SISTEMA E SEQUÊNCIA DAS OPÇÕES CONFORME FORAM ELEITAS.....	182
APÊNDICE G RESULTADOS DOS EXEMPLOS RESOLVIDOS PELO SISTEMA.....	214

NOTAÇÃO

- A_0 - área
 a - dimensão característica da trinca
 a_{eq} - dimensão da trinca equivalente
 a_c - tamanho crítico da trinca
 a_0 - tamanho inicial da trinca
 $\dot{a} = \frac{da}{dN}$ - velocidade de crescimento da trinca
 b - expoente da resistência à fadiga
 C - constante empírica da equação de Paris
 c - expoente da ductilidade à fadiga
 D - dano
 d - diâmetro
 E - módulo de elasticidade ou de Young
 e - deformação nominal
 F - força de tração ou compressão
 G - módulo de elasticidade transversal
 H - constante de proporcionalidade na região plástica da curva do material, encruamento linear.
 J_0 - momento polar de inércia
 K_I - fator de intensidade de tensão, modo I
 K_{II} - fator de intensidade de tensão, modo II.
 K_{III} - fator de intensidade de tensão, modo III.

K_p	-	fator de intensidade de tensão plástica
K_f	-	fator de concentração de tensões à fadiga.
K_{IC}	-	tenacidade à fratura
K_m	-	fator de concentração de tensão médio
K_{max}	-	fator de concentração de tensão máximo
K_{min}	-	fator de concentração de tensão mínimo
K_t	-	fator geométrico de concentração de tensão
K_ϵ	-	fator de concentração de deformação
K_σ	-	fator de concentração de tensão
k	-	coeficiente de resistência estático
k'	-	coeficiente de resistência cíclico
k_1	-	fator de superfície
k_2	-	fator de tamanho
k_3	-	fator de confiabilidade
k_4	-	fator de temperatura
k_5	-	fator de concentração de tensão
k_6	-	fator de efeitos diversos
K	-	relação entre tensões alternantes e média
M	-	momento fletor
m	-	expoente da equação de Paris
m'	-	inclinação da reta no gráfico de Whöler
m_s	-	margem de segurança
N	-	vida

- N_f - vida a fadiga
- N_n - vida na nucleação
- N_p - vida na propagação
- N_T - vida total
- N_{tr} - vida na transição
- n - expoente do encruamento, estático
- n' - expoente do encruamento, cíclico
- n_a - fator de segurança segundo a amplitude de tensão
- n_m - fator de segurança segundo a tensão média
- n_s - fator de segurança estático
- n'_s - fator de segurança dinâmico
- q - sensibilidade ao entalhe
- R - relação entre a tensão mínima e a máxima
- r - coordenada polar, equação 2.5.
- r - raio do entalhe
- S - tensão nominal
- s - comprimento da zona plástica segundo Dugdale
- T - momento de torção.
- T' - temperatura
- t - tempo
- W_0 - módulo resistente na flexão
- $W(f)$ - densidade espectral
- Y_i - fator geométrico segundo o modo de sollicitação (I, II ou III)

- Y_p - fator de correção plástico
- Z_c - variável padronizada na confiabilidade
- β - constante, equação 2.31.
- δ - abertura de deslocamento da trinca, segundo Dugdale
- $\Delta\epsilon$ - variação das deformações, local
- $\Delta\epsilon_e$ - variação das deformações, elástica
- $\Delta\epsilon_p$ - variação das deformações, plástica
- $\Delta\epsilon_t$ - variação das deformações, total
- $\Delta\epsilon_{tr}$ - variação das deformações na transição
- Δ_e - variação da deformação, nominal
- Δ_{fi} - variação de frequência
- $\Delta\sigma$ - variação das tensões, normais
- ΔK - variação do fator de intensidade de tensão
- ΔK_0 - valor de ΔK , abaixo do qual não há propagação da trinca
- ΔS - variação da tensão nominal
- ϵ - deformação local
- ϵ_a - amplitude da deformação
- ϵ_E - deformação no escoamento
- ϵ_f - coeficiente de ductilidade estático
- ϵ_f' - coeficiente de ductilidade cíclico
- ϵ_m - deformação média

- σ_{ij} - tensão normal
- σ_a - tensão alternante
- σ_f - tensão real da fratura
- σ_f' - coeficiente de resistência à fadiga
- σ_m - tensão média
- σ_E - tensão de escoamento
- σ_F - limite de resistência à fadiga
- σ_F' - limite de resistência à fadiga corrigido
- σ_R - tensão limite de resistência à tração
- $\sigma(t)$ - tensão atuante no tempo
- ρ - raio do entalhe, equação 3.46
- ρ' - variável função do tamanho do grão
- θ - coordenada polar
- τ_{ij} - tensão cisalhante

RESUMO

No presente trabalho é desenvolvido um sistema computacional para a análise da resistência mecânica de componentes de máquinas ou estruturais, sob carregamentos dinâmicos, aleatórios ou em blocos, como também sob carregamento estático, podendo o usuário escolher entre distintas geometrias com e sem defeitos e entre as propriedades de distintos materiais, fornecidos no banco de dados.

A análise de falhas no caso de solicitações dinâmicas se baseia nos estágios de nucleação, propagação e fratura final. Para o carregamento estático, a análise se baseia nos modos de falha de início de escoamento, plastificação total e fratura ou frágil.

O programa fornece, como saída o dano, a vida de nucleação, de propagação e a vida total para baixo e alto ciclo. Para os estágios de propagação e fratura final, é fornecido ainda o crescimento progressivo da trinca e o tamanho crítico em que ocorre a fratura final. No caso estático, a saída tem relação com o fator de segurança segundo as teorias de falha que o usuário pode escolher, verificando se falha, ou não, o componente mecânico ou estrutural.

A B S T R A C T

In this work a mechanical strength analysis software, for use in machine parts or structural components under dynamic loading is developed. The load may be defined as random or in blocks and the user can choose between different part geometries, with or without flaws, and material properties, stored in the software data base.

The failure analysis for dynamics loading is based in a fatigue method of analysis, including the nucleation and propagation phases and also the final fracture. In the case of a static loading, the failure analysis use the initial yielding, plastic collapse, ductile and brittle fracture modes of failure.

The software results, obtained by the fatigue analysis, are the cumulative damage, the nucleation and propagation life, using the low cycle fatigue and the high cycle fatigue models. In the fatigue crack propagation analysis, the crack growth data are obtained as well the critical crack size. In the option of static analysis the results are the safety factors, using the usual collapse theories and the software verify the failure of the mechanical or structural component.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A prevenção de falhas em elementos de máquinas ou estruturais causadas pelas diversas formas de carregamentos, tem sido desde há muito tempo um dos grandes problemas dos projetistas, já que as falhas mecânicas podem causar perdas de vidas, e grandes perdas econômicas. A fadiga no entanto é ainda a causa de 50% a 90% das falhas mecânicas, muitas das quais são fraturas inesperadas [7,24].

A partir da ocorrência das primeiras falhas atribuídas à fadiga, na Inglaterra nos anos 1840, e dos primeiros ensaios com tensões repetidas mostrando a variação das tensões versus a vida no diagrama S-N, realizados na Alemanha entre 1850-1860 por August Whöler, que introduziu o conceito de limite de fadiga, até nossos dias, muitos estudos e novas teorias sobre o comportamento à fadiga dos materiais tem sido feitos.

O método tradicional para o projeto contra a fratura por fadiga envolve previsões da vida cíclica baseadas na tensão nominal versus o número de ciclos, partindo de dados obtidos em testes com corpos de prova, realizados em laboratórios. Mas estes dados não distinguem entre o período de nucleação e o período de crescimento ou propagação da trinca. Consequentemente estes dados de resistência à fadiga de corpos de prova polidos, não fornecem informações a respeito de falhas pré-existentes sobre a vida do componente. Especificamente, a presença de defeitos pode reduzir ou mesmo eliminar o período de nuclea-

ção da trinca de fadiga, que muitas vezes chega até mais de 90% da vida prevista a partir de dados convencionais de fadiga.

Tendo em consideração o anterior, surge a necessidade do desenvolvimento de melhores métodos para o projeto contra a falha dos elementos de máquinas ou estruturais.

O programa computacional desenvolvido no presente trabalho tem como objetivo auxiliar na análise dos componentes submetidos às mais diversas formas de carregamentos dinâmicos como também a carregamento estático.

O estudo dos efeitos do carregamento dinâmico é feito considerando as três fases características de uma falha por fadiga ou seja; nucleação ou iniciação de uma trinca, propagação e finalmente o crescimento rápido e instável quando atingido o tamanho crítico da trinca levando à fratura final.

As tensões e deformações locais que atuam no ponto sob estudo podem ser determinadas através de um método experimental, ou bem, conhecendo as tensões nominais na seção, com a aplicação de fatores de concentração de tensão e de deformação.

Com isto a vida do componente é determinada aplicando as equações de Morrow baseadas nas de Coffin-Manson ou na das inclinações universais para baixo ciclo. Para alto ciclo, vida é determinada segundo a curva de Whöler. A obtenção do dano acumulado é feita utilizando a regra linear de acúmulo do dano de Palmgren-Miner.

Para o caso de componentes com defeitos iniciais ou quando se tem iniciado uma trinca, ao término da nucleação, a análise é realizada por propagação e posterior fratura estática.

A propagação é testada através da variação do fator de intensidade de tensão (ΔK vs ΔK_0), obtendo-se a vida da propagação, aplicando a equação de Paris. A fratura final até o tamanho crítico da trinca é testada através da tenacidade à fratura (K_I vs K_{IC}), determinando a falha do componente.

Na análise estática foram consideradas falhas por início do escoamento, plastificação total e fratura frágil ou dúctil. As tensões são determinadas segundo os métodos tradicionais ou aplicando os fatores de concentração de tensão e deformação considerando as constantes estáticas do material, segundo as teorias de falha mais utilizadas.

Em geral procurou-se desenvolver um programa computacional utilizando distintos carregamentos, geometrias com e sem defeito, com materiais sob encruamento linear ou potencial obtendo suas propriedades em publicações e artigos, abrangendo a grande maioria dos casos encontrados em elementos de máquina ou estruturais.

C A P Í T U L O 2

REVISÃO TEÓRICA

CAPÍTULO 2

REVISÃO TEÓRICA

2.1. Teoria da Mecânica da Fratura

A Mecânica da Fratura se preocupa em estudar o comportamento de um sólido quando este tem uma trinca. Em essência, é estudado o campo de tensões desenvolvido nas proximidades do extremo da trinca e sua relação com a tensão nominal aplicada, propriedades do material, bem como, geometria e tamanho da trinca.

Uma interpretação do fenômeno da fratura foi originalmente desenvolvida por Irwin [9] ao introduzir o conceito do fator de intensidade de tensões e deslocamentos do extremo de uma descontinuidade.

Os fatores de intensidade de tensão dependem somente da geometria e das condições de carregamento, caracterizando-se em três possíveis modos de sollicitação da trinca, como se mostra na Figura 2.1.

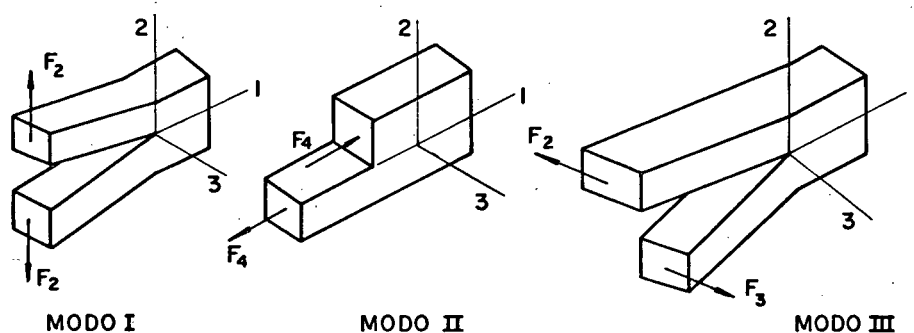


Fig.2.1. Modos de sollicitação da trinca.

Para esses casos, é possível dizer, sendo a uma trinca, que:

$$K_I = \sigma Y_I \sqrt{\pi a} \quad (2.1)$$

$$K_{II} = \tau Y_{II} \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

$$K_{III} = \tau Y_{III} \sqrt{\pi a} \quad (2.3)$$

Y_i é um fator geométrico que depende da forma e proporções do componente sob estudo e do carregamento e σ e τ são as tensões nominais que atuam no elemento provocando os modos I, II e III.

Como no presente trabalho será usado apenas o modo de solitação I, a equação para o fator de intensidade de tensão ficará assim:

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (2.4)$$

O fator de intensidade de tensão é uma medida do estado de tensões e deformações que solicita o material nas proximidades do extremo da trinca. Para que ocorra uma propagação da trinca, é necessário que as tensões e deformações nas suas proximidades alcancem um valor crítico, ou seja, pode-se esperar que ocorra fratura quando K_I atinge um valor crítico K_{IC} , que é uma propriedade do material. Contudo, o uso de K_{IC} está restrito a situações onde a fratura é precedida por uma deformação plástica limitada, pois, conforme Liu [19] assinalou, não

são as tensões e deformações elásticas fora da zona plástica que causam a fratura, embora estas controlem o estado de tensões e deformações plásticas. Outro ponto que deve ser ressaltado quanto à validade de K_{IC} como critério de falha está na própria definição de K como parâmetro caracterizador da singularidade do extremo da trinca, expresso na fórmula:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \dots \quad (2.5)$$

A equação 2.5 apresenta o primeiro termo da expansão em série da expressão para a distribuição de tensões em pontos próximos ao extremo da trinca, só válida quando $r \ll a$ sendo r a distância do ponto considerado ao extremo da trinca.

2.1.1. Fatiga com plasticidade restrita

Como os materiais reais exibem uma tensão de escoamento, acima da qual eles se deformam plasticamente, existe uma região ao redor do extremo da trinca onde ocorrem deformações plásticas e, portanto, não pode existir a singularidade elástica. É possível estimar o comprimento da zona plástica, tanto para um estado plano de tensão como para um estado plano de deformação. Irwin [12] e Dugdale [2,6] propuseram métodos de estimativa da zona plástica, com os quais é possível se determinar um valor de K que se adapte melhor às condições de plasticidade no extremo da trinca, assumindo que a região plastificada seja de pequena dimensão.

2.1.2. Estimativa da zona plástica segundo Irwin

Assumindo que o material possui uma tensão de escoamento σ_E , tem-se que o raio de plastificação r_p é definido no

ponto onde a tensão segundo o eixo 2, Fig.2.1, é igual a σ_E .
Então:

$$r_p = \frac{1}{2\pi} (K_I/\sigma_E)^2 \quad \text{E.P.T.} \quad (2.6)$$

$$r_p = \frac{1}{6\pi} (K_I/\sigma_E)^2 \quad \text{E.P.D.} \quad (2.7)$$

Devido ao escoamento, a distribuição de tensões fica alterada, podendo ser pensada como proveniente de uma trinca fictícia, em um material perfeitamente elástico, com dimensão característica $a+r_p$, sendo assim definida uma trinca equivalente de acordo com a Figura 2.2:

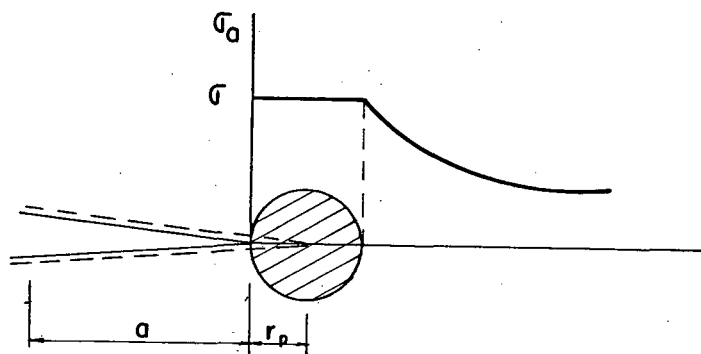


Fig.2.2. Correção da zona plástica segundo Irwin.

Irwin [2], então, propôs que, quando a tensão que solicita o material for da mesma ordem de grandeza da tensão de escoamento, o fator de intensidade de tensão deve ser definido através da trinca equivalente. Como esse fator de intensidade de tensão considera o efeito de deformações plásticas no extremo da trinca, será denominado fator de intensidade de tensão plástico K_p , calculado por:

$$K_p = Y\sigma \sqrt{\pi a_{eq}} \quad (2.9)$$

Substituindo a equação 2.6, do raio plástico e a equação 2.4, onde K é calculado com base no tamanho geométrico da trinca, tem-se:

$$K_p = Y\sigma \sqrt{\pi a \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Y\sigma}{\sigma_E}\right)^2\right)} \quad (2.10)$$

Porém, o fator de intensidade de tensões plástico é definido por:

$$K_p = Y Y_p \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.11)$$

Neste caso, Y_p é o fator de correção plástica. Dessa forma, o fator de correção, segundo Irwin, é:

$$Y_p = \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Y\sigma}{\sigma_E}\right)^2} \quad (2.12)$$

A definição do fator de correção plástica, dado pela equação 2.21, não é rigorosamente corret; em parte porque o valor de r_p foi calculado usando o fator de intensidade de tensões K , sem correção. Usando K_p no cálculo do raio da plastificação, obtêm-se:

$$Y_p = 1/\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{Y\sigma}{\sigma_E}\right)^2} \quad (2.13)$$

Uma análise mais rigorosa mostra que as expressões acima são razoavelmente exatas se o limite de sollicitação não exceder o limite de escoamento do material. Ou seja, a equação 2.12

pode ser usada para níveis de tensão nominal de até 70% da tensão de escoamento, e a equação 2.13 para tensões de até 90% da tensão de escoamento.

2.1.3 - Estimativa da zona plástica segundo Dugdale

Dugdale [2,6] obteve uma expressão para o comprimento da zona plástica de uma trinca solicitada segundo o modo de abertura I, para um material elasto-plástico ideal.

Quando ocorre o escoamento sobre um comprimento s medido do extremo da trinca de comprimento $2a$, figura 2.3a, é assumido que esta situação é equivalente à deformação elástica de uma trinca hipotética de comprimento $2a_{eq}$, que está sob a ação da tensão nominal aplicada σ e da tensão de escoamento σ_E sobre parte de sua superfície, que tende a fechá-la, de acordo com a fig. 2.3b:

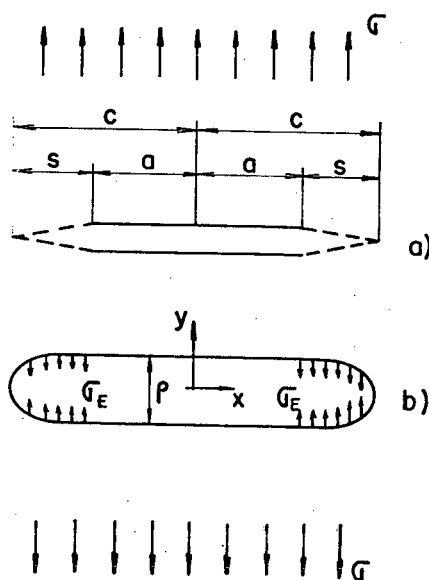


Fig.2.3- Correção da zona plástica segundo

Dugdale: (a) escoamento interno

(b) tensões internas atuando sobre a região que sofreu escoamento.

Dugdale define o comprimento da zona plástica como:

$$s = C \left| 2 \operatorname{sen}^2 \left(\frac{\pi \sigma}{4 \sigma_E} \right) \right| \quad (2.14)$$

que pode ser colocada na fórmula:

$$s = a \left| \sec \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_E} - 1 \right| \quad (2.15)$$

E a trinca equivalente \tilde{e} é definida como:

$$a_{\text{eq}} = \frac{a}{2} (1 + \sec \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_E}) \quad (2.16)$$

E, assim o fator de intensidade de tensão plástica será:

$$K_p = Y \sigma \sqrt{\frac{\pi a (1 + \sec \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_E})}{2}} \quad (2.17)$$

Assim sendo, o fator de correção plástico, segundo Dugdale:

$$Y_p = \sqrt{\frac{(1 + \sec \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_E})}{2}} \quad (2.18)$$

Outra forma de usar os resultados de Dugdale é definir o fator de correção da zona plástica a partir do conceito de deslocamento de abertura da trinca. Segundo Dugdale, a extremidade da trinca sofre uma abertura δ devido ao afastamento de suas faces, como consequência das deformações plásticas, e pode ser obtida como:

$$\delta = \frac{8}{\pi} \frac{\sigma_E}{E} a \ln \left(\sec \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_E} \right) \quad (2.19)$$

A expressão para δ pode ser expandida, e, considerando só o primeiro termo da série, pode-se definir o fator de intensidade de tensão plástica como:

(2.20)

$$K_P = Y \sqrt{\delta \cdot E \sigma_E / \pi a} \sqrt{\pi a}$$

E, desenvolvendo a equação 2.20, tem-se:

$$K_P = Y \sigma \sqrt{\pi} \frac{\sigma_E}{\pi \sigma} \sqrt{8 \ln(\sec \pi \sigma / 2 \sigma_E)} \quad (2.21)$$

Portanto, o fator de correção da zona plástica é:

$$Y_P = \frac{\sigma_E}{\pi \sigma} \sqrt{8 \ln(\sec \pi \sigma / 2 \sigma_E)} \quad (2.22)$$

Dentre as expressões para Y_P , ou seja, equações 2.12, 2.13, 2.18, 2.22, a última é a mais exata, sendo a adotada neste trabalho. Deve-se ter presente que elas foram obtidas para o modelo de uma placa de dimensões infinitas sob tração. Deste modo, em peças ou corpos de prova reais, a menos que o tamanho de zona plastificada seja pequeno, comparado com as outras dimensões, estas expressões não fornecem resultados muito confiáveis.

2.1.4 - Propagação de trincas de fadiga

Embora o término da vida de uma estrutura, por sua ruptura brusca, possa ser baseado no fator de intensidade de tensões críticas, a vida útil de um componente solicitado ciclicamente pode depender da velocidade de crescimento da trinca, desde um tamanho microscópico até o tamanho crítico requerido para

provocar a ruptura. Assim, tanto um estudo das combinações críticas de tensões e tamanho dos defeitos para a fratura, como as características de propagação da trinca para o material em consideração, são essenciais para determinar a vida útil do componente.

Como o conceito do fator de intensidade de tensão fornece um parâmetro único, que descreve a magnitude do estado de tensões existentes nas proximidades da ponta da trinca, e como a propagação de fadiga é um fenômeno localizado, dependente também destas tensões, o conceito do fator de intensidade de tensões pode ser usado para um enfoque quantitativo na interpretação do comportamento de propagação da trinca.

Os dados de propagação da trinca são habitualmente obtidos monitorizando o tamanho da trinca durante o ensaio, obtendo a curva de seu crescimento, conforme a figura 2.4, onde a_1 , a_2 , a_3 são os tamanhos críticos para σ_1 , σ_2 , σ_3 .

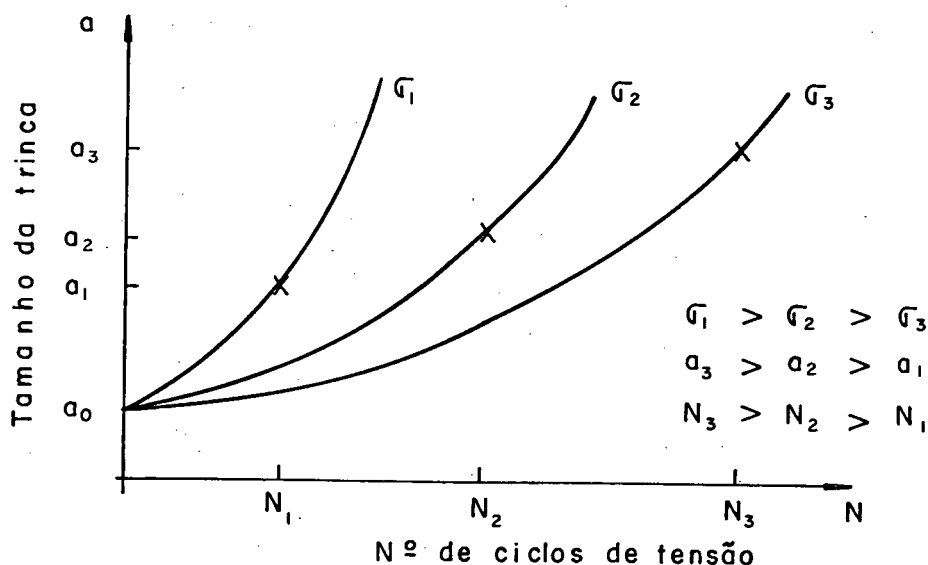


Figura 2.4 - Curvas de crescimento da trinca.

A variável de interesse, em geral, é a velocidade de propagação da trinca \dot{a} , ou seja, da/dN . Paris e Erdogan [16] mostram que o crescimento da trinca pode ser aproximadamente fornecido pela expressão.

$$\dot{a} = \frac{da}{dN} = f(\Delta\sigma, a, C) \quad (2.23)$$

Usando o conceito do fator de intensidade de tensão, Paris propôs uma fórmula mais específica, ou seja:

$$\dot{a} = \frac{da}{dN} = f(\Delta K, C) \quad (2.24)$$

Atualmente existe uma grande quantidade de dados experimentais que confirmam esta relação e mostram que o fator de intensidade de tensão é o parâmetro que controla a propagação da trinca de fadiga. Das curvas da Fig. 2.4 é possível obter \dot{a} e ΔK para cada ponto e plotar em um gráfico de \dot{a} versus ΔK , como na Fig. 2.5: habitualmente traçado em escala específica.

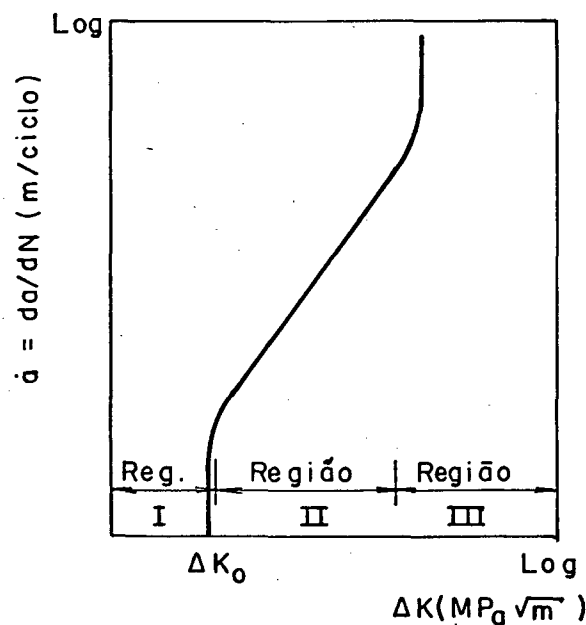


Fig.2.5 - Velocidade de crescimento da trinca versus variação do fator de intensidade de tensão.

O valor de ΔK_0 é um nível mínimo de sensibilidade para que a trinca venha a se propagar. Para valores de ΔK inferiores a ΔK_0 a trinca não se propaga. A velocidade de propagação é muito pequena, quase nula. Esta condição é representada pela Região I da Fig. 2.5, e corresponde ao período de nucleação.

O fator de intensidade de tensões máximo, está ligado à faixa de variação, pela equação 2.25:

$$K_{\text{máx}} = \Delta K / (1-R) \quad (2.25)$$

R é um coeficiente que fornece a assimetria do carregamento dinâmico, definido como:

$$R = \frac{K_{\text{min}}}{K_{\text{máx}}} \quad (2.26)$$

Assim, o valor limite de ΔK , para evitar a ruptura brusca, é:

$$\Delta K_{\text{IC}} = K_{\text{IC}} (1-R) \quad (2.27)$$

Nas proximidades do fim da vida, a velocidade de propagação cresce rapidamente, chegando-se de imediato ao tamanho crítico da trinca. A ruptura ocorre quando $K_{\text{máx}}$ iguala a K_{IC} , isto é representado pela Região III da Fig. 2.5.

A parte da curva entre os valores limites de ΔK correspondente à Região II, Fig. 2.5, representa a propagação, o crescimento da trinca, através da equação proposta por Paris, adotado neste trabalho:

$$\dot{a} = \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.28)$$

Em vista do apresentado até este ponto, uma vantagem óbvia do uso da mecânica da fratura para a propagação da trinca é a possibilidade de incorporar em um único parâmetro todas as variáveis externas pertinentes, como a tensão nominal, tamanho da trinca, geometria do componente, etc., de modo que os dados são aplicáveis para uma grande variedade de configurações. A equação 2.28 foi verificada para vários materiais estruturais, sendo C e m constantes empíricas. A constante C depende das propriedades do material, da frequência de aplicação da carga, da carga média e outras variáveis secundárias, e m é a inclinação da reta $\log \dot{a}$ versus $\log \Delta K$.

É um fato reconhecido que uma tensão média de tração, em um carregamento cíclico, reduz sensivelmente a vida, ou seja, aumenta a velocidade de propagação da trinca. Assim, vários autores procuraram desenvolver expressões que levassem em conta este efeito, para situações diferentes das de ensaio, pois este é normalmente feito com carga pulsante, variando de zero até um máximo, ou seja, com $R=0$.

Segundo Forman [8] a velocidade de propagação da trinca deve tender a infinito quando $K_{m\acute{a}x}$ tende para K_{IC} , ou seja:

$$\begin{aligned} \lim_{K_{m\acute{a}x} \rightarrow K_{IC}} \dot{a} &\rightarrow \infty \\ K_{m\acute{a}x} &\rightarrow K_{IC} \end{aligned}$$

que pode ser obtido dividindo a equação 2.28 por uma expressão que se anule com $K_{m\acute{a}x}=K_{IC}$; usando a equação 2.27, obtém-se:

$$\dot{a} = \frac{C \Delta K^m}{(1-R) K_{IC} - \Delta K} \quad (2.29)$$

Por outro lado, Nelson [15] cita um trabalho de Erdogan, onde foi desenvolvida a equação:

$$\dot{a} = C (\Delta K)^m (K_{m\max})^n \quad (2.30)$$

Radon e Culver [17] em um trabalho de propagação de trincas em polímeros, obtiveram a expressão:

$$\dot{a} = \beta \lambda^n \quad (2.31)$$

onde:

$$\begin{aligned} \lambda &= K_{m\max}^2 - K_{min}^2 \\ \lambda &= 2 \Delta K \cdot K_m \end{aligned} \quad (2.32)$$

E assim, pode ser pensado como um caso particular da equação 2.30, onde o expoente que afeta ΔK e K_m é o mesmo.

Finalmente, Mukherjee e Burns [14] também trabalhando com polímeros, através de uma análise estatística detalhada, chegaram à conclusão que a expressão que melhor representa os dados dos seus ensaios é:

$$\dot{a} = C_f^{-0.43} \Delta K^{2.39} K_m^{2.13} \quad (2.33)$$

com um coeficiente de correlação de 0.955. No caso, f é a frequência do carregamento, que, para o caso de materiais visco-elásticos, é de importância fundamental. Vale a observação de que não há, também, diferença sensível entre esta expressão e a equação proposta por Erdogan.

2.2 - Fadiga

Carregamentos estáticos ou quase estáticos, não são observados com frequência na prática da engenharia, tendo o projetista que estudar as implicações das cargas repetidas e flutuantes que atuam na maioria das peças de máquinas ou componentes estruturais. Cada carregamento induz tensões flutuantes ou cíclicas, causando falhas por fadiga. O dano durante o processo de fadiga é cumulativo e geralmente irrecuperável.

Pesquisas de falhas por fadiga, feitos nos últimos anos, têm demonstrado que são dois os domínios do processo de fadiga aceitos atualmente: controle por tensões cíclicas e de controle por deformações cíclicas, com características diferentes. As falhas são, provavelmente, produzidas por mecanismos físicos distintos [3]. Um dos domínios acontece quando ocorre uma grande deformação plástica durante cada ciclo, associada com altas cargas e curta vida ou baixo número de ciclos para produzir a falha por fadiga, chamada "fadiga de baixo ciclo" ou "fadiga cíclica com deformação controlada". Aplica-se quando o objetivo do projetista em engenharia é obter vida curta, mas tem problemas, porque a fadiga de baixo ciclo é aplicável, por exemplo no projeto de mísseis, onde a vida pode ser de algumas centenas de ciclos, também no projeto de vasos sob pressão, elementos para usinas nucleares, rotores para turbinas etc., onde um amplo transiente mecânico ou térmico durante o funcionamento origina grande dano cumulativo na vida total do projeto, e, ainda, quando as cargas nominais são baixas, mas o material na raiz de um entalhe crítico pode sofrer uma plastificação local, situação em que

a deformação é ciclicamente controlada pela contração imposta pelo material elástico do contorno [3].

O outro domínio de carregamento cíclico está associado a cargas baixas e vida longa, ou grande número de ciclos para produzir a falha de fadiga. É denominado "fadiga de alto ciclo" ou "fadiga com tensões controladas". Exemplos de "fadiga de alto ciclo" são carregamentos que incluem tensões alternantes associadas a eixos rotativos, ciclos de pressurização e despressurização da cabina do avião na decolagem e aterrissagem, e a flutuação das cargas do vento durante o vôo. Todavia, dependendo do tipo de material, estes carregamentos podem estar em "fadiga de baixo ciclo".

A "fadiga de baixo ciclo" é aquela que ocorre entre 1/4 ou 1 ciclo até 10^5 ciclos, embora muitos pesquisadores definam 50.000 ciclos [3] como o máximo para que a falha aconteça em "fadiga de baixo ciclo". Para "fadiga de alto ciclo", as vidas são maiores que 10^3-10^4 ciclos.

2.2.1 - O diagrama $\sigma-N$ (ou de Wöhler) [2,3,12]

Para a determinação da resistência dos materiais sob condições de fadiga, corpos de prova são expostos a forças repetitivas ou com variação de suas magnitudes específicas no tempo, fazendo a contagem dos ciclos ou reversões das tensões até a fratura. A máquina de ensaio de fadiga mais usada é aquela em que o corpo de prova é solicitado em flexão pura com altas velocidades de rotação. Ela foi desenvolvida por R.R. Moore. Os corpos de prova são usinados e polidos com muito cuidado, tendo como acabamento final um polimento axial para evitar arranhões circunferenciais.

Para a determinação da resistência à fadiga de um material, é necessário um grande número de ensaios por causa da natureza estatística da fadiga. O primeiro ensaio é realizado com uma tensão um pouco menor que a tensão limite de resistência do material, obtendo-se o número de ciclos ou de reversões que levaram o corpo de prova à ruptura. O processo é continuado até se obter os pontos para desenhar o diagrama σ -N (Fig. 2.6) em papel semi log ou log-log, tendo a resistência à fadiga σ_N como ordenada e o número de ciclos de tensões N na abcissa. Para as ligas ferro-carbono e titânio, a curva fica horizontal depois do material ter sido tensionado um certo número de ciclos. Partindo deste ponto, denominado limite de fadiga σ_F , o material não falha para qualquer número de ciclos, tendo uma vida infinita.

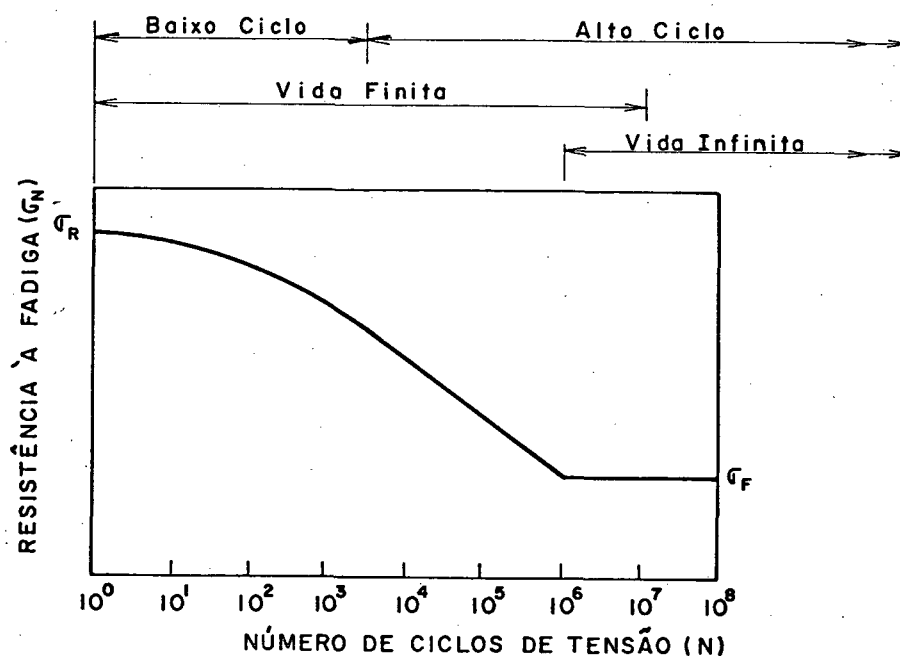


Fig. 2.6 - Diagrama σ -N do ensaio de fadiga com tensão completamente reversível.

Para os materiais e ligas não ferrosas, a curva não tem a parte horizontal, e estes materiais não têm tensão limite de resistência à fadiga, ou, simplesmente, limite de fadiga.

Como indicado na Fig.2.6, de 1/2 até 1000 ciclos, classifica-se como "fadiga de baixo ciclo"; de 1000 ciclos em diante, portanto, tem-se, "fadiga de alto ciclo".

Também se tem indicado uma região de "vida finita" e outra de "vida infinita". As fronteiras entre as regiões são definidas de forma evidente, pela presença do limite de fadiga. Para o aço, por exemplo, encontra-se entre 10^6 - 10^7 ciclos [24].

A determinação do limite de fadiga mediante ensaios de corpos de prova é um processo lento e de grande custo econômico, quando o custo do projeto o justifica, é a melhor opção. Em outras aplicações, é factível encontrar, na literatura técnica, tabelas de propriedades dos materiais [17,2] mais utilizados em engenharia.

Outra consideração importante de se ter em conta é que a vida à fadiga diminui rapidamente em presença de um entalhe (Fig.2.7). Ademais, vários pesquisadores têm concluído que a fadiga envolve um processo de três estágios, Fig.2.8 [7,10], denominados iniciação da trinca ou nucleação; propagação da trinca; e, finalmente, fratura frágil, quando a trinca alcança o comprimento crítico. Mas, se ocorrer uma falha ou defeito preexistente, o período de nucleação é rapidamente reduzido ou até completamente eliminado, tendo como resultado uma redução da vida cíclica.

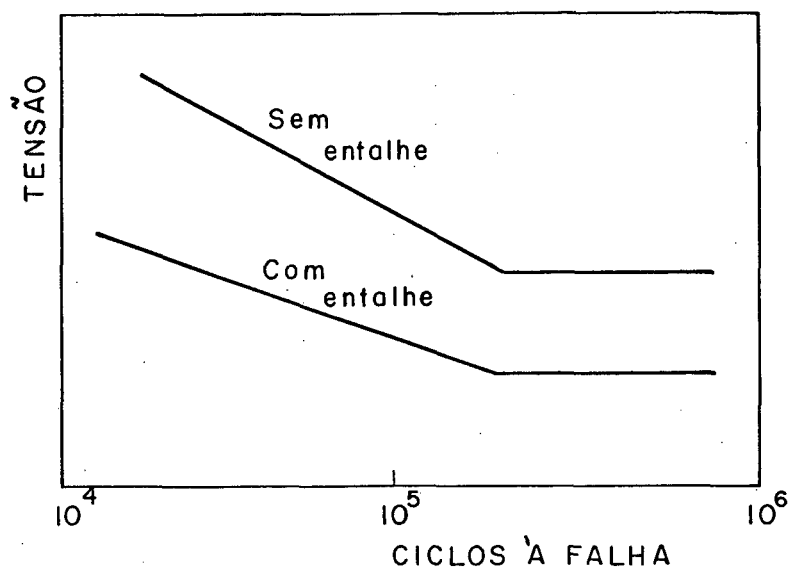


Fig.2.7 - Curvas σ -N ou de Whöler , mostrando a diferença em resistência para peças com e sem entalhe.

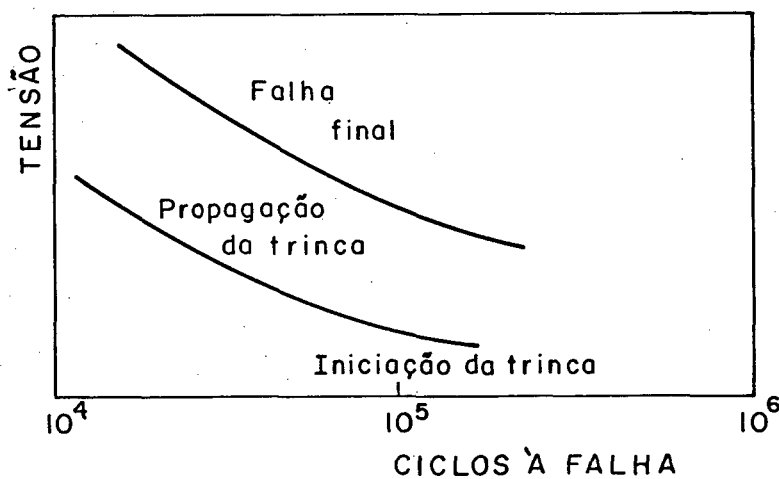


Fig.2.8 - Vida à fadiga dependente da extensão dos estágios de iniciação e propagação de trincas.

2.2.2 - Fadiga de baixo ciclo

2.2.2.1 - O conceito de deformação cíclica

Da curva σ - N (Fig.2.6), é possível verificar que de 1/4 de ciclo até, mais ou menos, 10^3 ciclos, a resistência à fadiga é quase constante, chegando até à tensão limite de resistência do material. Ou seja, a curva σ - N fica relativamente plana em toda esta região onde o material sofre ciclicamente um escoamento geral com uma grande deformação plástica, o que faz com que a vida à fadiga seja determinada em função da variação destas deformações cíclicas [7]. O comportamento das tensões e deformações se caracteriza por um laço de histerese como é mostrado na Fig. 2.9, indicando uma deformação plástica macroscópica seja induzida em um corpo de prova ou em uma peça de máquina.

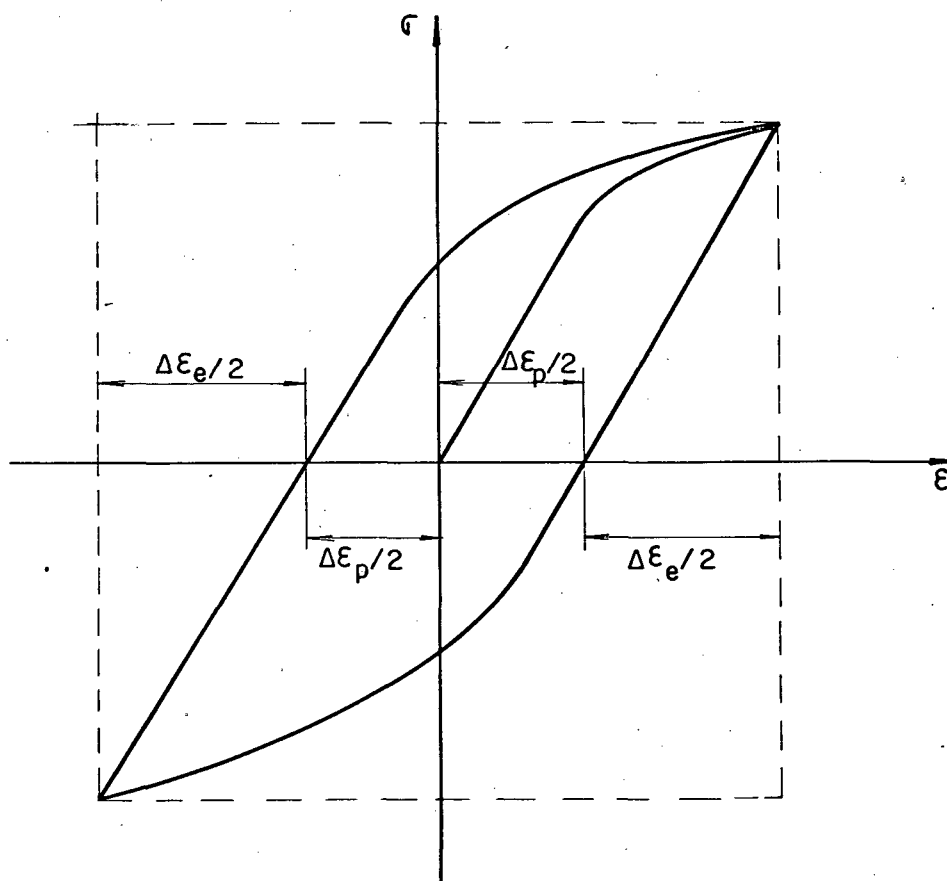


Fig.2.9 - Laço de histerese associado a um carregamento cíclico que produz dano por fadiga de baixo-ciclo.

O comportamento plástico é não-linear, e tem-se observado que a resposta tensão-deformação, para muitos materiais, muda significativamente com os ciclos de sollicitação, quando dentro da zona plástica, tendo alguns materiais encruado e outros amolecido por uma deformação cíclica [3], como é mostrado na Fig. 2.10.

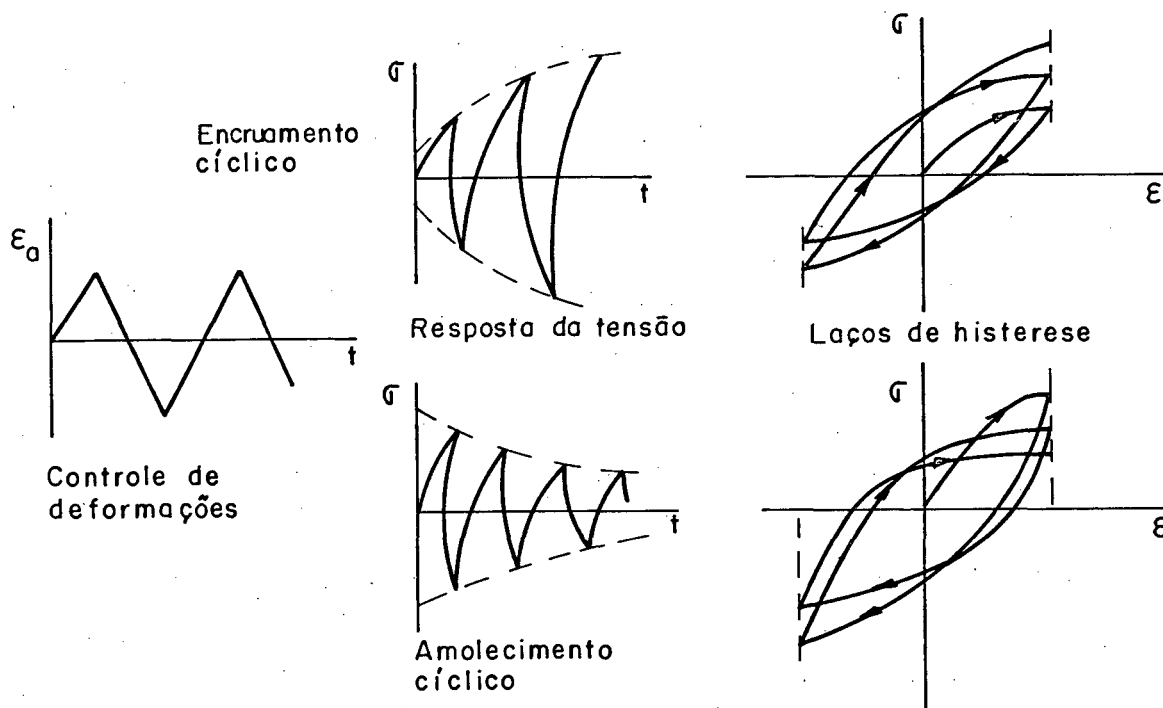


Fig.2.10 - Encruamento e amolecimento por deformações cíclicas com controle de deformações.

Portanto, aplicando-se deformações cíclicas, a resposta de muitos materiais, caracterizada pela curva tensão-deformação, muda. Isto porque os laços de histerese tendem a ficar estáveis assim que a amplitude das tensões permanecerem razoavelmente constantes, sob controle de deformação, em uma grande porção de vida à fadiga. Com base nos laços de histerese estáveis, para uma família de amplitudes de deformações constantes e diferentes, a

curva que passa pelos extremos dos laços de histerese, como mostra a Fig. 2.11, define a curva tensão-deformação cíclica para o material.

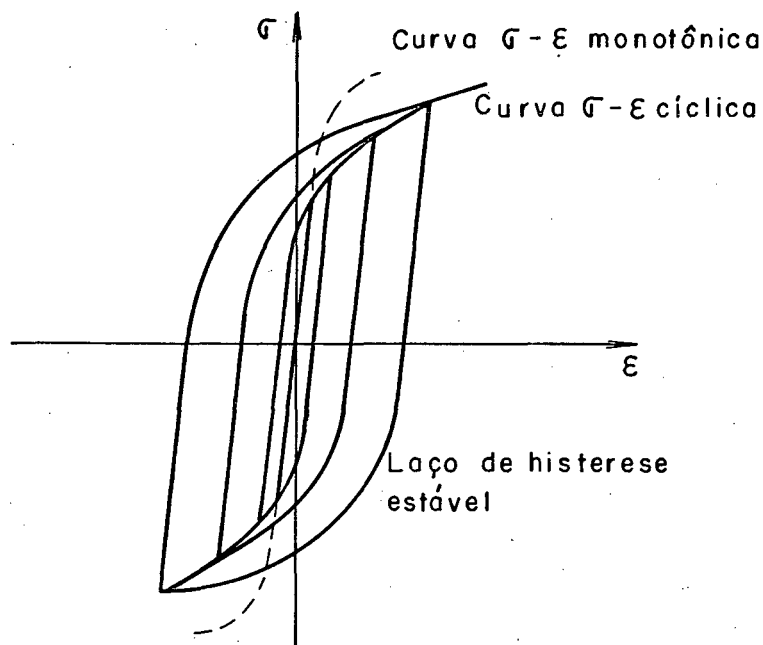


Fig.2.11 - Curva tensão-deformação cíclica comparada com a curva tensão-deformação monotônica e um desenho aproximado dos laços de histerese.

Na Fig. 2.12, as curvas tensão-deformação cíclicas são comparadas com as curvas tensão-deformação estáticas, ou monotônicas, para diferentes materiais [3,7].

Os resultados dos ensaios de fadiga de baixo-ciclo são traçados em um gráfico log-log (Fig.2.13), com as amplitudes ou as variações das deformações na ordenada e o número de ciclos ou de reversões à falha na abcissa. Evidências experimentais acumuladas por vários pesquisadores indicam que a vida cíclica

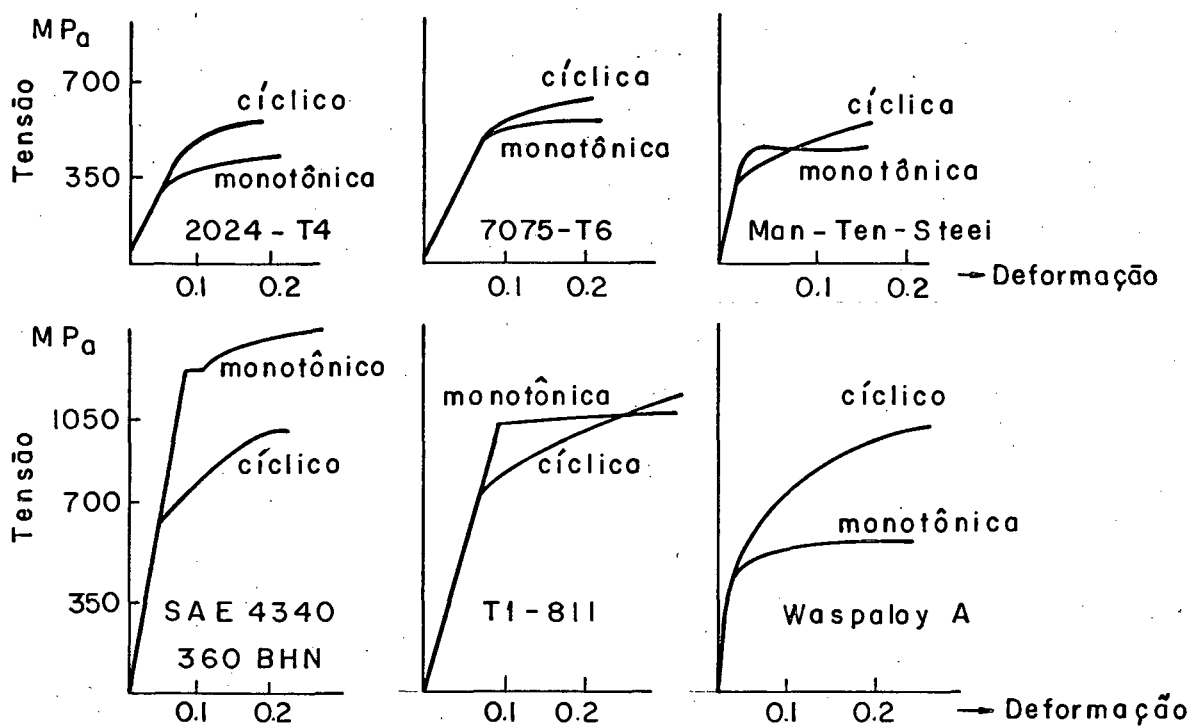


Fig.2.12 - Curvas tensão-deformação para vários materiais.

é melhor relacionada com a deformação plástica do que com a deformação total, em especial para o caso de vida no regime de baixo-ciclo.

2.2.2.2 - Relação entre a curva deformação-vida e a fadiga de baixo ciclo.

Para a determinação da vida de um corpo de prova ou de uma peça de máquina ou componente estrutural consideradas as propriedades cíclicas dos materiais como, também, o carregamento sob controle das deformações, é conveniente analisar de forma

separada as componentes elásticas e plásticas das deformações.

A componente elástica é relacionada com a variação das tensões e o número de reversões da carga, segundo a seguinte equação empírica:

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} E = \sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b \quad (2.34)$$

Esta equação é similar à proposta por Basquin [7] em 1910, a qual é mostrada graficamente na Fig. 2.13. Incrementos da vida de fadiga são esperados quando diminui o expoente de resistência à fadiga b e aumenta o coeficiente de resistência à fadiga σ_f' .

