

Assimetria do ciclo de carregamento

Regra de Palmgreen-Miner

Sensibilidade ao entalhe

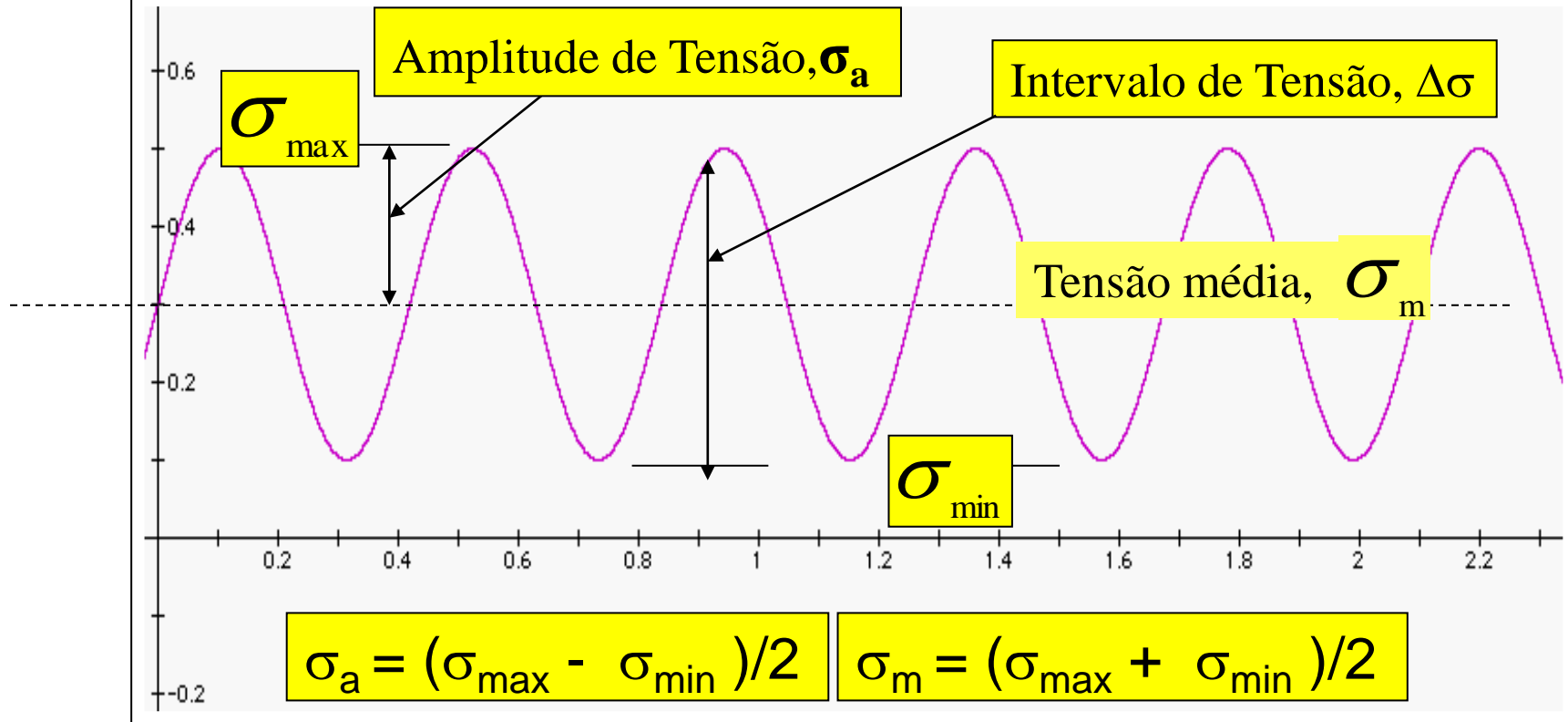
**Contagem de ciclos em carregamento de
Amplitude Variável: método Rainflow**

Deformação-Vida ($\epsilon \times N$)

DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão, σ



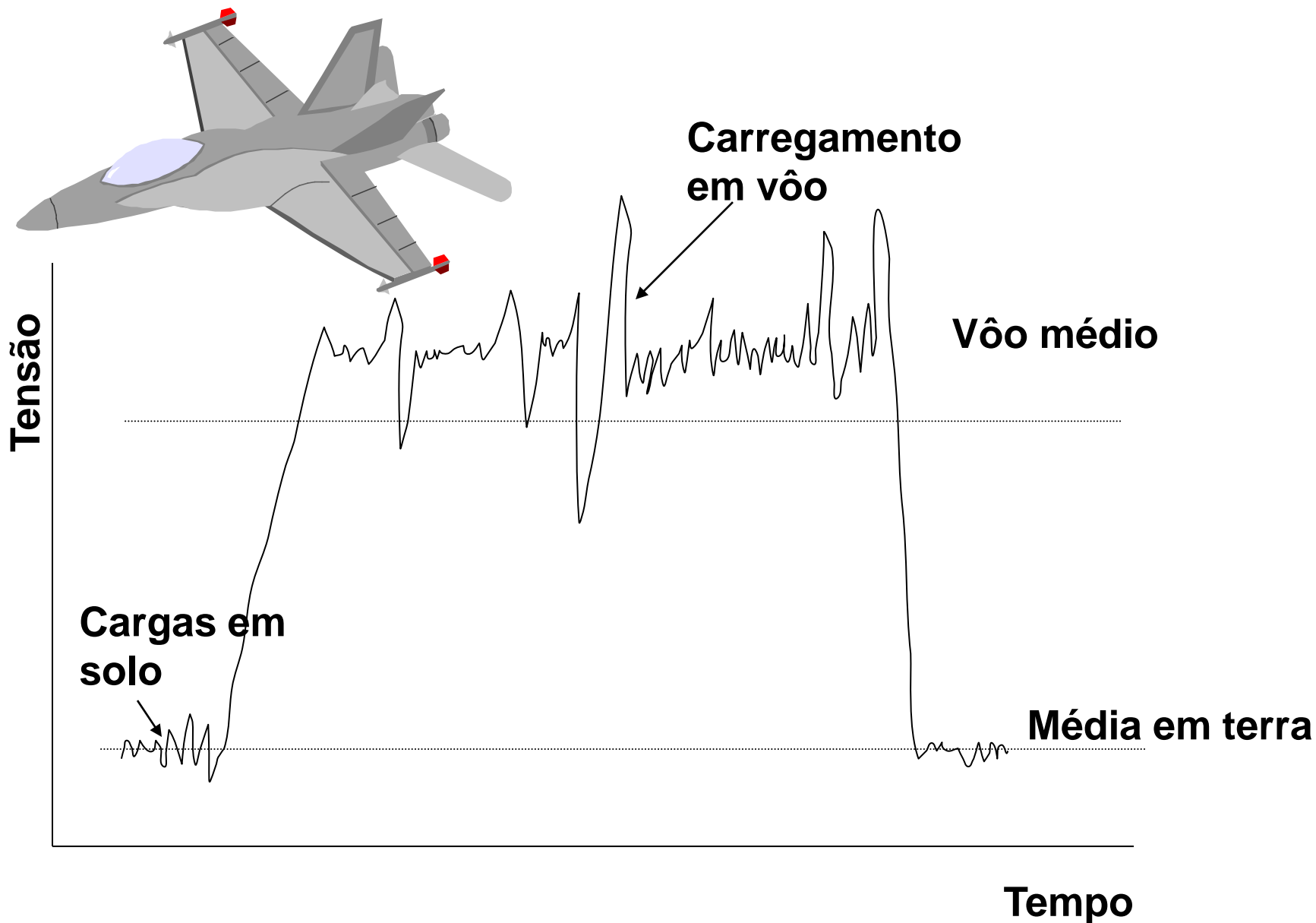
$$\Delta\sigma = (\sigma_{max} - \sigma_{min})$$

$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$$