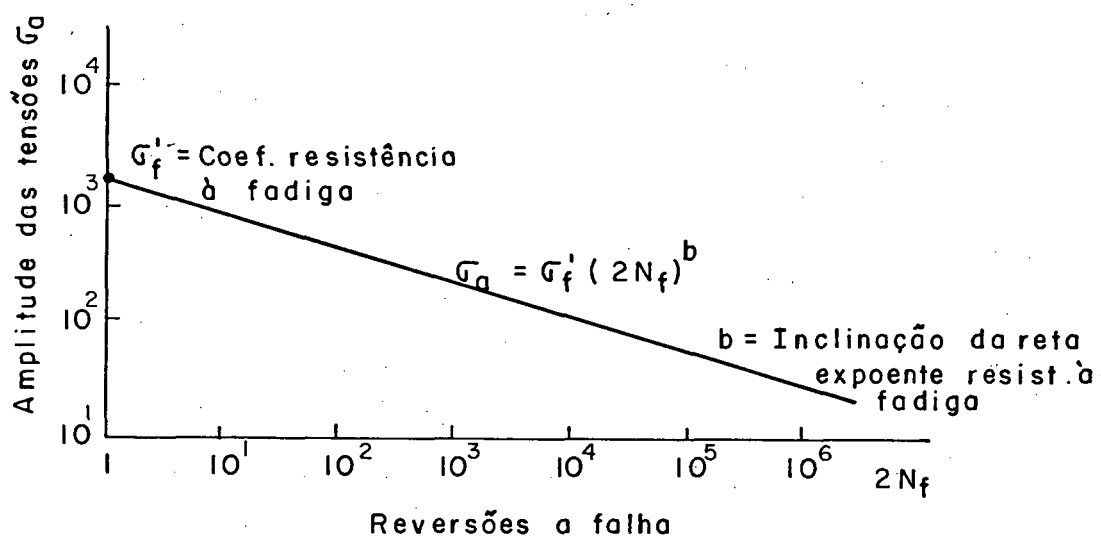


Fig.2.13 - Relação entre a amplitude de tensão e o número de reversões. Propriedades de resistência à fadiga do material.

A amplitude da deformação plástica, $\Delta\epsilon_p/2$, para um número de reversões $2N_f$ sob tensões uniaxiais, em fadiga de baixo ciclo, foi relacionada de forma independente por Manson e Coffin [17] de acordo com a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (2.35)$$

Na Fig.2.14, mostra-se graficamente a equação 2.35 e maiores vidas à fadiga são esperadas quando diminui o expoente de ductilidade à fadiga c , e aumenta o coeficiente de ductilidade à fadiga ϵ_f' .

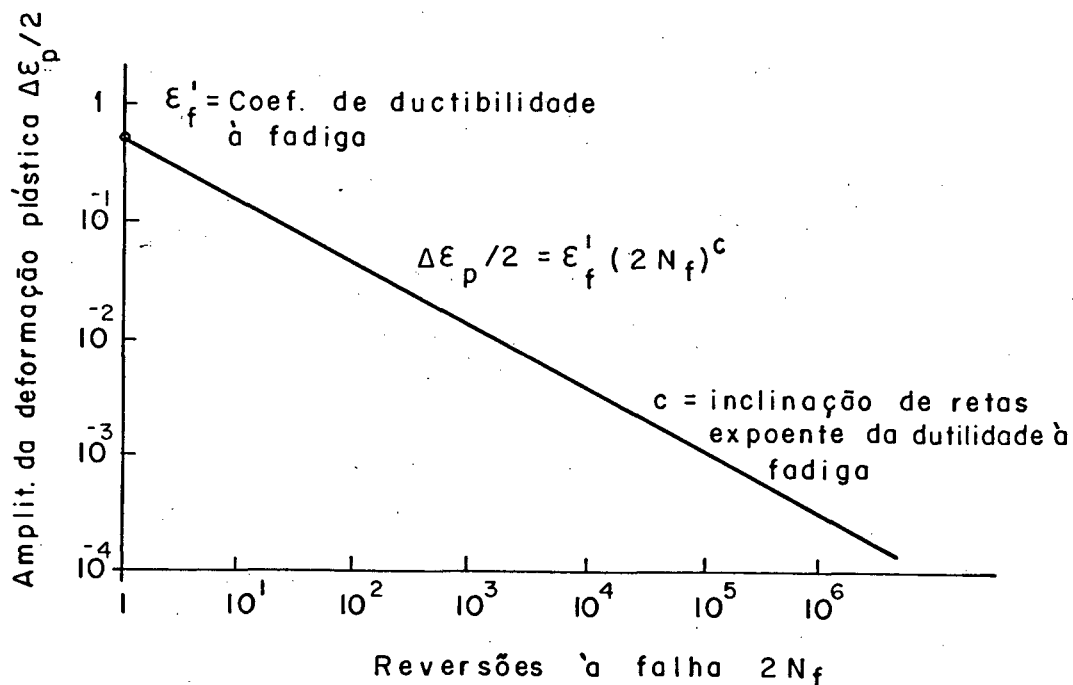


Fig.2.14 - Relação entre a amplitude de deformação e o número de reversões. Propriedades de ductilidade do material.

Depois da análise das equações 2.34 e 2.35, pesquisadores têm constatado que a amplitude da deformação total em um ponto é a soma das amplitudes das parcelas elástica e plástica, da deformação tendo uma correlação com a vida, o que foi modelado matematicamente por Morrow [7] como:

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} \quad (2.36)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (2.37)$$

A Fig. 2.15 representa a equação 2.37, mostrando a superposição das retas das deformações elástica e plástica, bem como a curva resultante, amplitude das deformações versus as reversões à falha.

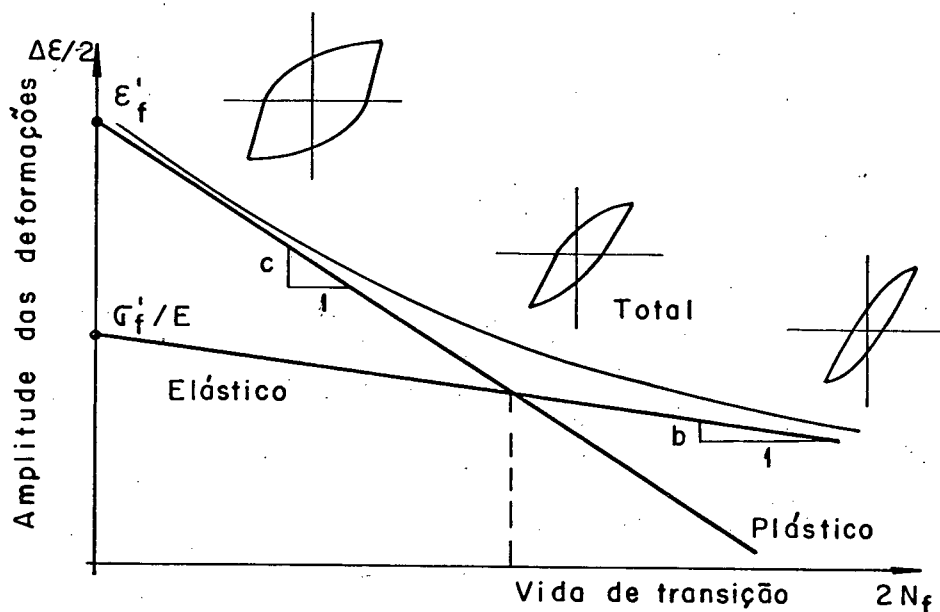


Fig.2.15 - Superposição das curvas de deformação plástica e elástica com a vida, produzindo a curva deformação total-vida.

As constantes b e σ_f'/E , c e ϵ_f' são inclinações e intersecções das retas de deformações elástica e plástica para uma reversão à falha. Os valores para b têm uma variação de -0.05 até -0.15 , sendo -0.1 um valor representativo; e os de c têm uma variação de -0.5 até -0.8 , sendo -0.6 um valor representativo. σ_f' e ϵ_f' podem ser relacionados com os valores de σ_f e ϵ_f do ensaio monotônico de tração, podendo ser considerados iguais [7] para uma primeira aproximação. As constantes b e c podem ser aproximadas [3] por funções do expoente de encruamento cíclico n' como:

$$b = - \frac{n'}{1+5n'} \quad (2.38)$$

$$c = - \frac{1}{1+5n'}$$

Destas expressões, tem-se que o expoente de encruamento cíclico n' pode ser determinado como:

$$n' = \frac{b}{c} \quad (2.39)$$

Através da Fig.2.15 pode-se notar que, para uma curta vida, a amplitude de deformação plástica é dominante, e, para longa vida, predomina a amplitude de deformação elástica.

O ponto de intersecção das duas retas, define o número de ciclos chamado "vida de transição", entre fadiga no regime de baixo número de ciclos e no regime de alto ciclo. Então, pode-se

verificar que, para vidas menores que a de transição, materiais com alta ductilidade (ϵ_f') são melhores, e, para vidas mais longas que a de transição, materiais de alta resistência à fratura (σ_f') são melhores.

As considerações anteriores devem ser tidas em conta na seleção dos materiais adequados para cada aplicação, em função da magnitude das amplitudes totais das deformações geradas. Na Fig. 2.16, mostra-se o comportamento de três materiais de características diferentes quanto à resistência e ductilidade, comprovando-se que, para 2×10^3 reversões, todos os materiais suportam aproximadamente o mesmo valor da amplitude total de deformação de 0.01; ou seja, nestas condições, qualquer liga pode cumprir seu propósito.

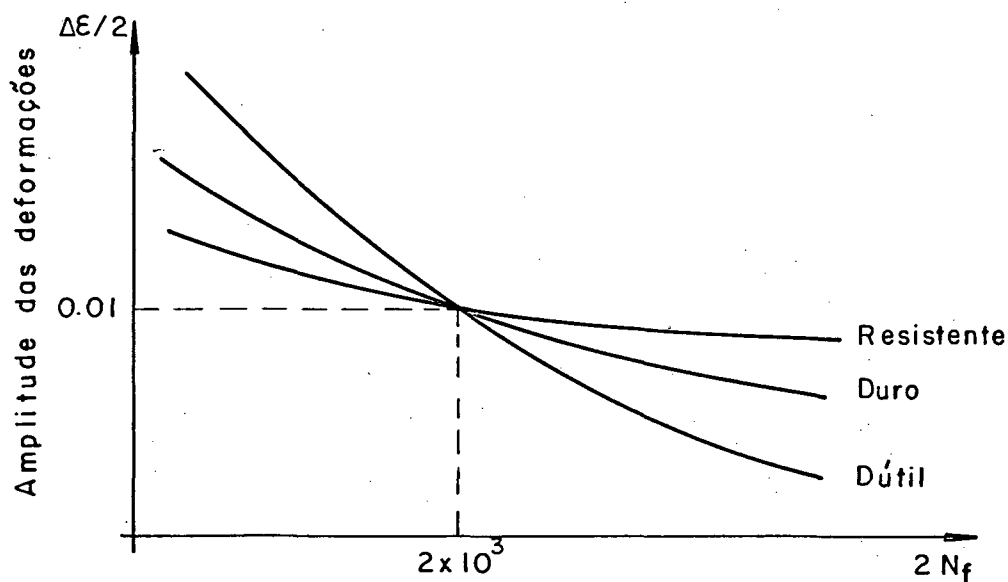


Fig.2.16 - Curva deformação-vida para materiais diferentes.

Manson [7] fez uma modificação na equação 2.37, ficando da seguinte forma:

$$\Delta \epsilon_t = 3,5 \frac{\sigma_R}{E} N_f^{-0,12} + \epsilon_f^{0,6} N_f^{-0,6} \quad (2.40)$$

Este método de obter a equação da fadiga foi denominado por Manson como "o método das inclinações universais". Com isto, a estimativa da vida à fadiga ou falha tem-se simplificado, já que a variação total da deformação é função dos valores de σ_R , E , ϵ_f , todos obtidos de um simples ensaio monotônico à tração.

Na equação 2.40, a primeira parcela representa a variação da deformação elástica (função da resistência do material) e a segunda parcela representa a variação de deformação plástica (função da ductilidade do material).

As vidas determinadas segundo os métodos de Morrow e das inclinações universais correspondem ao período de nucleação ou iniciação de uma pequena trinca detectável, em fadiga de baixo ciclo.

2.2.2.3 - Influência das tensões e deformações médias, distintas de zero

Pesquisas desenvolvidas têm verificado que o efeito de uma deformação média de compressão na vida à fadiga de baixo ciclo tem o mesmo efeito do que o ocasionado por uma deformação média de tração se suas magnitudes são as mesmas. [3] Também se tem constatado que o efeito das deformações médias tem maior importância

quando a componente da deformação plástica é dominante e afeta a ductilidade do material no projeto para vidas menores que a de transição, e que o efeito da tensão média distinta de zero é importante quando a deformação elástica é dominante e afeta a resistência do material, no projeto para vidas maiores que a de transição.

Um método de análise da influência das tensões e deformações médias distintas de zero é estudar seus comportamentos nas equações para prever a vida à fadiga ou falha em baixo-ciclo.

Considerando a equação do método de Morrow, tem-se dois casos:

2.2.2.3.1 - Tensão média σ_m distinta de zero [7].

Substituindo σ_f' por $\sigma_f' - \sigma_m$ na equação 2.37, tem-se:

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N)_f^b + \epsilon_f' (2N)_f^c \quad (2.41)$$

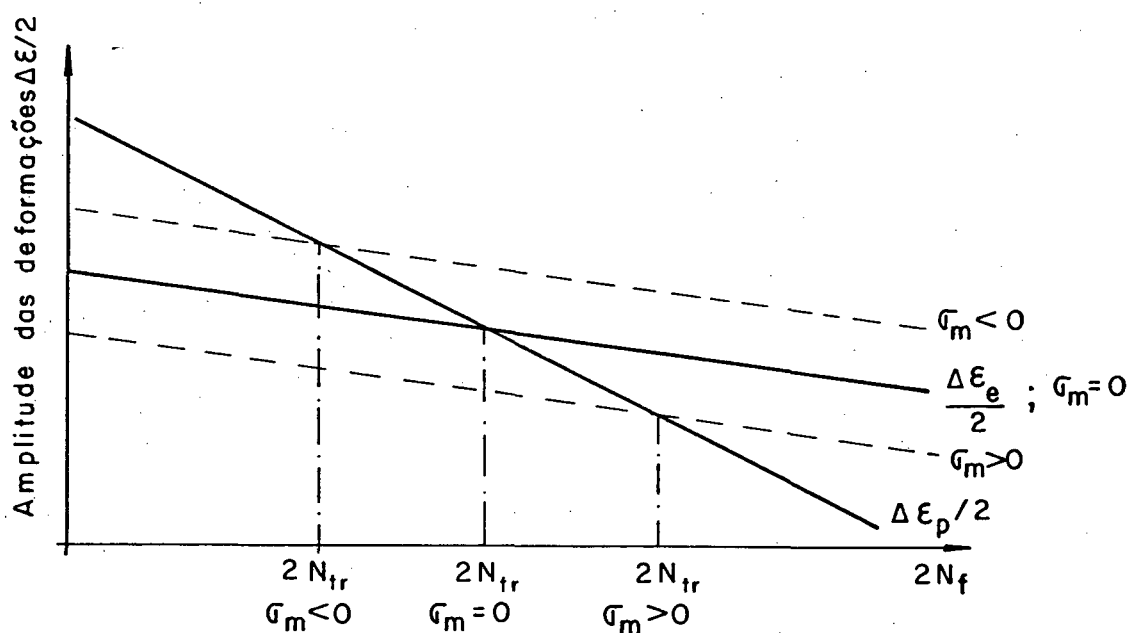


Fig.2.17 - Efeito da tensão média σ_m distinta de zero.

Se a tensão média é menor que zero, tem-se um aumento da resistência do material com uma diminuição da vida de transição em baixo ciclo.

Por outro lado, se a tensão média é maior que zero, tem-se uma diminuição da resistência com um aumento da vida de transição em baixo ciclo.

2.2.2.3.2 - Deformação média ϵ_m distinta de zero [7]

Substituindo-se ϵ_f' por $(\epsilon_f' - \epsilon_m)$ na equação 2.37

tem-se:

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + (\epsilon_f' - \epsilon_m) (2N_f)^c \quad (2.42)$$

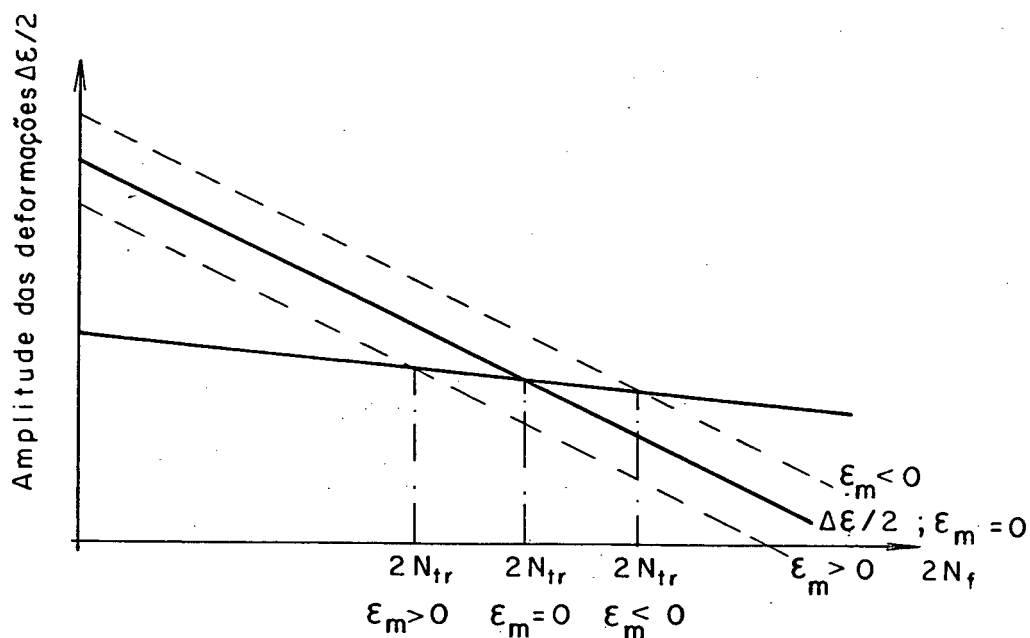


Fig.2.18 - Efeito da deformação média distinta de zero.

Se a deformação média é menor que zero, a ductilidade aumenta com um aumento da vida de transição em baixo ciclo. Mas se a deformação média é maior que zero, a ductilidade diminui, com diminuição da vida de transição em baixo ciclo.

A análise anterior é válida também para o método das inclinações universais.

As tensões e deformações médias mudam a posição do sistema de eixos dos laços de histerese, tendo como referência o sistema quando $\sigma_m=0$ e $\epsilon_m=0$. É assim que σ_m faz subir ou baixar os eixos do laço de histerese, sendo positiva ou negativa. Por outro lado, ϵ_m desloca os eixos à direita ou à esquerda, sendo positiva ou negativa.

Em muitos carregamentos tem-se a existência simultânea de σ_m e ϵ_m e, assim, a sua consideração é muito importante na seleção dos materiais como também no comportamento à fadiga de baixo ciclo em peças de máquinas ou componentes estruturais.

2.2.3 - Fadiga de alto ciclo

2.2.3.1 - O conceito de tensões cíclicas

Na análise da Fig.2.6, pode-se verificar que a região correspondente à fadiga de alto ciclo é para vidas superiores a 1000 ciclos.

O comportamento do material em "fadiga de alto ciclo" sob carregamento cíclico fica na região elástica. Portanto, pode-se estudar o problema da relação tensões-deformações segundo o conceito de carregamento com controle das tensões cíclicas, e

assim a vida é determinada em função da variação das tensões cíclicas, que produzem no material encruamento ou amolecimento, |10|, como é mostrado na Fig. 2.19.

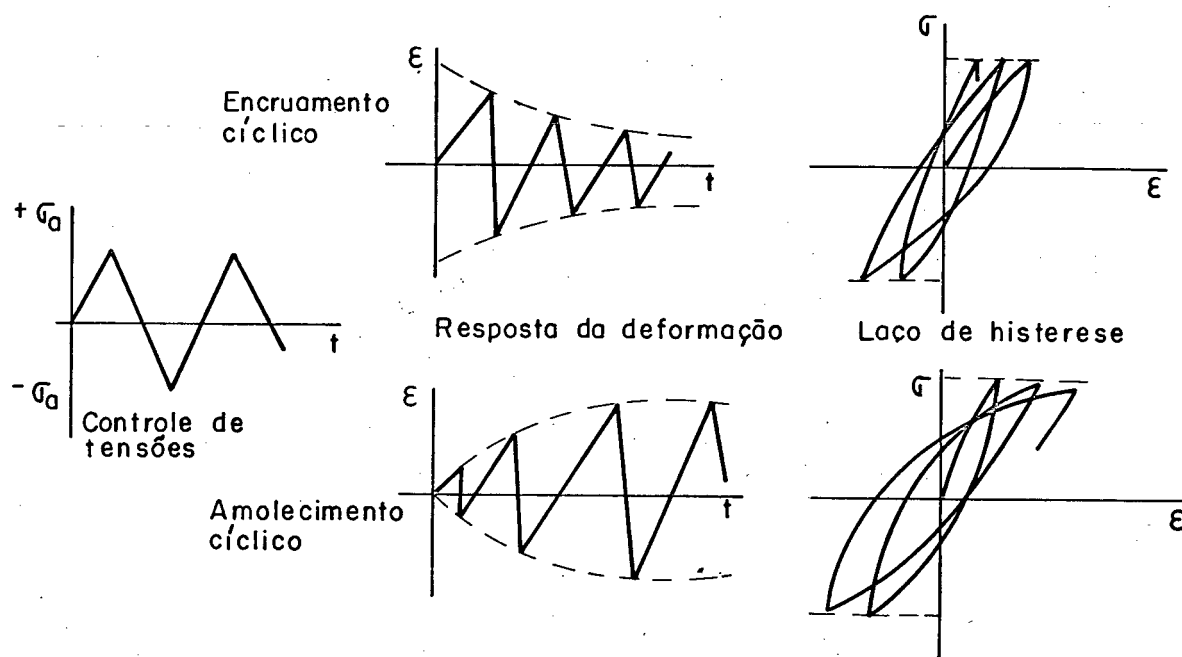


Fig.2.19 - Encruamento ou amolecimento por tensões cíclicas com controle de tensões.

Pode-se dizer que a resposta às tensões-deformações dos materiais pode mudar sob a aplicação de tensões cíclicas, pela tendência dos laços de histerese permanecerem estáveis caso a variação das deformações permaneça constante, sob controle de tensão.

2.2.3.2 - Relação entre a curva tensão-vida e a fadiga de alto ciclo [24]

A equação da curva σ - N , traçada em um gráfico log-log é:

$$\log \sigma_a = b - m' \log N \quad (2.43)$$

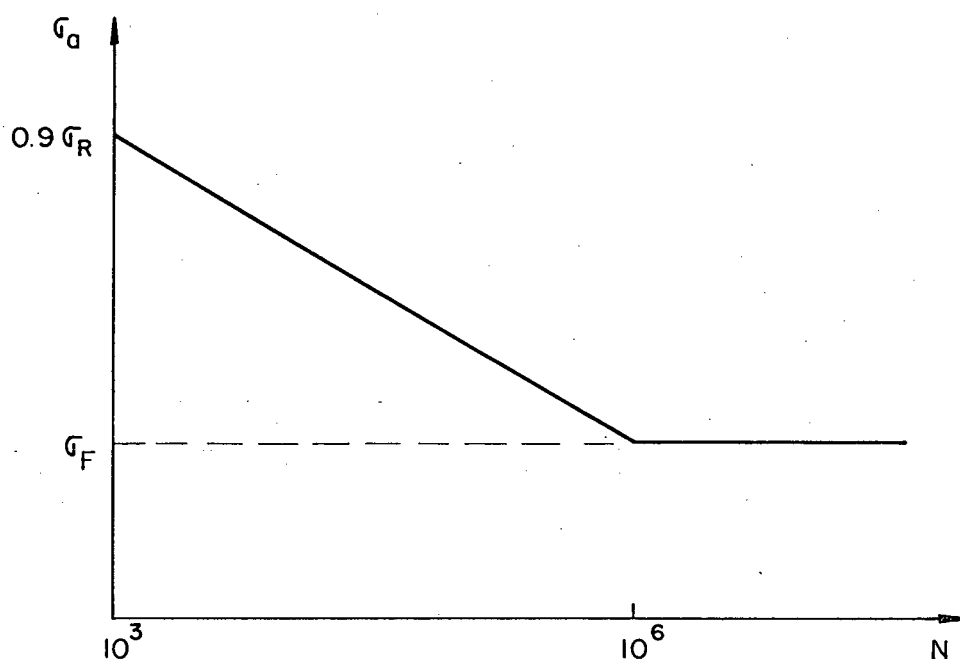


FIG.2.20 - Tensão alternante σ_a versus a vida N

O limite superior da curva de Whöler, é função de um coeficiente baseado na porcentagem da probabilidade de vida do material, conforme o ensaio de fadiga, neste trabalho dito coeficiente tem o valor de 0.9 [7,24].

Considerando a intersecção σ_F para 10^6 ciclos a $0.9 \sigma_R$ para 10^3 ciclos (Fig.2.20), tem-se para m' e b as seguintes expressões:

$$m' = \frac{1}{3} \log \frac{0.9 \sigma_R}{\sigma_F} \quad (2.44)$$

$$b = \log \frac{(0.9 \sigma_R)^2}{\sigma_F} \quad (2.45)$$

Conhecidos σ_R e σ_F , pode-se determinar σ_a , se a vida N é dada, segundo

$$\sigma_a = \frac{10^b}{N^{m'}} \quad 10^3 < N < 10^6 \quad (2.46)$$

Agora, se σ_a é conhecido e deseja-se determinar a vida N , tem-se:

$$N = \left[\frac{10^b}{\sigma_a} \right]^{1/m'} \quad 10^3 < N < 10^6 \quad (2.47)$$

O anterior é válido se a tensão média for zero e sem modificação da resistência do material.

2.2.3.3 - Fatores que afetam a tensão limite de resistência à fadiga

Pode-se observar que o limite de resistência à fadiga de uma peça de máquina ou estrutura é consideravelmente menor do que o limite de fadiga de um corpo de prova sob ensaio em flexão rotativa; Marin [13] tem classificado alguns dos fatores que modificam o limite de resistência à fadiga. São eles:

- a) Material: composição química.
- b) Fabricação: métodos de fabricação, tratamentos térmicos, desgaste por corrosão, condição da superfície, concentração de tensões.
- c) Meio-ambiente: corrosão, temperatura, estado de tensões, tempo de descanso ou repouso.
- d) Projeto: tamanho, forma, vida especificada, estado de tensões, concentração de tensões, velocidade de carregamento, desgaste.

Considerando as mais importantes destas condições, utiliza-se uma variedade de fatores de correção, cada um dos quais considera apenas um efeito. Então, pode-se escrever a seguinte equação geral:

$$\sigma'_F = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 \sigma_F \quad (2.48)$$

2.2.3.3.1 - Fator de superfície (k_1)

A superfície de um corpo de prova para ensaio de flexão rotativa é muito polida, com polimento final axial, para eliminar arranhões circunferenciais. Como a maioria das peças de máquinas ou componentes estruturais não tem este acabamento superficial, fatores modificadores, que dependem da qualidade do acabamento superficial e da resistência à tração, são mostrados na Fig. 2.21. São compilações de dados de ensaios de aços forjados, fundidos e os melhores ferros fundidos [24].

Os fatores para materiais não ferrosos devem ser considerados iguais à unidade porque os limites de resistência à fadiga tabelados destes materiais incluem o efeito de acabamento superficial.

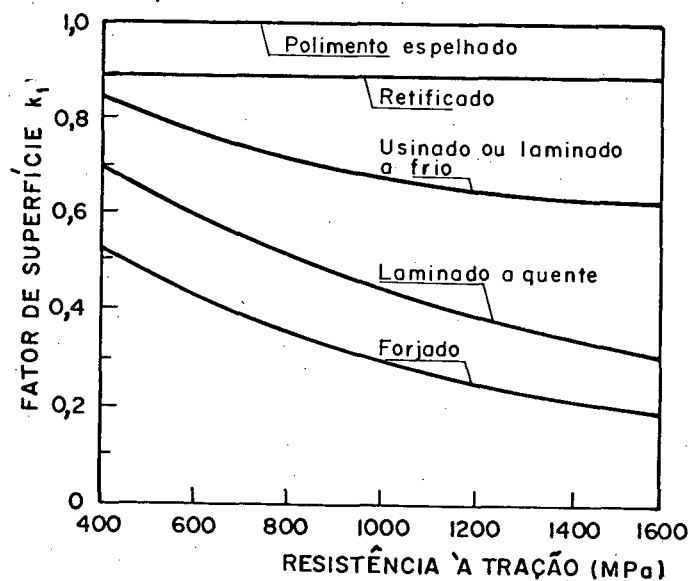


Fig. 2.21 - Fator de superfície para aços.

2.2.3.3.2 - Fator de tamanho (k_2)

Os ensaios para determinar o limite de resistência à fadiga são feitos com corpos de prova de 5-10 mm de diâmetro. Para corpos de provas de dimensões maiores, com tensões alternadas de flexão ou tração, o limite de fadiga é 10 a 15 por cento menor, isto para corpos de prova até 50mm. Para corpos de prova maiores do que 50mm, a redução pode chegar até 25 por cento.

Provavelmente, como a distribuição de tensões nos casos de flexão e torção é semelhante à distribuição de tensões em uma barra entalhada, ou seja, a flexão e torção assemelham-se à concentração de tensões, e como um corpo de provas de tamanho maior terá mais defeitos superficiais do que um pequeno, vale a redução dos limites de resistência à fadiga devido ao tamanho.

Tem-se que, para flexão e torção, os valores de k_2 são selecionados da seguinte maneira:

$$k_2 = \begin{cases} 1 & d \leq 7,6 \text{ mm} \\ 0.85 & 7.6 \text{ mm} < d \leq 50 \text{ mm} \\ 0.75 & d > 50 \text{ mm} \end{cases} \quad \text{ou} \quad (2.49a)$$

$$k_2 = \begin{cases} 1 & d < 8 \text{ mm} \\ 1.189 d^{-0,097} & 8 < d < 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.49b)$$

Neste trabalho, adotou-se (2.49b)

A dimensão d corresponde ao diâmetro de seções circulares ou à altura nas seções não-circulares sujeitas à flexão.

Os valores de k_2 [24] são também válidos para o caso

de cargas axiais. Para seções não-circulares, considera-se d como a menor dimensão da seção reta, em carregamento axial.

2.2.3.3.3 - Fator de confiabilidade (k_3)

O projeto de peças de máquina ou componentes estruturais sujeitos a cargas de fadiga deve ser feito, para qualquer vida desejada, com um determinado grau de confiabilidade. Ou seja, a vida e a confiabilidade constituem um método eficaz para medir a eficiência de um projeto, em vez do uso de um fator de segurança, porque são fáceis de serem medidas.

Em geral, tem-se que o desvio-padrão do limite de resistência à fadiga, não ultrapassa 8% do valor médio. Isto significa que se pode obter o limite de resistência à fadiga correspondente a qualquer confiabilidade desejada C , subtraindo da média do limite de resistência à fadiga um número de desvios-padrão. Então, o fator de confiabilidade k_3 |24| é:

$$k_3 = 1 - 0.08 Z_C \quad (2.50)$$

A Tabela 2.1 mostra a variável padronizada Z_C correspondente a várias confiabilidades exigidas em projetos.

TABELA 2.1 - Variável padronizada Z_C para vários valores de C.

Confiabilidade C	Variável padronizada Z_C
0.50	0
0.90	1.288
0.95	1.645
0.99	2.326
0.999	3.091

A distribuição estatística da resistência à fadiga pode ter uma melhor aproximação, muitas vezes, através da distribuição de Weibull do que através da distribuição normal, utilizada aqui por conveniência ao combinar tensão com resistência.

2.2.3.3.4 - Fator de temperatura (k_4)

Em operação em altas temperaturas, deve-se medir fator de temperatura k_4 , se for possível, em ensaios reais. O fator k_4 deve ser aplicado em ambos os extremos do diagrama σ -N, porque a resistência estática também pode ser reduzida. Também é desejável a verificação da possibilidade de falha devido à fluência. O valor de k_4 para aços é dado por:

$$\begin{array}{l}
 k_4 = 1 \quad \left. \begin{array}{l} T < 450^\circ\text{C} \\ 450^\circ\text{C} < T < 550^\circ\text{C} \end{array} \right\} \quad (2.51) \\
 k_4 = 1 - 0.0058(T - 450)
 \end{array}$$

2.2.3.3.5 - Fator de concentração de tensões (k_5)

A concentração de tensões é um efeito localizado. As tensões elevadas só existem em uma região na vizinhança da descontinuidade. Em materiais dúcteis, a primeira carga aplicada causará escoamento na descontinuidade, o que alivia a concentração de tensões. Então, se as peças são de material dúctil e o carregamento estático, não é necessário o emprego do fator de concentração de tensões.

Quando as peças forem feitas de materiais frágeis ou estiverem sujeitas a carregamento cíclico, é necessário considerar o fator de concentração de tensões. Mas, como alguns materiais podem não ser muito sensíveis à entalhes ou descontinuidade, recomenda-se não usar os valores integrais dos fatores teóricos de concentração de tensões, mas sim um valor chamado "fator de concentração de tensão de fadiga" ou "fator prático de concentração de tensão", K_f , definido pela equação:

$$K_f = \frac{\text{Limite de resistência à fadiga para corpos de prova sem entalhe}}{\text{Limite de resistência à fadiga para corpos de prova com entalhe}} \quad (2.52)$$

A relação entre o fator de correção devido a concentração de tensão k_5 e K_f é:

$$k_5 = \frac{1}{K_f} \quad (2.53)$$

Define-se o fator de sensibilidade ao entalhe q pela equação 2.54

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (2.54)$$

O valor de q varia entre zero e um. Segundo a equação 2.54, se $q=0$, $K_f=1$ e o material não possui sensibilidade ao entalhe; mas, se $q=1$, $K_f=K_t$ e o material terá sensibilidade plena. Em um projeto, primeiro determina-se o valor de K_t em função da geometria da peça. Com a especificação do material, determina-se que, após o valor de K_f , como:

$$K_f = 1 + q (K_t - 1) \quad (2.55)$$

Na Fig.2.22, pode-se determinar q para aços e ligas de alumínio, quando as peças estão sujeitas a solicitações do tipo do ensaio à fadiga com flexão rotativa ou carregamento axial alternado. A Figura 2.23 usa-se para peças sujeitas a cisalhamento alternado.

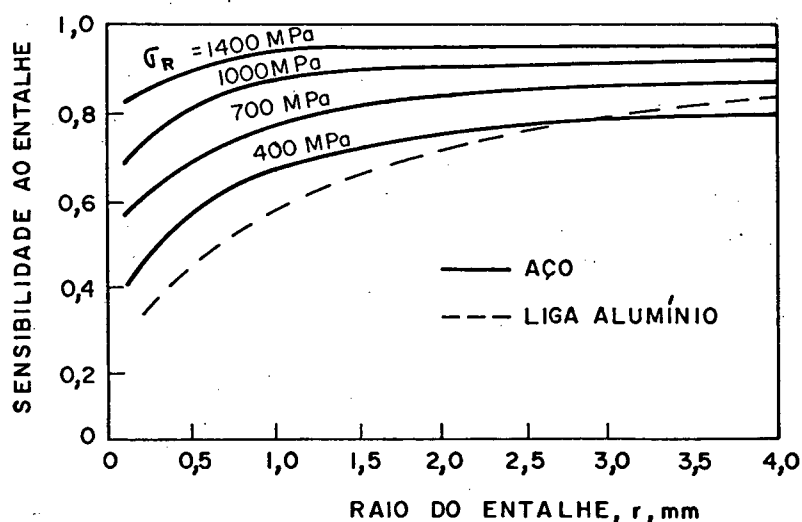


Fig.2.22 - Sensibilidade ao entalhe para aços e alumínio, peças sujeitas a carregamentos de flexão ou axial reversível.

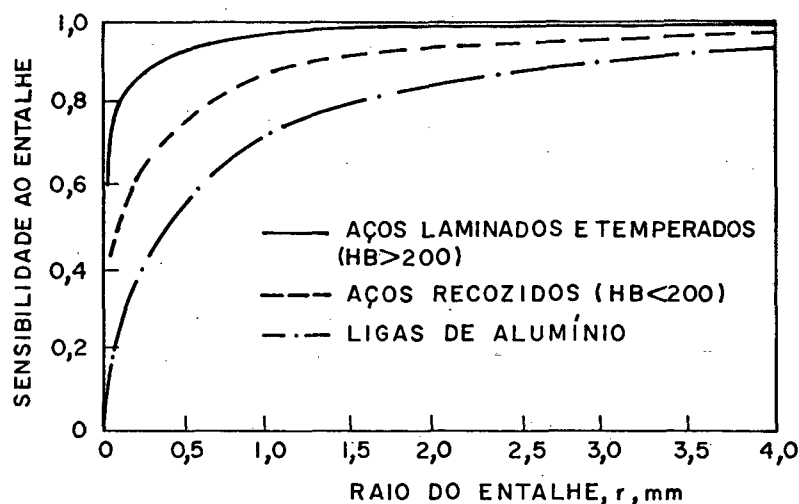


Fig.2.23 - Sensibilidade ao entalhe para peças sujeitas a cisalhamento alternativo.

Para entalhes de raios grandes, em especial para materiais de alta resistência, q aproxima-se do valor um, ou seja, pode-se fazer $K_f = K_t$. Em geral, para raios de entalhe maiores que 4mm, pode-se usar os valores de q correspondentes a 4 mm.

A sensibilidade ao entalhe q pode ser determinada em função do tamanho do grão, quando o material é aço, segundo a seguinte equação [3]:

$$q = \frac{1}{1 + 5.04 \frac{\sqrt{\rho^T}}{\sqrt{r}}} \quad (2.56)$$

onde o r está em mm.

Os valores de $\sqrt{\rho^T}$ são obtidos da Fig. 2.24 em função da resistência à tração do aço.

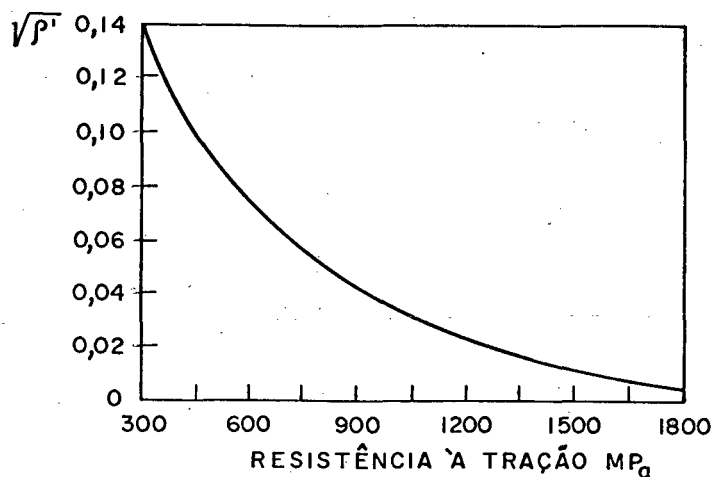


Fig. 2.24 - $\sqrt{p'}$ em função da resistência à tração.

Para os ferros fundidos, recomenda-se uma sensibilidade ao entalhe $q = 0.20$.

Como os materiais frágeis não apresentam um limite de resistência ao escoamento, deve-se aplicar um fator de concentração de tensões K_f à resistência estática σ_{Rt} ou σ_{Rc} , assim como ao limite de resistência à fadiga σ_f .

2.2.3.3.6 - Fator de efeitos diversos k_6

O fator k_6 deve ser considerado a critério do projetista e só se algum efeito não levado em conta for importante.

Alguns dos efeitos a lembrar são:

- a) As tensões residuais que podem melhorar ou piorar o limite de resistência à fadiga;

- b) As características direcionais da operação de laminação ou estampado de chapas e barras, bem como as peças forjadas, que afetam o limite de resistência à fadiga em uma direção;
- c) O endurecimento superficial que pode fazer falhar uma peça à fadiga na superfície ou no ponto de maior raio do núcleo dependendo do gradiente de tensões;
- d) O problema de corrosão superficial;
- e) Os revestimentos metálicos que reduzem o limite de fadiga até 35 por cento e que, em alguns casos, devem ser eliminados. [24]

2.2.3.4 - Influência das tensões médias distintas de zero [7]

Os dados obtidos em ensaios de laboratório são de tensões alternantes totalmente reversíveis, isto é, de tensões médias iguais a zero. Mas, nas aplicações reais, tem-se tensões médias distintas de zero. Então, é muito importante que o projetista conheça a influência das tensões médias no comportamento de fadiga.

Em geral, para carregamento cíclico, tem-se que as tensões alternantes e média são dadas pelas equações:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.57)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.58)$$

Considerando o gráfico σ - N , na Fig.2.25, pode-se verificar que tensões médias de compressão aumentam a vida à fadiga, e tensões médias de tração diminuem essa vida.

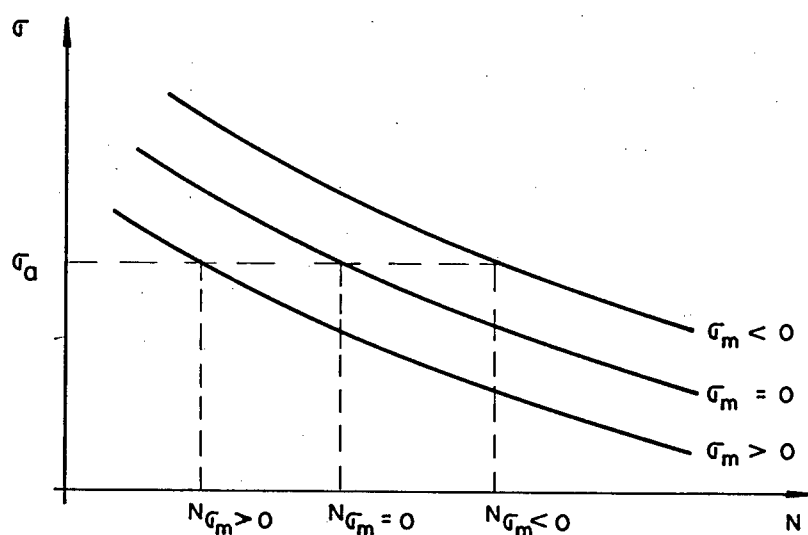


Fig.2.25 - Gráfico σ - N mostrando o efeito da tensão média distinta de zero.

Agora considerando os fatores de correção da resistência à fadiga, tem-se as seguintes equações que relacionam as tensões alternantes e médias com a resistência do material:

Goodman Modificado:
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{F'}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_R} = 1 \quad (2.59)$$

Gerber:
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{F'}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_R} \right)^2 = 1 \quad (2.60)$$

Soderberg:
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{F'}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_E} = 1 \quad (2.61)$$

Morrow:
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{F'}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1 \quad (2.62)$$

As equações 2.59, 2.60, 2.61 e 2.62 representam, cada uma delas, uma área de segurança dentro da qual não acontece falha por fadiga sempre que a expressão da esquerda for menor que um. A Fig. 2.26 mostra e compara as quatro expressões.

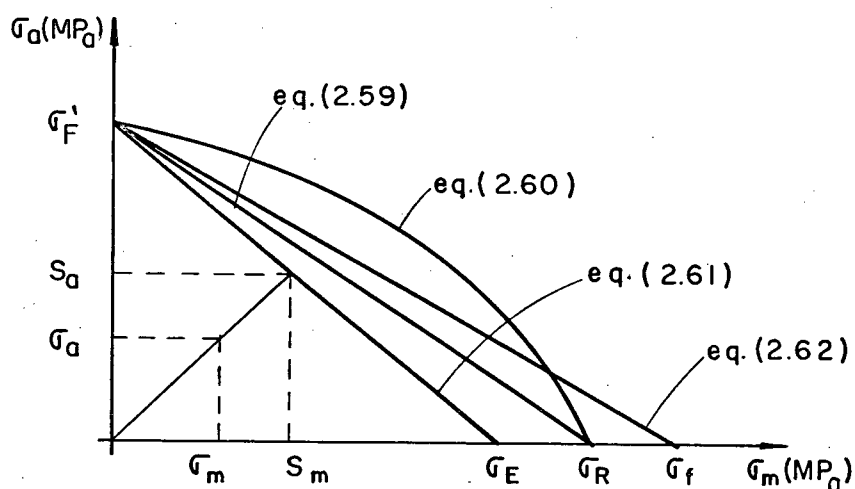


Fig.2.26 - Representação das equações de Goodman modificado, Gerber, Soderberg e Morrow.

Se as tensões alternantes e médias variam na mesma proporção, então o fator de segurança pode ser determinado como a relação entre a que causa a falha ao máximo valor da resistência e a tensão nas condições de operação, ou seja:

$$n_a = \frac{S_a}{\sigma_a} \quad (2.63)$$

$$n_m = \frac{S_m}{\sigma_m} \quad (2.64)$$

Os fatores de segurança n_a e n_m são iguais quando a reta que une os pontos das tensões atuante passa pela origem, ou seja, quando a proporção σ_a/σ_m é constante.

2.2.4 - Determinação das tensões e deformações locais, em peças entalhadas |7|

O carregamento atuante em peças entalhadas, muitas vezes, é tão alto que as tensões locais, determinadas como o produto da tensão nominal e o fator geométrico de concentração de tensões do entalhe, são consideravelmente maiores que a resistência ao escoamento do material. Quando isto acontece, é melhor utilizar o conceito do estado de deformações no local, ou seja:

$$\epsilon = K_\epsilon e \quad (2.65)$$

Então, se as tensões e deformações no entalhe ficam dentro da região elástica da curva σ - ϵ , tem-se:

$$\sigma = K_t S \quad \epsilon = K_t e \quad (2.66)$$

Quando a tensão no entalhe é maior que a tensão de escoamento do material, o campo de tensões não é proporcional às deformações. Definem-se, então, os fatores de concentração de tensões e deformações como:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma}{S} \quad (2.67)$$

$$K_{\epsilon} = \frac{\epsilon}{e} \quad (2.68)$$

A tensão e a deformação são relacionadas pela equação da curva tensão-deformação do material, que pode ser uma função de encruamento potencial ou linear e que se representa pelas seguintes equações:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{k}\right)^{1/n} \quad \text{(Potencial)} \quad (2.69)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \left. \begin{array}{l} \sigma < \sigma_E \end{array} \right\} \quad (2.70)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma - \sigma_E}{H} \quad \left. \begin{array}{l} \sigma \geq \sigma_E \end{array} \right\} \quad \text{linear} \quad (2.71)$$

Os valores de n, k, σ_E são correspondentes ao comportamento monotônico. Para o caso cíclico, têm-se outros valores que são n', k', σ'_E . Todos eles podem ser obtidos em tabela das propriedades mecânicas dos materiais [7,21].

O problema a resolver na análise das deformações no entalhe é, dada a tensão ou a deformação nominal, determinar o valor da tensão e deformação local na superfície da raiz do entalhe ou perto dela. As tensões locais podem ser obtidas aplicando o método dos elementos finitos, ou aplicando-se as equações da teoria

de plasticidade. Mas, para os problemas de fadiga, tem-se duas regras que apresentam bons resultados para as solicitações na superfície da raiz do entalhe.

2.2.4.1 - Regra linear [7]

Essa regra considera a igualdade entre o fator de concentração de deformações e o fator geométrico de concentração de tensões, ou seja:

$$K_\epsilon = K_t = \frac{\epsilon}{e} \quad (2.72)$$

A deformação pode ser determinada diretamente em função da tensão nominal e a tensão local pela curva tensão-deformação do material, conforme Fig.2.27.

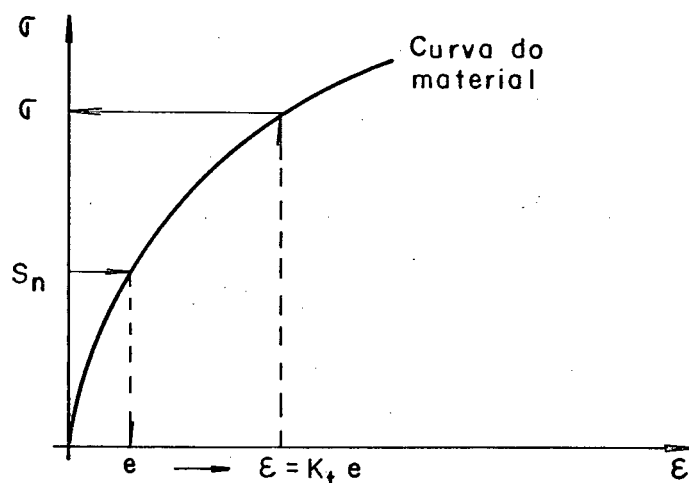


Fig.2.27 - Representação da regra linear.

2.2.4.2 - Regra de Neuber |3,7,10|

A regra de Neuber considera que o fator geométrico de concentração de tensões é igual à média geométrica do produto dos fatores de concentração de tensões e de deformações, ou seja:

$$K_t = (K_\sigma \cdot K_\epsilon)^{1/2} \quad (2.73)$$

ou

$$\epsilon_\sigma = K_t^2 \text{ e } S \quad (2.74)$$

A parte direita da equação 2.74 é uma constante. Para determinar os valores de σ e ϵ , tem-se que obter a solução simultânea da equação 2.74 e a equação da curva σ - ϵ do material. Na Fig. 2.28, mostra-se a intersecção da hipérbole de Neuber e a curva do material que fornece a solução da tensão e deformação local, segundo a regra de Neuber.

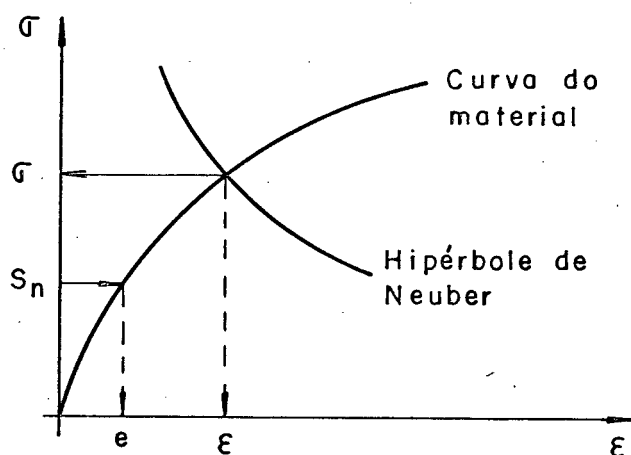


Fig.2.28 - Representação da regra de Neuber.

Para carregamento cíclico, é utilizada a curva de histerese que fornece as variações das tensões e deformações locais com as quais se determina a vida à fadiga em alto ou baixo ciclo. A curva de histerese Fig.2.29 é geometricamente similar à curva tensão-deformação, mas, de duplo comprimento.

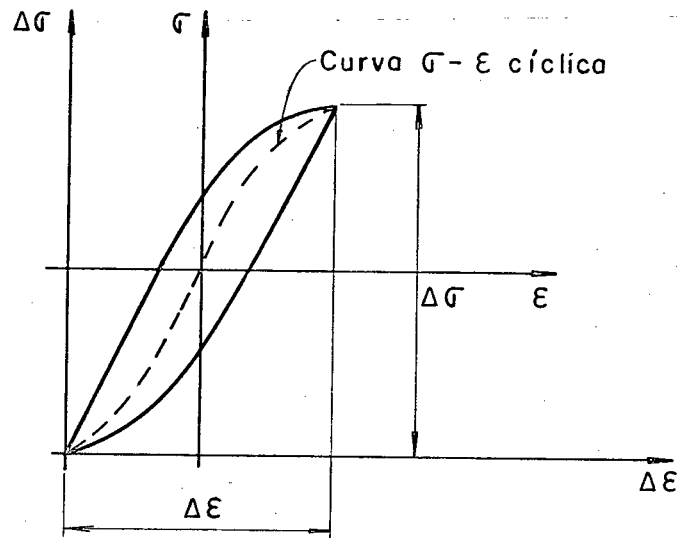


Fig.2.29 - Curva tensão-deformação cíclica e um laço de histerese.

As duas regras para determinar as variações de tensões e deformações ficam assim:

$$\text{Regra linear:} \quad \Delta \varepsilon = K_t \Delta \sigma \quad (2.75)$$

$$\text{Regra de Neuber:} \quad \Delta \varepsilon \Delta \sigma = K_t^2 \Delta \sigma \Delta S \quad (2.76)$$

2.2.4.3 - Dano acumulado

Em ensaios com cargas cíclicas de amplitude constante, o efeito cumulativo de todos os ciclos, eventualmente produz falhas por fadiga, sempre e quando a carga predominante não se encontre abaixo do limite de fadiga.

Quando o carregamento cíclico ocorre em ciclos que não são uniformes, ou seja, de maneira irregular, o efeito cumulativo destes ciclos pode produzir falha por fadiga.

O dano acumulado está em relação aos efeitos de cada ciclo fechado de carregamento, pela qual tem-se determinado, mediante algum método adequado, a variação de tensão ou a variação de deformação local, e o número de ciclos, através de um método de contagem de ciclos.

O método mais utilizado para a determinação do dano acumulado em fadiga é a regra do dano linear de Palmgren-Miner, [3, 7, 10, 24] e que é definida em função do dano causado por um ciclo como:

$$D_i = \frac{1}{N_i} \quad (2.78)$$

sendo N_i a vida média à falha de cada ciclo que é determinada pelos métodos de Morrow ou das inclinações universais, para fadiga a baixo-ciclo, e o diagrama σ - N para fadiga a alto ciclo, tendo em consideração as tensões e deformações médias. A falha acontecerá quando:

$$D_1 + D_2 + \dots + D_{i-1} + D_i > 1 \quad (2.79)$$

Mas muitos pesquisadores consideram que a falha é atingida quando a expressão da equação 2.79 for igual a um.

Em fadiga de baixo ciclo, a regra de Palmgren-Miner prevê a vida à fadiga para a nucleação de uma trinca, ou seja, indica o fim da nucleação ou o início da propagação da trinca.

Para fadiga de alto ciclo fornece uma boa aproximação na determinação da falha à fadiga.

2.2.4.4 - Contagem de ciclos

Para uma boa interpretação dos registros de cargas, tensões ou deformações em função do tempo, é necessário utilizar um método apropriado de contagem de ciclos.

Dentre todos os métodos de contagem de ciclos, o método do "rain-flow" [3, 7, 23] é amplamente o mais utilizado.

Considere-se, por exemplo, um registro de tensões em função do tempo, o qual é convertido em um sinal de picos e vales, Fig. 2.30.

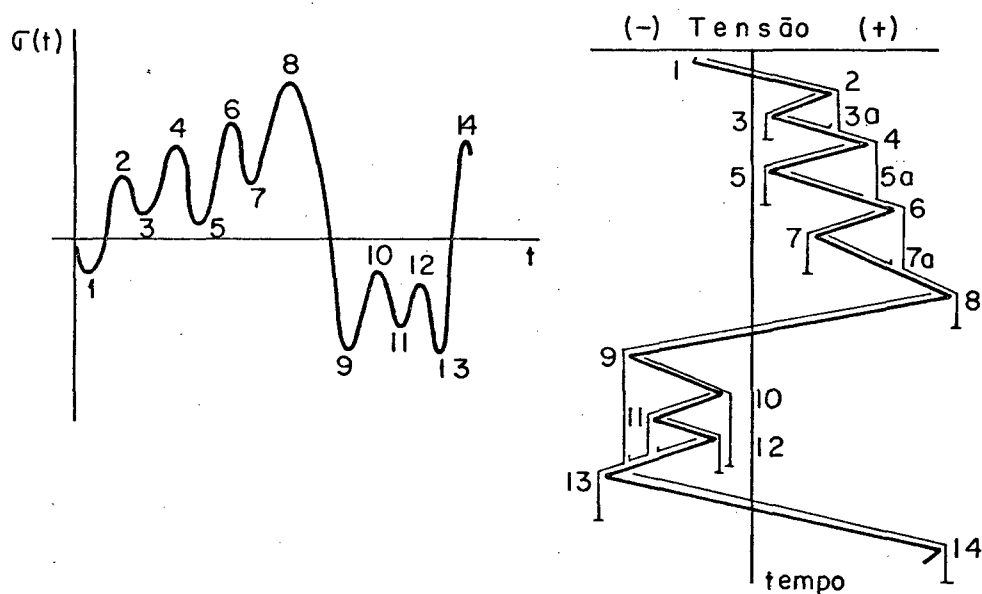


Fig.2.30 - Sinal de picos e vales no método rain-flow.

O eixo dos tempos é orientado verticalmente com a direção positiva para baixo. O processo pode ser considerado como uma sequência de calhas com a chuva caindo nelas. O método é desenvolvido de acordo com as seguintes regras:

a) Um trecho se inicia a cada pico ou vale.

Quando um trecho começa em uma depressão (vale) e chega ao pico, o trecho está terminado se o vale seguinte é mais negativo do que aquele em que começou o trecho considerado. São exemplos os trechos 1-8 e 9-10. Um percurso que começou num pico é terminado em outro pico que for mais positivo do que aquele onde começou o trecho em consideração. São exemplos os trechos 2-3, 4-5, 6-7.

b) Se o fluxo que desce uma calha intercepta o fluxo que vem do pico anterior, então o presente trecho está terminado. São exemplos os trechos 3-3a e 5-5a. Não se fecha o ciclo, portanto.

c) Um novo trecho não pode começar até que o trecho considerado não tenha terminado.

d) Os ciclos dos vales originam a variação das tensões. Seria, por exemplo, a distância projetada no eixo de tensão, como acontece nos trechos 1-8, 3-3a e 5-5a. Também o método fornece o valor da tensão média para cada variação de tensão.

O método "rain-flow" de contagem de ciclos corresponde ao comportamento estável da curva tensão-deformação cíclica do material onde todas as variações de tensões ou deformações de cada ciclo são contadas, fechando, ao final, um laço de histerese, como é mostrado na Fig. 2.31.

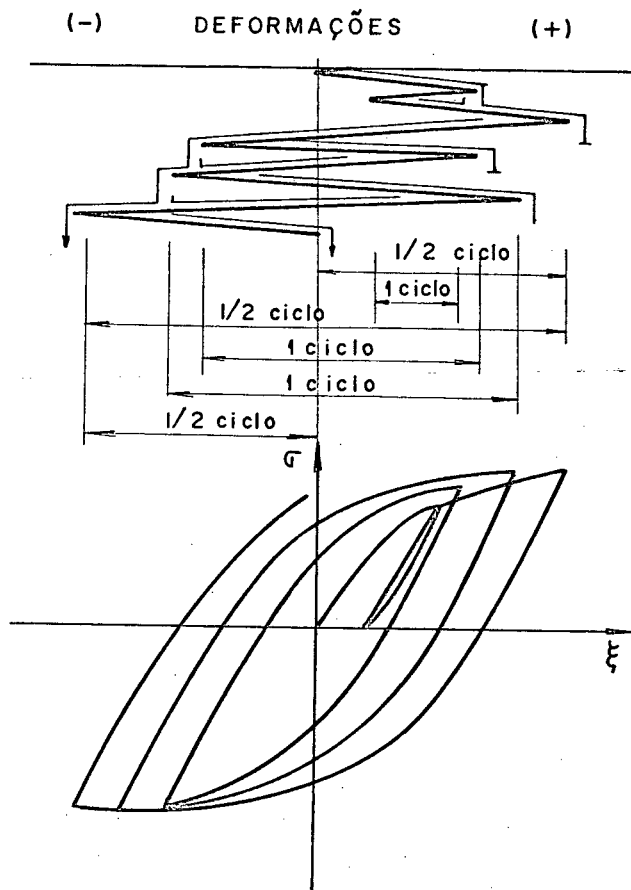


Fig. 2.31 - Método de contagem de ciclo rain-flow e laços de histerese.

2.2.5 - Carregamentos de fadiga

Para o desenvolvimento do trabalho, considerou-se três tipos de carregamento, e que são definidos da seguinte forma:

2.2.5.1 - Carregamento em blocos | 23 |

Este tipo de carregamento considera um conjunto de blocos que se repetem indefinidamente, com vários níveis de tensão, cada nível com a mesma amplitude de tensão e tensão média.

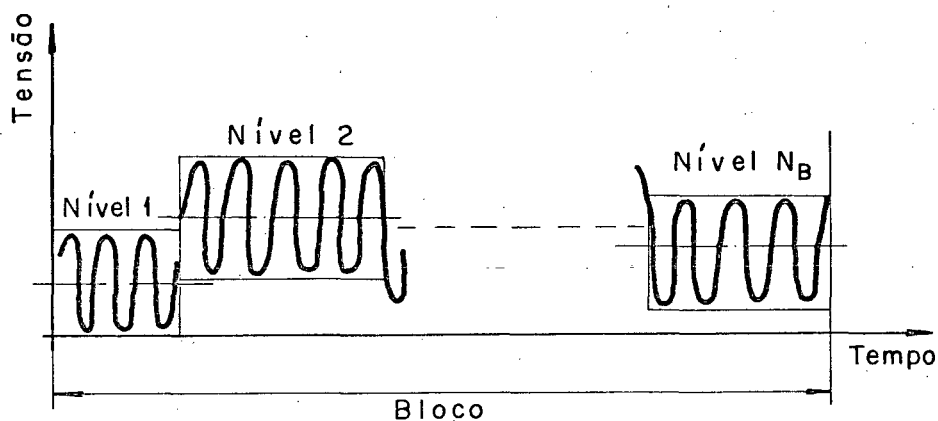


Fig.2.32 - Carregamento em blocos em intervalo de tempo.

2.2.5.2 - Carregamento aleatório por tabela de pontos fornecidos pico a pico |7,23|

Para definir o carregamento, é necessário ter a informação ponto a ponto de tensão existente no elemento. A Fig.2.33 mostra este tipo de carregamento.

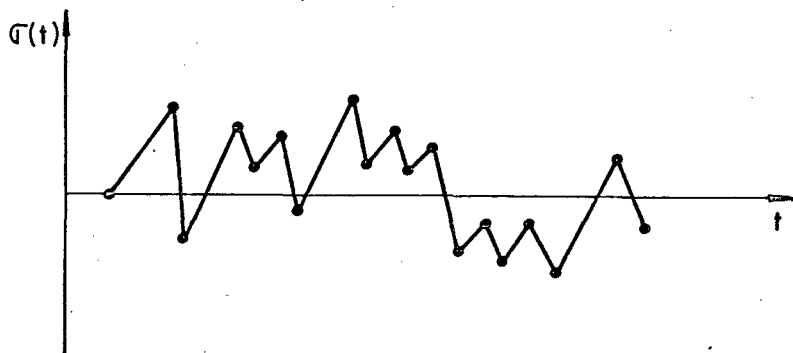


Fig.2.33 - Carregamento aleatório fornecido pico a pico

Todos os pontos são colocados em uma tabela e armazenados em forma de arquivo a ser, posteriormente, utilizado pelo programa.

2.2.5.3 - Carregamento aleatório por densidade espectral [7,20,23]

Neste carregamento é gerado um sinal aleatório que o caracteriza, partindo da densidade espectral, como é mostrado na Fig.2.34:

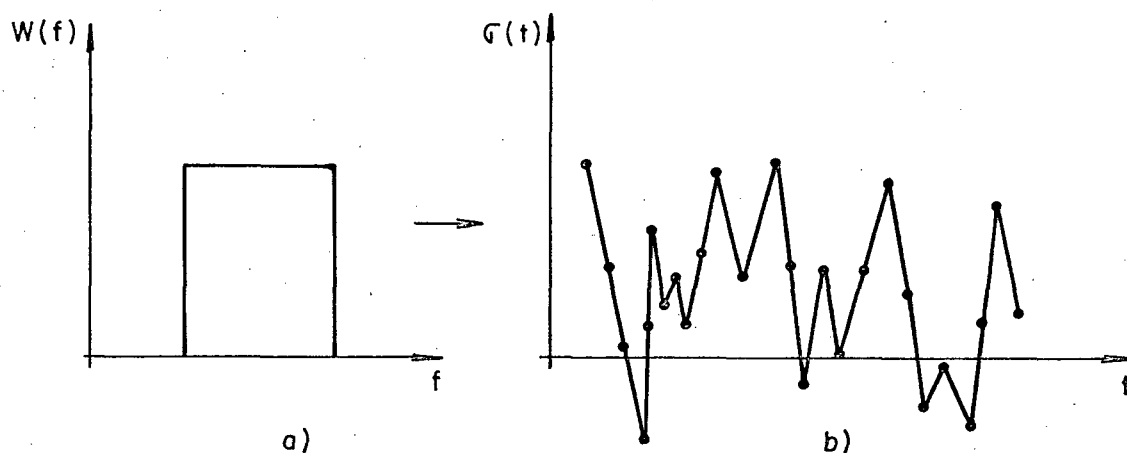


Fig.2.34 - Carregamento aleatório por densidade espectral

a) Densidade espectral.

b) Sinal gerado no tempo.

A simulação do sinal é feita segmentando a densidade espectral $W(f)$ em vários intervalos de amplitude ΔW_i , sendo desejável que as amplitudes da divisão de $W(f)$ sejam aleatórias, para não introduzir uma característica cíclica indesejável no sinal simulado. Sendo W_i e f_i os valores de $W(f)$ e da frequência associados ao intervalo i , o sinal é obtido por

$$\sigma(t) = \sum_i \left| W(f_i) \Delta f_i \right|^{1/2} \cos(f_i t + \theta_i) \quad (2.80)$$

onde θ_i é um ângulo de fase aleatório, considerando-se que não existe qualquer correlação de fase nas frequências que definem a densidade espectral. Após gerado o sinal, para um tempo T de amostragem, este sinal deve ser processado, tanto estatisticamente, como quanto às variações de carga, que irão formar os ciclos de carga.

Tanto no carregamento aleatório por tabela de pontos, como no carregamento aleatório por densidade espectral, é utilizado o método Rain-flow de contagem de ciclos, onde os pontos são transformados em ciclos e determinados os valores da variação de tensões e a tensão média para cada ciclo.

2.3 - Análise Estática

2.3.1 - Modos de falha

Na análise estática tem-se considerado os seguintes modos de falha:

2.3.1.1- Início do escoamento. Este modo de falha é baseado na hipótese de que em algum ponto do componente de máquina ou estrutural foi alcançada a tensão de escoamento. Este modo de falha só é aplicável a materiais dúcteis.

$$\sigma = \sigma_E \quad \text{no ponto crítico} \quad (2.81)$$

2.3.1.2- Plastificação total. O fato de ter alcançada a tensão de escoamento em um certo ponto do componente, não significa que este tenha atingido a falha, então para mate

riais elásto-plástico pode-se considerar a ocorrência da falha quando toda a seção líquida é plastificada.

$$\sigma = \sigma_E \quad \text{em todos os pontos da seção} \quad (2.82)$$

2.3.1.3- Fratura. Na fratura tem-se duas formas de falhas que são:

a) Fratura frágil ou quebradiça, originada por uma rápida propagação da trinca depois de uma pequena ou nenhuma deformação plástica.

$$K_I = K_{IC} \quad (2.83)$$

b) Fratura dúctil, é produzida depois de uma grande ou extensa deformação plástica.

$$\sigma = \sigma_f \quad (2.84)$$

2.3.2 - Teorias de falha

2.3.2.1- Teoria da máxima tensão normal. TMTN.

A teoria da máxima tensão normal diz que a falha do material ocorrerá para qualquer estado de tensões, quando a tensão normal de maior valor, atingir um valor crítico.

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 \quad (2.85)$$

ou

$$\sigma_{\max} = |\sigma_3| \quad (2.86)$$

Esta teoria não é válida para prever falhas por escoamento, mas pode prever com certa precisão falhas por tração em materiais quebradiços ou frágeis.

2.3.2.2. Teoria da máxima tensão de cisalhamento, TMTC.

A teoria da máxima tensão de cisalhamento diz que a falha dos materiais ocorrerá em qualquer estado de tensão, quando o máximo valor em módulo da tensão de cisalhamento para aquele estado de tensão atingir um valor crítico. Então, o critério da máxima tensão de cisalhamento pode ser expresso por:

$$\tau_{\text{abs.máx}} = \tau_E \quad (2.87)$$

ou

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_E}{2} \quad (2.88)$$

Esta teoria é aproximadamente correta para prever escoamento em materiais dúcteis.

2.3.2.3. Teoria da máxima energia de distorção, TMED.

Esta teoria propõe que a falha por escoamento seja associada a valores críticos de uma certa porção de energia de deformação por unidade de volume do material, em um determinado ponto. A teoria da máxima energia de distorção é expressa como:

$$2\sigma_E^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (2.89)$$

As experiências que se referem a falhas por escoamento em materiais dúcteis demonstram boa compatibilidade com o critério da máxima energia de distorção. Este critério é geralmente aceito como o melhor existente para prever o início de escoamento em materiais dúcteis submetidos a estados gerais de tensão.

2.3.3. Determinação das tensões locais.

Para determinar as tensões locais que agem no ponto sob estudo tem-se duas formas:

- a) Utilizar as regras linear ou de Neuber substituindo as constantes de fadiga pelas constantes estáticas.
- b) Utilizar o método tradicional.

Supondo conhecida a tensão nominal que atua na seção líquida do componente, são determinadas as tensões locais considerando o fator de concentração de tensões, (K_t), e o coeficiente de forma para plastificação (k) segundo seja o caso em estudo.

TABELA 2.2. - Coeficientes de forma para plastificação (k)

SOLICITAÇÃO	SEÇÃO			VIGA
	Retangular	Circular	Losangular	Tipo I
Flexão	1.5	1.7	2.0	1.06 a 1.18
Torção		1.3		

No desenvolvimento deste trabalho considerou-se os seguintes casos de solicitação nos componentes.

a) Tração unaxial, início do escoamento e plastificação total.

$$\sigma = K_t S \quad (2.90)$$

onde:

$$S = F/A_0 \quad (2.91)$$

b) Torção.

$$\tau = K_t \tau_n \quad \text{início do escoamento} \quad (2.92)$$

$$\tau = k K_t \tau_n \quad \text{plastificação total} \quad (2.93)$$

onde:

$$\tau_n = Tr/J_0 \quad (2.94)$$

c) Flexão.

$$\sigma = K_t S \quad \text{início do escoamento} \quad (2.95)$$

$$\sigma = k K_t S \quad \text{plastificação total} \quad (2.96)$$

onde:

$$S = M/W_0 \quad (2.97)$$

d) Combinação tração com flexão.

$$\sigma = K_{t1} F/A_0 + K_{t2} M/W_0 \quad \text{início do escoamento} \quad (2.98)$$

$$\sigma = K_{t1} F/A_0 + k K_{t2} M/W_0 \quad \text{plastificação total} \quad (2.99)$$

CAPÍTULO 3

SISTEMA COMPUTACIONAL

CAPÍTULO 3

SISTEMA COMPUTACIONAL

3.1 - Estrutura do Sistema

Com o crescente desenvolvimento do estudo da fadiga dos materiais tem-se chegado a métodos de cálculo para a determinação da vida de elementos estruturais ou mecânicos, considerando as etapas de nucleação, propagação e ruptura final.

No presente trabalho é desenvolvido um programa computacional considerando o comportamento de distintos materiais sob solicitações de carregamentos variáveis no tempo, em especial os de comportamento aleatório, que para os efeitos deste trabalho podem ser fornecidos na forma de um espectro de frequência, tabela de pontos, ou em blocos que se repetem indefinidamente, no caso de uma solicitação determinística. O sistema é complementado com aplicações estáticas onde a análise é feita para a determinação do fator de segurança segundo as teorias de falha mais comuns usadas em projetos.

A estrutura geral do sistema está feita segundo o esquema da Fig.3.1 onde são mostrados os respectivos passos.

No Apêndice C é mostrado o fluxograma geral do programa onde tem-se as distintas opções que o usuário pode utilizar em função do problema a resolver.

Para o caso de uma solicitação aleatória, a análise do carregamento é feita para cada ciclo ou bloco de tensão, aplicando o método "rain-flow" de contagem de ciclos conforme visto no pará-

grafo 2.2.4.4., incluindo um estudo estatístico para as distintas variáveis.

PROGRAMA PRINCIPAL
Abertura de arquivos
Inicialização de variáveis
Menú de opções
Leitura dos dados
Análise de fadiga
Análise estática
Saída

Fig.3.1 - Esquema da estrutura do sistema computacional.

O sistema computacional é formado por procedimentos em linguagem Pascal para a determinação das distintas variáveis e obtenção dos resultados das tensões, deformações, dano e vida para baixo ciclo na nucleação, dano e vida em alto ciclo, e tamanho de trinca, fator de intensidade de tensão e vida na propagação com comprovação de ruptura final.

3.2 - Descrição do Sistema

O sistema tem as diferentes opções mostradas através do menú principal, com o qual o usuário pode fazer as combinações que desejar, conforme o problema a solucionar. Na Fig.3.2 é mostrada a configuração das diferentes janelas do menú principal e, no Apêndice F, as seqüências de opções para cada caso em particular.

Menu Principal																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Material</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">ACDS:</td> </tr> <tr> <td>-> carbono</td> </tr> <tr> <td>baixa liga</td> </tr> <tr> <td>media liga</td> </tr> <tr> <td>alta liga</td> </tr> <tr> <td>ALUMINIO</td> </tr> <tr> <td>DUTROS</td> </tr> </tbody> </table>	Material	ACDS:	-> carbono	baixa liga	media liga	alta liga	ALUMINIO	DUTROS	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Geometria</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">COM DEFEITO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">SEM DEFEITO</td> </tr> </tbody> </table>	Geometria	COM DEFEITO	SEM DEFEITO	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Carga</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">TENSÃO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">DEFORMAÇÃO</td> </tr> </tbody> </table>	Carga	TENSÃO	DEFORMAÇÃO
Material																
ACDS:																
-> carbono																
baixa liga																
media liga																
alta liga																
ALUMINIO																
DUTROS																
Geometria																
COM DEFEITO																
SEM DEFEITO																
Carga																
TENSÃO																
DEFORMAÇÃO																

Fig.3.2 - Janelas do menù principal com as opções disponíveis para o usuário.

3.2.1 - Seleção do tipo de material

É esta a primeira opção que tem o usuário, com a qual pode selecionar um material que se encontra no arquivo de materiais do sistema. No apêndice A, tem-se os materiais tanto para os casos de fadiga de baixo e alto ciclo como para a análise estática; também o usuário tem a alternativa de utilizar seus próprios dados de material, quando não estão contidos na biblioteca do sistema.

Para selecionar os aços, algumas das diferentes formas de classificação existentes são:

- Classificação de acordo com a composição química (aços ao carbono, aços de baixa, média e alta liga).
- Classificação de acordo com a estrutura (perlíticos, martensíticos, austeníticos, ferríticos).

- Classificação de acordo com a aplicação (estruturais, para chapas, para tubos, para arames e fios, etc).

Neste trabalho é usada a classificação de acordo com a composição química.

3.2.2 - Seleção do tipo de Geometria

As geometrias disponíveis no sistema são mostradas no Apêndice B, e podem ser selecionadas pelo usuário segundo o problema a resolver, considerando a mais apropriada segundo seu critério.

A seleção é feita conforme a denominação dada para cada geometria, como:

Geometrias sem defeitos.

- Elementos de seção retangular
- Eixos
- Placas infinitas

Geometrias com defeitos

- Placas infinitas
- Eixos
- Corpos de prova
- Outros

O usuário pode adicionar outras geometrias com ou sem defeitos para as quais o arquivo fica aberto.

3.2.3 - Seleção do tipo de análise

O usuário tem duas alternativas de seleção de análise, podendo ser uma análise dinâmica ou uma análise estática.

3.2.3.1 - Análise dinâmica

3.2.3.1.1 - Seleção do tipo de carregamento

O primeiro passo a realizar é selecionar o tipo de carregamento entre:

- Aleatório:

Por espectro de frequência

Por tabela

- Determinístico: Em blocos

Uma vez selecionado o carregamento, obtém-se as tensões nominais mediante o método Rain-flow de contagem de ciclos.

3.2.3.1.2 - Determinação das tensões e deformações locais

Para determinar as tensões ou deformações locais tem-se as seguintes alternativas:

- a.- Através de extensômetros localizados no ponto sob estudo. Neste caso, os dados são fornecidos ao método "rain-flow" de contagem de ciclos, obtendo-se na saída a média e a variação da deformação no ponto, aplicando o algoritmo respectivo da média e a variação das tensões.
- b.- Através das regras linear ou a de Neuber em combinação com as equações dos materiais, assumindo um encruamento linear ou potencial. O usuário, conforme seu critério ou em consideração ao problema a resolver, pode trabalhar combinando as equações de uma regra e a equação de um material, com o que tem-se quatro algoritmos que se encontram desenvolvidos

no Apêndice D1 e que tem as seguintes denominações:

RLEL: Regra linear encruamento linear.

RLEP: Regra linear encruamento potencial.

RNEL: Regra de Neuber encruamento linear.

RNEP: Regra de Neuber encruamento potencial.

As tensões assim obtidas são processadas no método "rain-flow" de contagem de ciclos para obter a média e a variação das tensões para cada ciclo ou bloco de carregamento.

3.2.3.1.3 - Determinação da variação e média das deformações para cada ciclo ou bloco

Tendo determinada a variação e média das tensões locais para cada ciclo ou bloco, e considerando encruamento linear ou potencial para o material, pode-se determinar, através dos algoritmos dados no Apêndice D2, a variação e média das deformações para cada ciclo ou bloco de carregamento.

3.2.3.1.4 - Determinação da vida em baixo ciclo

Para a determinação da vida em baixo ciclo deve-se considerar dois estágios que são a nucleação e a propagação de trincas.

3.2.3.1.4.1 - Nucleação

Na nucleação tem-se os seguintes passos:

a.- Determinação da vida

Para determinar a vida de nucleação de uma trinca para cada ciclo ou bloco de carregamento de fadiga em peças sem defeito, tem-se os métodos de Morrow e o das inclinações universais

cujos algoritmos encontram-se no Apêndice D3.

b.- Determinação do dano acumulado.

Tendo determinado os valores da vida de nucleação para cada ciclo ou bloco de carregamento, determina-se o dano imposto ao material segundo a regra linear de acúmulo de dano de Palmgren-Miner representada por:

$$D = \sum D_i \quad (3.1)$$

onde: $D_i = 1/N_i$ e N_i o número de ciclos à falha, no caso de um ciclo, ou $D_i = n_i/N_i$ no caso de um nível de um bloco, onde n_i é o número de ciclos deste nível.

c.- Determinação do término da nucleação.

Obtido o valor do dano acumulado, pode-se determinar o término da nucleação em fadiga, ou seja, a aparição de uma trinca propagável, e para isto são usados dois critérios:

c.1- se o dano acumulado é maior que um ou seja:

$$D > 1 \quad (3.2)$$

tem-se o fim da nucleação e, caso contrário, ainda não é atingida a falha por nucleação. (O valor de D é definido pelo usuário; neste sistema é considerado como a unidade).

c.2- Considerar um comprimento a_0 da trinca ao final da nucleação, sendo este um valor constante ou função da geometria da peça, ou seja. (3.17)

$$a_0 = \text{constante}$$

ou

$$a_0 = 0.2 \sqrt{d_p} \quad (3.3)$$

onde d e ρ são parâmetros do entalhe como é mostrado na fig. 3.3.a.

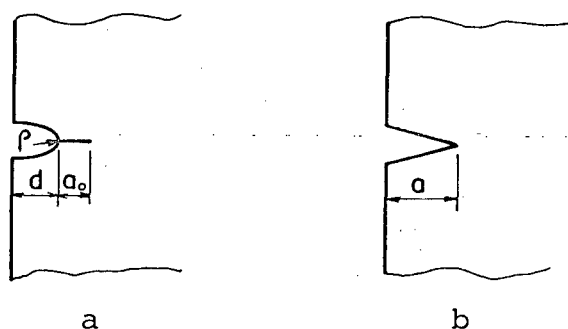


Fig.3.3 - a.- Trinca no entalhe
b.- Trinca equivalente

O comprimento da trinca a , pode ser obtido através de uma das equações:

$$a = \left[a_i^{(1 - \frac{m}{2})} - C(N_f - N_i)(Y Y_p \Delta \sigma \sqrt{\pi})^m \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{2-m}}$$

se $m \neq 2$ (3.4)

ou

$$a = a_i e^{C(Y Y_p \Delta \sigma \sqrt{\pi})^2 (N_f - N_i)}$$

se $m = 2$ (3.5)

como as situações da Fig.3.3 são semelhantes, portanto, há nucleação no ponto se se cumpre o seguinte:

$$a \geq a_0 + d \quad (3.6)$$

3.2.3.1.4.2 - Propagação

Tendo como dados a tensão nominal máxima e a variação de tensões do ciclo ou bloco de carregamento, bem como o compri-

mento da trinca de fadiga, tem-se para uma geometria qualquer, os valores de K_I e ΔK , segundo:

$$K_I = Y Y_p \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.7)$$

$$\Delta K = Y Y_p \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.8)$$

Se $\Delta K < K_0$, não há propagação da trinca de fadiga.

Se $\Delta K \geq K_0$ e $K_I < K_{IC}$, a trinca se propaga segundo:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (3.9)$$

Desenvolve-se esta equação, para determinar a vida de propagação para cada ciclo ou bloco, segundo o carregamento, através de uma das equações:

$$N_p = \left[a_i^{(1-\frac{m}{2})} - a_f^{(1-\frac{m}{2})} \right] / C (Y Y_p \Delta \sigma \sqrt{\pi})^m \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \quad \text{se } m \neq 2 \quad (3.10)$$

ou

$$N_p = \left| 1 / C \pi (Y Y_p \Delta \sigma)^2 \right| \ln \frac{a_f}{a_i} \quad \text{se } m = 2 \quad (3.11)$$

Se $K_I \geq K_{IC}$ a trinca atinge o tamanho crítico e tem-se uma rápida propagação produzindo-se a fratura frágil do componente.

3.2.3.1.4.3 - Vida total

A vida total de um componente é determinada pela soma da vida de nucleação mais a vida de propagação, ou seja:

$$N_T = N_n + N_p \quad (3.12)$$

3.2.3.1.5 - Determinação da vida em alto ciclo

Em alto ciclo, a vida se determina até atingir a falha por fratura, não se considerando a separação entre nucleação e propagação.

Segundo o gráfico de Whöler, tem-se que, para vidas de 10^3 ciclos em adiante, pode-se determinar a vida através da seguinte equação:

$$N = \left[10^b / \sigma_a \right]^{1/m} \quad (3.13)$$

onde:

$$m = \frac{1}{3} \log \frac{A}{\sigma'_F} \quad (3.14)$$

$$b = \log \frac{A^2}{\sigma'_F} \quad (3.15)$$

$$A = 0.9 k_4 \sigma_R$$

Para as ligas ferro-carbono, tem-se um limite de resistência à fadiga em 10^6 a 10^7 ciclos, abaixo do qual tem-se vida infinita.

O limite de resistência à fadiga deve ser corrigido pelos fatores de correção da resistência, conforme item 2.2.3.3.

3.2.3.1.5.1 - Determinação do dano acumulado

Em alto ciclo, o dano acumulado também é determinado pela regra linear de acúmulo de dano de Palmgren-Miner.

Se $D > 1$, ocorre a falha do componente por fadiga; e caso contrário, não ocorre a falha e o componente pode ainda seguir em funcionamento.

3.2.3.1.5.2 - Efeitos da tensão média em alto ciclo

O efeito da tensão média é analisado através das equações de Soderberg, Goodman modificado, Morrow ou Gerber.

Conhecidos os valores de tensões alternantes e média das tensões para cada ciclo ou bloco de carregamento, pode-se determinar os limites das resistências alternada e média.

Se:

$$K = \sigma_a / \sigma_m \quad (3.16)$$

$$\text{Soderberg :} \quad \sigma_M = 1 / (K / \sigma_F + 1 / \sigma_R) \quad (3.17)$$

$$\text{Goodman modificado:} \quad \sigma_M = 1 / (K / \sigma_F + 1 / \sigma_E) \quad (3.18)$$

$$\text{Morrow :} \quad \sigma_M = 1 / (K / \sigma_F + 1 / \sigma_f) \quad (3.19)$$

$$\text{Gerber:} \quad \sigma_M = -K / \sigma_F' + \sqrt{(K / \sigma_F')^2 + 4 / \sigma_R^2} \quad (3.20)$$

$$\text{e} \quad \sigma_A = K \sigma_M \quad (3.21)$$

Para a comprovação de falha com o efeito da tensão média, tem-se que esta acontece se:

$$\sigma_a \geq \sigma_A \quad (3.22)$$

ou

$$\sigma_m \geq \sigma_M \quad (3.23)$$

Ou se a equação que se usa em função das tensões alternantes e média, der como resultado um valor maior ou igual a um.

Um fator de segurança pode-se determinar segundo:

$$n_a = \sigma_A / \sigma_a \quad (3.24)$$

ou

$$n_m = \sigma_M / \sigma_m \quad (3.25)$$

ou pelo valor inverso da equação utilizada.

3.2.3.2- Análise estática

3.2.3.2.1 - Determinação das tensões locais

As tensões locais nos componentes sem defeito são determinadas segundo a escolha que fez o usuário entre o método tradicional ou as regras linear e de Neuber, como foi visto no parágrafo 2.3.3. Nas RLEL e RNEL como também no método tradicional de obter as tensões deve-se testar as tensões locais contra a tensão de escoamento para identificar os modos de falha segundo o parágrafo 2.3.1.

3.2.3.2.2. - Determinação do coeficiente e margem de segurança

O coeficiente de segurança n_s , para os diferentes modos de falha é calculado segundo a teoria de falha escolhida pelo usuário como:

$$n_s = \frac{\sigma_E}{\sigma_{\max}} \quad (\text{TMTN}) \quad (3.17)$$

$$n_s = \frac{\sigma_E}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (\text{TMTC}) \quad (3.18)$$

$$n_s = \frac{\sqrt{2} \sigma_E}{\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{TMED}) \quad (3.19)$$

Se $n_s \leq 1$ verifica-se a falha do componente.

A margem de segurança, m_s , é calculado como:

$$m_s = (n_s - 1) 100 \quad \% \quad (3.20)$$

3.2.3.2.3 - Falhas em componentes com defeitos

Nos componentes com defeitos a falha é determinada através do fator de intensidade de tensão, ou seja se:

$$K_I > K_{IC} \quad (3.21)$$

do contrário a falha não acontece.

3.2.4. Relatórios de saída

3.2.4.1. Entrada no sistema

O sistema fornece um quadro onde se indica a informação que o usuário deve fornecer ao sistema para seu funcionamento.

Esta informação é a seguinte:

a- Geral:

Tipo de material

Tipo de geometria

Tipo de análise

Tipo de carregamento

Forma de obtenção das tensões locais

b- No caso dinâmico:

Baixo ou alto ciclo

c- No caso estático:

Escolha da teoria de falha

3.2.4.2. Saídas do sistema

Na saída do sistema tem-se os resultados para cada opção que o usuário tem utilizado, sendo estes fornecidos na seguinte forma:

a- Resultados gerais:

Gráficos tensão-deformação

Gráficos tensão-número de pontos

Gráfico da densidade espectral

Estatística das variáveis tensão-deformação

Histograma das variáveis tensão-deformação

Fator geométrico da concentração de tensões.

Propriedades do material.

b- Análise dinâmica:

b.1- Baixo ciclo

b.1.1- Nucleação

Dano e vida na nucleação indicando o término dela.

Indicação de ter atingido o limite de resistência ou da ductilidade do material.

b.1.2- Propagação

Tamanho final da trinca

Tamanho crítico da trinca

Velocidade média do crescimento da trinca

Vida

Indicação de falha por ter atingido a tensão de escoamento do material.

Indicação de falha por ter atingido a tenacidade e fratura do material.

b.2- Alto ciclo

Temperatura do material

Limite superior e inferior da curva de Whöler, com ou sem correção da resistência.

Indicação de tensão alternante ter ultrapassado o limite superior da curva de Whöler.

Dano e a vida, indicando a falha por este conceito.

Efeito da tensão média, indicando a falha por este conceito.

c- Análise estática

Indicação do tipo de falha, por ter atingido a tensão de escoamento, por plastificação total ou fratura dúctil ou frágil.

Indicação da teoria de falha utilizada.

Fator e margem de segurança.

3.3. Operação do sistema

A operação do sistema com suas distintas opções é mostrado no Apêndice F.

3.4. Equipamento

Para o desenvolvimento do sistema é necessário um microcomputador compatível com o IBM-PC com um mínimo de 256Kb de RAM, com unidade de disco flexível e impressora. É aconselhável o uso de um coprocessador aritmético, especialmente no processamento do carregamento aleatório.

C A P Í T U L O 4

RESULTADOS

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados resultados obtidos através do sistema RESISTE na análise da resistência de componentes mecânicos ou estruturais. Os resultados foram obtidos em provas das principais rotinas em separado e testes do sistema completo.

4.1. Resultados obtidos das provas feitas nas principais rotinas do sistema

4.1.1. Obtenção das tensões e deformações locais

No Apêndice E1 são apresentados os resultados obtidos com as rotinas correspondentes e sua comparação com os obtidos através das equações e gráficos característicos para cada caso. A porcentagem de variação mostra uma boa aproximação entre ambas formas de cálculo.

Foram encontradas diferenças nos resultados conforme a equação do material, ou seja, tem-se diferenças entre as regras com material de encruamento linear e as regras com material de encruamento potencial, como é observado nas Tabelas E1, E2, E3 e E4.

4.1.2 - Determinação da vida em baixo ciclo

No Apêndice E2 são mostrados os resultados obtidos aplicando os métodos de Morrow e inclinações universais. Na observação das Tabelas E5, E6, E7 e E8, tem-se uma boa aproximação dentre os valores obtidos com as rotinas e aqueles obtidos com as equações e gráficos correspondentes.

4.1.3 - Determinação da vida e o efeito das tensões médias em alto ciclo

No Apêndice E3 são mostrados os resultados obtidos em alto ciclo conforme a curva de Whöler, como também o efeito das tensões médias maiores que zero segundo a equação de Goodman modificado. Na Tabela E9 mostra-se os resultados obtidos, observando-se uma boa aproximação dentre o cálculo do sistema e o feito através das equações e gráficos respectivos.

4.1.4 - Determinação da vida na propagação

No Apêndice E4 são mostrados os resultados obtidos através da rotina respectiva e sua comparação com os obtidos utilizando as equações e gráficos. Na Tabela 10 tem-se os valores obtido e a porcentagem de variação entre eles, apresentando uma boa aproximação.

4.2. Resultados do Sistema

Ao unir todas as rotinas através das distinções opções que o sistema oferece ao usuário, realizaram-se vários testes.

Para estes testes, usou-se o aço SAE 1005-1009 laminado a quente, junto com duas geometrias, uma com defeito e a outra sem defeito, e uma tabela de 40 tensões nominais.

No Apêndice G, são mostrados os resultados dos exemplos resolvidos pela sistema, fornecendo os resultados conforme visto no parágrafo 3.2.4

No relatório de saída do sistema "RESISTE SAI" são fornecidos os dados correspondentes às tensões nominais, tanto para carregamento fornecido através de tabela de dados como em blocos. Na lista de propriedades do material, se encontram além das correspondentes à fadiga e ao comportamento estático, variáveis correspondentes à determinação do fator de correção por acabamento superficial $k_1 (f_1, f_2, f_3)$, para determinar o fator de temperatura $k_4 (T_i, T_s)$, e o fator de efeitos diversos f_{cev} , em alto ciclo.

4.2.1. Exemplo G1.

Neste exemplo é mostrado, para um mesmo carregamento, fornecido na forma de tabela de dado, os seguintes casos:

a) Geometria sem defeito

a.1) Alto ciclo com correção da resistência do material, fornecendo a falha do componente, com efeito de tensão média no segundo ciclo de carregamento.

a.2) Baixo ciclo, com detecção da nucleação através do método de Morrow, fornecendo o término da nucleação no ciclo número 26; passando à propagação da trinca, de tamanho inicial igual a $2,5 \times 10^{-4}$ m. A falha na propagação acontece por atingir, a tensão máxima o valor da tensão de escoamento.

b) Geometria com defeito

O defeito considerado da geometria é uma trinca de 1×10^{-3} m do tamanho inicial, com isto, a falha acontece no ciclo número 12, por ter atingido a tensão máxima o valor da tensão de escoamento.

4.2.2. Exemplo G2

Neste exemplo tem-se o caso de carregamento em bloco, no qual se mostra como este é definido através dos dados que o usuário fornece ao sistema.

Foi utilizada a fadiga de baixo ciclo com o método de Morrow para a detecção da nucleação. Ao término do processamento de todos os blocos não foi atingida a nucleação.

4.3. Conclusões

O desenvolvimento deste trabalho foi feito dando maior importância aos carregamentos cíclicos, ou seja, aqueles que produzem fadiga em componentes mecânicos ou estruturais, com o qual o estudo foi o comportamento destes componentes em fadiga de baixo ciclo (nucleação e propagação de trincas), e alto ciclo.

Os resultados obtidos pelo sistema foram coerentes com os feitos por métodos tradicionais.

4.3.1. Sugestões

Para melhorar o sistema Resiste deve-se considerar o seguinte:

- a) Aprofundar o estudo das diferentes geometrias em especial para o caso de propagação de trincas.
- b) Aprofundar o estudo das propriedades dos materiais em especial para o caso de baixo ciclo.
- c) Pesquisar coeficientes de correção da resistência em alto ciclo.
- d) Estudar o efeito de tensões médias menores que zero em alto ciclo.
- e) Melhorar o estudo quanto à curva tensão-deformação cíclica, tanto nominal como local, obtendo não só o laço de histerese completo, como também os laços de histerese para cada ciclo de carregamento, mostrando a variação das tensões e deformações cíclicas para cada um deles.
- f) Testar o sistema com carregamento com alto número de pontos de tensões, tendo especial dedicação na transição nucleação - propagação.

B I B L I O G R A F I A

BIBLIOGRAFIA

- [01] BARSOM, J.M., ROLFE, S.T., ASTM STP 466, American Society for Testing and Materials, 1970, p.281.
- [02] BROEK, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics. Noordhoff International Publishing, Leyden, 1974.
- [03] COLLINS, J.A., Failures of Materials in Mechanical Design. John Wiley and Sons, 1981.
- [04] DARREL, F.S., Fatigue Life Prediction Using Local Stress-Strain Concepts. Experimental Mechanics, February 1977, pp. 50-56.
- [05] DOWLING, N.E., Fatigue Life Prediction for Complex Load Versus Time Histories. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. July 1983, Vol. 105, pp. 206-214.
- [06] DUGDALE, D.S., Yielding of Steel Sheets Containing Slits. Journal of Mechanics and Physics of Solids., Vol. 8, 1960, pp. 100-104.
- [07] FUCHS, H.D., STEPHENS, R.I., Metal Fatigue Engineering. John Wiley and Sons, 1980.

- |08| GRANDT, A.F.Jr., SINCLAIR, G.M., Stress Intensity Factors for Surface Cracks in Bending. Stress Analysis and Growth of Cracks, Proceeding of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics, Part.I, ASTM STP 513, American Society for Testing and Materials, 1972, pp. 37-58.
- |09| HAYES, D.J., Origins of the Stress Intensity Factor Approach to Fracture. Journal os Strain Analysis, vol. 10, n° 4, October 1975, pp. 198-200.
- |10| HERTZBERG, R.W., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. John Wiley and Sons. 1983.
- |11| KNOT, J.F., Fundamentals of Fracture Mechanics. Butterworths, 1979.
- |12| LEGERON, J.C., GORMAN, R., Fiabilité des Systèmes Mécaniques. Application aux structures. Matériaux Mécanique Électricite n° 419, Janvier - Fevrier 1987. pp. 36-49.
- |13| MARIN, Joseph., Mechanical Behaviour of Materials.. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1962.
- |14| MUKHERJEE, B., BURNS, D.J., Fatigue Crack Growth in Polymethyl-Metacrilate. Experimental Mechanics, October 1971, pp. 433-439.

- |15| NELSON, D.V., Review of Fatigue Crack Growth. Predictions methods. Experimental Mechanics, February 1977, pp.41-49.
- |16| PARIS, P., ERDOGAN, F., A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering. December 1963, pp. 528-534.
- |17| RADON, J.C., CULVER, L.E., Fatigue Crack Propagation in Metals. Experimental Mechanics, March 1976, pp.105-110.
- |18| ROARK, R.J., YOUNG, W.C., Formulas for Stress and Strain. McGraw-Hill Kogakusha Ltda, 1966.
- |19| ROLFE, S.T., NOVAK, S.R., ASTM STP 463. American Society for Testing and Materials, 1972, pp. 37-58.
- |20| ROSA, E., CAVALCANTI L. Willians., Acúmulo de Dano por Fadiga Devido a Solicitações Aleatórias. Resultados de uma simulação numérica. Anais do 7º CBECIMAT, UFSC, Florianópolis, S.C., Dezembro de 1986, pp.27-30.
- |21| SAE HANDBOOK., Materials. Vol.1, SAE J932, SAE J1099, Society of Automotive Engineering Inc. 1983.
- |22| SAILORS, R.H., CORTEN, H.T., ASTM STP 514, PART II, 1972, p. 164.

- |23| SANTANA, J.L., Simulação do Crescimento de Trincas de Fadiga. Tese de Mestrado, UFSC, 1980.
- |24| SHIGLEY, J.E., Mechanical Engineering Design. First metric edition. McGraw-Hill Book Company, 1986.
- |25| WALTON, D., PRAYOONRAT, S., TAYLOR, S., Computer-Aided Fatigue Analysis. Computer-aided Design, Vol.18, Nº 5, June 1986, pp.263-274.
- |26| WILLEMS, N., EASLEY, J.T., ROLFE, S.T., Resistência dos Materiais. Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda, 1983.

APÊNDICE A

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

APÊNDICE A**TABELA A1**

PROPRIEDADES MONOTÔNICAS E CÍCLICAS PARA LIGAS DE MATERIAIS DE ENGENHARIA.

TABELA A2

TENACIDADE À FRATURA, K_{IC} , PARA UMA SELEÇÃO DE MATERIAIS.

TABELA A3

DADOS DO ΔK_0 NO LIMITE DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA DE FADIGA, E O EXPOENTE m DA EQUAÇÃO DE PARIS.

TABELA A4

CORRELAÇÃO TENACIDADE DA FRATURA ENERGIA CHARPY.

TABELA A1
 PROPRIEDADES MECÂNICAS MONOTONICAS E CÍCLICAS PARA LIGAS DE MATERIAIS DE ENGENHARIA [7.10.21]

MATERIAIS	Bhn	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	σ_R MPa	σ_E/σ'_E MPa/MPa	k/k'	n/n'	ϵ_f/ϵ'_f	σ_f/σ'_f MPa/MPa	b	c	E MPa
AÇO											
1005-1009	98	H.R.Sheet	345	262/228	531/462	0.16/0.12	1.6/0.12	848/641	-0.109	-0.39	2.07×10^5
1005-1009	90	H.R.Sheet	359	269/241	503/490	0.12/0.12	1.3/0.15	717/579	-0.09	-0.43	2.07×10^5
1005-1009	125	C.D.Sheet	469	448/283	538/572	0.029/0.11	1.09/0.30	745/517	-0.059	-0.51	2.07×10^5
1020	108	H.R.Plate Plate	441	262/241	738/772	0.19/0.18	0.96/0.41	710/896	-0.12	-0.51	2.03×10^5
1045	225	Q and T	742	634/414	1145/1344	0.13/0.18	1.04/1.00	1227/1227	-0.095	-0.66	2.00×10^5
1045	410	Q and T	1448	1365/827	2082/2310	0.076/0.146	0.72/0.60	1862/1862	-0.073	-0.70	2.00×10^5
4142	403	Q and T	1413	1379/827	/	0.051/0.17	0.66/0.45	1825/1825	-0.08	0.075	2.00×10^5
4142	551	Q and T	1913	1724/1344	/	0.048/0.13	0.43/0.09	2170/2170	-0.081	-0.61	2.07×10^5
4340	243	H.R.and Annealed	827	634/455	/	/0.18	0.57/0.45	1090/1200	-0.095	-0.54	1.93×10^5
4340	350	Q and T	1242	1172/758	1579/	0.066/0.14	0.84/0.73	1655/1655	-0.076	-0.62	1.93×10^5
4340	409	Q and T	1469	1372/827	/	/0.15	0.48/0.48	1560/2000	-0.091	-0.60	2.00×10^5
5160	430	Q and T	1669	1531/1000	2124/2310	0.055/0.15	0.87/0.40	1931/1931	-0.071	-0.57	2.07×10^5
9262	260	Annealed	924	455/524	1744/1379	0.22/0.15	0.16/0.16	1046/1046	-0.071	-0.47	1.93×10^5
9262	280	Q and T	1000	786/648	/1358	0.14/0.12	0.41/0.41	1220/1220	-0.073	-0.60	2.00×10^5
9262	410	Q and T	1565	1379/1048	1951/2013	0.06/0.086	0.38/0.38	1855/185	-0.057	-0.65	2.00×10^5
950C	159	R.H.Plate	565	317/345	924/	0.19/0.15	1.03/0.95	931/1172	-0.12	-0.61	2.04×10^5
950C	150	R.H.Plate	565	324/310	/	0.21/0.185	1.19/0.85	1000/972	-0.11	-0.59	2.07×10^5
950X	150	Plate Channel	441	345/338	676/793	0.16/0.134	1.06/0.35	752/627	-0.075	-0.54	2.07×10^5
950X	156	H.R.Plate	531	331/386	903/924	0.19/0.114	0.19/0.114	1000/1055	-0.10	-0.61	2.03×10^5
980X	225	Plate Channel	696	565/558	1248/1248	0.13/0.134	0.13/0.134	1220/1055	-0.08	-0.53	1.94×10^5
RQE-100	290	R.H.Plate	938	896/600	1172/1434	0.06/0.14	0.06/0.14	1069/1241	-0.07	-0.69	2.07×10^5
RQC-100	290	R.H.Plate	931	883/600	1172/1434	0.06/0.14	0.06/0.14	1331/1241	-0.07	-0.69	2.07×10^5
302	181	Annealed	634	234/340	1448/1504	0.48/0.27	0.48/0.27	1580/1524	-0.112	-0.6	2.00×10^5
303	171	Annealed	600	241/345	1413/1445	0.51/0.36	0.51/0.36	1580/1524	-0.113	-0.6	2.00×10^5
30304	160	H.R.and Annealed	745	255/717	/0.36	/0.36	/0.36	1572/2413	-0.15	-0.69	1.86×10^5
30304	327	CD	951	745/876	/0.17	/0.17	/0.17	1696/2275	-0.12	-0.77	1.72×10^5
30310	145	H.R.and Annealed	641	221/345	/0.26	/0.26	/0.26	1158/1655	-0.15	-0.57	1.93×10^5
304	163	Annealed	572	276/517	1276/2018	0.45/0.36	0.45/0.36	1570/2415	-0.15	-0.57	1.93×10^5
440C	230	Annealed	807	462/550	1241/1294	0.14/0.16	0.14/0.16	922/922	-0.057	-0.6	2.00×10^5

TABELA A1 - CONTINUAÇÃO
 PROPRIEDADES MECÂNICAS MONOTÔNICAS E CÍCLICAS PARA LIGAS DE MATERIAIS DE ENGENHARIA. [7.10,12]

MATERIAL	Bhn	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	σ_R MPa	σ_E / σ_F MPa/MPa	k/k' MPa/MPa	n/n'	ϵ_f / ϵ_f'	σ_f / σ_f' MPa/MPa	b	c	E MPa
Magnésio											
HK31XA-0	50		176	131/150	341/	0.22/	0.33/	267/	-0.105	-0.476	0.45×10^5
HK31XA-H24	71		250	214/230	331/	9.08/	0.20/	291/	-0.057	-0.710	0.45×10^5
Cobre											
70-30 Brass	86	Hard	303	72/95	724/	0.52/	1.55/	910/	-0.144	-0.277	
Naval Brass	107	Hard	376	117/120	830/	0.48/	1.00/	862/	-0.141	-0.294	
Alumínio											
1100-0	32	As received	110	97/62	152/176	0.25/0.15	2.09/1.8	183/193	-0.106	-0.69	0.71×10^5
2014-T6	155	As received	543	460/415	731/976	0.16/9.16	0.29/0.42	600/850	-0.106	-0.65	0.71×10^5
2024-T3	134	As received	469	379/427	455/655	0.032/0.065	0.28/0.22	558/110	-0.124	-0.59	0.71×10^5
2024-T4	136	As received	476	303/441	807/655	0.20/0.08	0.43/0.21	634/1015	-0.11	-0.52	0.71×10^5
5456	95	As received	333	235/360	603/820	0.16/0.16	0.42/0.46	525/725	-0.11	-0.67	0.71×10^5
7075-T6	165	As received	579	469/524	827/655	0.11/0.146	0.41/0.19	745/1315	-0.126	-0.52	0.71×10^5

TABELA A2

TENACIDADE À FRATURA, K_{IC}, PARA UMA SELEÇÃO DE MATERIAIS. - [7,10]

MATERIAL	σ_E [MPa]	K _{IC} [MPa \sqrt{m}]	OBSERVAÇÕES
Aço			
4330 V	1315	103-110	Forjado
4340	1570	62	Placa
4340	1495-1640	50-63	Placa
4340	1360-1455	79-91	Forjado
D6AC	1495	102	Placa
HP 9-4-20	1280-1310	132-154	-
HP 9-4-30	1320-1420	90-115	-
18Ni (Vim)	1770	54-56	Placa
18Ni (200)	1450	110	Placa
18Ni (250)	1785	88-87	Placa
18Ni (300)	1905	50-64	Placa
18Ni (300)	1930	83-105	Forjado
RQC-100	896	165	-
RQC-100	883	165	-
AFC77	1530	79	Forjado
Alumínio			
2014-T651	433-470	23-27	Placa
2020-T651	525-540	22-27	Placa
2024-T351	370-385	31-44	Placa
2024-T851	450	23-28	Placa
2124-T851	440-460	27-36	Placa
2219-T851	345-360	36-41	Placa
7050-T73651	460-510	33-41	Placa
7075-T651	515-560	27-31	Placa
7075-T7351	400-455	31-35	Placa
7079-T651	525-540	29-33	Placa
7178-T651	560	26-30	Placa
7475-T651	505-515	33-37	Placa
7475-T7351	395-420	39-44	Placa
Liga de Titânio			
Ti-6Al-4V	875	123	Placa
	315-835	85-107	Placa
	820	106	Placa
	825	77-116	Placa

DADOS DE ΔK_0 NO LIMITE DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS DE FADIGA, E OEXPOENTE m DA EQUAÇÃO DE PARIS: [7,10]

MATERIAL	σ_R [MPa]	$R = K_{min}/K_{max}$	ΔK_0 [MPa \sqrt{m}]	m
Aço doce	430	0.13	6.6	3.3
		0.35	5.2	3.3
		0.49	4.3	3.3
		0.64	3.2	3.3
		0.75	3.8	3.3
Aço baixa liga	835 680	-1,00	6.2	3.3
		0.33	6.2	3.3
		0.75	5.1	3.3
Aço Maranging	2010	0.63	3.5	3.0
Aço Austenítico 18/8	665	0.00	6.0	3.1
		0.33	5.9	3.1
		0.62	4.6	3.1
		0.74	4.1	3.1
		-1.00	6.3	3.1
12N _i -5C _r -3M _o AM	1648	0.0-0.74	6.3	3.1
		0.0-0.74	6.3	3.1
12N _i -5C _r -3M _o VIM	1364	0.0-0.74	6.3	3.1
18N _i -8C _o -3M _o AM	1379	0.0-0.74	6.3	3.1
18N _i -8C _o -3M _o VIM	1345	0.0-0.74	6.3	3.1
D 6 A C	1970	0.03	3.4	3.1
Alumínio	125-155 75	0.33-0.60	2.0	2.9
		-1.00-0.53	2.0	2.9
2024-T3	469		1.7	2.9
2024-T4	476		1.7	2.9
7075-T6	579		2.6	3.7
7001-T75	555		2.15	3.5
7178-T651	630		2.8	3.7
7178-T7651	559		2.8	3.7
1/2C _u -AL, Liga BSL71	480	0.14-0.46	2.4	3.7
4 1/2C _u -AL, Liga BSL65	450 495	-1	3.3	4.0
		0.33	3.0	4.0
AL Liga HS30W	265	0.20-0.71	1.9	2.6
AL Liga HS30PW	310	0.25-0.43	2-6	3.9
Titânio	540 555	0.60	3.6	4.4
		0.07-0.87	6.6	4.4
Ti-6Al-4V	1035	0.15	6.6	4.4
		0.33	4.4	4.4
		0.15	6.6	4.4
		0.33	4.4	4.4
		0.33	4.4	4.4
Cobre 60/40 Brass	215-310 325	0.07-0.60	4.3	3.9
		0	3.5	3.9
		0.33	4.1	3.9
		0.51	2.6	3.9
		0.72	2.6	3.9
70/30 Brass	303		5.6	4.0
Naval Brass	376		4.3	3.9
Níquel	430	0	7.9	4.0
		0.33	6.5	4.0
		0.57	5.2	4.0
		0.71	3.6	4.0
		0.71	3.6	4.0
Monel	525		6.2	4.0
Inconel	655 650	-1	10.7	4.0
		0	10.7	4.0
		0.33-0.71	8.2	4.0

O valor de C dado pela Equação 2.28 pode ser calculado através da expressão:

$$C = 10^{-9} \cdot \Delta K_0^{-m}$$

para $da/dN = 10^{-9} [m/ciclo]$

MATERIAL	ENTALHE	ENSAIO	INTERVALO DE TEMPERATURA	INTERVALO RESULTADOS CHARPY (J)	σ_E [MPa]	CORRELAÇÃO
A517D 4147 HY130 4130 12Ni-5Cr-3Mo 18Ni-8Co-3Mo	V	Impacto	Upper-Shelf	31-121	760-1700	$\frac{KIC^2}{\sigma E} = 0.64 (CVN - 0.01)$
A517F A3202B AB5-C HY-130 18 Ni (250) Ni-Cr-Mo-V Cr-Mo-V Ni-Mo-V	V	Impacto	Transição	4-82	270-1700	$\frac{KIC^2}{\sigma E} = 0.22 (CVN)^{1.5}$
A 533 B A 517 F A 542	V	Impacto	Transição	7-68	410-480	$\frac{KIC^2}{\sigma E} = 14.6 (CVN)^{0.5}$
A B S-C A 305-B A 517-F	V	Impacto Slow-bend	Transição	2.7-61	250-345	$\frac{KID^2}{E} = 0.64 CVN$ $\frac{KIC^2}{E} = 0.64 CSB$
A B S-C A 302-B A 517-F	Com trinca inicial	Impacto Slow-bend	Transição	2.7-61	250-345	$\frac{KID^2}{E} = 0.52 PCI$ $\frac{KIC^2}{E} = 0.52 PSB$

J | Joule |

KIC | MPa \sqrt{m} |KID | MPa \sqrt{m} |

E | MPa |

PCI (Precracked-Impact)

PSB (Precracked-Slow-bend)

CVN (Charpy V - Notch)

CSB (Charpy Slow-bend)

APÊNDICE B**GEOMETRIAS DISPONÍVEIS**

APÊNDICE BGEOMETRIAS DISPONÍVEIS |18,23|

Neste apêndice encontra-se o conjunto das geometrias que estão disponíveis no programa e que podem ser chamadas, indicando o código correspondente.

Nas geometrias correspondentes aos corpos de prova, o fator de intensidade de tensões K é obtido, geralmente, como sendo função da força aplicada, por ser este parâmetro mais fácil de controlar durante a realização de testes em laboratório.

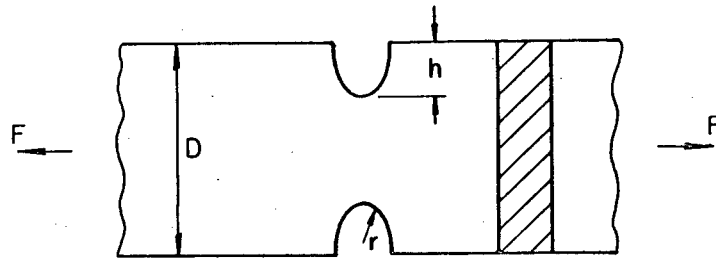
As geometrias encontram-se divididas segundo:

- B.1 - Geometrias sem defeitos
 - B.1.1 - Elementos de seção retangular
 - B.1.2 - Eixos
 - B.1.3 - Placas infinitas
- B.2 - Geometrias com defeitos
 - B.2.1 - Placas infinitas
 - B.2.2 - Corpos de prova
 - B.2.3 - Eixos
 - B.2.4 - Outras

B.1 - Geometrias sem defeitos

B.1.1 - Elementos de seção retangular

1. Elemento de seção retangular com dois entalhes em U sob tração.



$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3 + K_5 \left(\frac{2h}{D}\right)^4$$

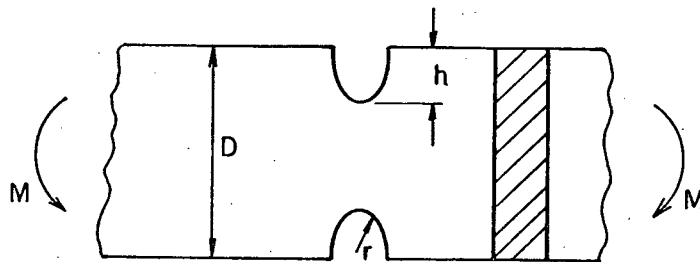
onde:

	$0.1 \leq h/r \leq 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 50.0$
K_1	$0.850 + 2.628\sqrt{h/r} - 0.413 h/r$	$0.833 + 2.069\sqrt{h/r} - 0.009 h/r$
K_2	$-1.119 - 4.826\sqrt{h/r} + 2.575 h/r$	$2.732 - 4.157\sqrt{h/r} + 0.176 h/r$
K_3	$3.563 - 0.514\sqrt{h/r} - 2.402 h/r$	$-8.959 + 5.327\sqrt{h/r} - 0.320 h/r$
K_4	$-2.294 + 2.713\sqrt{h/r} - 0.240 h/r$	$6.294 - 3.239\sqrt{h/r} + 0.154 h/r$

Para entalhe semicircular $h/r = 1$

$$K_t = 3.065 - 3.370 \left(\frac{2h}{D}\right) + 0.647 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + 0.658 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

2. Elemento de seção retangular com dois entalhes em U sob flexão.



$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3 + K_5 \left(\frac{2h}{D}\right)^4$$

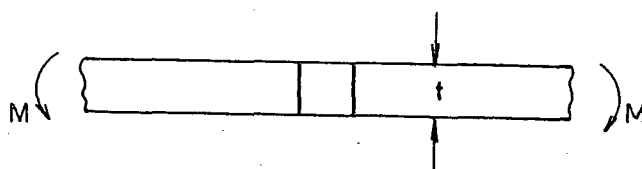
onde:

	$0.25 \leq h/r \leq 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 50.0$
K_1	$0.723 + 2.845\sqrt{h/r} - 0.504 h/r$	$0.833 + 2.069\sqrt{h/r} - 0.009 h/r$
K_2	$-1.836 - 5.746\sqrt{h/r} + 1.314 h/r$	$0.024 - 5.383\sqrt{h/r} + 0.126 h/r$
K_3	$7.254 - 1.885\sqrt{h/r} + 1.646 h/r$	$-0.856 + 6.460\sqrt{h/r} - 0.199 h/r$
K_4	$-5.140 + 4.785\sqrt{h/r} - 2.456 h/r$	$0.999 - 3.146\sqrt{h/r} + 0.082 h/r$

Para entalhe semicircular $h/r=1$

$$K_t = 3.065 - 6.269\left(\frac{2h}{D}\right) + 7.015\left(\frac{2h}{D}\right)^2 - 2.812\left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

3. Elemento de seção retangular com dois entalhes em U sob flexão fora do plano.



$$K_t = K_1 + K_2\left(\frac{2h}{D}\right) + K_3\left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4\left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

onde para $0.25 \leq h/r \leq 4.0$ e h/t grande:

$$K_1 = 1.031 + 0.831\sqrt{h/r} + 0.014 h/r$$

$$K_2 = -1.227 - 1.646\sqrt{h/r} + 0.117 h/r$$

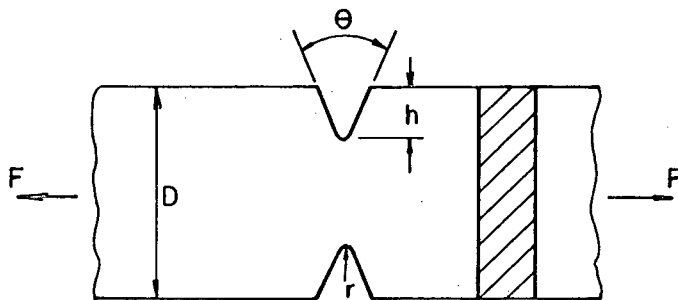
$$K_3 = 3.337 - 0.750\sqrt{h/r} + 0.469 h/r$$

$$K_4 = -2.141 + 1.566\sqrt{h/r} - 0.600 h/r$$

Para entalhe semicircular $h/r=1$

$$K_t = 1.876 - 2.756\left(\frac{2h}{D}\right) + 3.056\left(\frac{2h}{D}\right)^2 - 1.175\left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

4. Elemento de seção retangular com dois entalhes em V sob tração.



O fator de concentração de tensões K_t é o menor dos valores:

$$K_t = K_u$$

ou

$$K_t = 1.11 K_u - \left[0.0275 + 0.000145\theta + 0.0164 \left(\frac{\theta}{120} \right)^8 \right] K_u^2$$

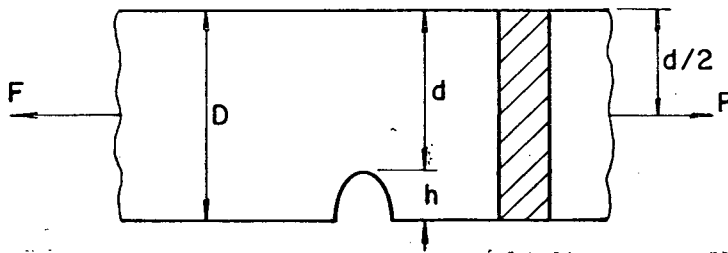
$$\text{para } \frac{2h}{D} = 0.40 \text{ e } \theta < 120^\circ$$

$$K_t = 1.11 K_u - \left[0.0275 + 0.00042\theta + 0.0075 \left(\frac{\theta}{120} \right)^8 \right] K_u^2$$

$$\text{para } \frac{2h}{D} = 0.667 \text{ e } \theta < 120^\circ$$

onde K_u é o fator de concentração de tensões para o entalhe em U, caso 1, quando as dimensões h , r , e D , são as mesmas do entalhe em V e θ é o ângulo do entalhe em graus.

5. Elemento de seção retangular com entalhe em U sob tração.



$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{1}{D} \right) + K_3 \left(\frac{h}{D} \right)^2 + K_4 \left(\frac{h}{D} \right)^3$$

onde para $0.5 \leq h/r \leq 4.0$

$$K_1 = 0.721 + 2.394\sqrt{h/r} - 0.127 h/r$$

$$K_2 = 1.978 - 11.489\sqrt{h/r} + 2.211 h/r$$

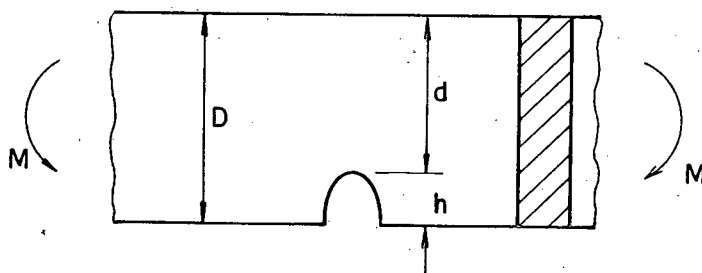
$$K_3 = -4.413 + 18.751\sqrt{h/r} - 4.596 h/r$$

$$K_4 = 2.714 - 9.655\sqrt{h/r} + 2.512 h/r$$

para entalhe semicircular $h/r=1$

$$K_t = 2.988 - 7.300\left(\frac{h}{D}\right) + 9.742\left(\frac{h}{D}\right)^2 - 4.429\left(\frac{h}{D}\right)^3$$

6. Elemento de seção retangular com entalhe em U sob flexão



$$K_t = K_1 + K_2\left(\frac{h}{D}\right) + K_3\left(\frac{h}{D}\right)^3 + K_4\left(\frac{h}{D}\right)^4$$

onde para $0.5 \leq h/r \leq 4.0$

$$K_1 = 0.721 + 2.394\sqrt{h/r} - 0.127 h/r$$

$$K_2 = -0.426 - 8.827\sqrt{h/r} + 1.518 h/r$$

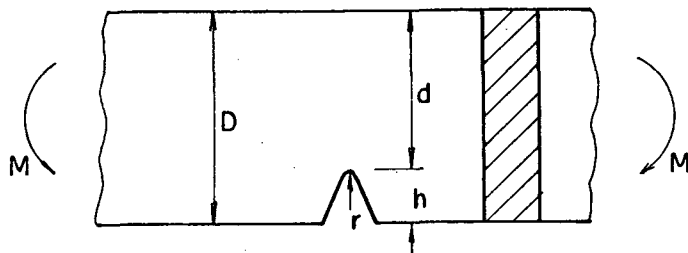
$$K_3 = 2.161 + 10.968\sqrt{h/r} - 2.455 h/r$$

$$K_4 = -1.456 - 4.535\sqrt{h/r} + 1.064 h/r$$

para entalhe semicircular $h/r=1$

$$K_t = 2.988 - 7.735\left(\frac{h}{D}\right) + 10.674\left(\frac{h}{D}\right)^2 - 4.927\left(\frac{h}{D}\right)^3$$

7. Elemento de seção retangular com entalhe em V sob flexão



O fator de concentração de tensões K_t para o entalhe em V é o menor dos valores:

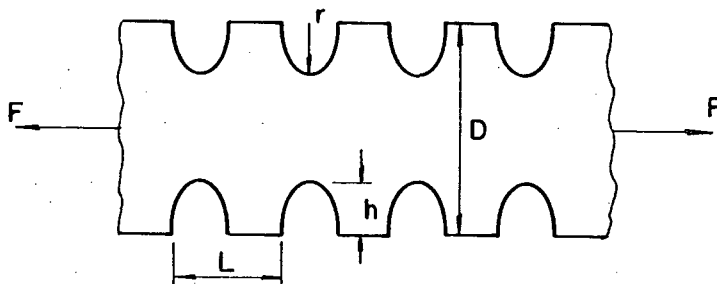
$$K_t = K_u$$

$$K_t = 1.11K_u - \left| 0.0275 + 0.1125 \left(\frac{\theta}{150} \right)^4 \right| K_u^2$$

para $\theta < 150^\circ$

onde K_u é o fator de concentração de tensões para o entalhe em U caso 6, quando as dimensões h , r , e D , são as mesmas para o entalhe em V e θ é o ângulo do entalhe em graus.

8. Elemento de seção retangular com múltiplos entalhes em U sob tração.



O fator de concentração de tensões para múltiplos entalhes semi-circulares em U, é o menor dos valores:

$$K_M = K_u$$

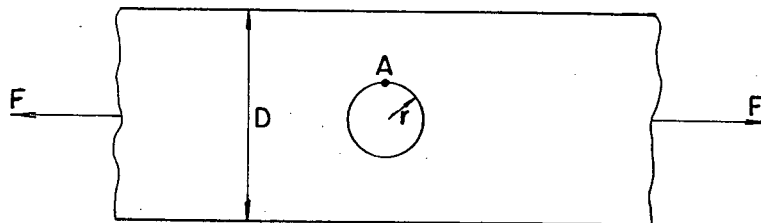
ou

$$K_M = \left\{ 1.1 - \left| 0.88 - 1.68 \left(\frac{2r}{D} \right) \right| \frac{2r}{L} + \left| 1.3 \left(0.5 - \frac{2r}{D} \right) \right| \left(\frac{2r}{L} \right)^3 \right\} K_u$$

$$\text{para } \frac{2r}{L} < 1$$

onde K_u é o fator de concentração de tensões para um par de simples entalhes semicircular, caso 1.

9. Elemento de seção retangular com orifício central sob tração.



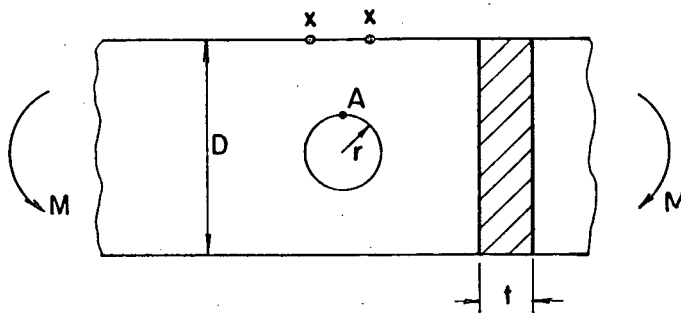
$$\sigma_{\text{máx}} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}$$

onde:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{t(D-2r)}$$

$$K_t = 3.00 - 3.13 \left(\frac{2r}{D} \right) + 3.66 \left(\frac{2r}{D} \right)^2 - 1.53 \left(\frac{2r}{D} \right)^3$$

10. Elemento de seção retangular com orifício circular central sob flexão.



A tensão máxima na borda do orifício é:

$$\sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}$$

onde:

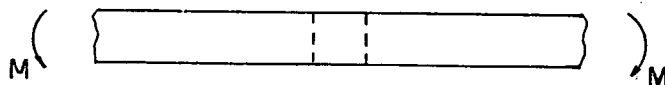
$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{12 Mr}{t |D^3 - (2r)^3|} \quad (\text{na borda do orifício})$$

$$K_t = 2 \quad (\text{independente de } r/D)$$

A tensão máxima na borda da placa não está diretamente sobre o orifício, encontra-se nos pontos X

$$\sigma_X = \frac{6 M D}{t |D^3 - (2r)^3|}$$

11. Elemento de seção retangular com orifício circular central sob flexão fora do plano



A tensão máxima na borda do orifício é:

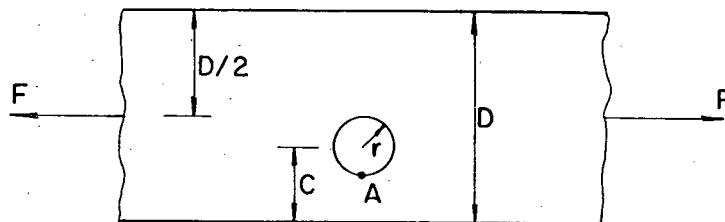
$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_A = K_t \frac{6M}{t^2 (D-2r)}$$

onde:

$$K_t = \left[1.79 + \frac{0.25}{0.39 + (2r/t)} + \frac{0.81}{1 + (2r/t)^2} - \frac{0.26}{1 + (2r/t)^3} \right] \left[1 - 1.04 \left(\frac{2r}{D} \right) + 1.22 \left(\frac{2r}{D} \right)^2 \right]$$

$$\text{para } \frac{2r}{D} < 0.3$$

12. Elemento de seção retangular com orifício circular fora de centro sob tração



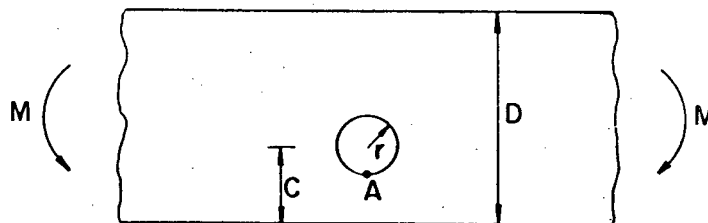
$$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}$$

onde:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{D t} \frac{\sqrt{1 - (r/c)^2}}{1 - (r/c)} \frac{1 - C/D}{1 - C/D [2 - \sqrt{1 - (r/c)^2}]}$$

$$K_t = 3.00 - 3.13 \left(\frac{r}{c} \right) + 3.66 \left(\frac{r}{c} \right)^2 - 1.53 \left(\frac{r}{c} \right)^3$$

13. Elemento de seção retangular com orifício circular fora de centro sob flexão.



$$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}$$

onde:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{12M}{t D^3} \left(\frac{D}{2} - c+r \right)$$

e:

$$K_t = 3 \quad \text{se } r/c < 0.05$$

ou:

$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2c}{D} \right) + K_3 \left(\frac{2c}{D} \right)^2 + K_4 \left(\frac{2c}{D} \right)^3$$

onde para $0.05 \leq r/c \leq 0.5$

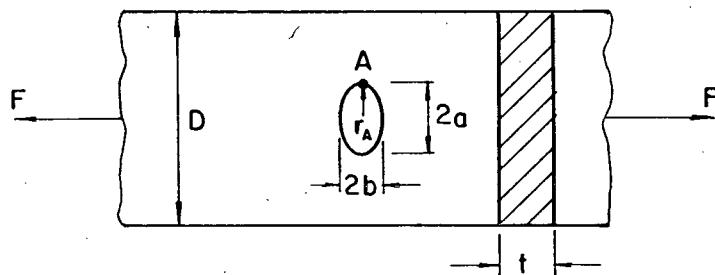
$$K_1 = 3.022 - 0.422 r/c + 3.556 (r/c)^2$$

$$K_2 = -0.569 + 2.664 r/c - 4.397 (r/c)^2$$

$$K_3 = 3.138 - 18.367 r/c + 28.093 (r/c)^2$$

$$K_4 = -3.591 + 16.125 r/c - 27.252 (r/c)^2$$

14. Elemento de seção retangular com orifício elíptico central sob tração



$$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}$$

onde

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{t(D-2a)}$$

$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2a}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2a}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2a}{D}\right)^3$$

onde para $0.5 \leq a/b \leq 10.0$

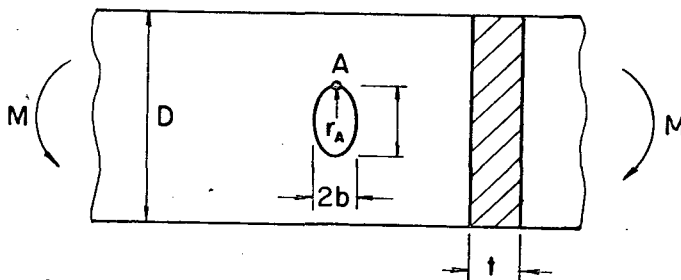
$$K_1 = 1.000 + 0.000 \sqrt{a/b} + 2.000 a/b$$

$$K_2 = -0.351 - 0.021 \sqrt{a/b} - 2.483 a/b$$

$$K_3 = 3.621 - 5.183 \sqrt{a/b} + 4.494 a/b$$

$$K_4 = -2.270 + 5.204 \sqrt{a/b} - 4.011 a/b$$

15. Elemento de seção retangular com orifício elíptico central sob flexão.



$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}$$

onde:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{12Ma}{t|D^3 - (2a)^3|}$$

$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2a}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2a}{D}\right)^2$$

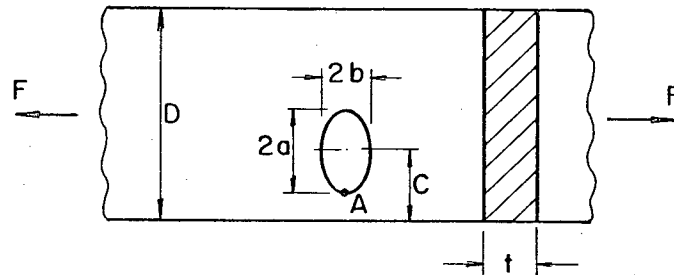
onde para $1.0 \leq a/b \leq 2.0$ e $0.4 \leq 2a/D \leq 1.0$

$$K_1 = 3.465 - 3.739 \sqrt{a/b} + 2.274 a/b$$

$$K_2 = -3.841 + 5.582 \sqrt{a/b} - 1.741 a/b$$

$$K_3 = 2.376 - 1.843 \sqrt{a/b} + 0.534 a/b$$

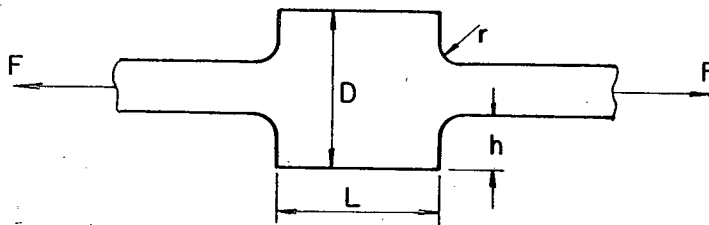
16. Elemento de seção retangular com orifício elíptico fora de centro sob tração



$$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}$$

A expressão para σ_{nom} idem caso 12 substituindo a/c por r/c . Para K_t usar o caso 14 substituindo a/c por $2a/D$.

17. Elemento de seção retangular com redução na espessura sob tração



$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

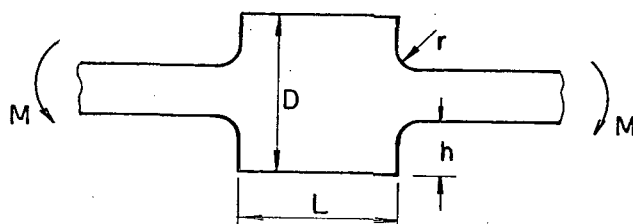
onde:

$$\frac{L}{D} > \frac{3}{[r/(D-2h)]^{1/4}}$$

e:

	$0.1 \leq h/r \leq 5.0$	$2.0 \leq h/r \leq 20.0$
K_1	$1.007 + 1.000\sqrt{h/r} - 0.031 h/r$	$1.042 + 0.982\sqrt{h/r} - 0.036h/r$
K_2	$-0.114 - 0.585\sqrt{h/r} + 0.314 h/r$	$-0.074 - 0.156\sqrt{h/r} - 0.010h/r$
K_3	$0.241 - 0.992\sqrt{h/r} - 0.271 h/r$	$-3.418 + 1.220\sqrt{h/r} - 0.005h/r$
K_4	$-0.134 + 0.577\sqrt{h/r} - 0.012 h/r$	$3.450 - 2.046\sqrt{h/r} + 0.051h/r$

18. Elemento de seção retangular com redução na espessura sob flexão.



$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

onde:

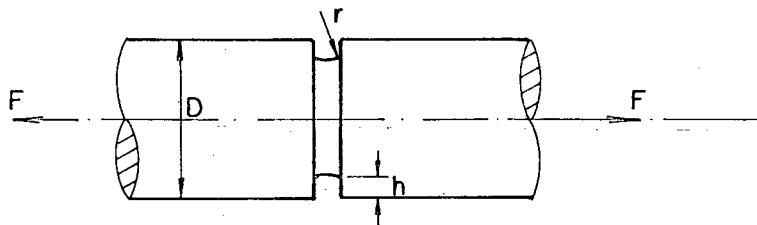
$$\frac{L}{D} > \frac{0.8}{|r/(D-2h)|^{1/4}}$$

e:

	$0.1 \leq h/r \leq 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 20.0$
K_1	$1.007 + 1.000\sqrt{h/r} - 0.031 h/r$	$1.042 + 0.982\sqrt{h/r} - 0.036h/r$
K_2	$-0.270 - 2.404\sqrt{h/r} + 0.749 h/r$	$-3.599 + 1.619\sqrt{h/r} - 0.431h/r$
K_3	$0.677 + 1.133\sqrt{h/r} - 0.904 h/r$	$6.084 - 5.607\sqrt{h/r} + 1.158h/r$
K_4	$-0.414 + 0.271\sqrt{h/r} + 0.186 h/r$	$-2.527 + 3.006\sqrt{h/r} - 0.691h/r$

B1.2 - Eixos

1. Eixo com entalhe circunferencial em U sob tração



$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

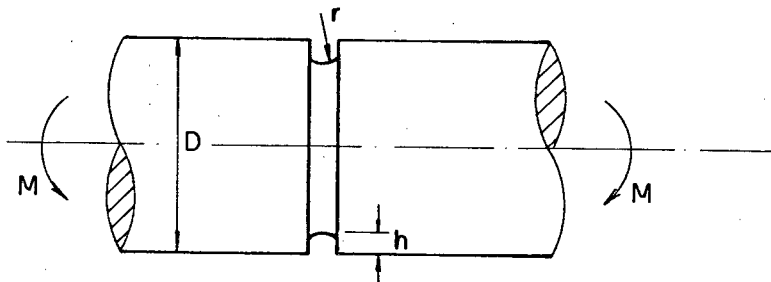
onde:

	$0.25 \leq h/r \leq 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 50.0$
K_1	$0.455 + 3.354\sqrt{h/r} - 0.769h/r$	$0.935 + 1.922\sqrt{h/r} + 0.004 h/r$
K_2	$3.129 - 15.955\sqrt{h/r} + 7.404h/r$	$0.537 - 3.708\sqrt{h/r} + 0.040 h/r$
K_3	$-6.909 + 29.286\sqrt{h/r} - 16.104h/r$	$-2.538 + 3.438\sqrt{h/r} - 0.012 h/r$
K_4	$4.325 - 16.685\sqrt{h/r} + 9.469h/r$	$2.066 - 1.652\sqrt{h/r} - 0.031 h/r$

para o entalhe semicircular $h/r = 1$

$$K_t = 3.04 - 5.42 \left(\frac{2h}{D}\right) + 6.27 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 - 2.89 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

2. Eixo com entalhe circunferencial em U sob flexão.



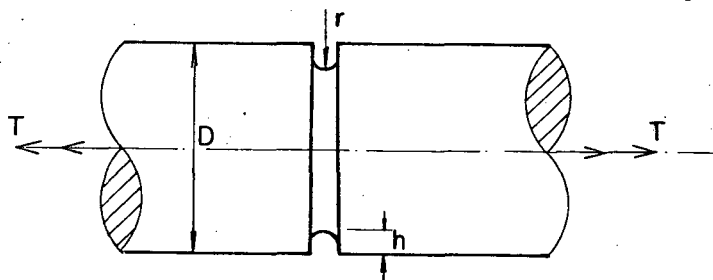
$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

onde:

	$0.25 \leq h/r \leq 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 50.0$
K_1	$0.455 + 3.354\sqrt{h/r} - 0.769 h/r$	$0.935 + 1.922\sqrt{h/r} + 0.004 h/r$
K_2	$0.891 - 12.721\sqrt{h/r} + 4.593 h/r$	$-0.552 - 5.327\sqrt{h/r} + 0.086 h/r$
K_3	$0.286 + 15.481\sqrt{h/r} - 6.392 h/r$	$0.754 + 6.281\sqrt{h/r} - 0.121 h/r$
K_4	$-0.632 - 6.115\sqrt{h/r} + 2.568 h/r$	$-0.138 - 2.876\sqrt{h/r} + 0.031 h/r$

para o entalhe semicircular $h/r=1$

3. Eixo com entalhe semicircular em U sob torção.



$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

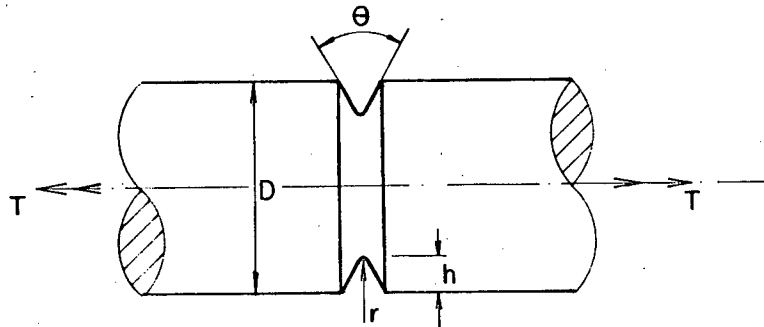
onde:

	$0.25 \leq h/r \leq 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 50.0$
K_1	$1.245 + 0.264\sqrt{h/r} + 0.491 h/r$	$1.651 + 0.614\sqrt{h/r} + 0.040 h/r$
K_2	$-3.030 + 3.269\sqrt{h/r} - 3.633 h/r$	$-4.794 - 0.314\sqrt{h/r} - 0.217 h/r$
K_3	$7.199 - 11.286\sqrt{h/r} + 8.318 h/r$	$8.457 - 0.962\sqrt{h/r} + 0.389 h/r$
K_4	$-4.414 + 7.753\sqrt{h/r} - 5.176 h/r$	$-4.314 + 0.662\sqrt{h/r} - 0.212 h/r$

para o entalhe semicircular $h/r=1$.

$$K_t = 2.000 - 3.304 \left(\frac{2h}{D}\right) + 4.231 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 - 1.837 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

4. Eixo com detalhe circunferencial em V sob torção.



O fator de concentração para o entalhe em V, K_t , é o menor dos valores:

$$K_t = K_u$$

$$K_t = 1.065 K_u - \left[0.022 + 0.137 \left(\frac{\theta}{135} \right)^2 \right] (K_u - 1) K_u$$

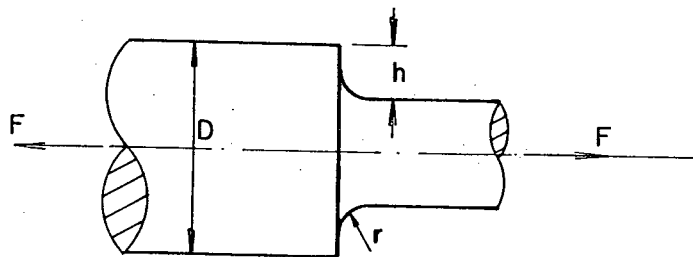
para:

$$\frac{r}{D-2h} < 0.01 \text{ e } \theta < 135^\circ$$

e:

K_u é o fator de concentração de tensão para o entalhe em U, caso 3 quando as dimensões h , r , e D são as mesmas do entalhe em V e θ é o ângulo do entalhe em graus.

5. Eixo escalonado sob tração.

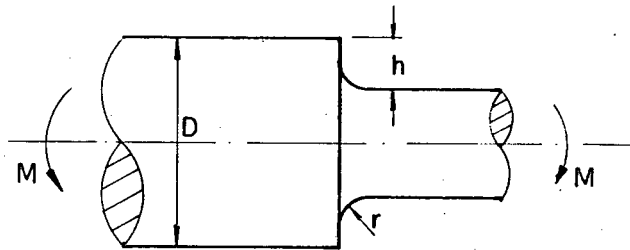


$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D} \right) + K_3 \left(\frac{2h}{D} \right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D} \right)^3$$

onde:

	$0.25 \leq h/r \leq 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 20.0$
K_1	$0.927 + 1.149\sqrt{h/r} - 0.086 h/r$	$1.225 + 0.831\sqrt{h/r} - 0.010 h/r$
K_2	$0.011 - 3.029\sqrt{h/r} + 0.948 h/r$	$-1.831 - 0.318\sqrt{h/r} - 0.049 h/r$
K_3	$-0.304 + 3.979\sqrt{h/r} - 1.737 h/r$	$2.236 - 0.522\sqrt{h/r} + 0.176 h/r$
K_4	$0.366 - 2.098\sqrt{h/r} + 0.875 h/r$	$-0.630 + 0.009\sqrt{h/r} - 0.117 h/r$

6. Eixo escalonado sob flexão.

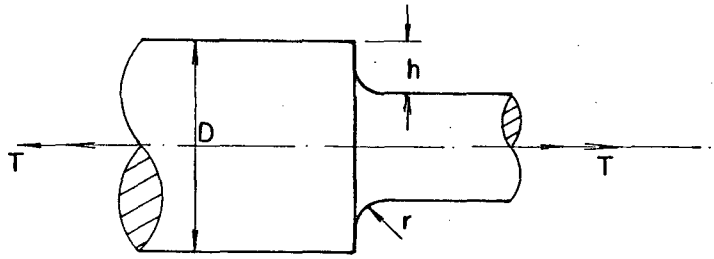


$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

onde:

	$0.25 \leq h/r \leq 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 20.0$
K_1	$0.927 + 1.149\sqrt{h/r} - 0.086 h/r$	$1.225 + 0.831\sqrt{h/r} - 0.010 h/r$
K_2	$0.015 - 3.281\sqrt{h/r} + 0.837 h/r$	$-3.790 + 0.958\sqrt{h/r} - 0.257 h/r$
K_3	$0.847 + 1.716\sqrt{h/r} - 0.506 h/r$	$7.374 - 4.834\sqrt{h/r} + 0.862 h/r$
K_4	$-0.790 + 0.417\sqrt{h/r} - 0.246 h/r$	$-3.809 + 3.046\sqrt{h/r} - 0.595 h/r$

7. Eixo escalonado sob torção.

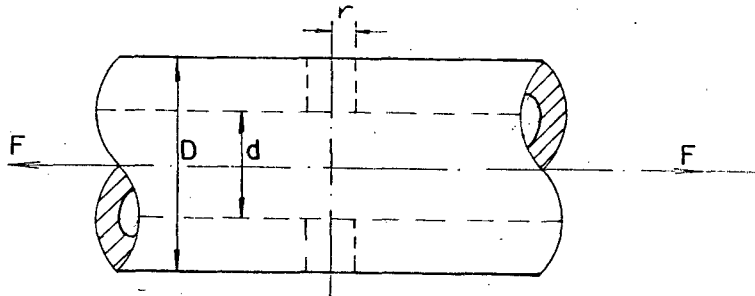


$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2h}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$$

onde:

	$0.25 \leq h/r \leq 4.0$
K_1	$0.953 + 0.680 \sqrt{h/r} - 0.053 h/r$
K_2	$-0.493 - 1.860 \sqrt{h/r} + 0.517 h/r$
K_3	$1.621 + 0.908 \sqrt{h/r} - 0.529 h/r$
K_4	$-1.081 + 0.232 \sqrt{h/r} + 0.065 h/r$

8. Eixo vazado ou maciço com orifício radial sob tração.



$$\sigma_{\max} = K_t \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2)}$$

onde:

$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2r}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2r}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2r}{D}\right)^3$$

e onde para $d/D \leq 0.9$ e $2r/D \leq 0.45$

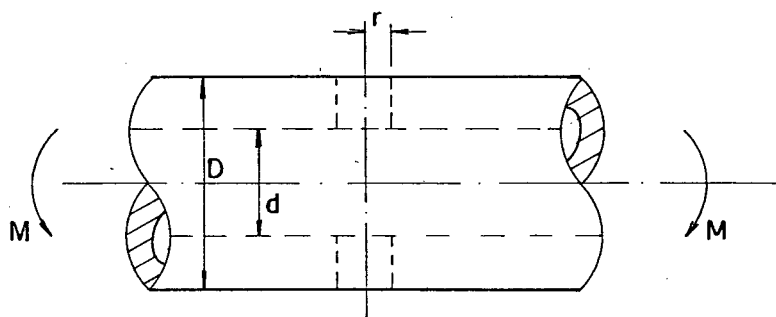
$$K_1 = 3.000$$

$$K_2 = 2.773 + 1.529 d/D - 4.379 (d/D)^2$$

$$K_3 = -0.421 + 12.782d/D + 22.781 (d/D)^2$$

$$K_4 = 16.841 + 16.678d/D - 40.007 (d/D)^2$$

9. Eixo vazado ou maciço com orifício radial sob flexão.



$$\sigma_{\max} = K_t \frac{32MD}{\pi(D^4 - d^4)}$$

onde:

$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2r}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2r}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2r}{D}\right)^3$$

e onde para $d/D \leq 0.9$ e $2r/D \leq 0.3$

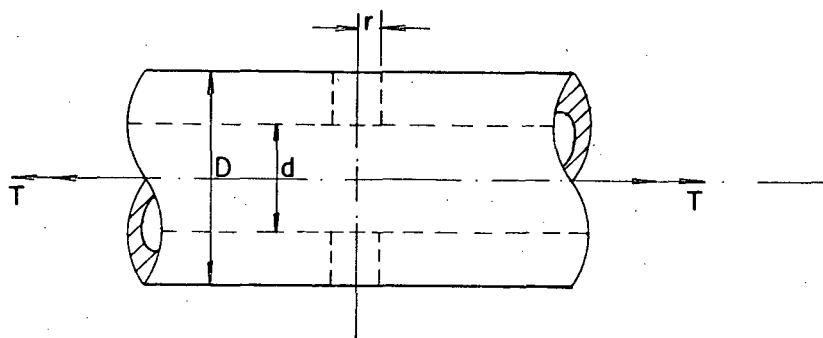
$$K_1 = 3.000$$

$$K_2 = -6.690 - 1.620 d/D + 4.432 (d/D)^2$$

$$K_3 = 44.739 + 10.724 d/D - 19.927 (d/D)^2$$

$$K_4 = -53.307 - 25.998 d/D + 43.258 (d/D)^2$$

10. Eixo vazado ou maciço com orifício radial sob torção.



$$\sigma_{\max} = K_t \frac{16 T D}{\pi (D^4 - d^4)}$$

onde:

$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{2r}{D}\right) + K_3 \left(\frac{2r}{D}\right)^2 + K_4 \left(\frac{2r}{D}\right)^3$$

e onde para $d/D \leq 0.9$ e $2r/D \leq 0.4$

$$K_1 = 4.000$$

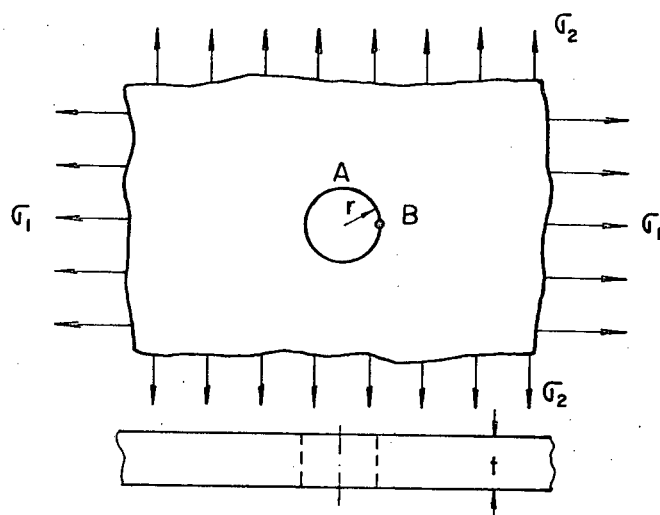
$$K_2 = -6.793 + 1.133 d/D - 0.126 (d/D)^2$$

$$K_3 = 38.382 - 7.242 d/D + 6.495 (d/D)^2$$

$$K_4 = -44.567 - 7.428 d/D + 58.65 (d/D)^2$$

B1.3 - Placas infinitas

1. Placa infinita com orifício circular sob tensões normais.



1a. Tensão uniaxial

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_A = 3\sigma_1$$

$$\sigma_3 = -\sigma_1$$

$$K_t = 3$$

1b. Tensão biaxial

$$\sigma_2 = \sigma_1$$

$$\sigma_A = \sigma_B = 2\sigma_1$$

$$K_t = 2$$

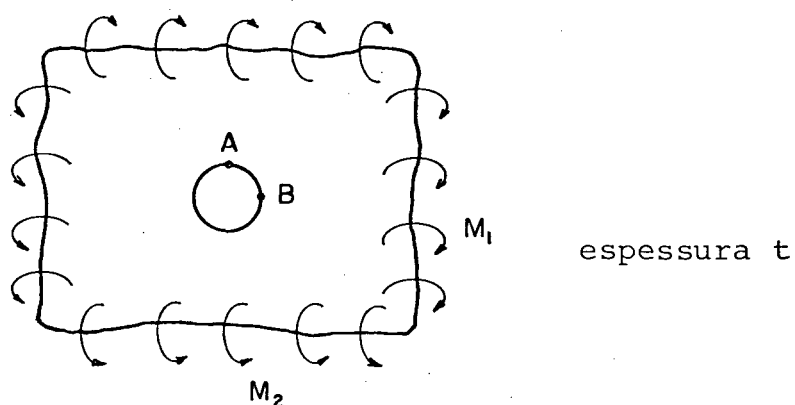
1c. Tensão biaxial (corte puro).

$$\sigma_2 = -\sigma_1$$

$$\sigma_A = -\sigma_B = 4\sigma_1$$

$$K_t = 4$$

2. Placa infinita com orifício central sob dupla flexão.



2a. Flexão simples, $M_2 = 0$

$$\sigma_A = K_t \frac{6M_1}{t^2}$$

onde:

$$K_t = 1.79 + \frac{0.25}{0.39 + (2r/t)} + \frac{0.81}{1 + (2r/t)^2} - \frac{0.26}{1 + (2r/t)^3}$$

2b. Flexão cilíndrica, $M_2 = \nu M_1$

$$\sigma_A = K_t \frac{6M_1}{t^2}$$

onde:

$$K_t = 1.85 + \frac{0.509}{0.70 + (2r/t)} - \frac{0.214}{1 + (2r/t)^2} + \frac{0.335}{1 + (2r/t)^3}$$

para $\nu = 0.3$

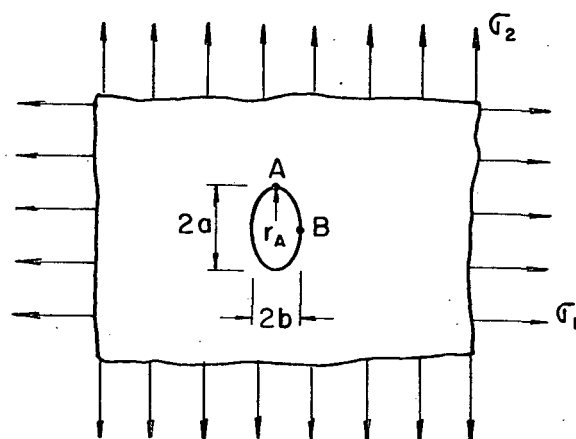
2c. Flexão isotrôpica, $M_2 = M_1$

$$\sigma_A = K_t \frac{6M_1}{t^2}$$

onde:

$$K_t = 2 \quad (\text{independente de } r/t)$$

3. Placa infinita com orifício elíptico sob tensões normais.



3a. Tensão uniaxial.

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_A = \left(1 + \frac{2a}{b}\right) \sigma_1 \quad \text{ou} \quad \sigma_A = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{r_A}}\right) \sigma_1$$

onde:

$$K_t = 1 + \frac{2a}{b} \quad \text{ou} \quad K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{r_A}}$$

3b. Tensão biaxial.

$$\sigma_2 = \sigma_1$$

$$\sigma_A = 2 \frac{a}{b} \sigma_1$$

onde:

$$K_t = 2 \frac{a}{b}$$

$$\sigma_B = 2 \frac{b}{a} \sigma_1$$

onde:

$$K_t = 2 \frac{b}{a}$$

3c. Tensão biaxial

$$\sigma_2 = -\sigma_1$$

$$\sigma_A = 2 \left(1 + \frac{a}{b}\right) \sigma_1$$

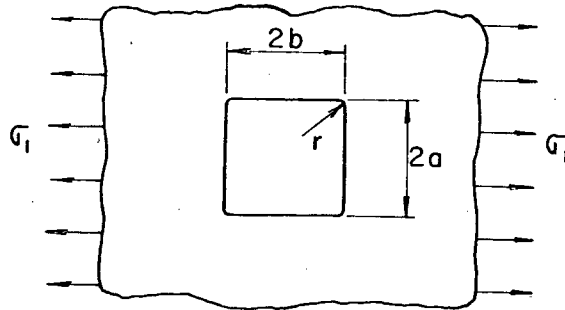
onde: $K_t = 2 \left(1 + \frac{b}{a}\right)$

$$\sigma_B = -2 \left(1 + \frac{b}{a}\right) \sigma_1$$

onde:

$$K_t = 2 \left(1 + \frac{b}{a}\right)$$

- 4 - Placa infinita com orifício retangular com v̄rtices arredondadas, sob tração



$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_1$$

onde:

$$K_t = K_1 + K_2 \left(\frac{b}{a}\right) + K_3 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + K_4 \left(\frac{b}{a}\right)^3$$

onde para $0.2 < r/b < 1.0$ e $0.3 < b/a < 1.0$:

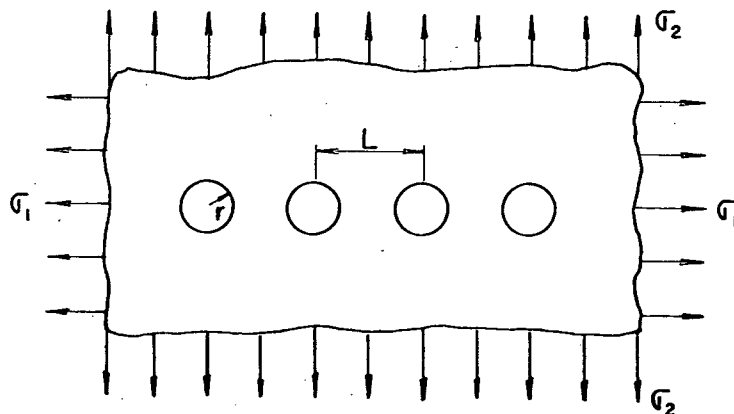
$$K_1 = 14.815 - 15.774 \sqrt{r/b} + 8.149 r/b$$

$$K_2 = -11.201 - 9.750 \sqrt{r/b} + 9.600 r/b$$

$$K_3 = 0.202 + 38.622 \sqrt{r/b} - 27.374 r/b$$

$$K_4 = 3.232 - 23.002 \sqrt{r/b} + 15.482 r/b$$

- 5 - Placa infinita com uma fileira de infinitos orifícios circulares.



5a - Tração paralela à filara de orifícios.

$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_1$$

$$\sigma_2 = 0$$

onde:

$$K_t = 3.0 - 1.061 \left(\frac{2r}{L}\right) - 2.136 \left(\frac{2r}{L}\right)^2 + 1.877 \left(\frac{2r}{L}\right)^3$$

5b - Tração normal à filara de orifícios.

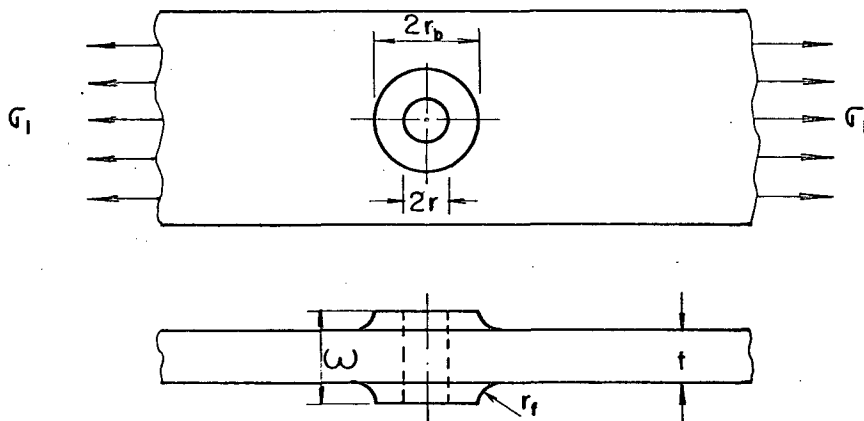
$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_2$$

$$\sigma_1 = 0$$

onde:

$$K_t = 3.0 - 3.057 \left(\frac{2r}{L}\right) + 0.214 \left(\frac{2r}{L}\right)^2 + 0.843 \left(\frac{2r}{L}\right)^3$$

6 - Placa infinita com orifício reforçado sob tração.



$$\sigma_{\max} = K \sigma_1$$

onde para $r_t \geq 0.6t$ e $w \geq 3t$:

$$K_t = 1.0 + \frac{1.66}{1+A} - \frac{2.182}{(1+A)^2} + \frac{2.521}{(1+A)^3}$$

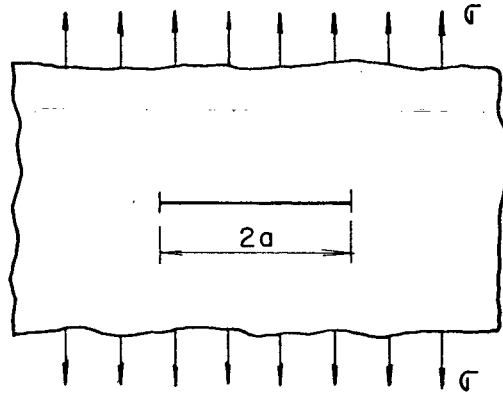
A é a relação transversal do reforço a área transversal do orifício:

$$A = \frac{(r_b - r)(w - t) + 0.429r_t^2}{rt}$$

B2 - Geometrias com defeito

B2.1 - Placas infinitas

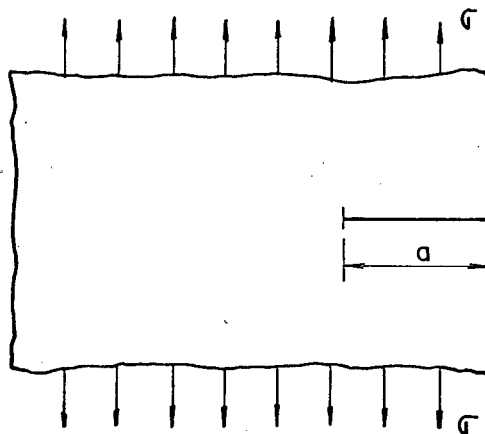
1. Placa infinita com trinca central sob tração



$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{\pi a}$$

$$Y = 1 \text{ constante}$$

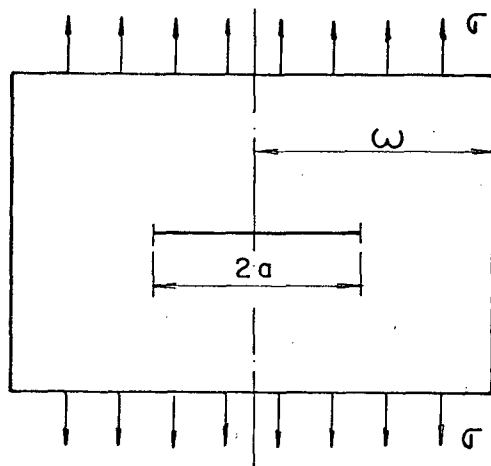
2 - Placa semi-infinita com trinca na borda sob tração.



$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{\pi a}$$

$$Y = 1.1215 \text{ constante}$$

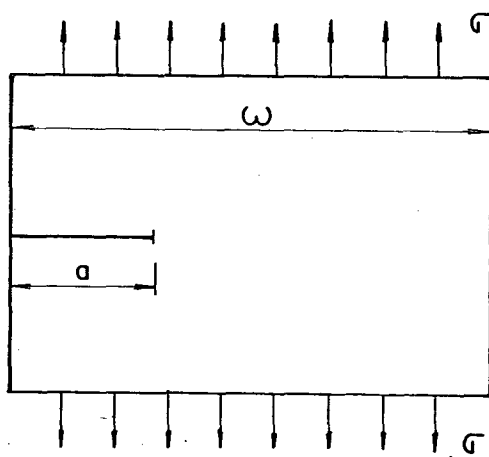
3 - Placa infinita com trinca central sob tração



$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{\pi a}$$

$$Y = \left| \sec \left(\frac{\pi \alpha}{2} \right) \right|^{1/2} \quad \text{onde } \alpha = a/w$$

4 - Placa finita com trinca na borda sob tração

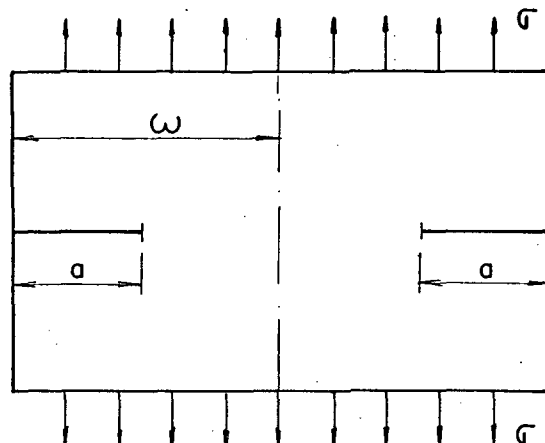


$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \quad \text{para } a/w \text{ pequeno}$$

$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{\pi a} \quad \text{onde}$$

$$Y = 1.99 - 0.41 \left(\frac{a}{w} \right) + 18.7 \left(\frac{a}{w} \right)^2 - 38.48 \left(\frac{a}{w} \right)^3 + 53.85 \left(\frac{a}{w} \right)^4$$

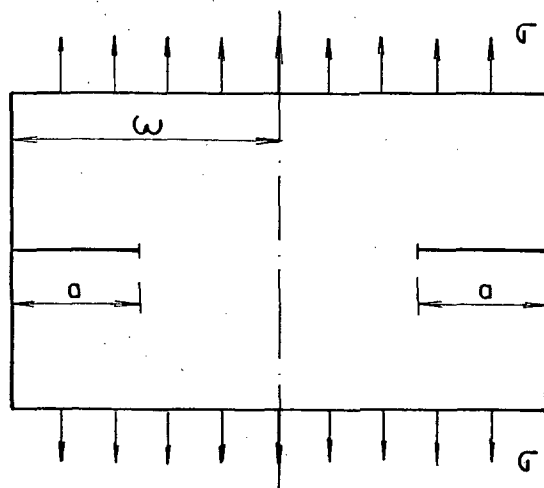
5 - Placa finita com trincas nas bordas sob tração I



$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{\pi a} \quad \text{onde}$$

$$Y = \left[\frac{2}{\pi \alpha} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \alpha}{2} \right) \right]^{1/2} \quad \text{onde} \quad \alpha = \frac{a}{w}$$

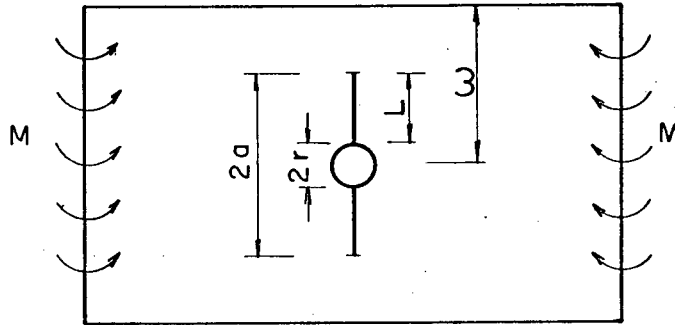
6 - Placa finita com trincas na borda sob tração II



$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{\pi a}$$

$$K = 1.99 + 0.38 \left(\frac{a}{w} \right) - 2.12 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 3.42 \left(\frac{a}{w} \right)^3$$

7 - Placa finita com trinca central sob flexão

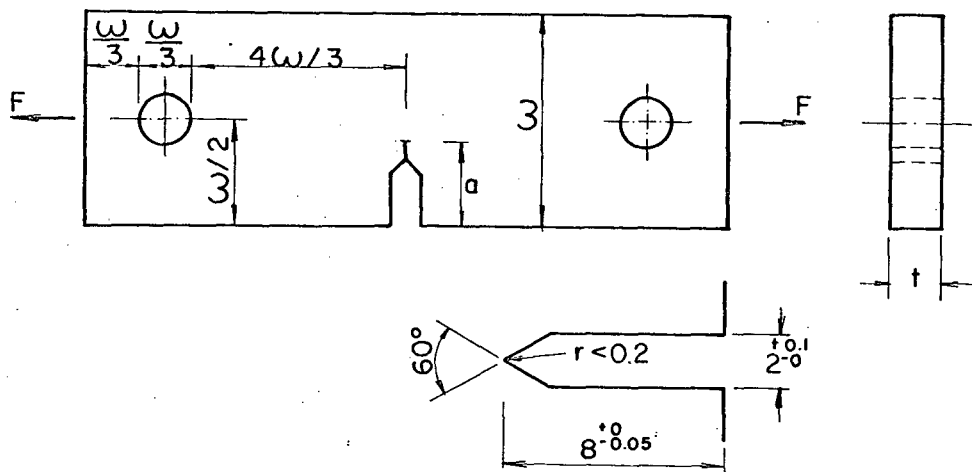


$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{\pi a}$$

$$Y = \left[1.369 \left(\frac{L}{r} \right)^{-0.119} \right] \left(\text{Sec } \frac{\pi \alpha}{2} \right)^{1/2} \quad \text{onde } \alpha = a/w$$

B2.2 - Corpos de Prova

1. Corpo de prova sob tração com trinca na borda.



$$K_I = F Y Y_P / t \sqrt{w}$$

em função de F .

$$\sigma = F / t \cdot w$$

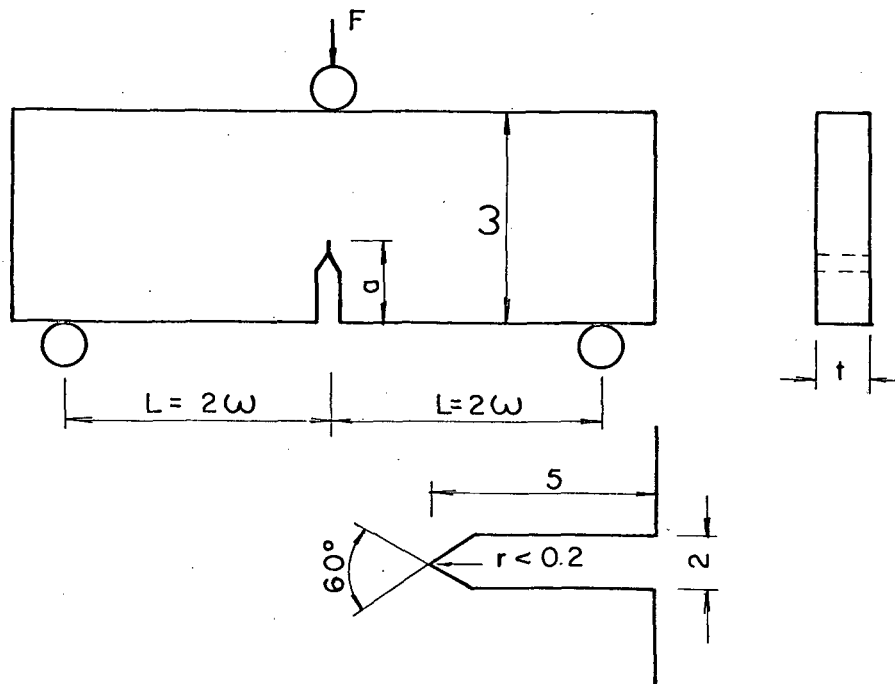
$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{w}$$

em função de σ .

onde:

$$Y = \left[1.99 \left(\frac{a}{w} \right)^{0.5} - 0.41 \left(\frac{a}{w} \right)^{1.5} + 18.70 \left(\frac{a}{w} \right)^{2.5} - 38.48 \left(\frac{a}{w} \right)^{3.5} + 53.85 \left(\frac{a}{w} \right)^{4.5} \right]$$

2. Corpo de prova com apoio em três pontos sob flexão, com trinca inicial.



$$2 < \frac{w}{t} < 8$$

$$K_I = F Y Y_P / t \sqrt{w}$$

em função de F.

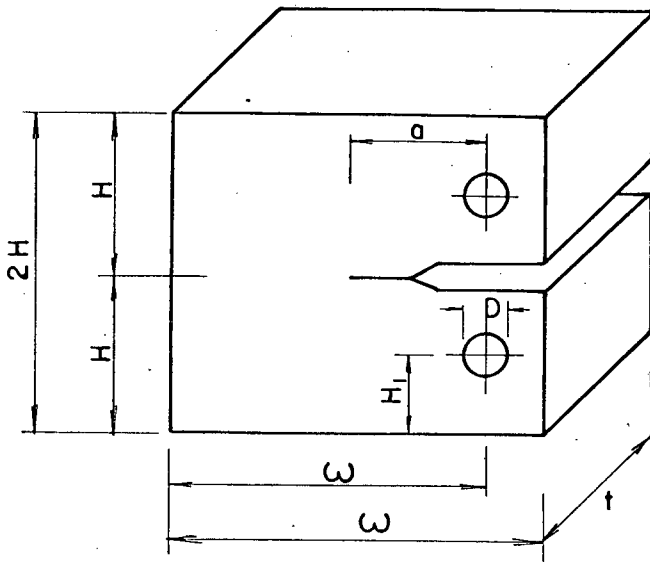
$$\sigma = 6F/tw$$

$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{w}$$

onde:

$$Y = \left[11.58 \left(\frac{a}{w}\right)^{1.5} - 18.42 \left(\frac{a}{w}\right)^{2.5} + 87.18 \left(\frac{a}{w}\right)^{3.5} - 150.66 \left(\frac{a}{w}\right)^{4.5} + 154.30 \left(\frac{a}{w}\right)^{5.5} \right]$$

3 - Corpo de prova compacto sob tração com trinca inicial.



Tipos		
1T-CT	t=1"	w=2t
2T-CT	t=2"	X=t
3T-CT	t=3"	H=1.2t
4T-CT	t=4"	D=0.5t
6T-CT	t=6"	Wl=2.5t
8T-CT	t=8"	Hl=0.65t
10T-CT	t=10"	$a = \frac{w}{2} = t$

$$K_I = F Y Y_P / t \sqrt{w}$$

em função de F.

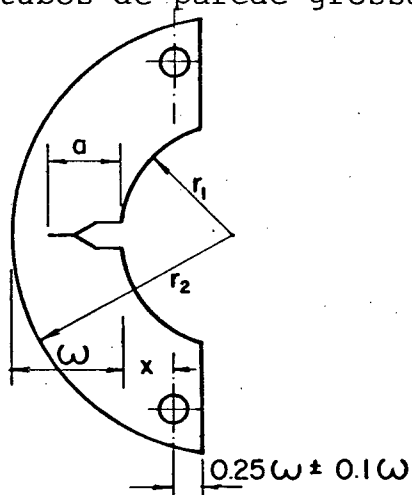
$$\sigma = F/tw$$

$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{w}$$

em função de σ

onde:

$$Y = \left[29.6 \left(\frac{a}{w}\right)^{0.5} - 185.5 \left(\frac{a}{w}\right)^{1.5} + 655.7 \left(\frac{a}{w}\right)^{2.5} - 1017 \left(\frac{a}{w}\right)^{3.5} + 638.9 \left(\frac{a}{w}\right)^{4.5} \right]$$

4 - Corpo de prova em forma de arco sob tração com trinca inicial
(Para tubos de parede grossa)

$$X = \begin{cases} 0.0 \\ 0.5w \pm 0.005w \end{cases}$$

$$B = 0.5w \pm 0.01w$$

$$K_I = F Y/B w^{0.5}$$

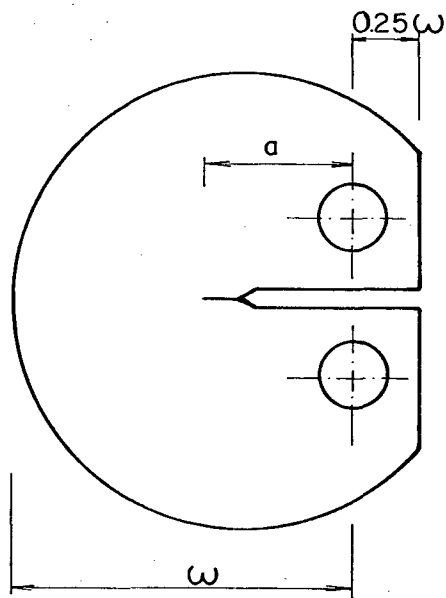
onde:

$$Y = \left[3X/w + 1.9 + 1.1 a/w \right] \left[1 + 0.25 (1+a/w)^2 (1-r_1/r_2) \right] f(a/w)$$

e:

$$f(a/w) = \left[\left(\frac{a}{w} \right)^{0.5} / \left(1 - \frac{a}{w} \right)^{1.5} \right] \left[3.74 - 6.30 \left(\frac{a}{w} \right) + 6.32 \left(\frac{a}{w} \right)^2 - 2.43 \left(\frac{a}{w} \right)^3 \right]$$

5 - Corpo de prova em forma de disco sob tração, com trinca inicial.



$$B = w/2$$

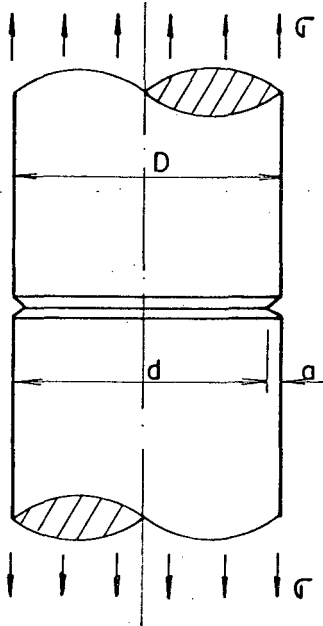
$$D = 1.35 w$$

$$K_I = (F/Bw^{1/2}) f(a/w)$$

$$f(a/w) = \frac{(2+a/w) (0.76 + 4.8a/w - 11.58(a/w)^2 + 11.43(a/w)^3 - 4.08(a/w)^4)}{(1 - a/w)^{1.5}}$$

B.2.3 - Eixos

1. Eixo com trinca circunferencial sob tração.

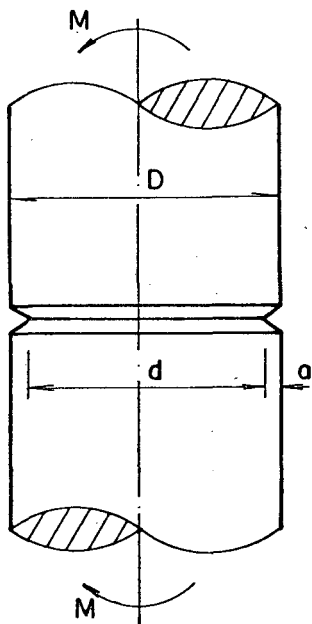


$$a = \frac{D-d}{2}$$

$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{\pi a}$$

$$Y = 3 + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{D-2a} \right)^{1/2}$$

2. Eixo com trinca circunferencial sob flexão.



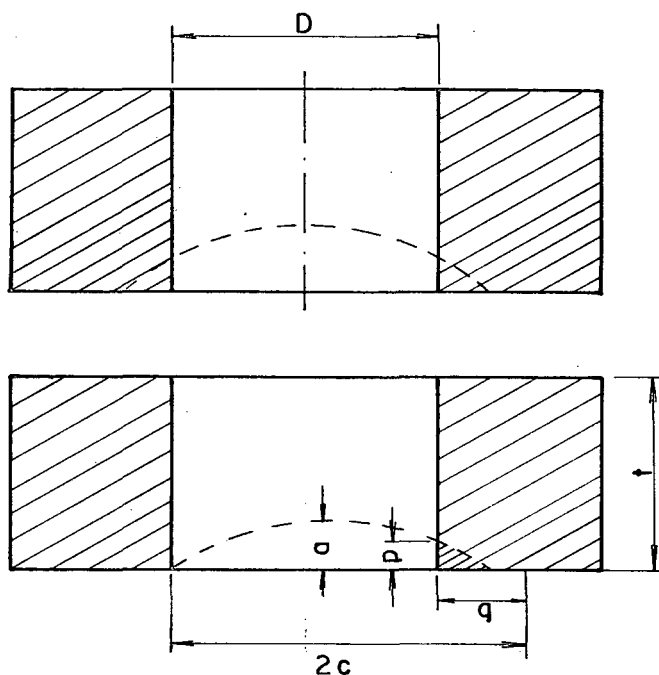
$$a = \frac{D-d}{2}$$

$$K_I = \sigma Y Y_P \sqrt{\pi a}$$

$$Y = \{ 1,5 [D/(D-2a) + 1] / [D/(D-2a)] + [D/(D-2a)]^3 \} / 4$$

B2.4 - Outras

1. Elemento com trincas nos cantos dos furos, considerando o furo como parte da trinca.



$$K_I = \frac{1.21 \sigma \sqrt{\pi p}}{\phi} \left[\frac{p^2 (D+q)^2 (D-q)^2 (D-q)^{-1} + 4p^2 (D+q)^2}{4 Dq [4p^2 + (D-q)^2]} \right]$$

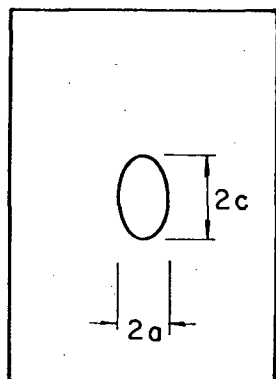
onde:

$$a/2c = p/2\sqrt{Dq}$$



2. Elementos com trincas na superfície sob tração.

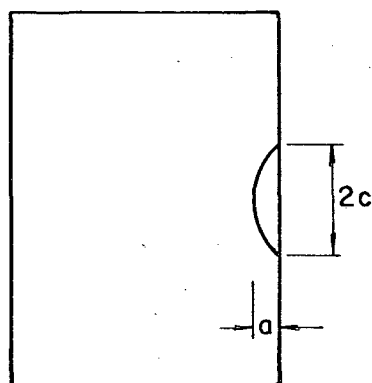
2a. Trinca elíptica no centro.



$$K_I = \sigma Y Y_p \sqrt{\pi a}$$

onde: $Y = \frac{1}{\phi} f(\beta)$

2b. Trinca semielíptica na borda.

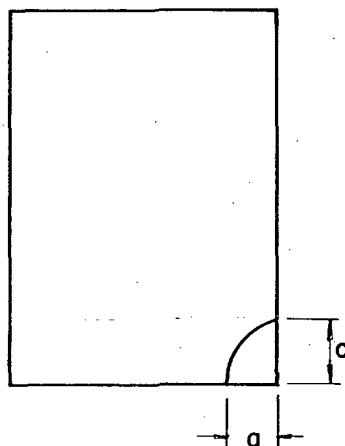


$$K_I = \sigma Y Y_p \sqrt{\pi a}$$

onde:

$$Y = 1.12 \frac{f(\beta)}{\phi}$$

2c. Trinca em forma de um quarto de elipse na esquina

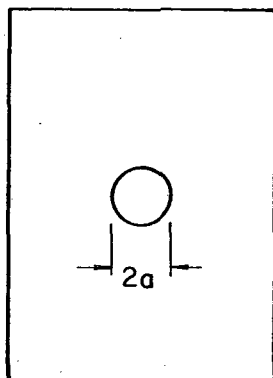


$$K_I = \sigma Y Y_p \sqrt{\pi a}$$

onde:

$$Y = (1.12)^2 \frac{f(\beta)}{\beta}$$

2d. Trinca circular no centro.



$$K_I = \sigma Y Y_p \sqrt{\pi a}$$

Onde:

$$Y = \frac{2}{\pi}$$

Nota: Para todos os casos.

\varnothing = Integral elíptica do 2º tipo.

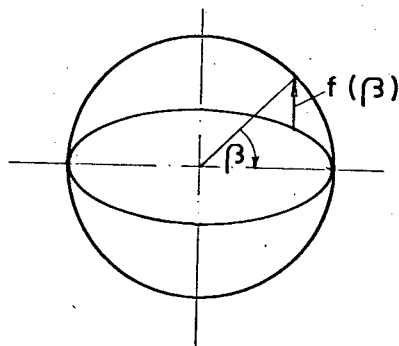
a/c	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
\varnothing	1.00	1.016	1.05	1.10	1.15	1.21	1.28	1.35	1.42	1.49	1.57

$$f(\beta) = \left[\text{sen}^2 \beta + (a/c)^2 \cos^2 \beta \right]^{0.25}$$

$$\beta = 0^\circ \quad Y_0 = \frac{1}{0} (a/c)^{0.5}$$

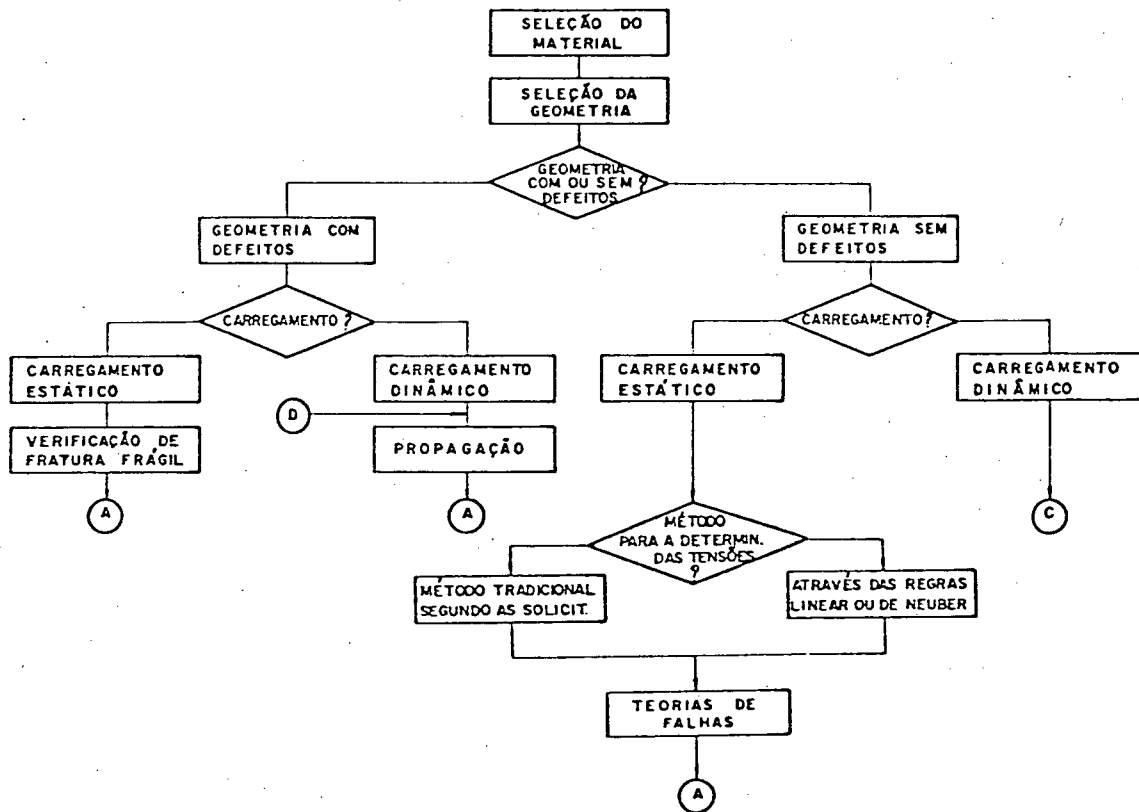
$$\beta = 90^\circ \quad Y_{90} = \frac{1}{\varnothing} \quad (> Y_0)$$

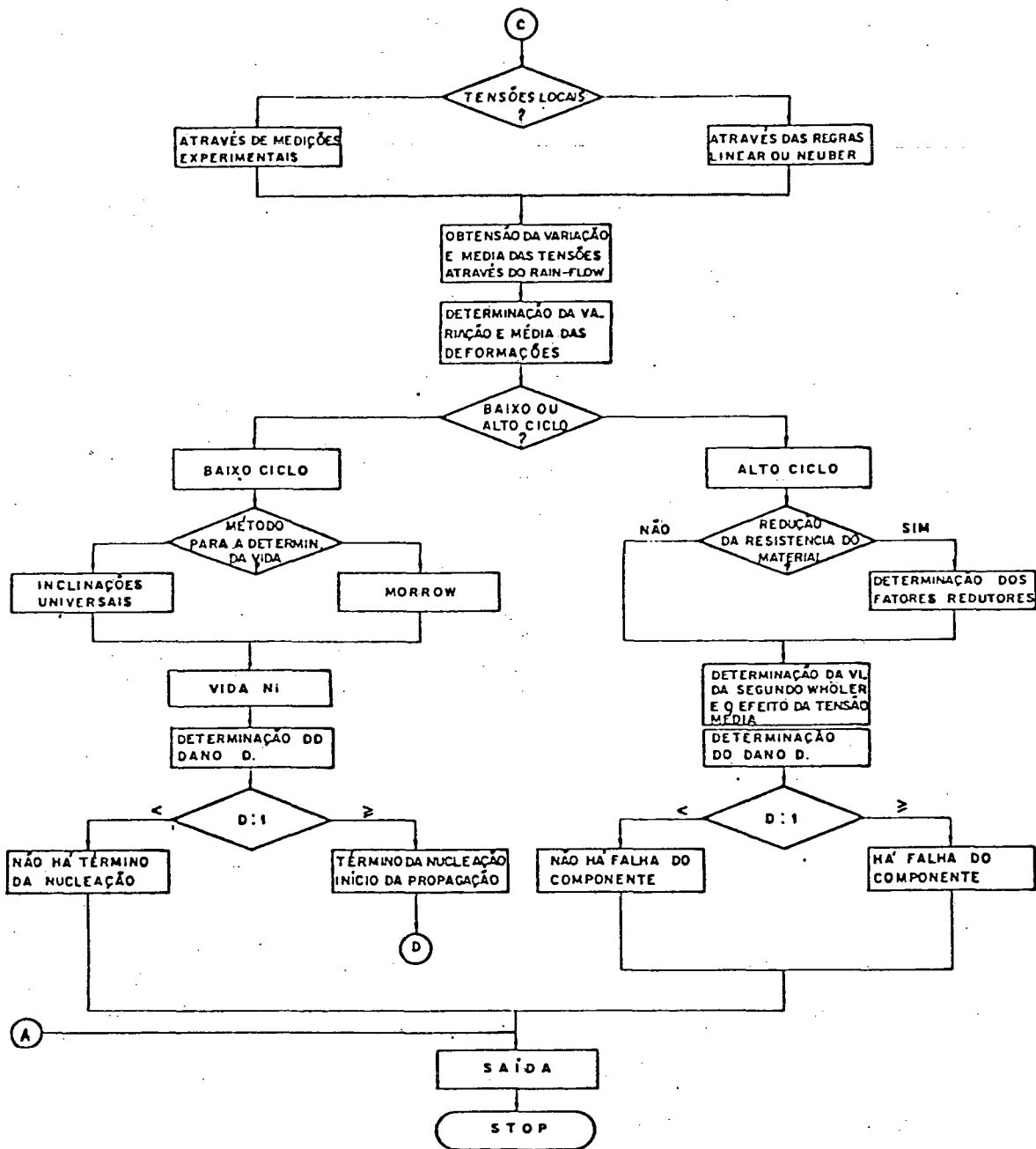
O angulo β é definido pelo circulo auxiliar.



APÊNDICE C**FLUXOGRAMA GERAL**

FLUXOGRAMA GERAL





APÉNDICE D**ALGORITMOS**

APÊNDICE D

- D1. Algoritmos para determinação das tensões e deformações locais.
- D2. Algoritmos para determinação da variação e média das deformações.
- D3. Algoritmos para a determinação da vida de nucleação em baixo ciclo.

D1. Algoritmos para a Determinação das Tensões e Deformações

D1.1 - Regra linear, encruamento linear RLEL.

Se a tensão nominal é maior do que a de escoamento, Fig.

D1.1, tem-se para a tensão e deformação local o seguinte:

$$\epsilon = K_t e \quad (D1.1)$$

$$\sigma = S + H(\epsilon - e) \quad (D1.2)$$

onde:

$$e = (\sigma_E / E) + (S - \sigma_E) / H \quad (D1.3)$$

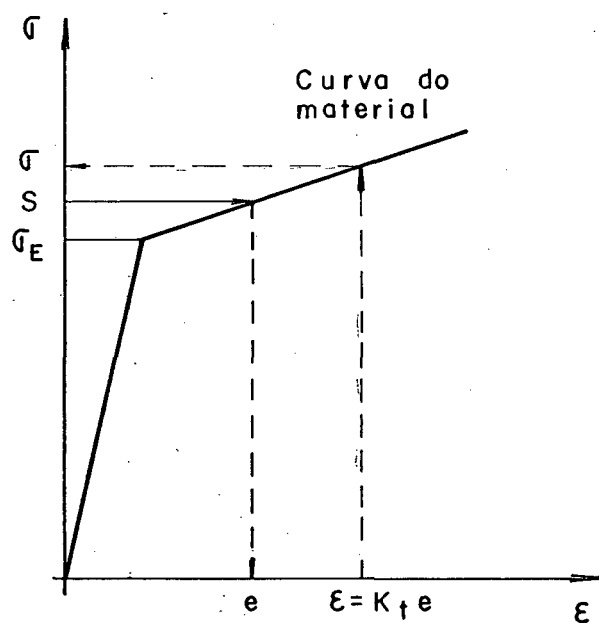


Fig.D1.1 - Representação da RLEL, se $S > \sigma_E$.

Se a tensão nominal $\tilde{\epsilon}$ é menor ou igual à de escoamento,
tem-se:

$$\epsilon = K_t e \quad (D1.4)$$

e

$$e = S/E \quad (D1.5)$$

Se a deformação local $\tilde{\epsilon}$ é maior do que a de escoamento,
a tensão local, Fig.D1.2, é:

$$\sigma = \sigma_E + H(\epsilon - \epsilon_E) \quad (D1.6)$$

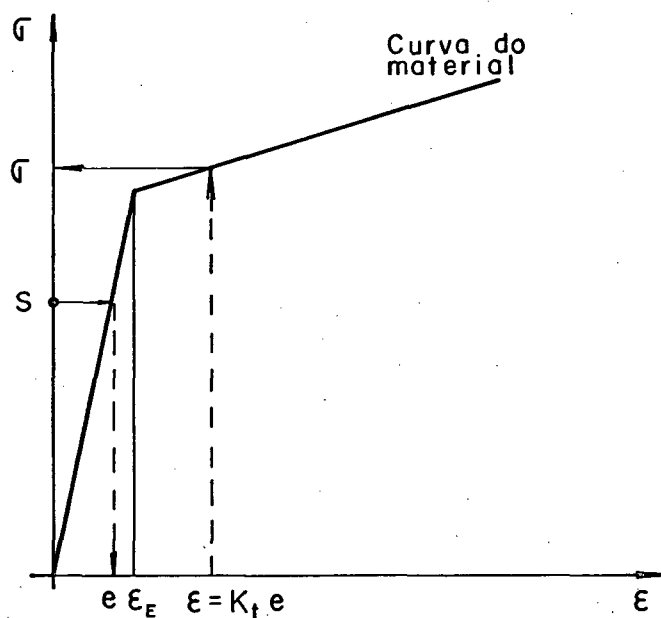


Fig.D1.2 - Representação da RLEL, se $\tilde{\epsilon} > \epsilon_E$

Se a deformação local é menor do que a de escoamento,
ou igual, Fig. D1.3, então:

$$\sigma = \epsilon E \quad (D1.7)$$

onde

$$e = S/E \quad (D1.8)$$

$$\epsilon_E = \sigma_E/E \quad (D1.9)$$

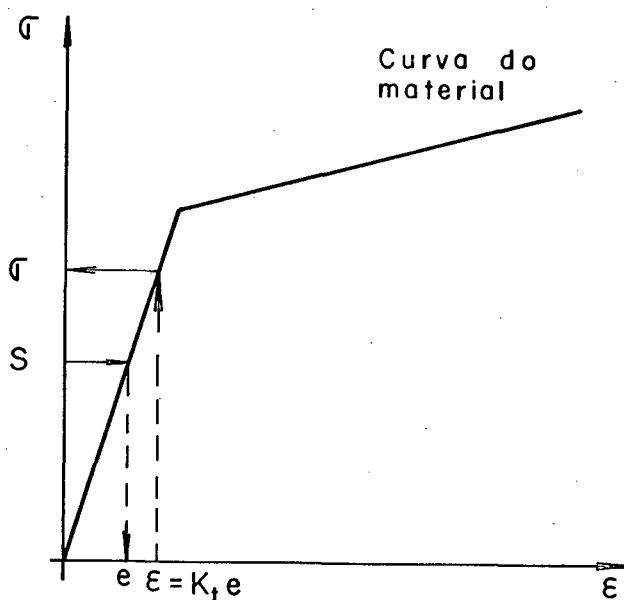


Fig.D1.3 - Representação da RLEL, se $\epsilon \leq \epsilon_E$

D1.2 - Regra linear, encruamento potencial. RLEP.

Conforme os dados iniciais, calculam-se as deformações nominal e local do seguinte modo:

$$e = S/E + (S/K')^{1/n'} \quad (D1.10)$$

$$\epsilon = K_t e \quad (D1.11)$$

Para determinar a tensão local, faz-se a combinação de deformação local, obtendo-se:

$$K_t e = \sigma/E + (\sigma/K')^{1/n'} \quad (D 1.12)$$

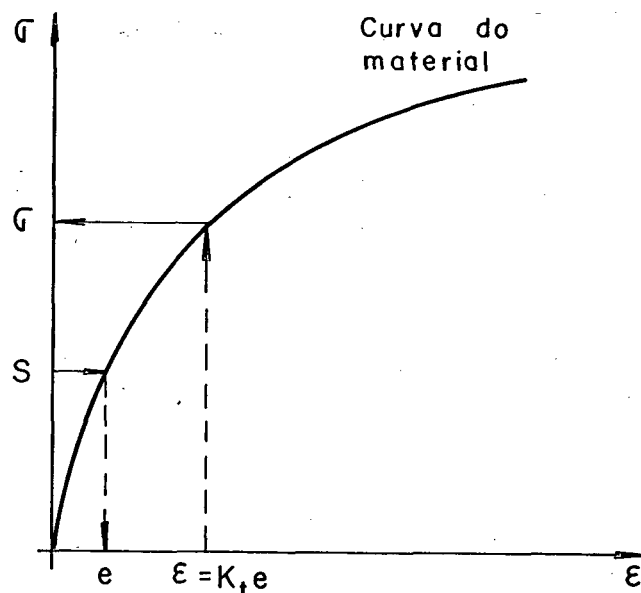


Fig.D1.4 - Representação da RLEP.

Para obter o valor da tensão local, tem-se que aplicar um método iterativo de aproximações sucessivas. Neste caso, é usado o método de Newton-Raphson.

D1.3 - Regra de Neuber, encruamento linear. RNEL.

Se a tensão nominal é maior do que a tensão de escoamento, tem-se o seguinte esquema.

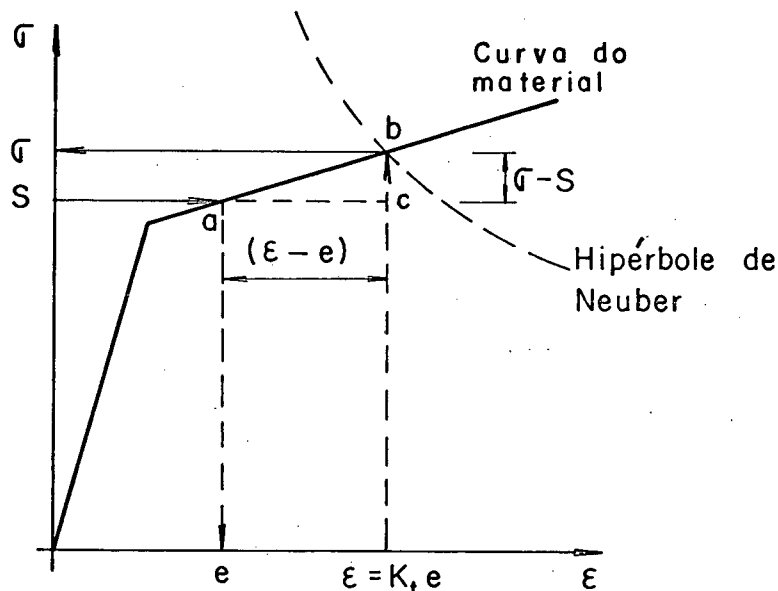


Fig. D1.5 - Representação da RNEL, se $S > \sigma_E$

Considerando o triângulo abc, tem-se:

$$\varepsilon = e + (\sigma - S)/H \quad (D1.13)$$

$$e = \sigma_E/E + (S - \sigma_E)/H \quad (D1.14)$$

E, conforme a regra de Neuber, tem-se:

$$\sigma \varepsilon = K_t^2 S e \quad (D1.15)$$

Combinando as duas equações anteriores, obtém-se:

$$\sigma^2 + (He - S)\sigma - K_t^2 S e H = 0 \quad (D1.16)$$

Resolvendo a equação (D1.16), tem-se para a tensão local:

$$\sigma = -\frac{1}{2}(He - S) + \left[\frac{1}{4}(He - S)^2 + K_t^2 S e H \right]^{1/2} \quad (D1.17)$$

E para a deformação local:

$$\varepsilon = \sigma_E/E + (\sigma - \sigma_E)/H \quad (D1.18)$$

Se a tensão local é menor do que a de escoamento, a tensão e deformação locais são determinadas por:

$$\sigma = K_t \cdot S \quad (D1.19)$$

$$\varepsilon = \sigma/E \quad (D1.20)$$

Se o valor da tensão local for maior do que o de escoamento, então tem-se o seguinte:

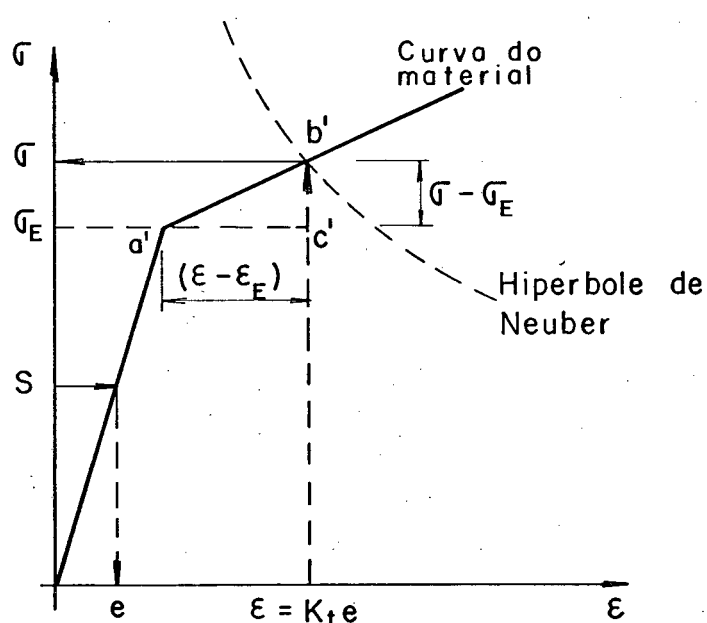


Fig.D1.6 - Representação da RNEL, se $\sigma > \sigma_E$

Considerando o triângulo a'b'c', a deformação local $\bar{\epsilon}$:

$$\epsilon = \sigma_E/E + (\sigma - \sigma_E)/H \quad (D1.21)$$

Com a equação D1.21, e a equação (D1.15), obtém-se:

$$\sigma^2 + (H \epsilon_E - \sigma_E) \quad (D1.22)$$

Desenvolvendo para a tensão local, tem-se:

$$\sigma = -\frac{1}{2} \frac{\sigma_E}{E} (H-E) + \frac{1}{2} \left\{ \left| \frac{\sigma_E}{E} (H-E) \right|^2 + 4K_t^2 \text{SeH} \right\}^{1/2} \quad (D1.23)$$

e, para a deformação local:

$$\epsilon = \sigma_E/E + (\sigma - \sigma_E)/H \quad (D1.24)$$

D1.4 - Regra de Neuber, encruamento potencial. RNEP.

Conhecida a tensão nominal, calcula-se a deformação nominal através da equação do material segundo:

$$e = S/E + (S/K')^{1/n'} \quad (D1.25)$$

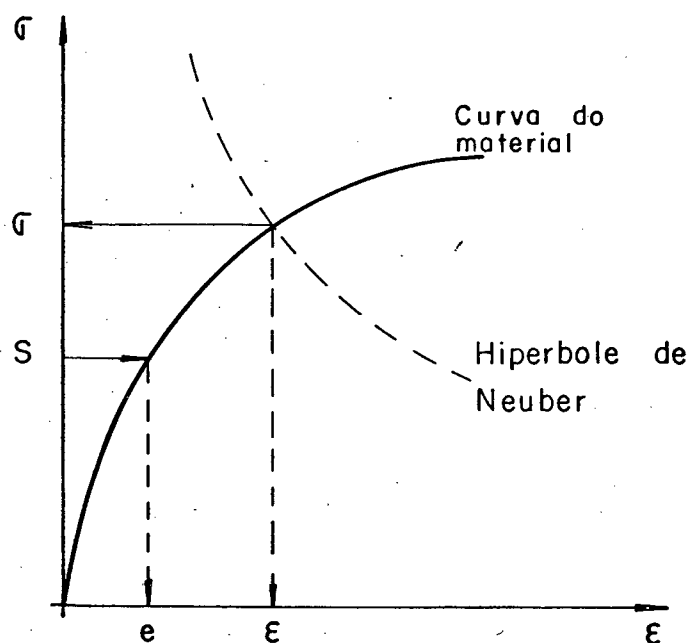


Fig.D1.7 - Representação da RNEP.

Considerando a equação da Regra de Neuber e a do material, obtem-se:

$$K_t^2 S_e/\sigma = \sigma/E + (\sigma/K')^{1/n'} \quad (D1.26)$$

Para obter o valor da tensão local, deve-se aplicar um método iterativo de aproximações sucessivas, como o método de Newton-Raphson. Na obtenção da deformação local aplica-se a seguinte equação:

$$\epsilon = \sigma/E + (\sigma/K')^{1/n'} \quad (D1.27)$$

Os valores das tensões locais são obtidas para cada valor da tensão nominal, mas, no caso de carregamentos cíclicos, devem-se conhecer as variações de tensões locais e a tensão média para cada ciclo ou bloco de carregamento. Para isto, aplica-se o método Rain-flow de contagem de ciclos.

Para aplicações estáticas, podem-se utilizar os mesmos algoritmos, mudando sô as constantes cíclicas do material pelas estáticas.

D2. Algoritmos para a Determinação da Variação e Média das Deformações

Segundo a equação do material que se utiliza, tem-se dois casos; encruamento linear ou encruamento potencial.

D2.1- Encruamento linear.

Se $\Delta\sigma$ é maior do que a tensão de escoamento, tem-se:

$$\Delta\epsilon = 2\sigma_E/E + (\Delta\sigma - 2\sigma_E)/H \quad (D2.1)$$

$$\epsilon_m = \sigma_E/E + (\sigma_m - \sigma_E)/H \quad (D2.2)$$

Do contrário:

$$\Delta\epsilon = \Delta\sigma/E \quad (D2.3)$$

$$\epsilon_m = \sigma_m/E \quad (D2.4)$$

D2.2- Encruamento potencial.

Tem-se o seguinte:

$$\Delta\epsilon = \Delta\sigma/E + 2(\Delta\sigma/2K')^{1/n'} \quad (D2.5)$$

$$\epsilon_m = \sigma_m/E + (\sigma_m/K')^{1/n'} \quad (D2.6)$$

D3. Algoritmos para a Determinação da Vida de Nucleação em Baixo Ciclo

D3.1 - Método de Morrow.

O método de Morrow é representado pela equação (D3.1), da amplitude de deformação versus o número de reversões do carregamento, ou seja:

$$(\Delta\varepsilon/2) = |(\sigma_f' - \sigma_m)/E| (2N)^b + (\varepsilon_f' - \varepsilon_m) (2N)^c \quad (D3.1)$$

Se a tensão média é menor que σ_f' e a deformação média é menor do que ε_f' , determina-se o número de reversões de transição, ou seja, onde a amplitude das deformações elásticas e plásticas são iguais, através da equação (D3.2).

$$(2N)_{tr} = |(\varepsilon_f' - \varepsilon_m)E/(\sigma_f' - \sigma_m)|^{\frac{1}{b-c}} \quad (D3.2)$$

Então a amplitude da deformação na transição fica como:

$$(\Delta\varepsilon/2)_{tr} = |(\sigma_f' - \sigma_m)/E| (2N_{tr})^b + (\varepsilon_f' - \varepsilon_m) (2N_{tr})^c \quad (D3.3)$$

Se a amplitude da deformação é igual à amplitude da deformação na transição, então:

$$2N = 2N_{tr} \quad (D3.4)$$

Mas, se a amplitude da deformação é maior do que a amplitude de transição, então determina-se um número de reversões aproximado, considerando a parte plástica, ou seja:

$$2N = \left[\Delta\epsilon/2 (\epsilon_f' - \epsilon_m) \right]^{1/c} \quad (D3.5)$$

Caso contrário, determina-se o número de reversões aproximado através da parte elástica, ou seja:

$$2N = \left| \Delta\epsilon E/2 (\sigma_f' - \sigma_m) \right|^{1/b} \quad (D3.6)$$

Para obter um valor mais exato do número de reversões, aplica-se a equação da amplitude de deformações total versus as reversões. A solução é feita através do uso de um método de aproximações sucessivas.

D3.2 - Método das inclinações universais

Este método relaciona a variação de deformações versus a vida, segundo:

$$\Delta\epsilon = \left| 3.5 (\sigma_R - \sigma_m)/E \right| N^{-0.12} + (\epsilon_f' - \epsilon_m)^{0.6} N^{-0.6} \quad (D3.7)$$

Se a tensão média é menor do que σ_R e a deformação média é menor que ϵ_f , a vida de transição, onde as amplitudes das deformações elásticas e plásticas são iguais, é determinada por:

$$N_{tr} = \left| E (\epsilon_f' - \epsilon_m)^{0.6} / 3.5 (\sigma_R - \sigma_m) \right|^{1/0.48} \quad (D3.8)$$

com isso, a variação de deformação na transição é:

$$(\Delta\epsilon)_{tr} = \left| 3.5 (\sigma_R - \sigma_m)/E \right| N_{tr}^{-0.12} + (\epsilon_f' - \epsilon_m)^{0.6} N_{tr}^{-0.6} \quad (D3.9)$$

Se a variação da deformação é igual à variação de deformação na transição, tem-se:

$$N = N_{tr} \quad (D3.10)$$

Se a variação da deformação é maior do que a de transição, então a vida determina-se, numa primeira aproximação, considerando a reta da variação de deformação plástica, ou seja:

$$N = \left| \Delta \epsilon / (\epsilon_f - \epsilon_m)^{0.6} \right|^{-\frac{1}{0.6}} \quad (D3.11)$$

Em caso contrário, considera-se a reta da variação de deformação elástica, ou seja:

$$N = \left| \Delta \epsilon E / 3.5 (\sigma_R - \sigma_m) \right|^{-\frac{1}{0.12}} \quad (D3.12)$$

Para obter um valor mais exato da vida, aplica-se a equação da variação de deformação total versus a vida. A solução é feita com a aplicação de um método iterativo de aproximações sucessivas.

APENDICE E**RESULTADOS DAS PROVAS FEITAS**
NAS PRINCIPAIS ROTINAS DO SISTEMA

APÊNDICE E

- E1. Obtenção das tensões e deformações locais.
- E2. Determinação da vida em baixo ciclo.
- E3. Determinação da vida e o efeito das tensões médias em alto ciclo.
- E4. Determinação da vida na propagação sob carregamento cíclico.

No presente apêndice são apresentados os resultados obtidos com as diferentes rotinas e fazendo sua comparação com os obtidos utilizando gráficos e equações características para cada caso.

El. Obtenção das tensões e deformações locais

A obtenção das tensões e deformações locais foram obtidas através das regras linear ou de Neuber, conforme os algoritmos desenvolvidos no parágrafo D1. do Apêndice D.

El.1. Dados

El.1.1. Material

Foi escolhido o aço ao carbono SAE 1005-1009, laminado a quente, que tem as seguintes propriedades (do apêndice A):

$$\begin{aligned} \text{BHN} &= 98 \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \\ \sigma_R &= 345 \text{ [MPa]} \\ \sigma_E/\sigma'_E &= 262/228 \text{ [MPa/MPa]} \\ k/k' &= 531/462 \text{ [MPa/MPa]} \\ n/n' &= 0,16/0,12 \\ \epsilon_f/\epsilon'_f &= 1,6/0,10 \\ \sigma_f/\sigma'_f &= 848/641 \text{ [MPa/MPa]} \\ b &= -0,109 \\ c &= -0,39 \\ E &= 2.00 \times 10^5 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

Sendo considerado encruamento linear e encruamento potencial para o material, nas figuras E1, E2, E3 e E4 mostram-se os gráficos para cada caso com suas equações características.

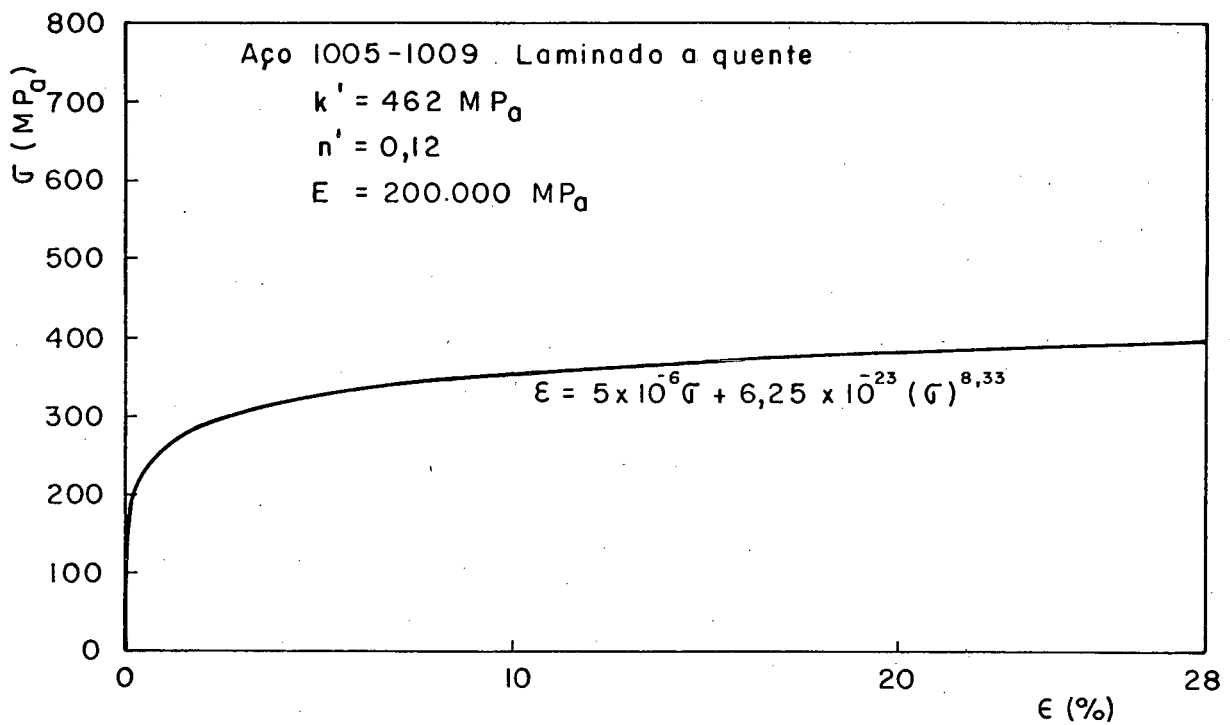


FIG.E1. Gráfico tensão-deformação, cíclico, com encruamento potencial. Aço 1005-1009 laminado a quente.

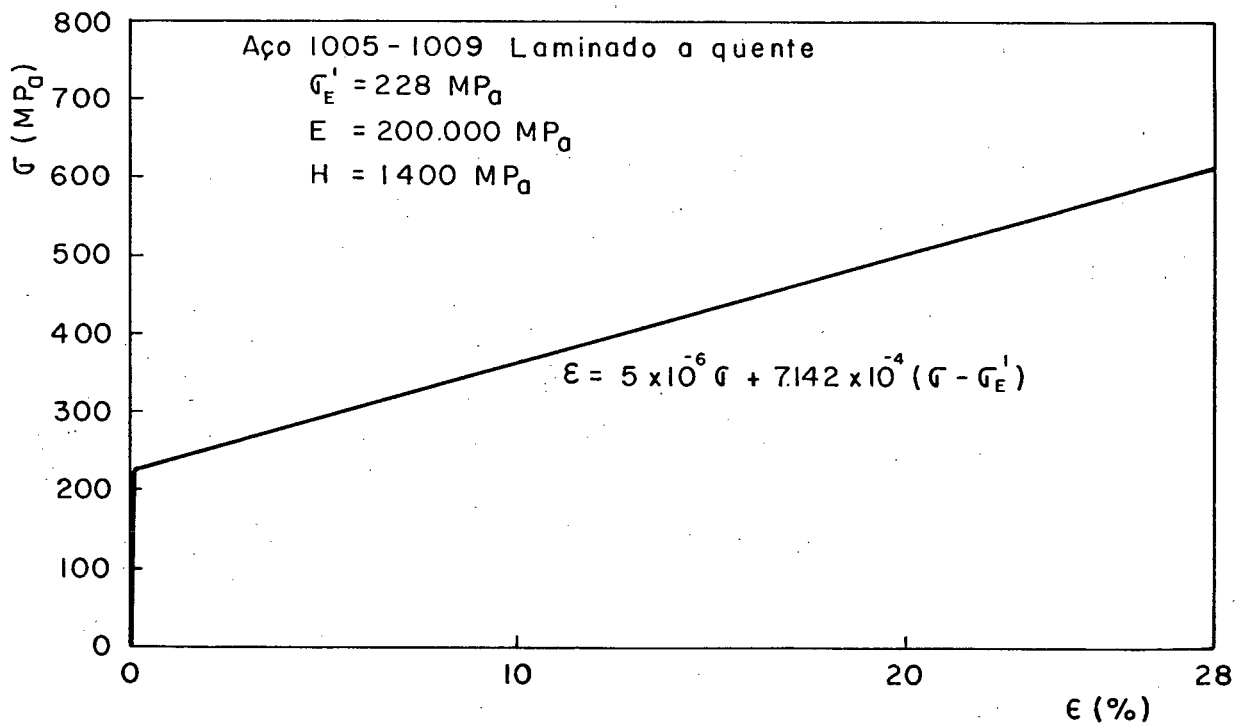


FIG.E2. Gráfico tensão-deformação, cíclico com encruamento linear. Aço 1005-1009 laminado a quente.

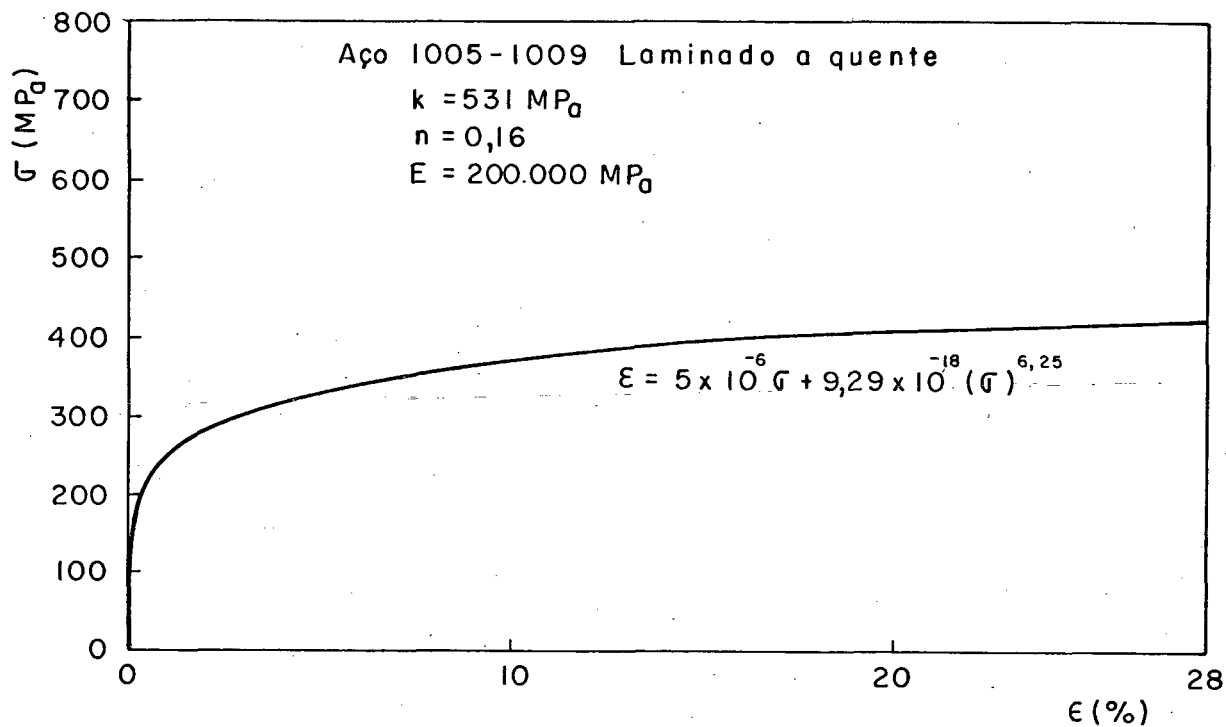


FIG.E3. Gráfico tensão-deformação estático, com encruamento potencial. Aço ao carbono 1005-1009 laminado a quente.

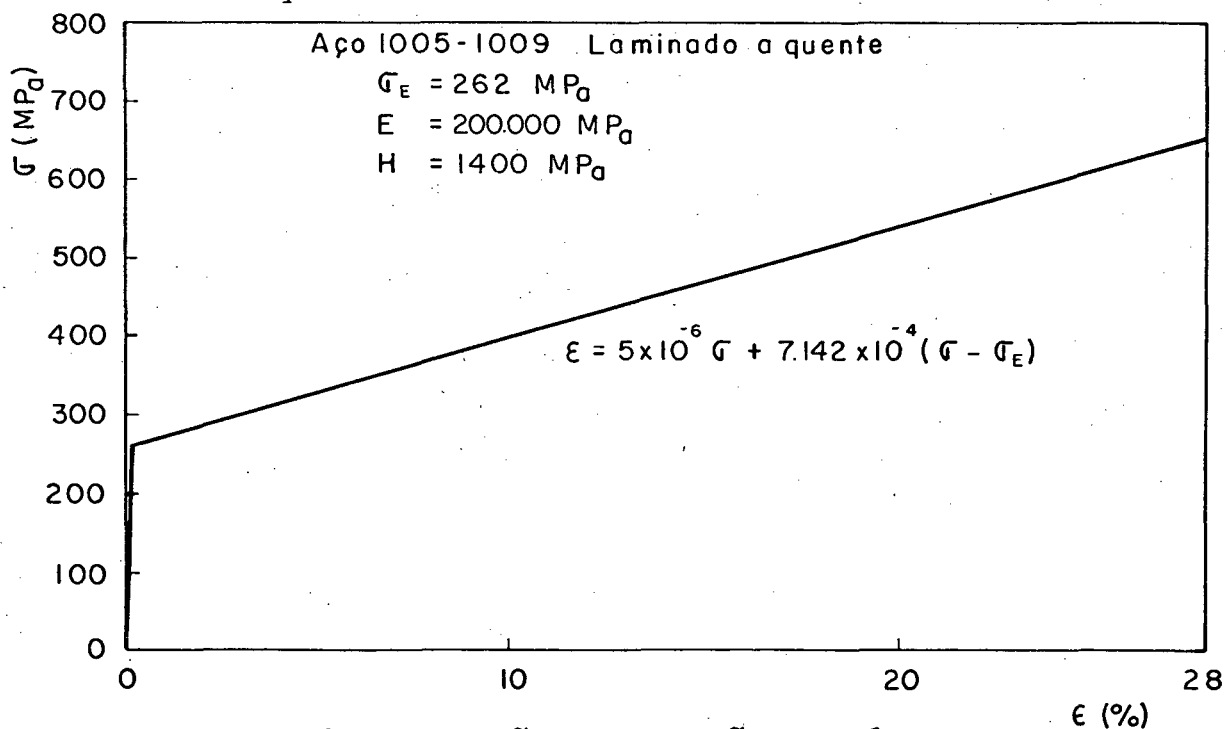


FIG.E4. Gráfico tensão-deformação, estático, com encruamento linear. Aço ao carbono 1005-1009 laminado a quente.

El.1.2. Geometria

Não foi escolhida uma geometria em particular, considerando para todos casos um fator de concentração de tensões:

$$K_t = 1,5$$

El.1.3. Tensões Nominais

Foram consideradas num conjunto de dez tensões nominais, as quais se encontram nas tabelas E1, E2, E3 e E4.

El.2. Resultados

Os resultados obtidos por cada rotina e sua comparação com os obtidos através de gráficos e equações características são mostrados nas tabelas E1, E2, E3 e E4. Ademais, é dada a porcentagem de variação comparando as duas formas de cálculo, obtendo-se uma boa aproximação. No caso estático o comportamento das rotinas é similar, trocando as constantes cíclicas do material pelas estáticas.

TABELA E1

REGRA LINEAR ENCRUAMENTO LINEAR. RLEL

	CÁLCULO MANUAL		CÁLCULO DO SISTEMA			% VARIAÇÃO	
	s [MPa]	σ [MPa]	ϵ	σ_s [MPa]	ϵ_s	$(\frac{\sigma_s}{\sigma} - 1)100$	$(\frac{\epsilon_s}{\epsilon} - 1)100$
01	100	150	7.50×10^{-4}	150	7.50×10^{-4}	0.00	0.00
02	175	228.3	1.31×10^{-3}	228	1.31×10^{-4}	-0.13	0.00
03	200	228.5	1.50×10^{-3}	228	1.50×10^{-3}	-0.22	0.00
04	225	228.7	1.68×10^{-3}	228	1.68×10^{-3}	-0.31	0.000
05	250	261.8	2.52×10^{-2}	261	2.53×10^{-4}	-0.31	+0.39
06	275	300	5.25×10^{-2}	299	5.21×10^{-2}	-0.33	-0.76
07	300	335	7.85×10^{-2}	336	7.88×10^{-2}	+0.39	+0.38
08	325	373	1.06×10^{-1}	374	1.06×10^{-1}	-0.27	0.00
09	350	411	1.32×10^{-1}	411	1.32×10^{-1}	0.00	0.00
10	375	449	1.59×10^{-1}	449	1.59×10^{-1}	0.00	0.00

TABELA E2

REGRA LINEAR ENCRUAMENTO POTENCIAL. RLEP

	CÁLCULO MANUAL		CÁLCULO DO SISTEMA		% VARIACÃO		
	S [MPa]	σ [MPa]	ϵ	σ_s [MPa]	ϵ_s	$(\frac{\sigma_s}{\sigma} - 1)100$	$(\frac{\epsilon_s}{\epsilon} - 1)100$
01	100	142	7.54×10^{-4}	141	7.54×10^{-3}	-0.70	0.00
02	175	196	1.77×10^{-3}	197	1.77×10^{-3}	+0.51	0.00
03	200	217	2.90×10^{-3}	216	2.89×10^{-3}	-0.46	-0.34
04	225	241	5.43×10^{-3}	243	5.42×10^{-3}	+0.82	-0.18
05	250	264	1.08×10^{-2}	267	1.09×10^{-2}	+1.13	+0.92
06	275	291	2.19×10^{-2}	292	2.19×10^{-2}	+0.34	0.00
07	300	316	4.33×10^{-2}	318	4.33×10^{-2}	+0.63	0.00
08	325	345	8.25×10^{-2}	345	8.24×10^{-2}	0.00	-0.12
09	350	370	1.51×10^{-1}	371	1.50×10^{-1}	+0.27	-0.66
10	375	395	2.66×10^{-1}	397	2.66×10^{-1}	90.50	0.00

TABELA E3

REGRA DE NEUBER ENCRUAMENTO LINEAR. RNEL

	CÁLCULO MANUAL		CÁLCULO DO SISTEMA			% VARIAÇÃO	
	S [MPa]	σ [MPa]	ϵ	σ_s [MPa]	ϵ_s	$\frac{\sigma_s}{\sigma} - 1$)100	$\frac{\epsilon_s}{\epsilon} - 1$)100
01	100	150	7.50×10^{-4}	150	7.50×10^{-4}	0.00	0.00
02	175	228.3	1.40×10^{-3}	228	1.50×10^{-3}	-0.13	+7.10
03	200	228.8	1.97×10^{-3}	229	1.96×10^{-3}	+0.08	-0.51
04	225	229	2.48×10^{-2}	229	2.47×10^{-3}	0.00	-0.40
05	250	274.7	3.50×10^{-2}	274	3.45×10^{-2}	-0.25	-1.43
06	275	320.3	6.69×10^{-2}	320	6.70×10^{-2}	-0.09	+0.15
07	300	363.2	9.77×10^{-2}	363	9.77×10^{-2}	-0.06	0.00
08	325	404.6	1.27×10^{-1}	404	1.27×10^{-1}	-0.15	0.00
09	350	445	1.56×10^{-1}	445	1.56×10^{-1}	0.00	0.00
10	375	484.9	1.84×10^{-1}	484	1.84×10^{-1}	-0.18	0.00

TABELA E4

REGRA DE NEUBER ENCRUAMENTO POTENCIAL. RNEP.

	S [MPa]	CÁLCULO MANUAL		CÁLCULO DO SISTEMA		% VARIAÇÃO	
		σ [MPa]	ϵ	σ_s [MPa]	ϵ_s	$\left(\frac{\sigma_s}{\sigma} - 1\right)100$	$\left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon} - 1\right)100$
01	100	150	8.35×10^{-4}	144	7.83×10^{-4}	-4.00	-6.23
02	175	206	2.27×10^{-3}	207	2.24×10^{-3}	+0.48	+0.48
03	200	225	3.62×10^{-3}	228	3.81×10^{-3}	+1.33	+5.54
04	225	248	6.85×10^{-3}	251	7.30×10^{-3}	+1.21	+6.57
05	250	275	1.46×10^{-2}	276	1.47×10^{-2}	+0.36	+0.68
06	275	302	3.05×10^{-2}	302	2.99×10^{-2}	0.00	-1.96
07	300	332	6.30×10^{-2}	328	5.93×10^{-2}	-1.20	-5.87
08	325	355	1.13×10^{-1}	355	1.13×10^{-1}	0.00	0.00
09	350	385	2.20×10^{-1}	382	2.07×10^{-1}	+1.23	+8.63
10	375	405	3.36×10^{-1}	410	3.65×10^{-1}	+1.23	+8.63

El.2.1. Exemplos de cálculo da tensão e deformação local segundo as regras linear e Neuber, utilizando gráficos e equações características.

El.2.1.1. Dados:

Material: Aço 1005-1009 laminado a quente.

$$\sigma'_E = 228 \text{ MP}_a$$

$$k' = 462 \text{ MP}_a$$

$$n' = 0,12$$

$$E = 2,00 \times 10^5 \text{ MP}_a$$

$$H = 1400 \text{ MP}_a$$

Fator de concentração de tensões

$$K_t = 1,5$$

Carregamento

Tensão nominal

$$S = 300 \text{ MP}_a$$

El.2.1.1.1. Regra Linear

Equação da regra linear:

$$K_e = K_t \quad (E1)$$

onde:

$$K_e = \epsilon/e \quad (E2)$$

- Encruamento linear

Se calcula a deformação nominal conforme a equação do material com encruamento linear:

como:

$$S > \sigma'_E \quad (E3)$$

tem-se:

$$e = 300 \times 5 \times 10^{-6} + 7,142 \times 10^{-4} (300 - 228)$$

$$e = 0,0523$$

com isto a deformação local fica como:

$$\epsilon = 1,5 \times 0,0523$$

$$\epsilon = 0,0785$$

usando o gráfico do material, Fig.E5, obtêm-se para a tensão local o seguinte valor:

$$\sigma = 335 \text{ MP}_a.$$

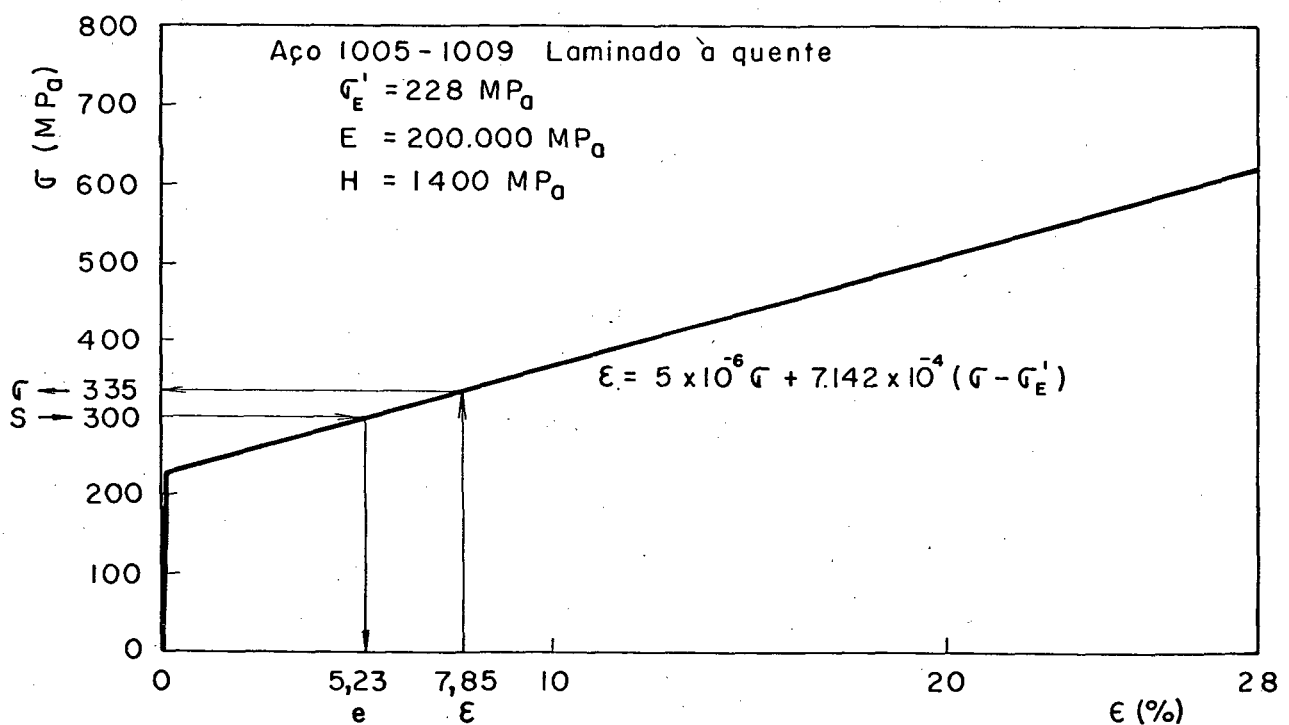


Fig.E5 - Gráfico do material com encruamento linear, mostrando a solução da RLEL.

- Encruamento potencial

Se calcula a deformação nominal conforme a equação do material com encruamento potencial ou seja:

$$e = 300 \times 5 \times 10^{-6} + 6,25 \times 10^{-23} (300)^{8,33}$$

$$e = 0,0289$$

com isto a deformação local fica como:

$$\epsilon = 1,5 \times 0,0289$$

$$\epsilon = 0,0433$$

usando o gráfico do material, Fig. E6, obtêm-se para a tensão local o seguinte valor.

$$\sigma = 320 \text{ MP}_a$$

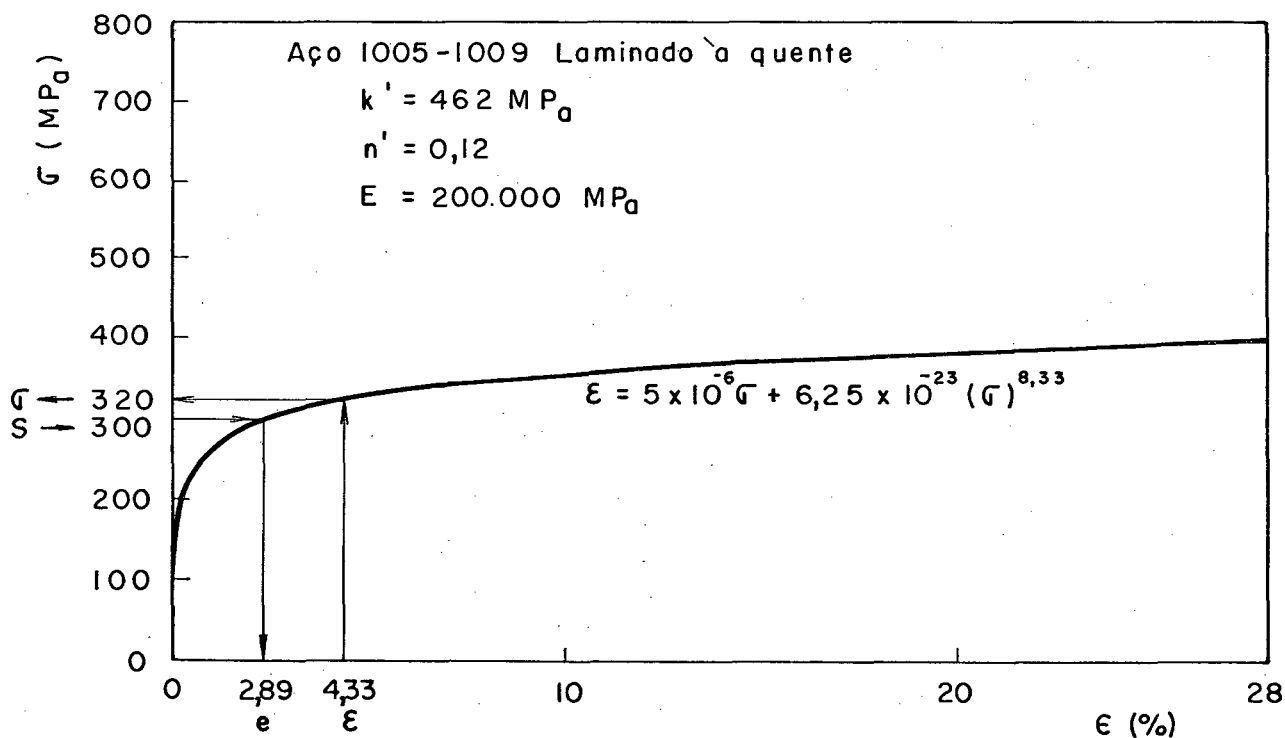


Fig.E6 - Gráfico do material com encruamento potencial, mostrando a solução da RLEP.

E.1.2.1.1.2 - Regra de Neuber

Equação da regra de Neuber:

$$\sigma \varepsilon = K_t^2 \quad \text{Se} \quad (E4)$$

- Encruamento linear

Se calcula a deformação nominal, conforme a equação do material com encruamento linear:

como:

$$S > \sigma'_E \quad (E5)$$

tem-se:

$$e = 300 \times 5 \times 10^{-6} + 7,142 \times 10^{-4} \quad (300-228)$$

$$e = 0,0523$$

com isto, obtêm-se a equação da hiperbole de Neuber, ou seja:

$$\sigma \varepsilon = (1,5)^2 \times 300 \times 0,0523$$

$$\sigma \varepsilon = 35,3$$

No gráfico do material, Fig. E7, é traçada a hiperbole de Neuber e sua interseção com a curva do material fornece os valores da tensão e deformação locais, ou seja:

$$\sigma = 363 \text{ MP}_a$$

$$\varepsilon = 0,097$$

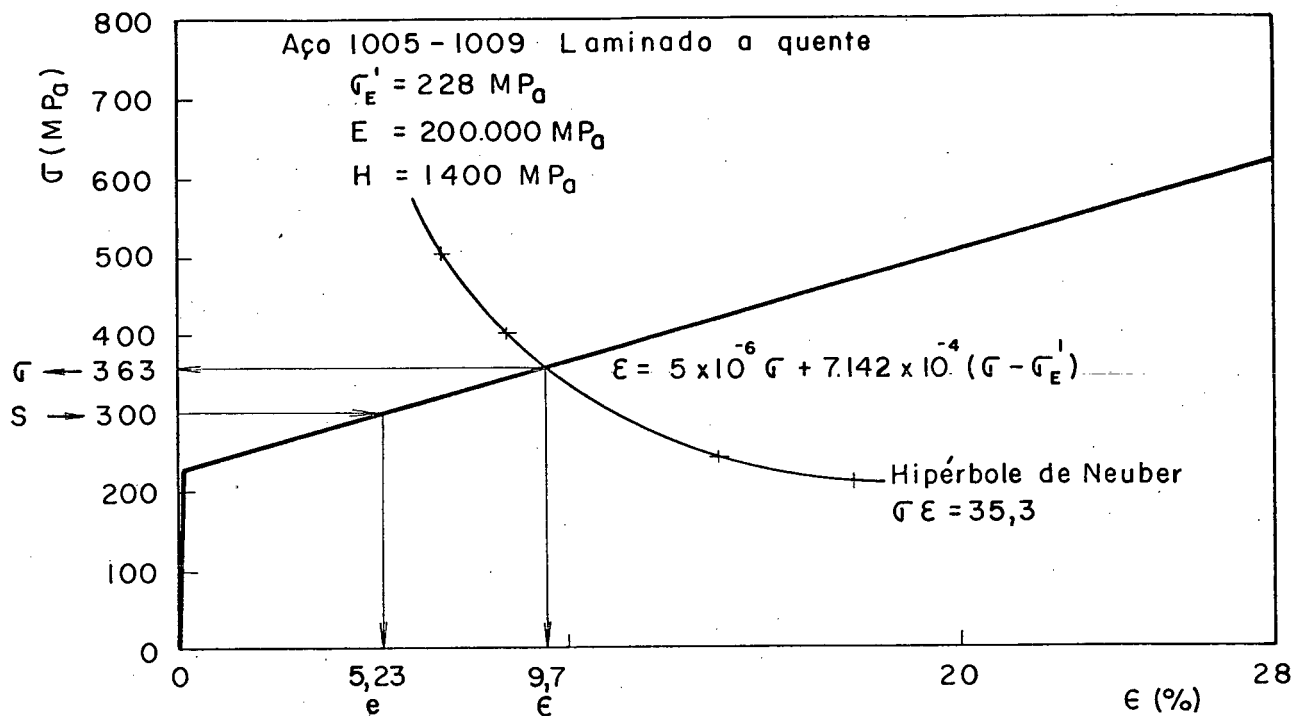


Fig.E7 - Gráfico do material, com encruamento linear, mostrando a solução da RNL.

- Encruamento potencial.

Se calcula a deformação nominal conforme a equação do material com encruamento potencial, ou seja:

$$e = 300 \times 5 \times 10^{-6} + 6,25 \times 10^{-23} (300)^{8.33}$$

$$e = 0,0289$$

com isto, obtêm-se a equação da hipérbole de Neuber, ou seja:

$$\sigma \epsilon = (1,5)^2 \times 300 \times 0.0289$$

$$\sigma \epsilon = 19,51$$

No gráfico do material, Fig. E8, é traçada a hipérbole de Neuber e sua interseção com a curva do ma-

terial fornece os valores da tensão e deformação locais, ou seja:

$$\sigma = 332 \text{ MP}_a$$

$$\varepsilon = 0.063$$

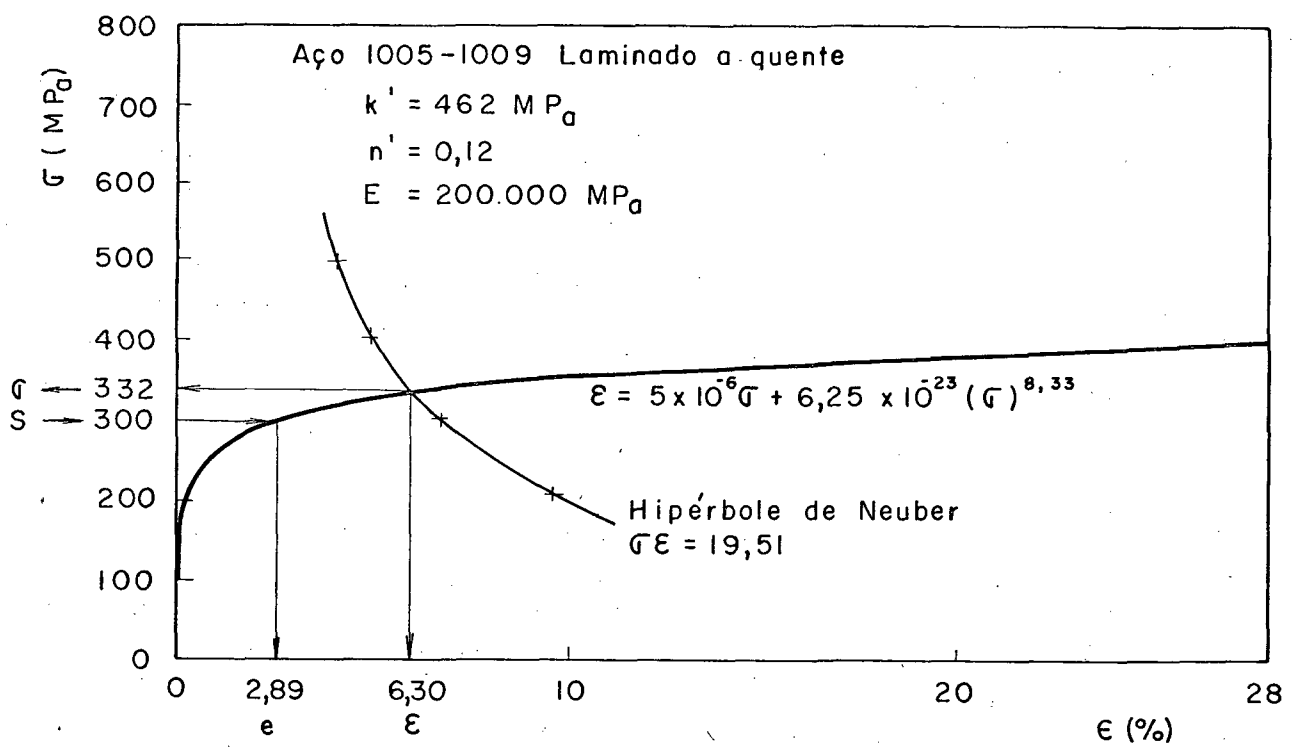


Fig.E8 - Gráfico do material, com encruamento potencial, mostrando a solução da RNEP.

E2 - Determinação da vida em baixo ciclo

Para obter a vida em baixo ciclo utilizaram-se os métodos de Morrow ou o das inclinações universais, conforme o desenvolvido no parágrafo D3 do apêndice D.

E2.1. Dados

E2.1.1- Material

Foi considerado o mesmo material utilizado no caso anterior e cujas propriedades estão no parágrafo E.1.1.1. Nos gráficos E5 e E6 mostram-se as curvas obtidas para os métodos de Morrow e inclinações universais conforme o material escolhido.

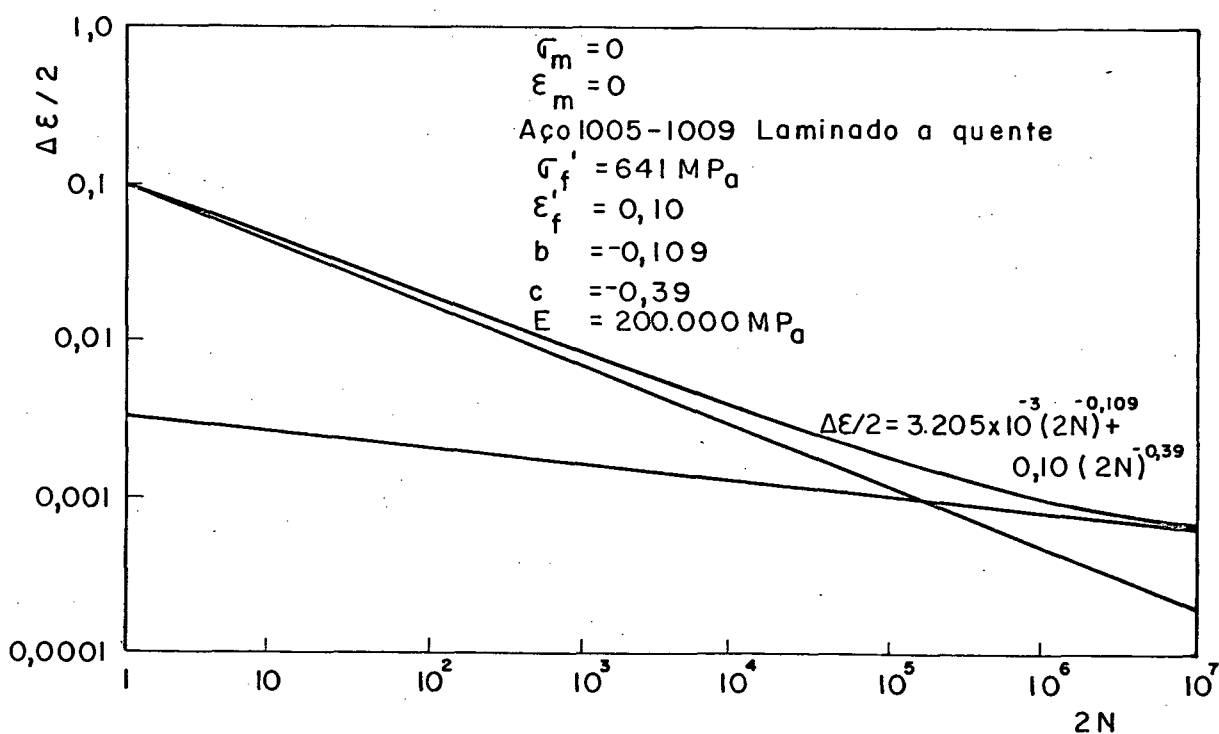


Fig. E9 - Gráfico do método de Morrow.

Aço 1005-1009 laminado a quente.

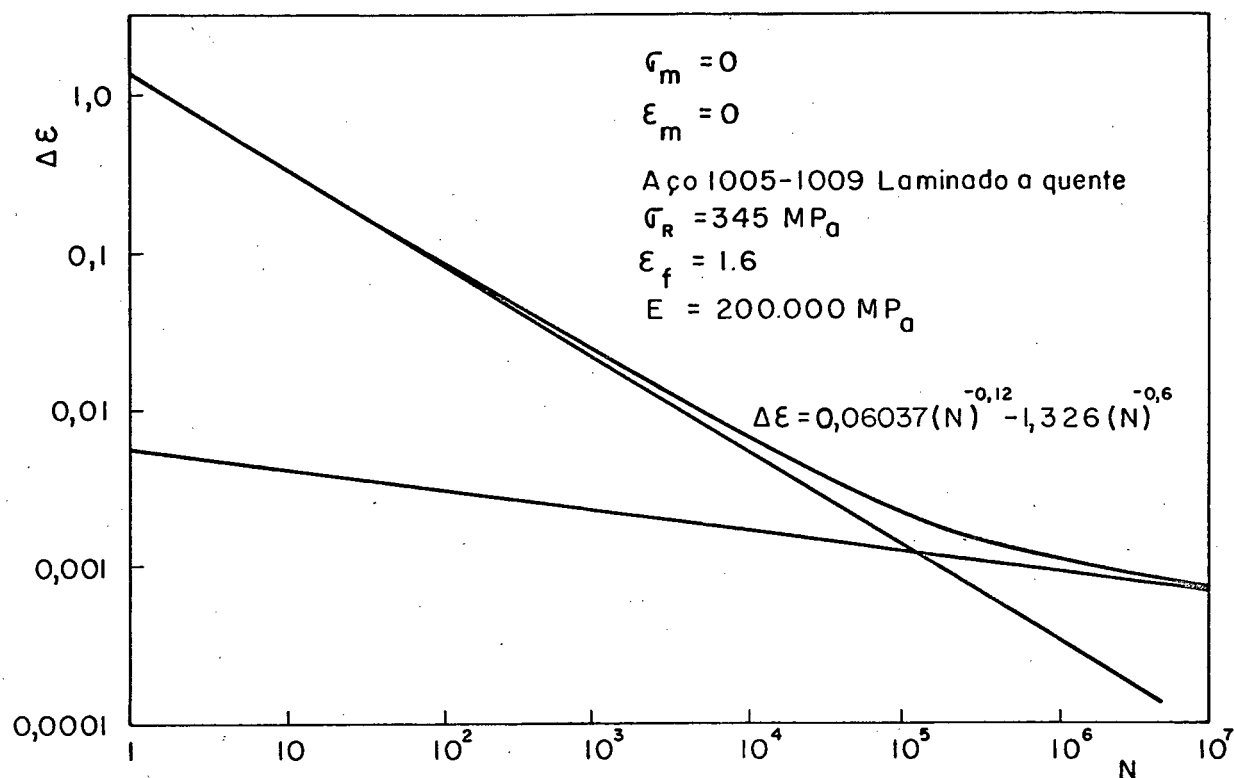


Fig.E10 - Gráfico do método das inclinações universais.
Aço 1005-1009 laminado a quente.

E.2.1.2. Variação e medias das deformações

É considerados um conjunto de sete valores de variação de deformações para ambos casos, tendo ademais em consideração a influência das tensões e deformações médias no cálculo da vida em baixo ciclo. Os dados correspondentes são mostrados nas Tabelas E5, E6, E7, e E8.

E.2.2. Resultados

Nas Tabelas E5 e E6 são mostrados os resultados dos dois métodos considerando tensão média e deformação média zero, tendo ademais a vida e variação da deformação na transição.

Nas Tabelas E7 e E8 tem-se os resultados considerando valores distintos de zero para as tensões e deformações médias.

Como é mostrado nas tabelas, verifica-se que os resultados obtidos através das rotinas são coerentes com os obtidos mediante gráficos e equações característicos.

E3. Determinação da vida e o efeito das tensões médias em alto ciclo

Na determinação da vida em alto ciclo, utilizou-se o desenvolvido no parágrafo 3.2.3.1.5, e para o estudo do efeito da tensão média em alto ciclo, o contido no parágrafo 3.2.3.1.5.2.

E.3.1. Dados

E.3.1.1. Material

Aço 1005-1009, com $\sigma_R = 345 \text{ MPa}$

E3.1.2. Fatores corretivos da resistência do material.

Consideram-se os seguintes fatores:

$k_1 = 0,89$ acabamento da superfície, espelhado

$k_2 = 1.00$ tamanho < 8mm

$k_3 = 1.00$ confiabilidade 50%

$k_4 = 1.00$ temperatura de 25°C

$k_5 = 1.00$ com $k_t = 1$ e $q = 0.806$

$k_6 = 1.00$ não se considerou outro efeito.

E3.1.2. Resistências corrigidas e constantes empíricas da curva no gráfico de Whöler.

Tendo em consideração o anterior, tem-se o seguinte:

$$A = 0,9 k_4 \sigma_R = 310.5 \text{ MPa} \quad (\text{E6})$$

$$\sigma'_F = 0.5 k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 \sigma_R = 153.25 \text{ MPa} \quad (\text{E7})$$

$$m = \frac{1}{3} \log (A/\sigma'_F) = 0.10196 \quad (\text{E8})$$

$$b = \log (A^2/\sigma'_F) = 2.7979 \quad (\text{E9})$$

No gráfico E11 mostra-se a curva obtida com os dados anteriores.

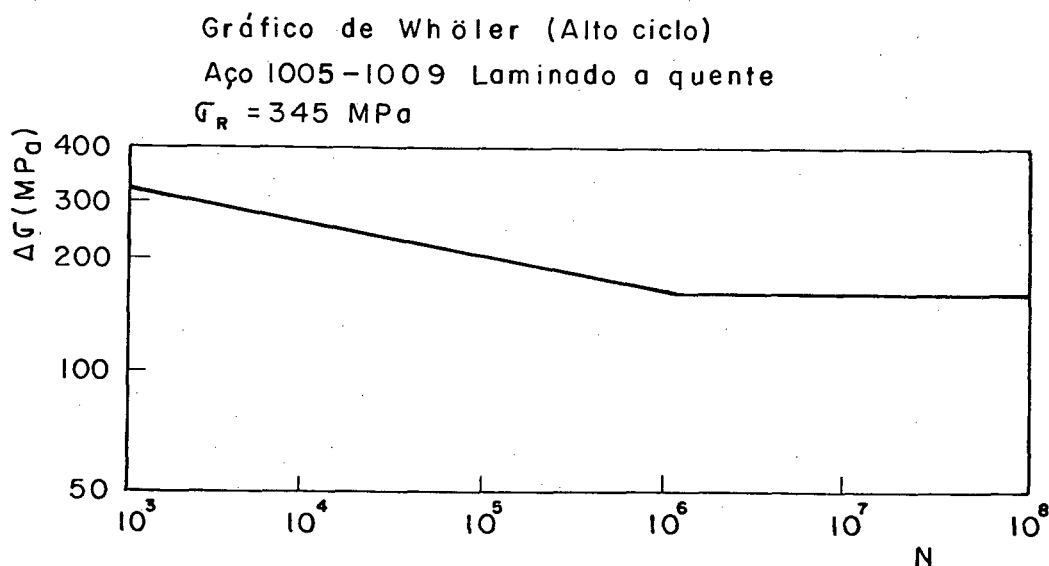


Fig.E11 - Gráfico de Whöler (alto ciclo)
Aço 1005-1009 (laminado em quente)

E3.1.3 - Variação e média das tensões

Considerou-se um conjunto de dez pares de valores correspondendo cada par a um ciclo de carregamento, como é mostrado na Tabela E9.

E3.2 - Resultados

Na Tabela E9 são mostrados os valores para a vida e o efeito da tensão média em alto ciclo determinados através das seguintes equações:

$$N = [10^b / \Delta\sigma]^{1/m} \quad (E10)$$

$$L = (\Delta\sigma / 2\sigma_F' + \sigma_m / \sigma_R) \quad (E11)$$

Neste caso considerou-se só a equação de Goodman modificado para avaliar o efeito de tensões médias positivas.

Nos casos 1 ao 6 tem-se vida infinita e nos casos 6 ao 10 se verifica falha por tensão média. Em geral os resultados apresentam uma boa concordância entre os determinados pelas equações e os determinados pela rotina.

E4 - Determinação da vida na propagação sob carregamento cíclico

A obtenção da vida na propagação de uma trinca de fadiga é baseada no desenvolvimento no parágrafo 3.2.3.1.4.2.

E4.1. Dados

E4.1.1. Material

Aço 1005-1009 laminado em quente:

$$\sigma_E = 262 \text{ MP}_a$$

$$K_{IC} = 60 \text{ MP}_a \sqrt{\text{m}}$$

$$\Delta K = 3.4 \text{ MP}_a \sqrt{\text{m}}$$

$$C = 2.42 \times 10^{-12}$$

$$m = 3.3$$

E4.1.2. Geometria

Foi escolhida uma geometria com defeito a qual encontra-se no apêndice B, sendo a geometria 2 no parágrafo B2.1, com isto obtêm-se um fator geométrico:

$$Y = 1.1215$$

E4.1.3. Carregamento

Considerou-se um conjunto de cinco pares de tensões máximas e mínimas como é mostrado na tabela E10.

E4.1.4. Tamanho inicial da trinca

O tamanho inicial considerou-se como:

$$a_0 = 5 \times 10^{-4} \text{ m.}$$

E4.2. Resultados

Os resultados obtidos com a rotina de propagação tem muito boa concordância com os obtidos através das equações correspondentes, conforme a Tabela E10.

Os incrementos da trinca são considerados como 10% da trinca inicial.

Nos casos 2 e 3 considerou-se que se $\sigma_{\min} \leq 0$, $\Delta\sigma$ é igual à tensão máxima σ_{\max} .

No caso 5 o processo é terminado por ser $\sigma_{\max} > \sigma_E$.

TABELA E5

MÉTODO DE MORROW

$\sigma_m = 0$

$\epsilon_m = 0$

DADO	CÁLCULO MANUAL			CÁLCULO DO SISTEMA			% VARIACÃO		
	$2N_{tr}$	$\Delta\epsilon_{tr}/2$	$2N$	$2N_{trs}$	$\Delta\epsilon_{trs}/2$	$2N_s$	$(\frac{2N_{trs}}{2N_{tr}} - 1)100$	$(\frac{\Delta\epsilon_{trs}/2}{\Delta\epsilon_{tr}/2} - 1)100$	$(\frac{2N_s}{2N} - 1)100$
01 1.94×10^{-2}	207639	1.68×10^{-3}	86	207652	1.69×10^{-3}	88	-0.44	+0.59	+2.32
02 1.336×10^{-2}	"	"	251	"	"	250	"	"	-0.40
03 6.095×10^{-3}	"	"	2461	"	"	2498	"	"	+1.50
04 3.929×10^{-3}	"	"	9615	"	"	9990	"	"	+3.90
05 2.527×10^{-3}	"	"	43687	"	"	45089	"	"	+3.20
06 1.366×10^{-3}	"	"	489779	"	"	499602	"	"	+2.00
07 1.168×10^{-3}	"	"	974061	"	"	999217	"	"	+2.6

TABELA E6

MÉTODO DAS INCLINAÇÕES UNIVERSAIS

$$\sigma_m = 0$$

$$\epsilon_m = 0$$

DADO	CÁLCULO MANUAL			CÁLCULO DO SISTEMA				% VARIÇÃO		
	Ntr	$\Delta\epsilon_{tr}$	N	Ntrs	$\Delta\epsilon_{trs}$	Ns	$\frac{N_{trs}}{N_{tr}} - 1$	$\frac{\Delta\epsilon_{trs}}{\Delta\epsilon_{tr}} - 1$	$\frac{N_s}{N} - 1$	100
01	111598	2.73×10^{-3}	102	111598	2.73×10^{-3}	100	0.00	0.00	-1.96	
02	"	"	516	"	"	502	"	"	-2.71	
03	"	"	1100	"	"	1059	"	"	-3.73	
04	"	"	22387	"	"	21629	"	"	-3.38	
05	"	"	102920	"	"	99832	"	"	-3.00	
06	"	"	10^6	"	"	999916	"	"	-0.00	
07	"	"	2.52×10^6	"	"	2.46×10^6	"	"	-2.38	

TABELA E7

MÉTODO DE MORROW

 $\sigma_m \neq 0$ $\epsilon_m \neq 0$

	DADOS			CÁLCULO MANUAL			CÁLCULO DO SISTEMA			% VARIACÃO		
	$\Delta\epsilon/2$	σ_m	ϵ_m	$2N_{tr}$	$\Delta\epsilon_{tr}/2$	$2N$	$2N_{tr}$	$\Delta\epsilon_{tr}/2$	$2N$	$\frac{2N_{trs} - 1}{2N_{tr}} \cdot 100$	$\frac{\Delta\epsilon_{trs} - 1}{\Delta\epsilon_{tr}} \cdot 100$	$\left(\frac{2N}{2N}\right) \cdot 100$
01	3.448×10^{-3}	50	0.09	76	3.69×10^{-3}	10^2	76,58	3.68×10^{-3}	99.90	+0.76	-0.27	-0.10
02	3.302×10^{-3}	100	0.07	5232	2.12×10^{-3}	10^3	5232	2.13×10^{-3}	999.20	0.00	+0.47	-0.08
03	1.168×10^{-3}	50	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04	2.459×10^{-3}	50	0.05	23526	1.07×10^{-3}	10^4	23527	1.97×10^{-3}	9994.58	0.00	0.00	-0.05
05	1.444×10^{-3}	100	0.04	61653	1.62×10^{-3}	10^5	61656	1.63×10^{-3}	100058	0.00	0.61	+0.06
06	4.193×10^{-4}	650	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07	7.469×10^{-4}	50	0.08	902	2.81×10^{-3}	10^6	902.44	2.82×10^{-3}	999418	0.00	+0.35	-0.06

No caso 3: $\epsilon_m > \epsilon'_f$ No caso 6: $\sigma_m > \sigma'_f$

TABELA E8

MÉTODO DAS INCLINAÇÕES UNIVERSAIS

 $\sigma_m \neq 0$ $\epsilon_m \neq 0$

DADOS			CÁLCULO MANUAL				CÁLCULO DO SISTEMA				% VARIACÃO			
$\Delta \epsilon$	σ_m	ϵ_m	N_{tr}	$\Delta \epsilon_{tr}$	N	N_{trs}	$\Delta \epsilon_{trs}$	N_s	$\frac{N_{trs} - 1}{N_{tr}}$	100	$\frac{\Delta \epsilon_{trs} - 1}{\Delta \epsilon_{tr}}$	100	$\frac{N_s - 1}{N}$	100
01	8.88×10^{-2}	50	0.09	12278	9.02×10^{-3}	10^2	12252	9.03×10^{-3}	10^2	- 0.21	+ 1.10	- 0.21	0.00	0.00
02	2.617×10^{-2}	100	0.07	14283	8.30×10^{-3}	10^3	14253	8.31×10^{-2}	10^3	- 0.21	+ 0.12	- 0.21	0.00	0.00
03	2.611×10^{-3}	50	1.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04	9.803×10^{-3}	50	0.05	12686	8.98×10^{-3}	10^4	12659	8.49×10^{-3}	10^4	- 0.21	+ 0.11	- 0.21	0.00	0.00
05	3.865×10^{-3}	100	1.20	2671	1.01×10^{-2}	10^5	3666	1.02×10^{-2}	19^5	- 0.26	+ 0.99	- 0.26	0.00	0.00
06	6.213×10^{-2}	850	0.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07	2.984×10^{-3}	50	0.08	12380	9.01×10^{-3}	10^6	12354	9.02×10^{-3}	10^6	- 0.21	+ 0.11	- 0.21	0.00	0.00

No caso 3: $\epsilon_m > \epsilon_f$ No caso 6: $\sigma_m > \sigma_f$

TABELA E9

VIDA SEGUNDO WHÖLER E EFEITO DA TENSÃO MÉDIA

$\Delta\sigma$ [MPa]	σ_m [MPa]	CÁLCULO MANUAL		CÁLCULO PELO SISTEMA		% VARIACÃO	
		N	E	Ns	Es	$\frac{Ns}{N} - 1$ 100	$\frac{Es}{E} - 1$ 100
01	20	10^6	9.05×10^{-2}	10^6	9.0539×10^{-2}		-0.00
02	20	10^6	1.56×10^{-1}	10^6	1.5567×10^{-1}		-0.00
03	40	10^6	3.12×10^{-1}	10^6	3.1135×10^{-1}		-0.15
04	80	10^6	5.26×10^{-1}	10^6	5.2499×10^{-1}		-0.19
05	100	10^6	6.82×10^{-1}	10^6	6.8067×10^{-1}		-0.19
06	180	10^6	1.0119	10^6	1.0102		-0.17
07	190	203735	1.1389	210064	1.1369	+3.10	-0.18
08	210	72673	1.2622	74744	1.2600	+2.85	-0.18
09	240	45087	1.3819	46319	1.3795	+2.73	-0.17
10	260	8188	1.6706	8377	1.5678	+2.31	-0.17

TABELA E10
PROPAGAÇÃO

	σ_{max} MPa	σ_{min} [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	a [m]	y_p	K_I [MPa \sqrt{m}]	ΔK [MPa \sqrt{m}]	MANUAL	SISTEMA	% VARIACÃO
								N	N _s	$(\frac{N_s}{N} - 1) 100$
01	200	50	150	5.5×10^{-4}	1.1869	10.551	7.913	36400	36489	+ 0.24
02	150	-10	150	6.00×10^{-4}	1.0833	7.575	7.575	31374	31374	+ 0.013
03	200	0	200	6.50×10^{-4}	1.5309	18.635	18.635	5065	5066	+ 0.02
04	180	60	120	7.00×10^{-4}	1.1353	10.357	6.905	50269	50269	0.00
05	265	25	240	-	-	-	-	-	-	-
VIDA FINAL								123104	123198	+ 0.076

APÊNDICE F

OPERAÇÃO DO SISTEMA E SEQUÊNCIA DAS
OPÇÕES CONFORME FORAM ELEITAS

- F1. Operação do Sistema
- F2. Seqüência de opções em baixo ciclo
- F3. Seqüência de opções em alto ciclo
- F4. Seqüência de opções na propagação
- F5. Seqüência de opções no caso estático.

Fl. Operação do Sistema

OPERAÇÃO DO SISTEMA

A operação do sistema é simples, já que o usuário só tem que seguir as instruções que aparecem no vídeo, com as quais pode estruturar o sistema conforme o problema a resolver.

O sistema é chamado com o nome de RESISTE, ao apertar a tecla ENTER tem-se na tela do vídeo o menu principal pronto para que o usuário possa fazer a seleção de opções.

Com as teclas (↑) ou (↓) é movida a seta indicadora das opções, para acima ou para abaixo, do vídeo. O usuário ao posicionar a seta na opção escolhida, apertando ENTER, faz válida a opção. Para continuar com o processo de seleção de opções, se muda a tela do vídeo acionando a tecla (→) e ENTER para fazer válida a opção. O processo de seleção pode ser interrompido em qualquer instante, e voltar às opções anteriores, acionando a tecla ENTER.

O procedimento do parágrafo anterior é repetido até esgotarem as opções; nesse momento aparece na tela do vídeo a síntese das opções que foram selecionadas, aparecendo na parte inferior do vídeo a frase "se não deseja voltar ao menu principal". Se é não apertando a tecla (→) se fazem válidas todas as opções selecionadas, se é sim, apertando a tecla ENTER volta ao menu principal.

Ao ter aceito a síntese de opções começam aparecer na tela do vídeo, apertando a tecla ENTER, gráficos que o sistema fornece para cada caso em particular. Depois de mostrar o último gráfico e apertando a tecla ENTER, começa o processamento da in-

formação fornecida ao sistema, aparecendo no vídeo a palavra "PROCESSANDO" e ao terminar aparece "FIM DO PROCESSAMENTO" , com o qual são obtidos os resultados que o sistema fornece através do arquivo "RESISTE.SAI".

A seguir, neste Apêndice, mostram-se as seqüências de opções para quatro casos distintos, e, no Apêndice G, mostram-se as saídas para dois exemplos característicos.

F2. Sequência de opções em baixo ciclo

Menu Principal		
Material	Geometria	Carga
ACOS: -> carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	TENSAO DEFORMACAO

Acos Carbono
-> ACO SAE 1005-1009

Menu Principal		
Material	Geometria	Carga
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO -> SEM DEFEITO	TENSÃO DEFORMAÇÃO

Menu Principal		
Material	Geometria	Carga
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	EIXOS -> ELEMENTOS PLACAS OUTRA	TENSÃO DEFORMAÇÃO

Elemento

ELEMENTO DE SECAO RETANGULAR COM DOIS ENTALHES
EM "U" SOB TRACAO

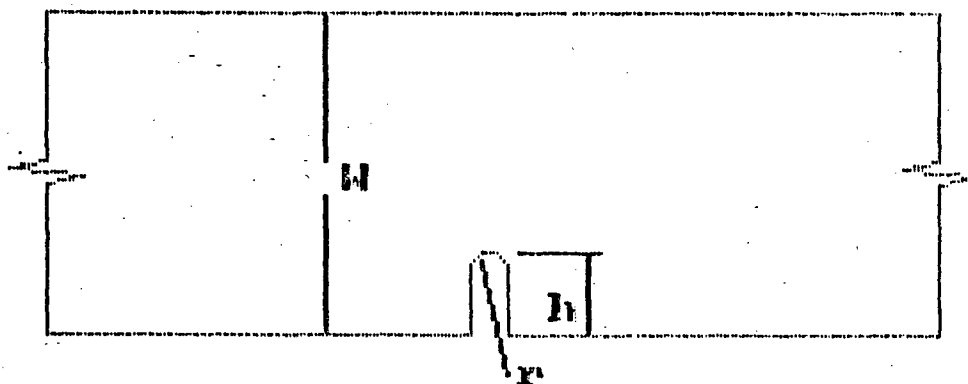
ELEMENTO DE SECAO RETANGULAR COM DOIS ENTALHES
EM "U" SOB FLEXAO

ELEMENTO DE SECAO RETANGULAR COM DOIS ENTALHES
EM "U" SOB FLEXAO FORA DO PLANO

ELEMENTO DE SECAO RETANGULAR COM DOIS ENTALHES
EM "V" SOB TRACAO

-> ELEMENTO DE SECAO RETANGULAR COM ENTALHE
EM "U" SOB TRACAO

**Elemento de Seccao Retangular com
Entalhe em "U" sob Tracao**



(MM) $h=10$
(MM) $N=50$
(MM) $r=5$

Menu Principal		
<p style="text-align: center;">Material</p> <p>ACOS:</p> <p>carbono</p> <p>baixa liga</p> <p>media liga</p> <p>alta liga</p> <p>ALUMINIO</p> <p>OUTROS</p>	<p style="text-align: center;">Geometria</p> <p>COM DEFEITO</p> <p>SEM DEFEITO</p>	<p style="text-align: center;">Analise</p> <p>ESTATICA</p> <p>-> DINAMICA</p>

Menu Principal		
<p style="text-align: center;">Material</p> <p>ACOS:</p> <p>carbono</p> <p>baixa liga</p> <p>media liga</p> <p>alta liga</p> <p>ALUMINIO</p> <p>OUTROS</p>	<p style="text-align: center;">Geometria</p> <p>COM DEFEITO</p> <p>SEM DEFEITO</p>	<p style="text-align: center;">Carga</p> <p>-> TENSAO</p> <p>DEFORMACAO</p>

Menu Principal		
Material	Geometria	Tensao
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	LOCAL -> NOMINAL

Menu Principal		
Material	Geometria	Tensao
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	METODO TRADICIONAL -> REGRAS P/ TENSAO

Menu Principal		
Material	Geometria	Regras
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	LINEAR EL -> LINEAR EP NEUBER EL NEUBER EP

Menu Principal		
Material	Geometria	Carregamento
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	DENSIDADE BLOCOS -> TABELA

Menu Principal		
Material	Geometria	Ciclos
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	ALTO CICLO -> BAIXO CICLO

Menu Principal		
Material	Geometria	VIDA
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	-> MORROW INCLINACOES UNIVERSAIS

Síntese das opções

MATERIAL SAE 1005-1009
GEOMETRIA ELEMENTO SEM DEFEITO
ANALISE DINAMICA
CARGA TENSÃO NOMINAL
CARREGAMENTO TABELA
OBTENSÃO DA TENSÃO . REGRA LINEAR EP
CICLO BAIXO
VIDA MORROW

CURVAS QUE SERÃO OBTIDAS:

TENSÃO x DEFORMAÇÃO
TENSÃO x PONTOS

ARQUIVO DE SAÍDA .. RESISTE.SAI

PROCESSANDO

Menu Principal		
Material	Geometria	VIDA
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	MORROW -> INCLINACOES UNIVERSAIS

Sintese das opcoes	
MATERIAL	SAE 1005-1009
GEOMETRIA	ELEMENTO SEM DEFEITO
ANALISE	DINAMICA
CARGA	TENSAO NOMINAL
CARREGAMENTO	TABELA
OBTENSAO DA TENSAO	REGRA LINEAR EP
CICLO	BAIXO
VIDA	INCLINACOES UNIVERSAIS
CURVAS QUE SERAO OBTIDAS:	
TENSAO x DEFORMACAO	
TENSAO x PONTOS	
ARQUIVO DE SAIDA .. RESISTE.SAI	
PROCESSANDO	

F3. Sequência de opções em alto ciclo

Menu Principal		
<p style="text-align: center;">Material</p> <p>ACOS:</p> <p> carbono</p> <p> baixa liga</p> <p> media liga</p> <p> alta liga</p> <p> ALUMINIO</p> <p> OUTROS</p>	<p style="text-align: center;">Geometria</p> <p> COM DEFEITO</p> <p> SEM DEFEITO</p>	<p style="text-align: center;">Ciclos</p> <p> -> ALTO CICLO</p> <p> BAIXO CICLO</p>

Menu Principal		
<p style="text-align: center;">Material</p> <p>ACOS:</p> <p> carbono</p> <p> baixa liga</p> <p> media liga</p> <p> alta liga</p> <p> ALUMINIO</p> <p> OUTROS</p>	<p style="text-align: center;">Geometria</p> <p> COM DEFEITO</p> <p> SEM DEFEITO</p>	<p style="text-align: center;">Alto Ciclo</p> <p> Entre com a</p> <p> temperatura</p> <p> (C) =></p>

Menu Principal		
<p style="text-align: center;">Material</p> <p>ACOS:</p> <p>carbono</p> <p>baixa liga</p> <p>media liga</p> <p>alta liga</p> <p>ALUMINIO</p> <p>OUTROS</p>	<p style="text-align: center;">Geometria</p> <p>COM DEFEITO</p> <p>SEM DEFEITO</p>	<p style="text-align: center;">Alto Ciclo</p> <p>Modificar a resistencia (S/N) ?</p>

Menu Principal		
<p style="text-align: center;">Material</p> <p>ACOS:</p> <p>carbono</p> <p>baixa liga</p> <p>media liga</p> <p>alta liga</p> <p>ALUMINIO</p> <p>OUTROS</p>	<p style="text-align: center;">Geometria</p> <p>COM DEFEITO</p> <p>SEM DEFEITO</p>	<p style="text-align: center;">Acabamento</p> <p>-> Espelhado</p> <p>Retificado</p> <p>Usinado</p> <p>Laminado</p> <p>Forjado</p>

Menu Principal		
<p style="text-align: center;">Material</p> <p>ACOS:</p> <p> carbono</p> <p> baixa liga</p> <p> media liga</p> <p> alta liga</p> <p>ALUMINIO</p> <p>OUTROS</p>	<p style="text-align: center;">Geometria</p> <p>COM DEFEITO</p> <p>SEM DEFEITO</p>	<p style="text-align: center;">Confiabilidade</p> <p>FAIXAS:</p> <p>-> 0.50</p> <p> 0.90</p> <p> 0.95</p> <p> 0.99</p>

Menu Principal		
<p style="text-align: center;">Material</p> <p>ACOS:</p> <p> carbono</p> <p> baixa liga</p> <p> media liga</p> <p> alta liga</p> <p>ALUMINIO</p> <p>OUTROS</p>	<p style="text-align: center;">Geometria</p> <p>COM DEFEITO</p> <p>SEM DEFEITO</p>	<p style="text-align: center;">Tensao media</p> <p>CRITERIOS:</p> <p>-> Goodmam m.</p> <p> Gerber</p> <p> Soderberg</p> <p> Morrow</p>

Síntese das opções

MATERIAL SAE 1005-1009
GEOMETRIA ELEMENTO SEM DEFEITO
ANALISE DINAMICA
CARGA. TENSÃO NOMINAL
CARREGAMENTO TABELA
OBTENSÃO DA TENSÃO . REGRA LINEAR EP
CICLO ALTO

CURVAS QUE SERÃO OBTIDAS:

TENSÃO x DEFORMAÇÃO
TENSÃO x PONTOS

ARQUIVO DE SAÍDA .. RESISTE.SAI

PROCESSANDO

F4. Seqüência de opções na propagação

Menu Principal		
Material	Geometria	Carga
ACOS: -> carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	TENSAO DEFORMACAO

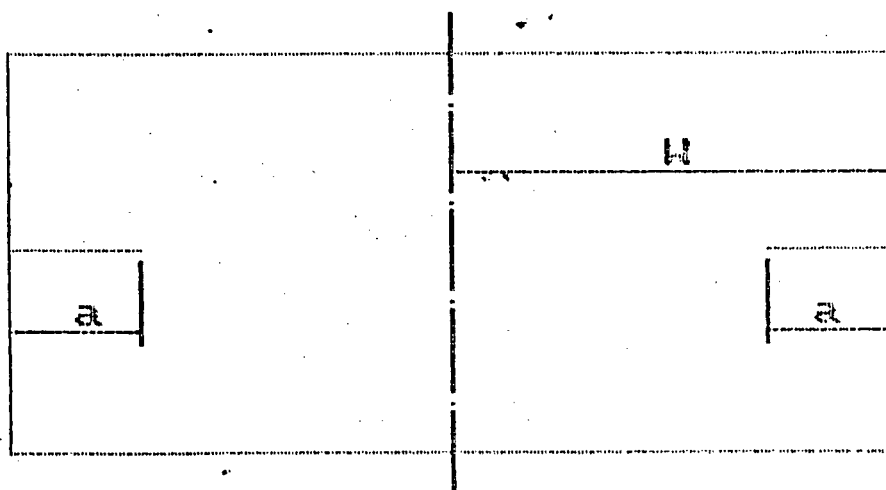
Acos Carbono
-> ACO SAE 1005-1009

Menu Principal		
Material	Geometria	Carga
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	-> COM DEFEITO SEM DEFEITO	TENSÃO DEFORMAÇÃO

Menu Principal		
Material	Geometria	Carga
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	CORPOS DE PROVA EIXOS -> PLACAS OUTRA	TENSÃO DEFORMAÇÃO

Placas
PLACA FINITA COM TRINCA NA BORDA SOB TRACAO
PLACA FINITA COM TRINCAS NAS BORDAS (I) SOB TRACAO
-> PLACA FINITA COM TRINCAS NAS BORDAS (II) SOB TRACAO
PLACA FINITA COM TRINCA CENTRAL SOB FLEXAO
PLACA FINITA COM TRINCA CENTRAL SOB TRACAO
PLACA INFINITA COM TRINCA CENTRAL SOB TRACAO
PLACA SEMI-INFINITA COM TRINCA NA BORDA SOB TRACAO

Placa Finita com Trincas nas Bordas II Sob Tracao



(m) $a=0.005$
(m) $W=0.1$

Menu Principal		
Material	Geometria	Analise
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	ESTATICA -> DINAMICA

Menu Principal		
Material	Geometria	Carga
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	CORPOS DE PROVA EIXOS PLACAS OUTRA	-> TENSAO DEFORMACAO

Menu Principal		
Material	Geometria	Tensao
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	LOCAL -> NOMINAL

Menu Principal		
Material	Geometria	Carregamento
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	DENSIDADE BLOCOS -> TABELA

Síntese das opções

MATERIAL SAE 1005-1009
GEOMETRIA PLACA COM DEFEITO
ANALISE DINAMICA
CARGA. TENSÃO NOMINAL
CARREGAMENTO TABELA

CURVAS QUE SERÃO OBTIDAS:

TENSÃO x DEFORMAÇÃO
TENSÃO x PONTOS

ARQUIVO DE SAÍDA .. RESISTE.SAI

APERTAR → SE NÃO DESEJA VOLTAR PARA O MENU PRINCIPAL

F5. Seqüência de opções de caso estático.

Menu Principal		
Material	Geometria	Analise
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	-> ESTATICA DINAMICA

Menu Principal		
Material	Geometria	Analise
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	-> INICIO DE ESCOAMENTO PLASTIFICACAO

Menu Principal		
Material	Geometria	Carga
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	-> TENSÃO DEFORMAÇÃO

Menu Principal		
Material	Geometria	Tensao
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	LOCAL -> NOMINAL

Menu Principal		
Material	Geometria	Tensao
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	METODO TRADICIONAL -> REGRAS P/ TENSAO

Menu Principal		
Material	Geometria	Regras
ACOS: carbono baixa liga media liga alta liga ALUMINIO OUTROS	COM DEFEITO SEM DEFEITO	LINEAR EL LINEAR EP -> NEUBER EL NEUBER EP

Síntese das opções

MATERIAL SAE 1005-1009
GEOMETRIA ELEMENTO SEM DEFEITO
ANALISE ESTATICA
CARGA TENSÃO NOMINAL
CRITÉRIO DE FALHA .. INÍCIO DE ESCOAMENTO
OBTENÇÃO DA TENSÃO . REGRA NEUBER EL

CURVAS QUE SERÃO OBTIDAS:

TENSÃO x DEFORMAÇÃO

ARQUIVO DE SAÍDA .. RESISTE.SAI

APORTE -> SE NÃO DESEJA VOLTAR PARA O MENU PRINCIPAL

APÊNDICE G

RESULTADOS DOS EXEMPLOS RESOLVIDOS PELO SISTEMA

G1. Carregamento através de tabela de dados

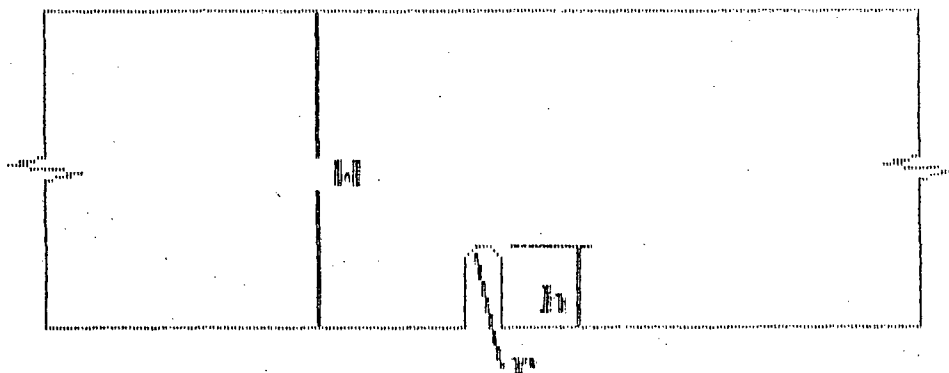
- Alto ciclo com correção da resistência
- Baixo ciclo
- Propagação

G2 - Carregamento em blocos

- Baixo ciclo

Síntese das opções	
MATERIAL	SAE 1005-1009
GEOMETRIA	ELEMENTO SEM DEFEITO
ANALISE	DINAMICA
CARGA	TENSÃO NOMINAL
CARREGAMENTO	TABELA
OBTENÇÃO DA TENSÃO	REGRAS LINEAR E P
CICLO	ALTO
CURVAS QUE SERÃO OBTIDAS:	
TENSÃO x DEFORMAÇÃO	
TENSÃO x PONTOS	
ARQUIVO DE SAÍDA .. RESISTE.SAI	
PROCESSANDO	

Elemento de Seção Retangular com
Entalhe em "U" sob Tração



(mm) h=10
 (mm) H=50
 (mm) r=5

Sintese das opcoes

MATERIAL SAE 1005-1009
 GEOMETRIA ELEMENTO SEM DEFEITO
 ANALISE DINAMICA
 CARGA TENSÃO NOMINAL
 CARREGAMENTO TABELA
 OBTENSÃO DA TENSÃO . REGRA LINEAR EP
 CICLO BAIXO
 VIDA MORROW

CURVAS QUE SERAO OBTIDAS:

TENSÃO x DEFORMAÇÃO
 TENSÃO x PONTOS

ARQUIVO DE SAIDA .. RESISTE.SAI

PROCESSANDO

Sintese das opcoes

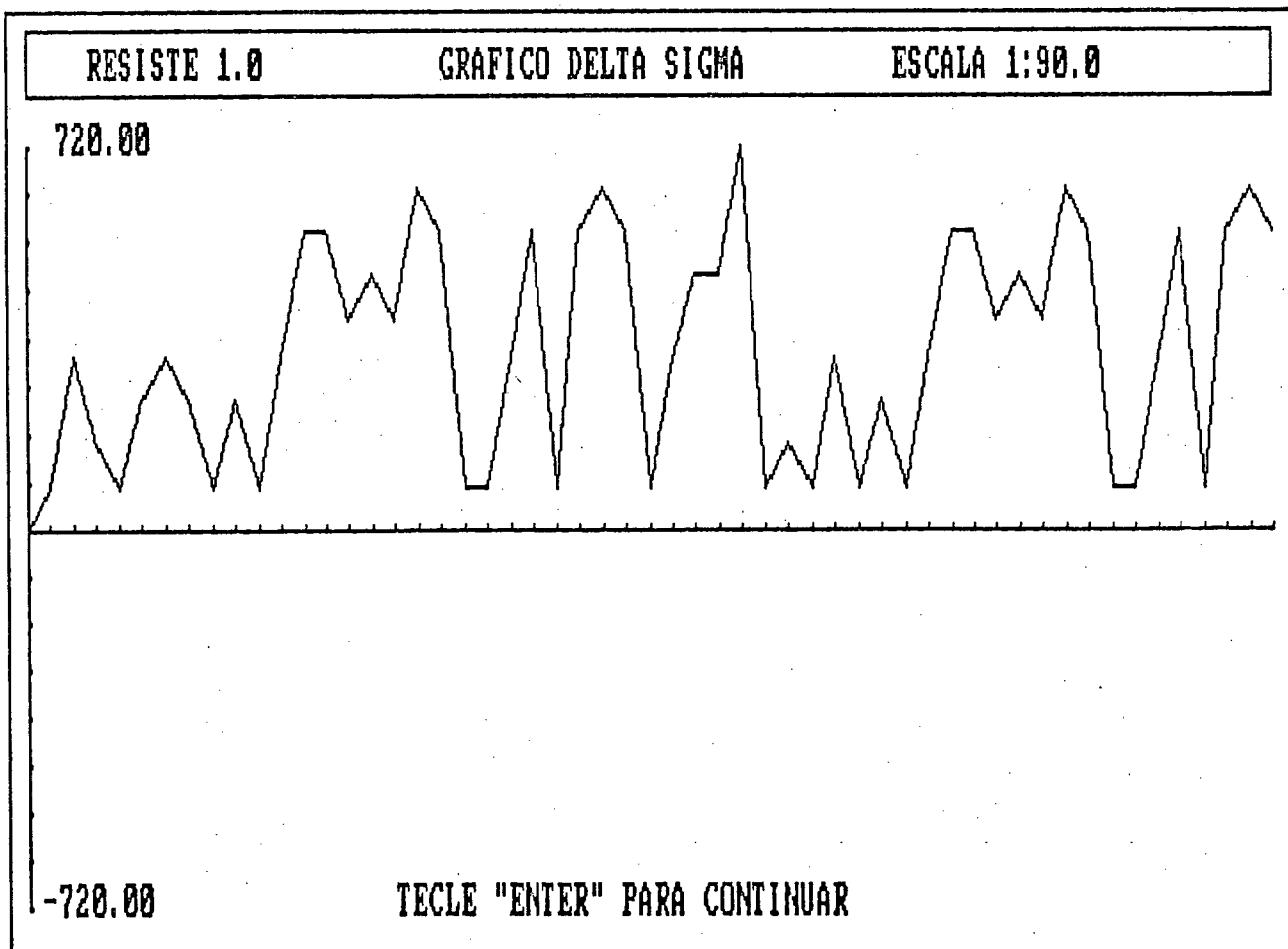
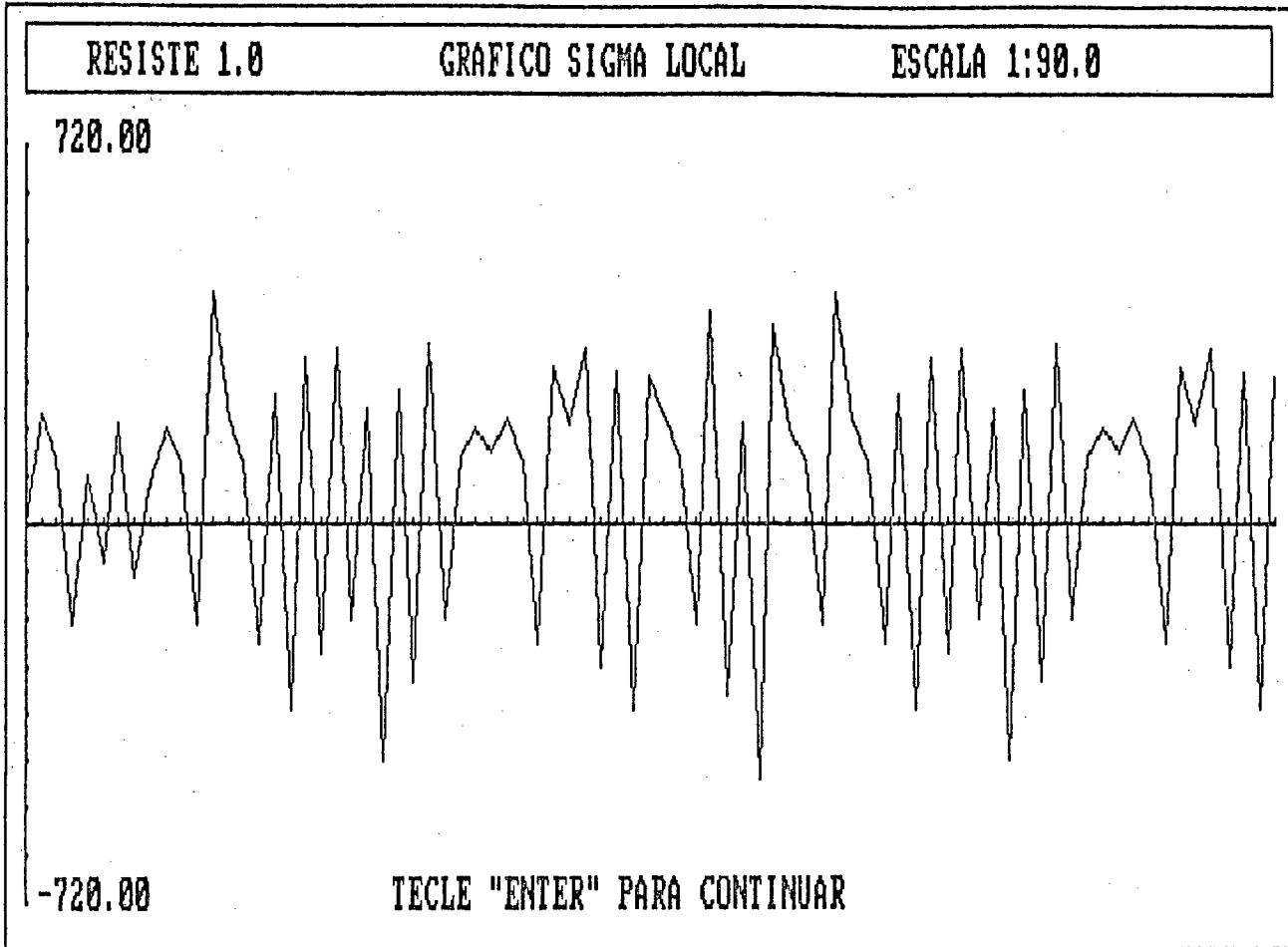
MATERIAL SAE 1005-1009
 GEOMETRIA ELEMENTO SEM DEFEITO
 ANALISE DINAMICA
 CARGA TENSÃO NOMINAL
 CARREGAMENTO TABELA
 OBTENSÃO DA TENSÃO . REGRA LINEAR EP
 CICLO BAIXO
 VIDA INCLINAÇÕES UNIVERSAIS

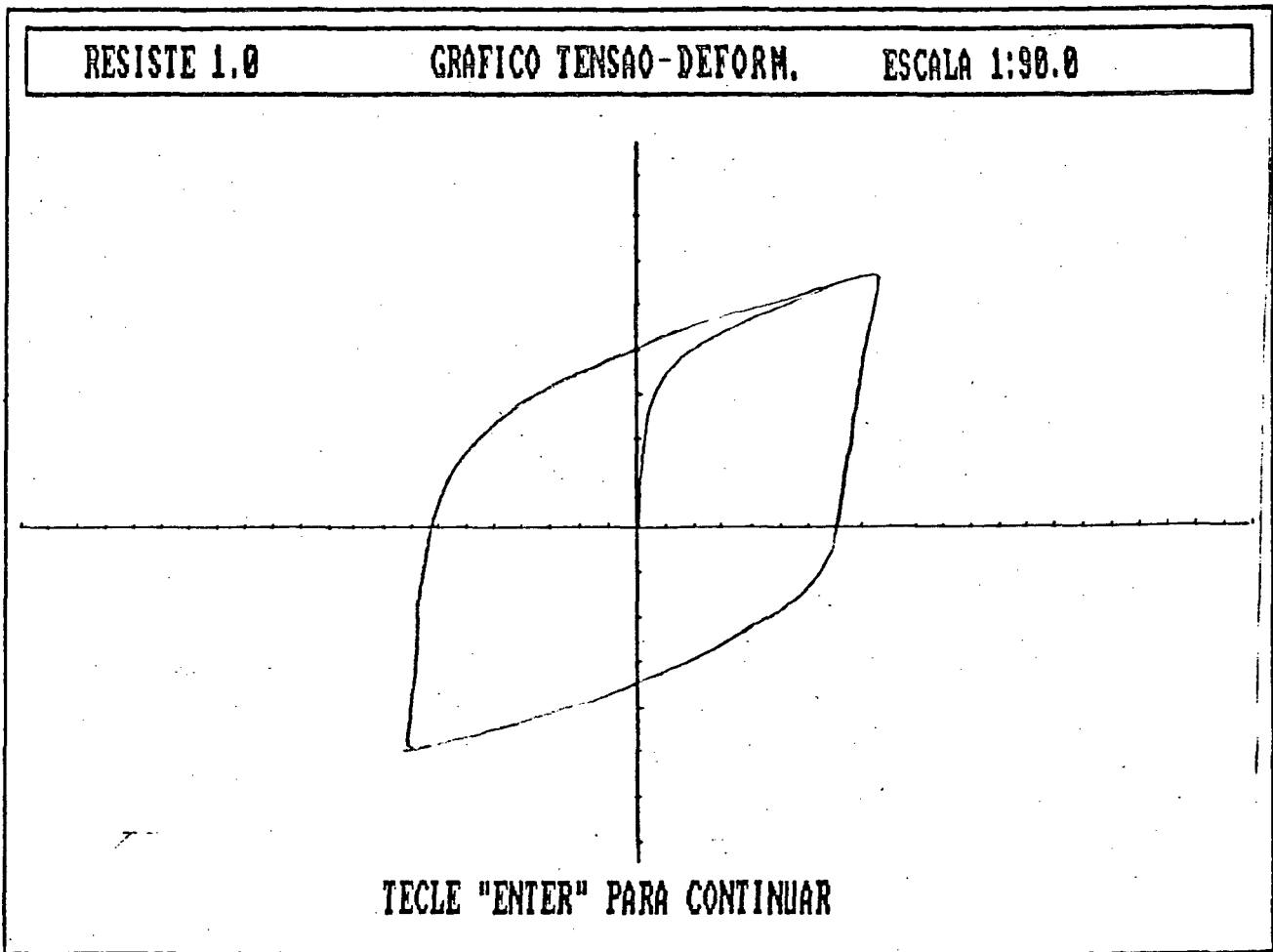
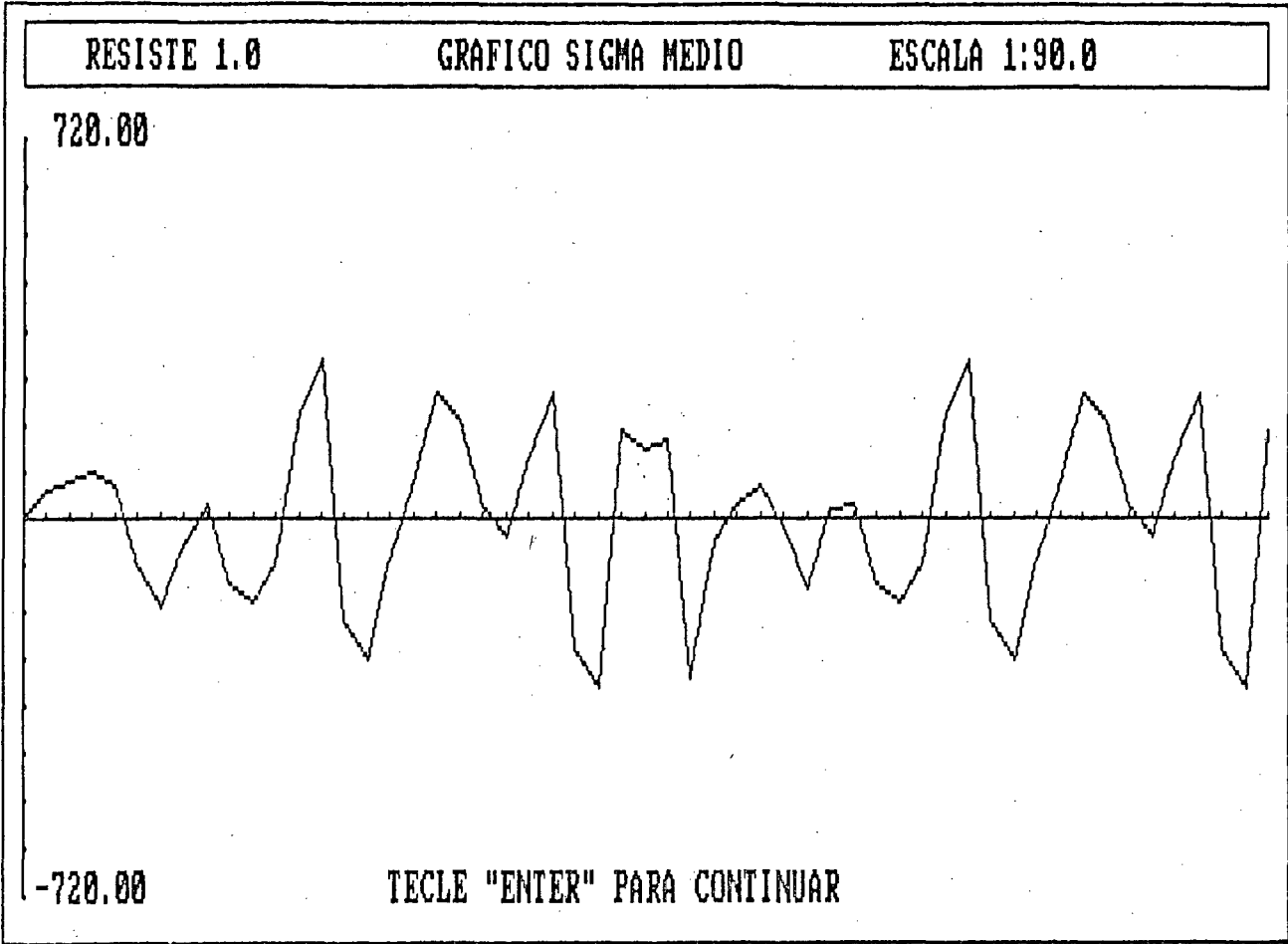
CURVAS QUE SERAO OBTIDAS:

TENSÃO x DEFORMAÇÃO
 TENSÃO x PONTOS

ARQUIVO DE SAIDA .. RESISTE.SAI

PROCESSANDO





SOFTWARE RESISTE 1.0

SIMULACAO NUMERICA DE FADIGA

MATERIAL ... : SAE 1005-1009

PROPRIEDADES :

hn : 9.8E+0001
..... : -1.1E-0001
..... : -3.9E-0001
_l : 2.4E-0012
K0 : 3.4E+0000
..... : 2.0E+0005
p_f : 1.4E+0000
p_f_l : 1.0E-0001
1 : 1.4E+0003
2 : 2.0E+0002
3 : 1.0E+0002
cev : 9.0E-0001
..... : 1.4E+0003
..... : 5.3E+0002
IC : 6.0E+0001
_l : 4.6E+0002
..... : 3.3E+0000
..... : 1.6E-0001
_l : 1.2E-0001
_esc : 2.6E+0002
_esc_l : 2.3E+0002
_f : 8.5E+0002
_f_l : 6.4E+0002
_rup : 3.5E+0002
i : 4.5E+0002
s : 5.5E+0002

ALCULO DAS TENSOES : REGRA LINEAR ENC. POTENCIAL

ATOR DE CONCENTRACAO DE TENSÃO 2.4E+0000

STATISTICA DA VARIÁVEL SIGMA LOCAL

NUMERO DE PONTOS GERADOS..... 80
MEDIA..... 5.5E+0001
VALOR MEDIO QUADRATICO..... 6.6E+0004
COEFICIENTE DE VARIACAO..... 2.5E+0002
TERCEIRO MOMENTO..... -8.2E+0006
QUARTO MOMENTO..... 7.7E+0009
COEFICIENTE DE DISPERSAO..... 4.5E+0000
COEFICIENTE DE SIMETRIA..... -5.2E-0001
COEFICIENTE DE PLANICIDADE..... 1.9E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE -485 E -392 = 3
NUMEROS DE PONTOS ENTRE -390 E -300 = 5
NUMEROS DE PONTOS ENTRE -298 E -208 = 8

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-206	E	-115	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-110	E	-23	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-21	E	68	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	70	E	161	=	14
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	163	E	253	=	18
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	255	E	45	=	16
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	347	E	438	=	2

ESTATISTICA DA VARIÁVEL DELTA SIGMA

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	60
MEDIA.....	3.4E+0002
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	1.6E+0005
DESVIO PADRAO.....	2.1E+0002
TERCEIRO MOMENTO.....	-7.3E+0003
QUARTO MOMENTO.....	3.3E+0009
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	6.3E-0001
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	-9.4E-0004
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	1.6E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	40	E	109	=	16
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	110	E	178	=	1
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	179	E	247	=	3
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	248	E	316	=	7
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	317	E	385	=	4
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	386	E	454	=	4
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	455	E	523	=	4
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	524	E	592	=	10
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	593	E	661	=	6
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	662	E	730	=	3

ESTATISTICA DA VARIÁVEL SIGMA MEDIO

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	60
MEDIA.....	1.6E+0001
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	2.7E+0004
DESVIO PADRAO.....	1.6E+0002
TERCEIRO MOMENTO.....	-8.0E+0005
QUARTO MOMENTO.....	1.6E+0009
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	1.0E+0001
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	-1.8E-0001
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	2.2E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-302	E	-242	=	5
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-241	E	-182	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-181	E	-122	=	8
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-121	E	-63	=	5
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-61	E	-3	=	3
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-1	E	56	=	13
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	57	E	116	=	7
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	117	E	176	=	7
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	177	E	236	=	4
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	237	E	296	=	4

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	80
MEDIA.....	-1.6E-0002
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	6.0E-0002
DESVIO PADRAO.....	2.4E-0001
TERCEIRO MOMENTO.....	-4.8E-0002
QUARTO MOMENTO.....	7.8E-0002
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	-1.5E+0001
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	-3.3E+0000
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	2.2E+0001

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE - 1.5E+0000	E	- 1.3E+0000	=	1
NUMEROS DE PONTOS ENTRE - 1.3E+0000	E	- 1.1E+0000	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE - 1.1E+0000	E	- 8.6E-0001	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE - 8.5E-0001	E	- 6.4E-0001	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE - 6.4E-0001	E	- 4.3E-0001	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE - 4.3E-0001	E	- 2.1E-0001	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE - 2.1E-0001	E	1.3E-0003	=	43
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 3.5E-0003	E	2.2E-0001	=	17
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 2.2E-0001	E	4.3E-0001	=	1
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 4.3E-0001	E	6.4E-0001	=	0

ESTATISTICA DA VARIÁVEL DELTA DEFORMAÇÃO

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	60
MEDIA.....	2.3E-0002
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	2.7E-0003
DESVIO PADRAO.....	4.7E-0002
TERCEIRO MOMENTO.....	3.6E-0004
QUARTO MOMENTO.....	8.5E-0005
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	2.0E+0000
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	3.6E+0000
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	1.8E+0001

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE 2.0E-0004	E	2.9E-0002	=	43
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 2.9E-0002	E	5.7E-0002	=	8
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 5.7E-0002	E	8.5E-0002	=	4
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 8.6E-0002	E	1.1E-0001	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 1.1E-0001	E	1.4E-0001	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 1.4E-0001	E	1.7E-0001	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 1.7E-0001	E	2.0E-0001	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 2.0E-0001	E	2.3E-0001	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 2.3E-0001	E	2.6E-0001	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE 2.6E-0001	E	2.8E-0001	=	0

ESTATISTICA DA VARIÁVEL DEFORMAÇÃO MÉDIA

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	60
MEDIA.....	3.5E-0003
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	6.8E-0005
DESVIO PADRAO.....	7.4E-0003
TERCEIRO MOMENTO.....	9.0E-0007

QUARTO MOMENTO.....	2.0E-0000
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	2.1E+0000
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	2.2E+0000
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	6.4E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	- 6.7E-0004	E	2.2E-0003	=	43
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	2.2E-0003	E	5.0E-0003	=	6
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	5.1E-0003	E	7.9E-0003	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	7.9E-0003	E	1.1E-0002	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.1E-0002	E	1.4E-0002	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.4E-0002	E	1.6E-0002	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.6E-0002	E	1.9E-0002	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.9E-0002	E	2.2E-0002	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	2.2E-0002	E	2.5E-0002	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	2.5E-0002	E	2.8E-002	=	2

IGMA NOMINAL	1	=	155
IGMA NOMINAL	2	=	53
IGMA NOMINAL	3	=	-134
IGMA NOMINAL	4	=	37
IGMA NOMINAL	5	=	-29
IGMA NOMINAL	6	=	120
IGMA NOMINAL	7	=	-44
IGMA NOMINAL	8	=	34
IGMA NOMINAL	9	=	106
IGMA NOMINAL	10	=	51
IGMA NOMINAL	11	=	-127
IGMA NOMINAL	12	=	395
IGMA NOMINAL	13	=	141
IGMA NOMINAL	14	=	52
IGMA NOMINAL	15	=	-183
IGMA NOMINAL	16	=	212
IGMA NOMINAL	17	=	-318
IGMA NOMINAL	18	=	282
IGMA NOMINAL	19	=	-212
IGMA NOMINAL	20	=	296
IGMA NOMINAL	21	=	-113
IGMA NOMINAL	22	=	176
IGMA NOMINAL	23	=	-409
IGMA NOMINAL	24	=	226
IGMA NOMINAL	25	=	-268
IGMA NOMINAL	26	=	310
IGMA NOMINAL	27	=	-113
IGMA NOMINAL	28	=	54
IGMA NOMINAL	29	=	106
IGMA NOMINAL	30	=	60
IGMA NOMINAL	31	=	141
IGMA NOMINAL	32	=	51
IGMA NOMINAL	33	=	-183
IGMA NOMINAL	34	=	268
IGMA NOMINAL	35	=	120
IGMA NOMINAL	36	=	296
IGMA NOMINAL	37	=	-240
IGMA NOMINAL	38	=	254
IGMA NOMINAL	39	=	-318
IGMA NOMINAL	40	=	247
IGMA NOMINAL	41	=	155
IGMA NOMINAL	42	=	53
IGMA NOMINAL	43	=	-134
IGMA NOMINAL	44	=	367
IGMA NOMINAL	45	=	-289
IGMA NOMINAL	46	=	120

SIGMA NOMINAL	47	=	-400
SIGMA NOMINAL	48	=	339
SIGMA NOMINAL	49	=	106
SIGMA NOMINAL	50	=	51
SIGMA NOMINAL	51	=	-127
SIGMA NOMINAL	52	=	395
SIGMA NOMINAL	53	=	141
SIGMA NOMINAL	54	=	52
SIGMA NOMINAL	55	=	-183
SIGMA NOMINAL	56	=	212
SIGMA NOMINAL	57	=	-318
SIGMA NOMINAL	58	=	282
SIGMA NOMINAL	59	=	-212
SIGMA NOMINAL	60	=	296
SIGMA NOMINAL	61	=	-113
SIGMA NOMINAL	62	=	176
SIGMA NOMINAL	63	=	-409
SIGMA NOMINAL	64	=	226
SIGMA NOMINAL	65	=	-268
SIGMA NOMINAL	66	=	310
SIGMA NOMINAL	67	=	-113
SIGMA NOMINAL	68	=	54
SIGMA NOMINAL	69	=	106
SIGMA NOMINAL	70	=	60
SIGMA NOMINAL	71	=	141
SIGMA NOMINAL	72	=	51
SIGMA NOMINAL	73	=	-183
SIGMA NOMINAL	74	=	268
SIGMA NOMINAL	75	=	120
SIGMA NOMINAL	76	=	296
SIGMA NOMINAL	77	=	-240
SIGMA NOMINAL	78	=	254
SIGMA NOMINAL	79	=	-318
SIGMA NOMINAL	80	=	247

SIGMA LOCAL	1	=	203
SIGMA LOCAL	2	=	122
SIGMA LOCAL	3	=	-193
SIGMA LOCAL	4	=	86
SIGMA LOCAL	5	=	-68
SIGMA LOCAL	6	=	186
SIGMA LOCAL	7	=	-102
SIGMA LOCAL	8	=	80
SIGMA LOCAL	9	=	79
SIGMA LOCAL	10	=	117
SIGMA LOCAL	11	=	-190
SIGMA LOCAL	12	=	438
SIGMA LOCAL	13	=	196
SIGMA LOCAL	14	=	119
SIGMA LOCAL	15	=	-221
SIGMA LOCAL	16	=	243
SIGMA LOCAL	17	=	-353
SIGMA LOCAL	18	=	315
SIGMA LOCAL	19	=	-243
SIGMA LOCAL	20	=	330
SIGMA LOCAL	21	=	-182
SIGMA LOCAL	22	=	216
SIGMA LOCAL	23	=	-454
SIGMA LOCAL	24	=	256
SIGMA LOCAL	25	=	-300
SIGMA LOCAL	26	=	345
SIGMA LOCAL	27	=	-182
SIGMA LOCAL	28	=	123
SIGMA LOCAL	29	=	179

DEFORMACAO LOCAL	1	=	2.1E-0003
DEFORMACAO LOCAL	2	=	6.2E-0004
DEFORMACAO LOCAL	3	=	-1.7E-0003
DEFORMACAO LOCAL	4	=	4.3E-0004
DEFORMACAO LOCAL	5	=	-3.4E-0004
DEFORMACAO LOCAL	6	=	1.4E-0003
DEFORMACAO LOCAL	7	=	-5.1E-0004
DEFORMACAO LOCAL	8	=	4.0E-0004
DEFORMACAO LOCAL	9	=	1.3E-0003
DEFORMACAO LOCAL	10	=	6.0E-0004
DEFORMACAO LOCAL	11	=	-1.5E-0003
DEFORMACAO LOCAL	12	=	6.4E-0001
DEFORMACAO LOCAL	13	=	1.8E-0003
DEFORMACAO LOCAL	14	=	6.1E-0004
DEFORMACAO LOCAL	15	=	-3.2E-0003
DEFORMACAO LOCAL	16	=	6.0E-0003
DEFORMACAO LOCAL	17	=	-1.1E-0001
DEFORMACAO LOCAL	18	=	4.2E-0002
DEFORMACAO LOCAL	19	=	-6.0E-0003
DEFORMACAO LOCAL	20	=	6.2E-0002
DEFORMACAO LOCAL	21	=	-1.3E-0003
DEFORMACAO LOCAL	22	=	2.8E-0003
DEFORMACAO LOCAL	23	=	-8.6E-0001
DEFORMACAO LOCAL	24	=	8.7E-0003
DEFORMACAO LOCAL	25	=	-2.8E-0002
DEFORMACAO LOCAL	26	=	8.9E-0002
DEFORMACAO LOCAL	27	=	-1.3E-0003
DEFORMACAO LOCAL	28	=	6.3E-0004
DEFORMACAO LOCAL	29	=	1.3E-0003

IGMA LOCAL	30 =	134	DEFORMACAO LOCAL	30 =	7.1E-0004
IGMA LOCAL	31 =	196	DEFORMACAO LOCAL	31 =	1.9E-0003
IGMA LOCAL	32 =	117	DEFORMACAO LOCAL	32 =	6.0E-0004
IGMA LOCAL	33 =	-221	DEFORMACAO LOCAL	33 =	-3.2E-0003
IGMA LOCAL	34 =	300	DEFORMACAO LOCAL	34 =	2.8E-0002
IGMA LOCAL	35 =	186	DEFORMACAO LOCAL	35 =	1.4E-0003
IGMA LOCAL	36 =	330	DEFORMACAO LOCAL	36 =	6.2E-0002
IGMA LOCAL	37 =	-270	DEFORMACAO LOCAL	37 =	-1.3E-0002
IGMA LOCAL	38 =	285	DEFORMACAO LOCAL	38 =	1.9E-0002
IGMA LOCAL	39 =	-353	DEFORMACAO LOCAL	39 =	-1.1E-0001
IGMA LOCAL	40 =	277	DEFORMACAO LOCAL	40 =	1.6E-0002
IGMA LOCAL	41 =	203	DEFORMACAO LOCAL	41 =	2.1E-0003
IGMA LOCAL	42 =	122	DEFORMACAO LOCAL	42 =	6.2E-004
IGMA LOCAL	43 =	-193	DEFORMACAO LOCAL	43 =	-1.7E-0003
IGMA LOCAL	44 =	407	DEFORMACAO LOCAL	44 =	3.5E-0001
IGMA LOCAL	45 =	-322	DEFORMACAO LOCAL	45 =	-5.1E-0002
IGMA LOCAL	46 =	186	DEFORMACAO LOCAL	46 =	1.4E-0003
IGMA LOCAL	47 =	-485	DEFORMACAO LOCAL	47 =	-1.5E+0000
IGMA LOCAL	48 =	376	DEFORMACAO LOCAL	48 =	1.8E-0001
IGMA LOCAL	49 =	179	DEFORMACAO LOCAL	49 =	1.3E-0003
IGMA LOCAL	50 =	117	DEFORMACAO LOCAL	50 =	6.0E-0004
IGMA LOCAL	51 =	-190	DEFORMACAO LOCAL	51 =	-1.5E-0003
IGMA LOCAL	52 =	438	DEFORMACAO LOCAL	52 =	6.4E-0001
IGMA LOCAL	53 =	196	DEFORMACAO LOCAL	53 =	1.8E-0003
IGMA LOCAL	54 =	119	DEFORMACAO LOCAL	54 =	6.1E-0004
IGMA LOCAL	55 =	-221	DEFORMACAO LOCAL	55 =	-3.2E-0003
IGMA LOCAL	56 =	243	DEFORMACAO LOCAL	56 =	6.0E-0003
IGMA LOCAL	57 =	-353	DEFORMACAO LOCAL	57 =	-1.1E-0001
IGA LOCAL	58 =	315	DEFORMACAO LOCAL	58 =	4.2E-0002
IGMA LOCAL	59 =	-243	DEFORMACAO LOCAL	59 =	-6.0E-0003
IGMA LOCAL	60 =	330	DEFORMACAO LOCAL	60 =	6.2E-0002
IGMA LOCAL	61 =	-182	DEFORMACAO LOCAL	61 =	-1.3E-0003
IGMA LOCAL	62 =	216	DEFORMACAO LOCAL	62 =	2.8E-0003
IGMA LOCAL	63 =	-454	DEFORMACAO LOCAL	63 =	-8.6E-0001
IGMA LOCAL	64 =	256	DEFORMACAO LOCAL	64 =	8.7E-0003
IGMA LOCAL	65 =	-300	DEFORMACAO LOCAL	65 =	-2.8E-0002
IGMA LOCAL	66 =	345	DEFORMACAO LOCAL	66 =	8.9E-0002
IGMA LOCAL	67 =	-182	DEFORMACAO LOCAL	67 =	-1.3E-0003
IGMA LOCAL	68 =	123	DEFORMACAO LOCAL	68 =	6.3E-0004
IGMA LOCAL	69 =	179	DEFORMACAO LOCAL	69 =	1.3E-0003
IGMA LOCAL	70 =	134	DEFORMACAO LOCAL	70 =	7.1E-0004
IGMA LOCAL	71 =	196	DEFORMACAO LOCAL	71 =	1.8E-0003
IGMA LOCAL	72 =	117	DEFORMACAO LOCAL	72 =	6.0E-0004
IGMA LOCAL	73 =	-221	DEFORMACAO LOCAL	73 =	-3.2E-0003
IGMA LOCAL	74 =	300	DEFORMACAO LOCAL	74 =	2.8E-0002
IGMA LOCAL	75 =	186	DEFORMACAO LOCAL	75 =	1.4E-0003
IGMA LOCAL	76 =	330	DEFORMACAO LOCAL	76 =	6.2E-0002
IGMA LOCAL	77 =	-270	DEFORMACAO LOCAL	77 =	-1.3E-0002
IGMA LOCAL	78 =	285	DEFORMACAO LOCAL	78 =	1.9E-0002
IGMA LOCAL	79 =	-353	DEFORMACAO LOCAL	79 =	-1.1E-0001
IGMA LOCAL	80 =	277	DEFORMACAO LOCAL	80 =	1.6E-0002

DELTA SIGMA	1 =	80	DELTA DEFORMACAO	1 =	4.0E-0004
DELTA SIGMA	2 =	310	DELTA DEFORMACAO	2 =	1.8E-0003
DELTA SIGMA	3 =	150	DELTA DEFORMACAO	3 =	7.5E-0004
DELTA SIGMA	4 =	60	DELTA DEFORMACAO	4 =	3.0E-0004
DELTA SIGMA	5 =	280	DELTA DEFORMACAO	5 =	1.5E-0003
DELTA SIGMA	6 =	290	DELTA DEFORMACAO	6 =	1.6E-0003
DELTA SIGMA	7 =	280	DELTA DEFORMACAO	7 =	1.5E-0003
DELTA SIGMA	8 =	310	DELTA DEFORMACAO	8 =	1.8E-0003
DELTA SIGMA	9 =	80	DELTA DEFORMACAO	9 =	4.0E-0004
DELTA SIGMA	10 =	240	DELTA DEFORMACAO	10 =	1.2E-0003
DELTA SIGMA	11 =	80	DELTA DEFORMACAO	11 =	4.0E-0004
DELTA SIGMA	12 =	340	DELTA DEFORMACAO	12 =	2.2E-0003
DELTA SIGMA	13 =	600	DELTA DEFORMACAO	13 =	5.8E-0002

ELTA SIGMA	14 =	560	DELTA DEFORMACAO	14 =	3.4E-0002
ELTA SIGMA	15 =	400	DELTA DEFORMACAO	15 =	3.9E-0003
ELTA SIGMA	16 =	510	DELTA DEFORMACAO	16 =	1.7E-0002
ELTA SIGMA	17 =	400	DELTA DEFORMACAO	17 =	3.9E-0003
ELTA SIGMA	18 =	670	DELTA DEFORMACAO	18 =	1.4E-0001
ELTA SIGMA	19 =	560	DELTA DEFORMACAO	19 =	3.4E-0002
ELTA SIGMA	20 =	40	DELTA DEFORMACAO	20 =	2.0E-0004
ELTA SIGMA	21 =	80	DELTA DEFORMACAO	21 =	4.0E-0004
ELTA SIGMA	22 =	340	DELTA DEFORMACAO	22 =	2.2E-0003
ELTA SIGMA	23 =	530	DELTA DEFORMACAO	23 =	2.2E-0002
ELTA SIGMA	24 =	110	DELTA DEFORMACAO	24 =	5.5E-0004
ELTA SIGMA	25 =	550	DELTA DEFORMACAO	25 =	2.9E-0002
ELTA SIGMA	26 =	600	DELTA DEFORMACAO	26 =	5.0E-0002
ELTA SIGMA	27 =	550	DELTA DEFORMACAO	27 =	2.9E-0002
ELTA SIGMA	28 =	640	DELTA DEFORMACAO	28 =	9.7E-0002
ELTA SIGMA	29 =	70	DELTA DEFORMACAO	29 =	3.5E-0004
ELTA SIGMA	30 =	70	DELTA DEFORMACAO	30 =	3.5E-0004
ELTA SIGMA	31 =	80	DELTA DEFORMACAO	31 =	4.0E-0004
ELTA SIGMA	32 =	70	DELTA DEFORMACAO	32 =	3.5E-0004
ELTA SIGMA	33 =	310	DELTA DEFORMACAO	33 =	1.8E-0003
ELTA SIGMA	34 =	510	DELTA DEFORMACAO	34 =	1.7E-0002
ELTA SIGMA	35 =	510	DELTA DEFORMACAO	35 =	1.7E-0002
ELTA SIGMA	36 =	730	DELTA DEFORMACAO	36 =	2.0E-0001
ELTA SIGMA	37 =	60	DELTA DEFORMACAO	37 =	3.0E-0004
ELTA SIGMA	38 =	200	DELTA DEFORMACAO	38 =	1.0E-0003
ELTA SIGMA	39 =	60	DELTA DEFORMACAO	39 =	3.0E-0004
ELTA SIGMA	40 =	310	DELTA DFORMACAO	40 =	1.8E-0003
ELTACSIGMA	41 =	80	DELTA DEFORMACAO	41 =	4.0E-0004
ELTA SIGMA	42 =	240	DELTA DEFORMACAO	42 =	1.2E-0003
ELTA SIGMA	43 =	80	DELTA DEFORMACAO	43 =	4.0E-0004
ELTA SIGMA	44 =	340	DELTA DEFORMACAO	44 =	2.2E-0003
ELTA SIGMA	45 =	600	DELTA DEFORMACAO	45 =	5.0E-0002
ELTA SIGMA	46 =	560	DELTA DEFORMACAO	46 =	3.4E-0002
ELTA SIGMA	47 =	400	DELTA DEFORMACAO	47 =	3.9E-0003
ELTA SIGMA	48 =	510	DELTA DEFORMACAO	48 =	1.7E-0002
ELTA SIGMA	49 =	400	DELTA DEFORMACAO	49 =	3.9E-0003
ELTA SIGMA	50 =	670	DELTA DEFORMACAO	50 =	1.4E-0001
ELTA SIGMA	51 =	560	DELTA DEFORMACAO	51 =	3.4E-0002
ELTA SIGMA	52 =	40	DELTA DEFORMACAO	52 =	2.0E-0004
ELTA SIGMA	53 =	80	DELTA DEFORMACAO	53 =	4.0E-0004
ELTA SIGMA	54 =	340	DELTA DEFORMACAO	54 =	2.2E-0003
ELTA SIGMA	55 =	530	DELTA DEFORMACAO	55 =	2.2E-0002
ELTA SIGMA	56 =	110	DELTA DEFORMACAO	56 =	5.5E-0004
ELTA SIGMA	57 =	550	DELTA DEFORMACAO	57 =	2.9E-0002
ELTA SIGMA	58 =	600	DELTA DEFORMACAO	58 =	5.0E-0002
ELTA SIGMA	59 =	550	DELTA DEFORMACAO	59 =	2.9E-0002
ELTA SIGMA	60 =	640	DELTA DEFORMACAO	60 =	9.7E-0002
IGMA MEDIO	1 =	46	DEFORMACAO MEDIA	1 =	2.3E-0004
IGMA MEDIO	2 =	19	DEFORMACAO MEDIA	2 =	9.3E-0005
IGMA MEDIO	3 =	74	DEFORMACAO MEDIA	3 =	3.7E-0004
IGMA MEDIO	4 =	68	DEFORMACAO MEDIA	4 =	3.4E-0004
IGMA MEDIO	5 =	-143	DEFORMACAO MEDIA	5 =	-6.6E-0004
IGMA MEDIO	6 =	-153	DEFORMACAO MEDIA	6 =	-6.7E-0004
IGMA MEDIO	7 =	11	DEFORMACAO MEDIA	7 =	5.7E-0005
IGMA MEDIO	8 =	31	DEFORMACAO MEDIA	8 =	1.5E-0004
IGMA MEDIO	9 =	48	DEFORMACAO MEDIA	9 =	2.4E-0004
IGMA MEDIO	10 =	-105	DEFORMACAO MEDIA	10 =	-5.2E-0004
IGMA MEDIO	11 =	-146	DEFORMACAO MEDIA	11 =	-6.6E-0004
IGMA MEDIO	12 =	-55	DEFORMACAO MEDIA	12 =	-2.0E-0004
IGMA MEDIO	13 =	220	DEFORMACAO MEDIA	13 =	3.2E-0003
IGMA MEDIO	14 =	296	DEFORMACAO MEDIA	14 =	2.6E-0002
IGMA MEDIO	15 =	-164	DEFORMACAO MEDIA	15 =	-6.4E-0004

SIGMA MEDIO	16 =	-271	DEFORMAÇÃO MEDIA	16 =	1.0E-0002
SIGMA MEDIO	17 =	-74	DEFORMAÇÃO MEDIA	17 =	-3.7E-0004
SIGMA MEDIO	18 =	81	DEFORMAÇÃO MEDIA	18 =	4.0E-0004
SIGMA MEDIO	19 =	241	DEFORMAÇÃO MEDIA	19 =	5.7E-0003
SIGMA MEDIO	20 =	170	DEFORMAÇÃO MEDIA	20 =	1.1E-0003
SIGMA MEDIO	21 =	48	DEFORMAÇÃO MEDIA	21 =	2.4E-0004
SIGMA MEDIO	22 =	21	DEFORMAÇÃO MEDIA	22 =	1.1E-0004
SIGMA MEDIO	23 =	156	DEFORMAÇÃO MEDIA	23 =	9.0E-0004
SIGMA MEDIO	24 =	289	DEFORMAÇÃO MEDIA	24 =	2.2E-0002
SIGMA MEDIO	25 =	-239	DEFORMAÇÃO MEDIA	25 =	3.0E-0003
SIGMA MEDIO	26 =	-288	DEFORMAÇÃO MEDIA	26 =	1.8E-0002
SIGMA MEDIO	27 =	174	DEFORMAÇÃO MEDIA	27 =	1.2E-0003
SIGMA MEDIO	28 =	212	DEFORMAÇÃO MEDIA	28 =	2.6E-0003
SIGMA MEDIO	29 =	140	DEFORMAÇÃO MEDIA	29 =	7.5E-0004
SIGMA MEDIO	30 =	55	DEFORMAÇÃO MEDIA	30 =	2.8E-0004
SIGMA MEDIO	31 =	46	DEFORMAÇÃO MEDIA	31 =	2.3E-0004
SIGMA MEDIO	32 =	-131	DEFORMAÇÃO MEDIA	32 =	-6.3E-0004
SIGMA MEDIO	33 =	89	DEFORMAÇÃO MEDIA	33 =	4.5E-0004
SIGMA MEDIO	34 =	-302	DEFORMAÇÃO MEDIA	34 =	2.8E-0002
SIGMA MEDIO	35 =	3	DEFORMAÇÃO MEDIA	35 =	1.7E-0005
SIGMA MEDIO	36 =	59	DEFORMAÇÃO MEDIA	36 =	2.9E-0004
SIGMA MEDIO	37 =	68	DEFORMAÇÃO MEDIA	37 =	3.4E-0004
SIGMA MEDIO	38 =	-65	DEFORMAÇÃO MEDIA	38 =	-3.3E-0004
SIGMA MEDIO	39 =	-140	DEFORMAÇÃO MEDIA	39 =	-6.5E-0004
SIGMA MEDIO	40 =	-39	DEFORMAÇÃO MEDIA	40 =	-2.0E-0004
SIGMA MEDIO	41 =	48	DEFORMAÇÃO MEDIA	41 =	2.4E-0004
SIGMA MEDIO	42 =	-105	DEFORMAÇÃO MEDIA	42 =	-5.2E-0004
SIGMA MEDIO	43 =	-146	DEFORMAÇÃO MEDIA	43 =	-6.6E-0004
SIGMA MEDIO	44 =	-55	DEFORMAÇÃO MEDIA	44 =	-2.8E-0004
SIGMA MEDIO	45 =	220	DEFORMAÇÃO MEDIA	45 =	3.2E-0003
SIGMA MEDIO	46 =	296	DEFORMAÇÃO MEDIA	46 =	2.6E-0002
SIGMA MEDIO	47 =	-164	DEFORMAÇÃO MEDIA	47 =	-6.4E-0004
SIGMA MEDIO	48 =	-271	DEFORMAÇÃO MEDIA	48 =	1.0E-0002
SIGMA MEDIO	49 =	-74	DEFORMAÇÃO MEDIA	49 =	-3.7E-0004
SIGMA MEDIO	50 =	81	DEFORMAÇÃO MEDIA	50 =	4.0E-0004
SIGMA MEDIO	51 =	241	DEFORMAÇÃO MEDIA	51 =	5.7E-0003
SIGMA MEDIO	52 =	170	DEFORMAÇÃO MEDIA	52 =	1.1E-0003
SIGMA MEDIO	53 =	48	DEFORMAÇÃO MEDIA	53 =	2.4E-0004
SIGMA MEDIO	54 =	21	DEFORMAÇÃO MEDIA	54 =	1.1E-0004
SIGMA MEDIO	55 =	156	DEFORMAÇÃO MEDIA	55 =	9.0E-0004
SIGMA MEDIO	56 =	289	DEFORMAÇÃO MEDIA	56 =	2.2E-0002
SIGMA MEDIO	57 =	-239	DEFORMAÇÃO MEDIA	57 =	3.0E-0003
SIGMA MEDIO	58 =	-288	DEFORMAÇÃO MEDIA	58 =	1.8E-0002
SIGMA MEDIO	59 =	174	DEFORMAÇÃO MEDIA	59 =	1.2E-0003
SIGMA MEDIO	60 =	212	DEFORMAÇÃO MEDIA	60 =	2.6E-0003

PROPAGACAO - MORROW

DA DE NUCLEACAO 2.6E+0001 ciclos
 NO 1.0E+0000

PROPAGACAO

COMPRIMENTO INICIAL DA TRINCA 2.5E-0004 m

TENSAO MAXIMA > TENSAO DE ESCOAMENTO

TENSAO MAXIMA 3.1E+0002
 TENSAO DE ESCOAMENTO 2.6E+0002

CICLO 26

COMPRIMENTO FINAL DA TRINCA 2.8E-0004 m

COMPRIMENTO CRITICO DA TRINCA 1.0E-0002 m

DA PROPAGACAO 3.4E+0001 ciclos

DA TOTAL 6.0E+0001 ciclos

PROPAGACAO - INCLINACOES UNIVERSAIS

NO 2.1E-0001

TESTE DE CICLO - WHOLER

TEMPERATURA 25.00

CORRECCAO DA TENSAO (FATORES DE REDUCCAO DA RESISTENCIA)

TENSAO LIMITE SUPERIOR DA CURVA 310.50
 TENSAO LIMITE INFERIOR DA CURVA 67.84

COEFICIENTE DE CORRECCAO POR TENSAO MEDIA

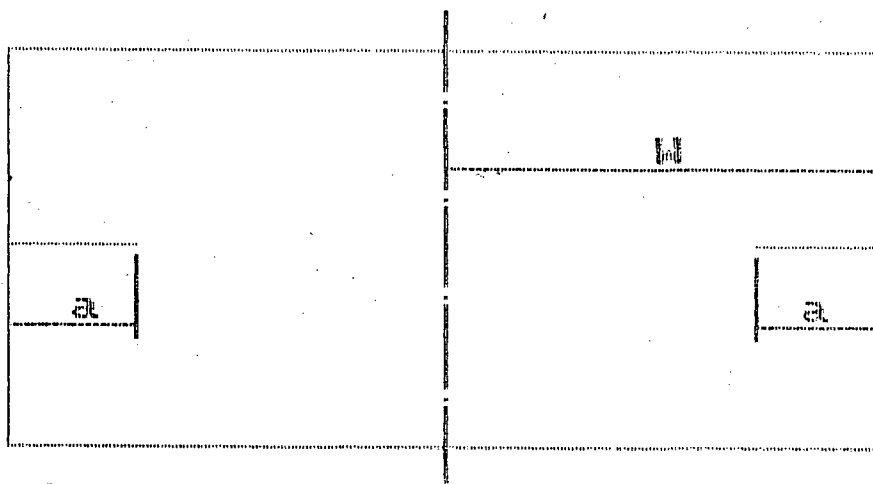
FACTOR DE CORRECCAO 2

b) Geometria com defeito

- Propagação

Síntese das opções	
MATERIAL	SAE 1005-1009
GEOMETRIA	PLACA COM DEFEITO
ANALISE	DINAMICA
CARBA.	TENSAO NOMINAL
CARREGAMENTO	TABELA
CURVAS QUE SERAO OBTIDAS:	
TENSAO x DEFORMACAO	
TENSAO x PONTOS	
DENSIDADE ESPECTRAL	
ARQUIVO DE SAIDA .. RESISTE.SAI	
AFERTE -> SE NAO DESEJA VOLTAR PARA O MENU PRINCIPAL	

Placa Finita com Trincas nas
Bordas II Sob Tração



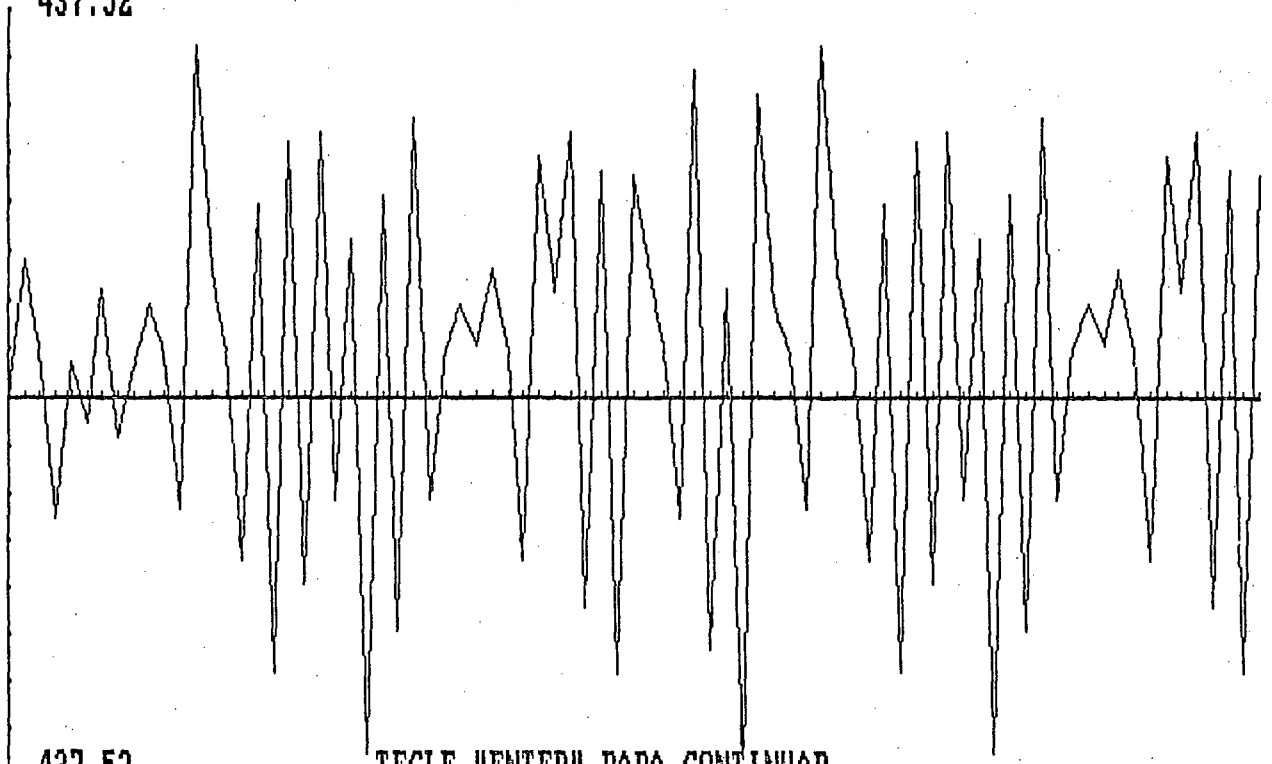
(m) $a=0.005$
(m) $H=0.1$

RESISTE 1.0

GRAFICO SIGMA NOMINAL

ESCALA 1:54.7

437.52



-437.52

TECLE "ENTER" PARA CONTINUAR

SOFTWARE RESISTE 1.0

SIMULACAO NUMERICA DE FADIGA

MATERIAL ... : SAE 1005-1009

PROPRIEDADES :

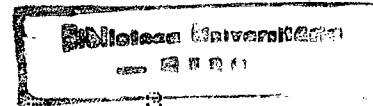
Bhn : 9.8E+0001
 b : -1.1E-0001
 c : -3.9E-0001
 c_l : 2.4E-0012
 DK0 : 3.4E+0000
 E : 2.0E+0005
 ep_f : 1.6E+0000
 ep_f_l : 1.0E-0001
 f1 : 1.4E+0003
 f2 : 2.0E+0002
 f3 : 1.0E+0002
 fcev : 9.0E-0001
 H : 1.4E+0003
 K : 5.3E+0002
 KIC : 6.0E+0001
 K_l : 4.6E+0002
 m : 3.3E+0000
 n : 1.6E-0001
 n_l : 1.2E-0001
 S_esc : 2.6E+0002
 S_esc_l : 2.3E+0002
 S_f : 8.5E+0002
 S_f_l : 6.4E+0002
 S_rup : 3.5E+0002
 Ti : 4.5E+0002
 Ts : 5.5E+0002

ESTATISTICA DA VARIAVEL SIGMA NOMINAL

NUMERO DE PONTOS GERADOS..... 80
 MEDIA..... 3.9E+0001
 VALOR MEDIO QUADRATICO..... 4.7E+0004
 DESVIO PADRAO..... 2.1E+0002
 TERCEIRO MOMENTO..... -4.0E+0006
 QUARTO MOMENTO..... 4.6E+0009
 COEFICIENTE DE DISPERSAO..... 5.6E+0000
 COEFICIENTE DE SIMETRIA..... -4.1E-0001
 COEFICIENTE DE PLANICIDADE..... 2.2E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-437	E	-354	=	3
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-352	E	-270	=	5
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-269	E	-187	=	6
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-186	E	-104	=	12
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-102	E	-21	=	2
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-19	E	62	=	14
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	63	E	145	=	12



NUMEROS DE PONTOS ENTRE	147	E	228
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	230	E	311
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	313	E	395

=	3
=	14
=	2

SIGMA NOMINAL	1	=	155
SIGMA NOMINAL	2	=	53
SIGMA NOMINAL	3	=	-134
SIGMA NOMINAL	4	=	37
SIGMA NOMINAL	5	=	-29
SIGMA NOMINAL	6	=	120
SIGMA NOMINAL	7	=	-44
SIGMA NOMINAL	8	=	34
SIGMA NOMINAL	9	=	106
SIGMA NOMINAL	10	=	51
SIGMA NOMINAL	11	=	-127
SIGMA NOMINAL	12	=	395
SIGMA NOMINAL	13	=	141
SIGMA NOMINAL	14	=	52
SIGMA NOMINAL	15	=	-183
SIGMA NOMINAL	16	=	212
SIGMA NOMINAL	17	=	-318
SIGMA NOMINAL	18	=	282
SIGMA NOMINAL	19	=	-212
SIGMA NOMINAL	20	=	296
SIGMA NOMINAL	21	=	-113
SIGMA NOMINAL	22	=	176
SIGMA NOMINAL	23	=	-409
SIGMA NOMINAL	24	=	226
SIGMA NOMINAL	25	=	-268
SIGMA NOMINAL	26	=	310
SIGMA NOMINAL	27	=	-113
SIGMA NOMINAL	28	=	54
SIGMA NOMINAL	29	=	106
SIGMA NOMINAL	30	=	60
SIGMA NOMINAL	31	=	141
SIGMA NOMINAL	32	=	51
SIGMA NOMINAL	33	=	-183
SIGMA NOMINAL	34	=	268
SIGMA NOMINAL	35	=	120
SIGMA NOMINAL	36	=	296
SIGMA NOMINAL	37	=	-240
SIGMA NOMINAL	38	=	254
SIGMA NOMINAL	39	=	-318
SIGMA NOMINAL	40	=	247
SIGMA NOMINAL	41	=	155
SIGMA NOMINAL	42	=	53
SIGMA NOMINAL	43	=	-134
SIGMA NOMINAL	44	=	367
SIGMA NOMINAL	45	=	-289
SIGMA NOMINAL	46	=	120
SIGMA NOMINAL	47	=	-408
SIGMA NOMINAL	48	=	339
SIGMA NOMINAL	49	=	106
SIGMA NOMINAL	50	=	51
SIGMA NOMINAL	51	=	-127
SIGMA NOMINAL	52	=	395
SIGMA NOMINAL	53	=	141
SIGMA NOMINAL	54	=	52
SIGMA NOMINAL	55	=	-183

SIGMA NOMINAL	56 =	-212
SIGMA NOMINAL	57 =	-318
SIGMA NOMINAL	58 =	282
SIGMA NOMINAL	59 =	-212
SIGMA NOMINAL	60 =	296
SIGMA NOMINAL	61 =	-113
SIGMA NOMINAL	62 =	176
SIGMA NOMINAL	63 =	-409
SIGMA NOMINAL	64 =	226
SIGMA NOMINAL	65 =	-268
SIGMA NOMINAL	66 =	310
SIGMA NOMINAL	67 =	-113
SIGMA NOMINAL	68 =	54
SIGMA NOMINAL	69 =	106
SIGMA NOMINAL	70 =	60
SIGMA NOMINAL	71 =	141
SIGMA NOMINAL	72 =	51
SIGMA NOMINAL	73 =	-183
SIGMA NOMINAL	74 =	268
SIGMA NOMINAL	75 =	120
SIGMA NOMINAL	76 =	296
SIGMA NOMINAL	77 =	-240
SIGMA NOMINAL	78 =	254
SIGMA NOMINAL	79 =	-318
SIGMA NOMINAL	80 =	247

PROPAGACAO

TAMANHO INICIAL DA TRINCA.....	1.0E-0003 m
DK < DK0	
DK	2.7E+0000
DK0	3.4E+0000
CICLO	1.0E+0001
TENSAO MAXIMA > TENSAO DE ESCOAMENTO	
TENSAO MAXIMA	7.2E+0002
TENSAO DE ESCOAMENTO	2.6E+0002
CICLO	12
TAMANHO FINAL DA TRINCA	2.1E-0003 m
TAMANHO CRITICO DA TRINCA	3.2E-0003 m
VIDA PROPAGACAO.....	5.6E+0001 ciclo
VIDA TOTAL.....	5.7E+0001 ciclo

G2 - Carregamento em bloco

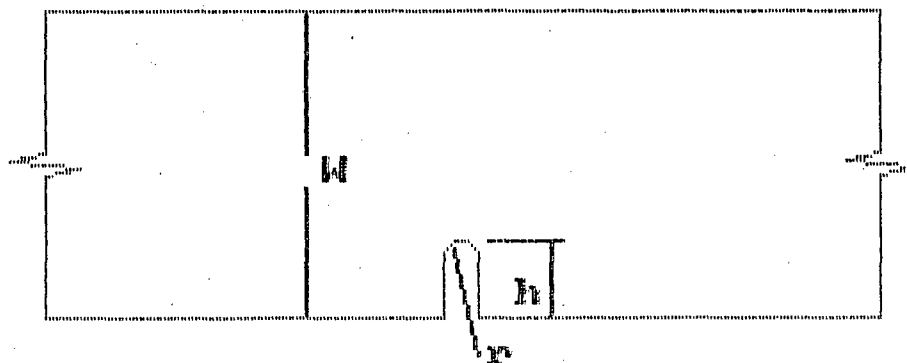
- Baixo ciclo

Blocos	
NUMERO MAXIMO DE BLOCOS	=> 4
NUMERO DE NIVEIS DO BLOCO 1	=> 1
NIVEL 1	
TENSAO MAXIMA	=> 250
TENSAO MINIMA	=> -50
NUMERO DE CICLOS	=> 20

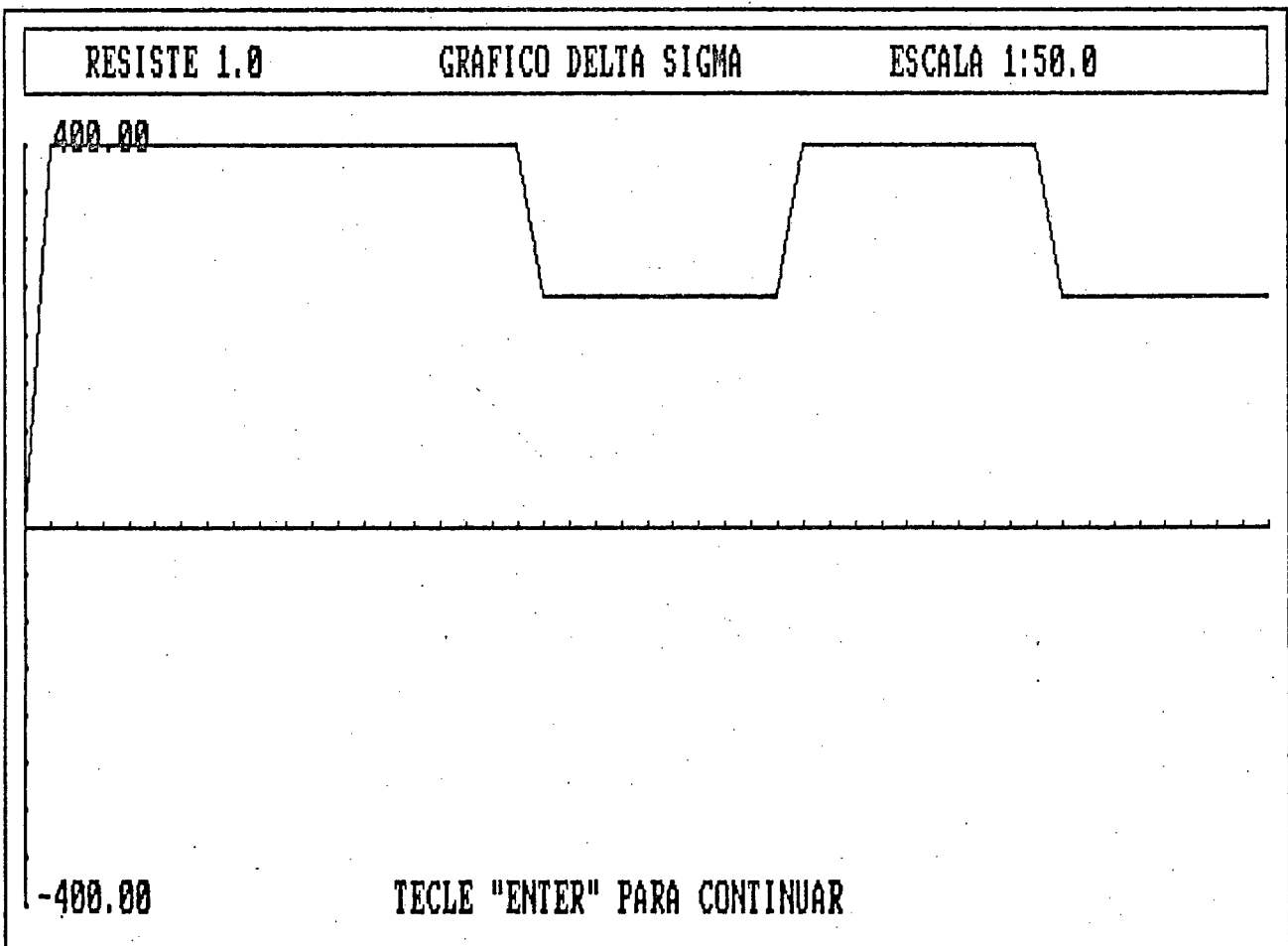
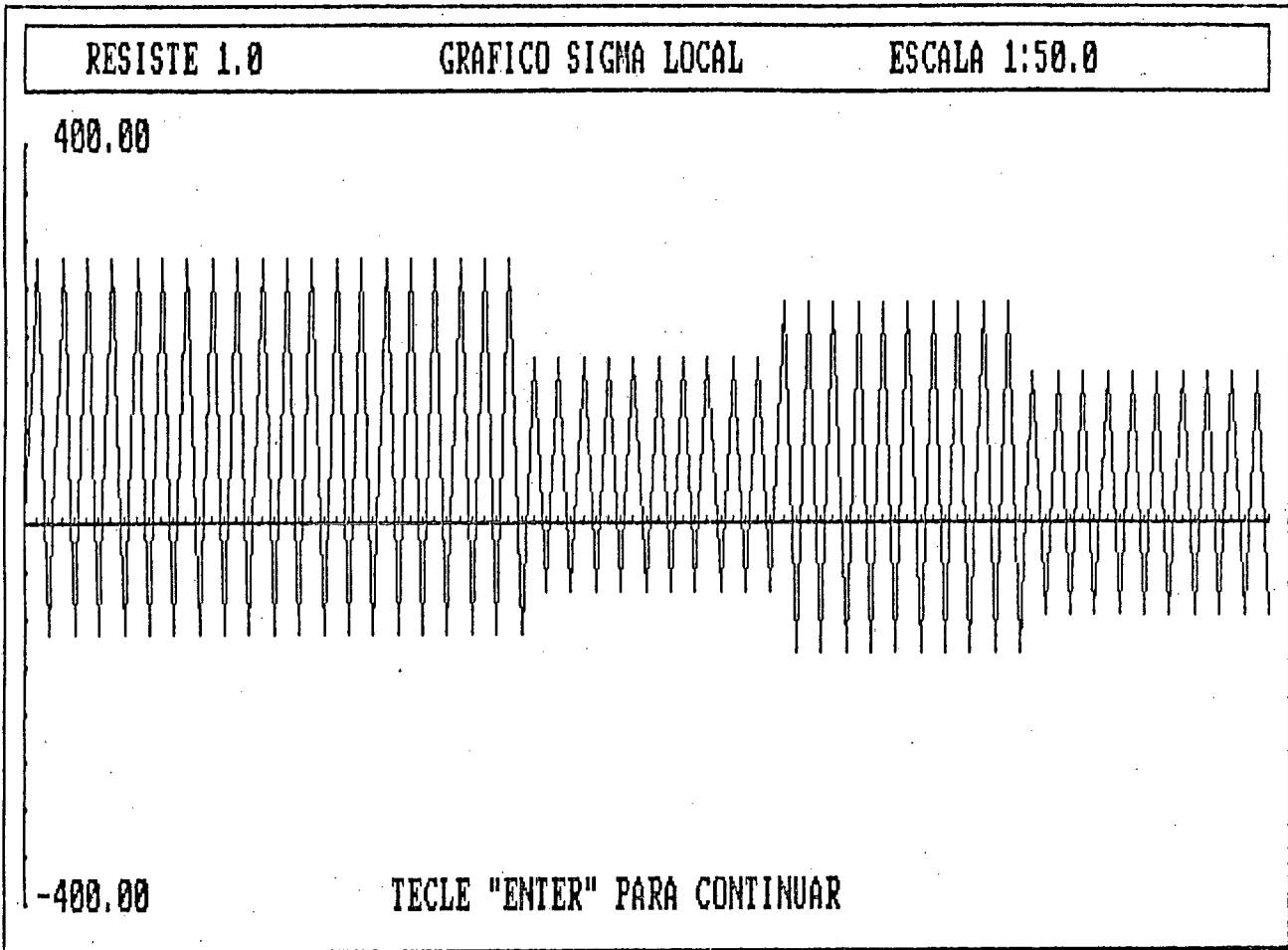
Sintese das opcoes	
MATERIAL	SAE 1005-1009
GEOMETRIA	ELEMENTO SEM DEFEITO
ANALISE	DINAMICA
CARGA	TENSAO NOMINAL
CARREGAMENTO	BLOCOS
OBTENSAO DA TENSAO ..	REGRA LINEAR EP
CICLO	BAIXO
VIDA	MORROW
CURVAS QUE SERAO OBTIDAS:	
TENSÃO x DEFORMAÇÃO	
TENSÃO x PONTOS	

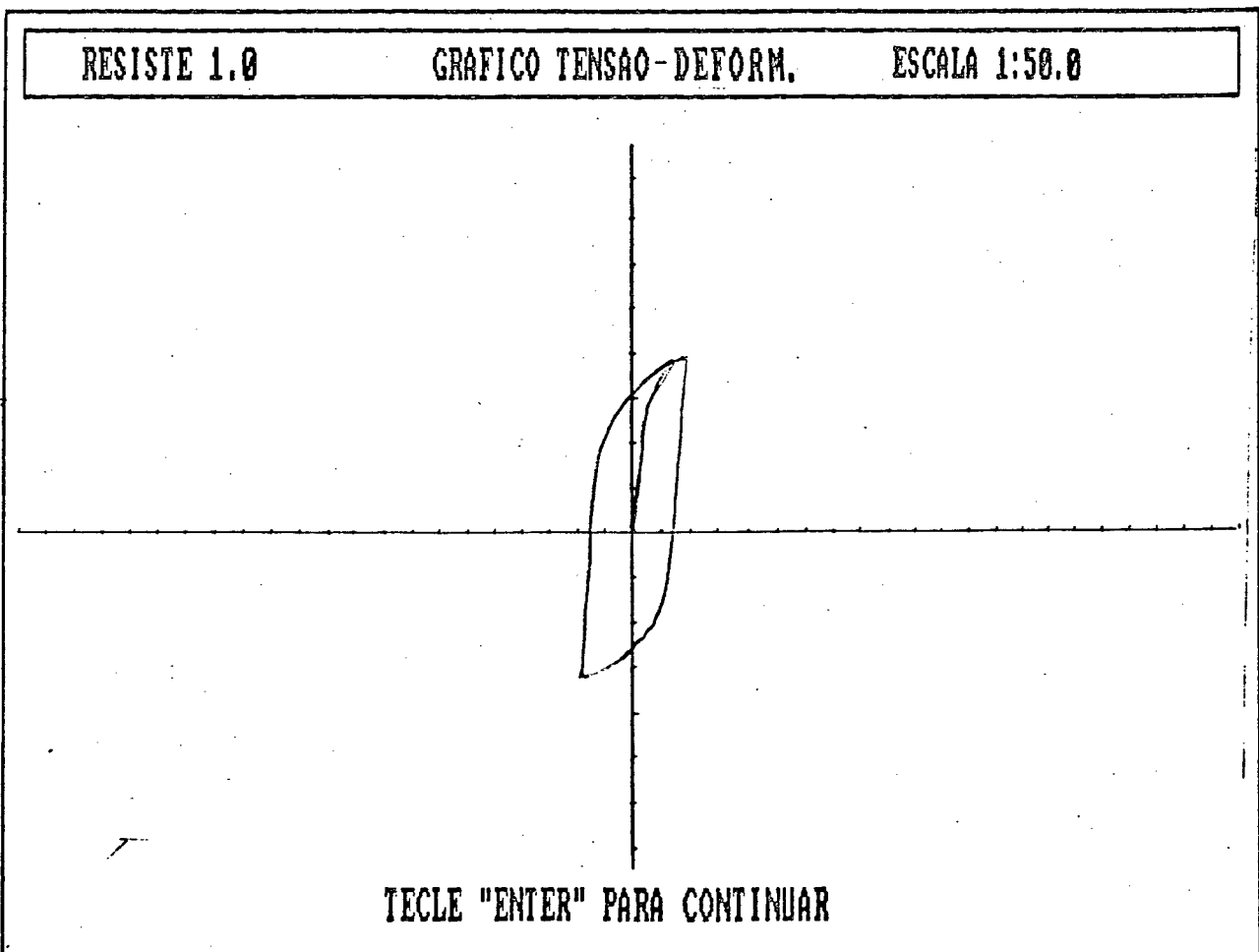
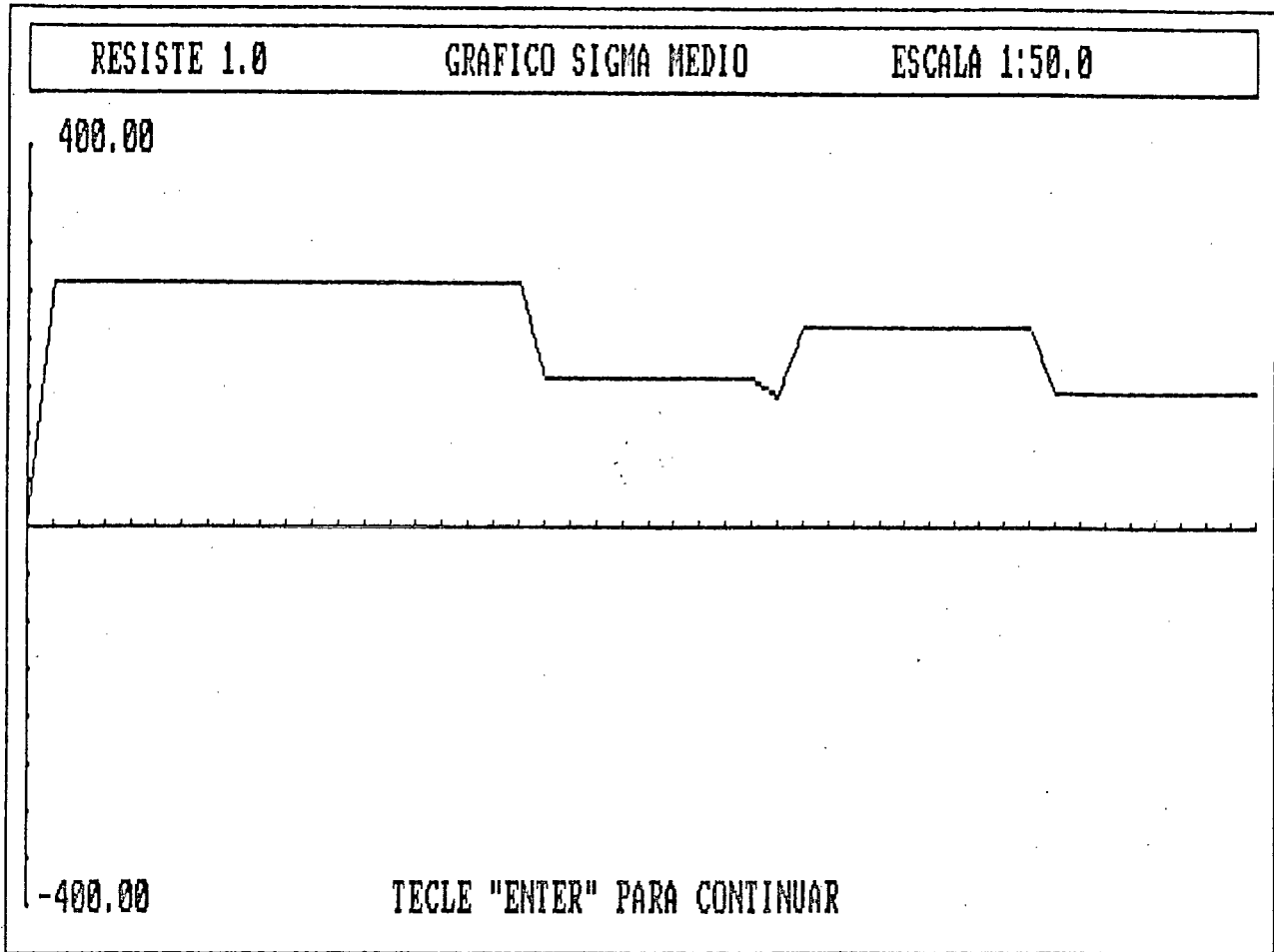
ARQUIVO DE SAIDA .. RESISTE.SAI	
APERTE -> SE NAO DESEJA VOLTAR PARA O MENU PRINCIPAL	

Elemento de Seccao Retangular com
Entalhe em "U" sob Tricao



(mm) $h=10$
(mm) $W=50$
(mm) $r=5$





SOFTWARE RESISTE 1.0

SIMULACAO NUMERICA DE FADIGA

MATERIAL ... : SAE 1005-1009

PROPRIEDADES :

Bhn : 9.8E+0001
 b : -1.1E-0001
 c : -3.9E-0001
 c_l : 2.4E-0012
 DK0 : 3.4E+0000
 E : 2.0E+0005
 ep_f : 1.6E+0000
 ep_f_l : 1.0E-0001
 f1 : 1.4E+0003
 f2 : 2.0E+0002
 f3 : 1.0E+0002
 fcev : 9.0E-0001
 H : 1.4E+0003
 K : 5.3E+0002
 KIC : 6.0E+0001
 K_l : 4.6E+0002
 m : 3.3E+0000
 n : 1.6E-0001
 n_l : 1.2E-0001
 S_esc : 2.6E+0002
 S_esc_l : 2.3E+0002
 S_f : 8.5E+0002
 S_f_l : 6.4E+0002
 S_rup : 3.5E+0002
 Ti : 4.5E+0002
 Ts : 5.5E+0002

CALCULO DAS TENSOES : REGRA LINEAR ENC. POTENCIAL

FATOR DE CONCENTRACAO DE TENSAO 2.4E+0000

ESTATISTICA DA VARIAVEL SIGMA LOCAL

NUMERO DE PONTOS GERADOS..... 100
 MEDIA..... 6.8E+0001
 VALOR MEDIO QUADRATICO..... 2.9E+0004
 DESVIO PADRAO..... 1.6E+0002
 TERCEIRO MOMENTO..... 4.1E+0005
 QUARTO MOMENTO..... 7.9E+0008
 COEFICIENTE DE DISPERSAO..... 2.3E+0000
 COEFICIENTE DE SIMETRIA..... 1.0E-0001
 COEFICIENTE DE PLANICIDADE..... 1.3E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE -115 E -76 = 30
 NUMEROS DE PONTOS ENTRE -75 E -36 = 20
 NUMEROS DE PONTOS ENTRE -35 E 3 = 0

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	3	E	42	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	43	E	82	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	83	E	122	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	122	E	161	=	10
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	162	E	201	=	20
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	202	E	240	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	241	E	280	=	0

ESTATISTICA DA VARIÁVEL DELTA SIGMA

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	49
MEDIA.....	3.0E+0002
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	9.7E+0004
DESVIO PADRAO.....	8.0E+0001
TERCEIRO MOMENTO.....	2.0E+0005
QUARTO MOMENTO.....	5.2E+0007
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	2.7E-0001
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	3.9E-0001
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	1.3E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	210	E	229	=	12
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	229	E	248	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	248	E	267	=	18
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	267	E	286	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	286	E	305	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	305	E	324	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	324	E	343	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	343	E	362	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	362	E	381	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	381	E	400	=	19

ESTATISTICA DA VARIÁVEL SIGMA MEDIO

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	49
MEDIA.....	1.9E+0002
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	4.2E+0004
DESVIO PADRAO.....	7.2E+0001
TERCEIRO MOMENTO.....	-5.5E+0005
QUARTO MOMENTO.....	1.7E+0008
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	3.8E-0001
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	-1.5E+0000
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	6.6E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-77	E	-44	=	1
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-43	E	-10	=	1
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	-9	E	23	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	24	E	57	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	58	E	91	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	91	E	125	=	1
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	125	E	158	=	9
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	159	E	192	=	18
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	193	E	226	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	227	E	260	=	0

ESTATISTICA DA VARIÁVEL DEFORMAÇÃO

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	100
MEDIA.....	3.6E-0003
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	5.9E-0005
DESVIO PADRAO.....	6.8E-0003
TERCEIRO MOMENTO.....	4.5E-0007
QUARTO MOMENTO.....	6.6E-0009
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	1.9E+0000
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	1.4E+0000
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	3.2E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	5.9E-0004	E	1.2E-0003	=	60
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.2E-0003	E	2.9E-0003	=	10
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	3.0E-0003	E	4.7E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	4.7E-0003	E	6.5E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	6.5E-0003	E	8.2E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	8.2E-0003	E	1.0E-0002	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.0E-0002	E	1.2E-0002	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.2E-0002	E	1.4E-0002	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.4E-0002	E	1.5E-0002	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.5E-0002	E	1.7E-0002	=	0

ESTATISTICA DA VARIÁVEL DELTA DEFORMAÇÃO

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	49
MEDIA.....	2.2E-0003
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	6.7E-0006
DESVIO PADRAO.....	1.3E-0003
TERCEIRO MOMENTO.....	9.6E-0010
QUARTO MOMENTO.....	3.4E-0012
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	5.8E-0001
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	4.5E-0001
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	1.2E+0000

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.1E-0003	E	1.3E-0003	=	30
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.3E-0003	E	1.6E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.6E-0003	E	1.9E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.9E-0003	E	2.2E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	2.2E-0003	E	2.5E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	2.5E-0003	E	2.7E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	2.7E-0003	E	3.0E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	3.0E-0003	E	3.3E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	3.3E-0003	E	3.6E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	3.6E-0003	E	3.9E-0003	=	0

ESTATISTICA DA VARIÁVEL DEFORMAÇÃO MÉDIA

NUMERO DE PONTOS GERADOS.....	49
MEDIA.....	4.4E-0003
VALOR MEDIO QUADRATICO.....	3.7E-0005
DESVIO PADRAO.....	4.3E-0003
TERCEIRO MOMENTO.....	3.5E-0008

QUARTO MOMENTO.....	4.2E-0010	243
COEFICIENTE DE DISPERSAO.....	9.9E-0001	
COEFICIENTE DE SIMETRIA.....	4.4E-0001	
COEFICIENTE DE PLANICIDADE.....	1.2E+0000	

HISTOGRAMA ENTRE OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS

NUMEROS DE PONTOS ENTRE	- 3.9E-0004	E	6.2E-0004	=	3
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	6.3E-0004	E	1.5E-0003	=	27
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	1.6E-0003	E	2.6E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	2.7E-0003	E	3.7E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	3.7E-0003	E	4.7E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	4.7E-0003	E	5.7E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	5.7E-0003	E	6.7E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	6.7E-0003	E	7.7E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	7.7E-0003	E	8.7E-0003	=	0
NUMEROS DE PONTOS ENTRE	8.7E-0003	E	9.7E-0003	=	0

SIGMA LOCAL	1 =	280	DEFORMACAO LOCAL	1 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	2 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	2 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	3 =	280	DEFORMACAO LOCAL	3 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	4 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	4 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	5 =	280	DEFORMACAO LOCAL	5 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	6 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	6 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	7 =	280	DEFORMACAO LOCAL	7 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	8 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	8 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	9 =	280	DEFORMACAO LOCAL	9 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	10 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	10 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	11 =	280	DEFORMACAO LOCAL	11 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	12 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	12 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	13 =	280	DEFORMACAO LOCAL	13 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	14 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	14 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	15 =	280	DEFORMACAO LOCAL	15 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	16 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	16 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	17 =	280	DEFORMACAO LOCAL	17 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	18 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	18 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	19 =	280	DEFORMACAO LOCAL	19 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	20 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	20 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	21 =	280	DEFORMACAO LOCAL	21 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	22 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	22 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	23 =	280	DEFORMACAO LOCAL	23 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	24 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	24 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	25 =	280	DEFORMACAO LOCAL	25 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	26 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	26 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	27 =	280	DEFORMACAO LOCAL	27 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	28 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	28 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	29 =	280	DEFORMACAO LOCAL	29 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	30 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	30 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	31 =	280	DEFORMACAO LOCAL	31 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	32 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	32 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	33 =	280	DEFORMACAO LOCAL	33 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	34 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	34 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	35 =	280	DEFORMACAO LOCAL	35 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	36 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	36 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	37 =	280	DEFORMACAO LOCAL	37 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	38 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	38 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	39 =	280	DEFORMACAO LOCAL	39 =	1.7E-0002
SIGMA LOCAL	40 =	-116	DEFORMACAO LOCAL	40 =	-5.9E-0004
SIGMA LOCAL	41 =	175	DEFORMACAO LOCAL	41 =	1.2E-0003

SIGMA LOCAL	42 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	42 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	43 =	175	DEFORMACAO LOCAL	43 =	1.2E-0003
SIGMA LOCAL	44 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	44 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	45 =	175	DEFORMACAO LOCAL	45 =	1.2E-0003
SIGMA LOCAL	46 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	46 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	47 =	175	DEFORMACAO LOCAL	47 =	1.2E-0003
SIGMA LOCAL	48 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	48 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	49 =	175	DEFORMACAO LOCAL	49 =	1.2E-0003
SIGMA LOCAL	50 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	50 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	51 =	175	DEFORMACAO LOCAL	51 =	1.2E-0003
SIGMA LOCAL	52 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	52 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	53 =	175	DEFORMACAO LOCAL	53 =	1.2E-0003
SIGMA LOCAL	54 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	54 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	55 =	175	DEFORMACAO LOCAL	55 =	1.2E-0003
SIGMA LOCAL	56 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	56 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	57 =	175	DEFORMACAO LOCAL	57 =	1.2E-0003
SIGMA LOCAL	58 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	58 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	59 =	175	DEFORMACAO LOCAL	59 =	1.2E-0003
SIGMA LOCAL	60 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	60 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	61 =	201	DEFORMACAO LOCAL	61 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	62 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	62 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	63 =	201	DEFORMACAO LOCAL	63 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	64 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	64 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	65 =	201	DEFORMACAO LOCAL	65 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	66 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	66 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	67 =	201	DEFORMACAO LOCAL	67 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	68 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	68 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	69 =	201	DEFORMACAO LOCAL	69 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	70 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	70 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	71 =	201	DEFORMACAO LOCAL	71 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	72 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	72 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	73 =	201	DEFORMACAO LOCAL	73 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	74 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	74 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	75 =	201	DEFORMACAO LOCAL	75 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	76 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	76 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	77 =	201	DEFORMACAO LOCAL	77 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	78 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	78 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	79 =	201	DEFORMACAO LOCAL	79 =	2.0E-0003
SIGMA LOCAL	80 =	-47	DEFORMACAO LOCAL	80 =	-2.4E-0004
SIGMA LOCAL	81 =	160	DEFORMACAO LOCAL	81 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	82 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	82 =	-4.7E-0004
SIGMA LOCAL	83 =	160	DEFORMACAO LOCAL	83 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	84 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	84 =	-4.7E-0004
SIGMA LOCAL	85 =	160	DEFORMACAO LOCAL	85 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	86 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	86 =	-4.7E-0004
SIGMA LOCAL	87 =	160	DEFORMACAO LOCAL	87 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	88 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	88 =	-4.7E-0004
SIGMA LOCAL	89 =	160	DEFORMACAO LOCAL	89 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	90 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	90 =	-4.7E-0004
SIGMA LOCAL	91 =	160	DEFORMACAO LOCAL	91 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	92 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	92 =	-4.7E-0004
SIGMA LOCAL	93 =	160	DEFORMACAO LOCAL	93 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	94 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	94 =	-4.7E-0004
SIGMA LOCAL	95 =	160	DEFORMACAO LOCAL	95 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	96 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	96 =	-4.7E-0004
SIGMA LOCAL	97 =	160	DEFORMACAO LOCAL	97 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	98 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	98 =	-4.7E-0004
SIGMA LOCAL	99 =	160	DEFORMACAO LOCAL	99 =	9.4E-0004
SIGMA LOCAL	100 =	-94	DEFORMACAO LOCAL	100 =	-4.7E-0004

DELTA SIGMA	1 =	400	DELTA DEFORMACAO	1 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	2 =	400	DELTA DEFORMACAO	2 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	3 =	400	DELTA DEFORMACAO	3 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	4 =	400	DELTA DEFORMACAO	4 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	5 =	400	DELTA DEFORMACAO	5 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	6 =	400	DELTA DEFORMACAO	6 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	7 =	400	DELTA DEFORMACAO	7 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	8 =	400	DELTA DEFORMACAO	8 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	9 =	400	DELTA DEFORMACAO	9 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	10 =	400	DELTA DEFORMACAO	10 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	11 =	400	DELTA DEFORMACAO	11 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	12 =	400	DELTA DEFORMACAO	12 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	13 =	400	DELTA DEFORMACAO	13 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	14 =	400	DELTA DEFORMACAO	14 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	15 =	400	DELTA DEFORMACAO	15 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	16 =	400	DELTA DEFORMACAO	16 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	17 =	400	DELTA DEFORMACAO	17 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	18 =	400	DELTA DEFORMACAO	18 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	19 =	400	DELTA DEFORMACAO	19 =	3.9E-0003
DELTA SIGMA	20 =	220	DELTA DEFORMACAO	20 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	21 =	220	DELTA DEFORMACAO	21 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	22 =	220	DELTA DEFORMACAO	22 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	23 =	220	DELTA DEFORMACAO	23 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	24 =	220	DELTA DEFORMACAO	24 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	25 =	220	DELTA DEFORMACAO	25 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	26 =	220	DELTA DEFORMACAO	26 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	27 =	220	DELTA DEFORMACAO	27 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	28 =	220	DELTA DEFORMACAO	28 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	29 =	220	DELTA DEFORMACAO	29 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	30 =	250	DELTA DEFORMACAO	30 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	31 =	250	DELTA DEFORMACAO	31 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	32 =	250	DELTA DEFORMACAO	32 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	33 =	250	DELTA DEFORMACAO	33 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	34 =	250	DELTA DEFORMACAO	34 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	35 =	250	DELTA DEFORMACAO	35 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	36 =	250	DELTA DEFORMACAO	36 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	37 =	250	DELTA DEFORMACAO	37 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	38 =	250	DELTA DEFORMACAO	38 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	39 =	210	DELTA DEFORMACAO	39 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	40 =	250	DELTA DEFORMACA	40 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	41 =	210	DELTA DEFORMACAO	41 =	1.1E-0003
DELTA SIGMA	42 =	250	DELTA DEFORMACAO	42 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	43 =	250	DELTA DEFORMACAO	43 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	44 =	250	DELTA DEFORMACAO	44 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	45 =	250	DELTA DEFORMACAO	45 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	46 =	250	DELTA DEFORMACAO	46 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	47 =	250	DELTA DEFORMACAO	47 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	48 =	250	DELTA DEFORMACAO	48 =	1.3E-0003
DELTA SIGMA	49 =	250	DELTA DEFORMACAO	49 =	1.3E-0003
SIGMA MEDIO	1 =	260	DEFORMACAO MEDIA	1 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	2 =	260	DEFORMACAO MEDIA	2 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	3 =	260	DEFORMACAO MEDIA	3 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	4 =	260	DEFORMACAO MEDIA	4 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	5 =	260	DEFORMACAO MEDIA	5 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	6 =	260	DEFORMACAO MEDIA	6 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	7 =	260	DEFORMACAO MEDIA	7 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	8 =	260	DEFORMACAO MEDIA	8 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	9 =	260	DEFORMACAO MEDIA	9 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	10 =	260	DEFORMACAO MEDIA	10 =	9.7E-0003

SIGMA MEDIO	11 =	260	DEFORMACAO MEDIA	11 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	12 =	260	DEFORMACAO MEDIA	12 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	13 =	260	DEFORMACAO MEDIA	13 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	14 =	260	DEFORMACAO MEDIA	14 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	15 =	260	DEFORMACAO MEDIA	15 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	16 =	260	DEFORMACAO MEDIA	16 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	17 =	260	DEFORMACAO MEDIA	17 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	18 =	260	DEFORMACAO MEDIA	18 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	19 =	260	DEFORMACAO MEDIA	19 =	9.7E-0003
SIGMA MEDIO	20 =	160	DEFORMACAO MEDIA	20 =	9.5E-0004
SIGMA MEDIO	21 =	160	DEFORMACAO MEDIA	21 =	9.5E-0004
SIGA MEDIO	22 =	160	DEFORMACAO MEDIA	22 =	9.5E-0004
SIGMA MEDIO	23 =	160	DEFORMACAO MEDIA	23 =	9.5E-0004
SIGMA MEDIO	24 =	160	DEFORMACAO MEDIA	24 =	9.5E-0004
SIGMA MEDIO	25 =	160	DEFORMACAO MEDIA	25 =	9.5E-0004
SIGMA MEDIO	26 =	160	DEFORMACAO MEDIA	26 =	9.5E-0004
SIGMA MEDIO	27 =	160	DEFORMACAO MEDIA	27 =	9.5E-0004
SIGMA MEDIO	28 =	160	DEFORMACAO MEDIA	28 =	9.5E-0004
SIGMA MEDIO	29 =	156	DEFORMACAO MEDIA	29 =	9.0E-0004
SIGMA MEDIO	30 =	185	DEFORMACAO MEDIA	30 =	1.4E-0003
SIGMA MEDIO	31 =	185	DEFORMACAO MEDIA	31 =	1.4E-0003
SIGMA MEDIO	32 =	185	DEFORMACAO MEDIA	32 =	1.4E-0003
SIGMA MEDIO	33 =	185	DEFORMACAO MEDIA	33 =	1.4E-0003
SIGMA MEDIO	34 =	185	DEFORMACAO MEDIA	34 =	1.4E-0003
SIGMA MEDIO	35 =	185	DEFORMACAO MEDIA	35 =	1.4E-0003
SIGMA MEDIO	36 =	185	DEFORMACAO MEDIA	36 =	1.4E-0003
SIGMA MEDIO	37 =	185	DEFORMACAO MEDIA	37 =	1.4E-0003
SIGMA MEDIO	38 =	185	DEFORMACAO MEDIA	38 =	1.4E-0003
SIGMA MEDIO	39 =	-39	DEFORMACAO MEDIA	39 =	-2.0E-0004
SIGMA MEDIO	40 =	-78	DEFORMACAO MEDIA	40 =	-3.9E-0004
SIGMA MEDIO	41 =	105	DEFORMACAO MEDIA	41 =	5.3E-0004
SIGMA MEDIO	42 =	144	DEFORMACAO MEDIA	42 =	7.8E-0004
SIGMA MEDIO	43 =	144	DEFORMACAO MEDIA	43 =	7.8E-0004
SIGMA MEDIO	44 =	144	DEFORMACAO MEDIA	44 =	7.8E-0004
SIGMA MEDIO	45 =	144	DEFORMACAO MEDIA	45 =	7.8E-0004
SIGMA MEDIO	46 =	144	DEFORMACAO MEDIA	46 =	7.8E-0004
SIGMA MEDIO	47 =	144	DEFORMACAO MEDIA	47 =	7.8E-0004
SIGMA MEDIO	48 =	144	DEFORMACAO MEDIA	48 =	7.8E-0004
SIGMA MEDIO	49 =	144	DEFORMACAO MEDIA	49 =	7.8E-0004

NUCLEACAO - MORROW

DANO 8.0E-0004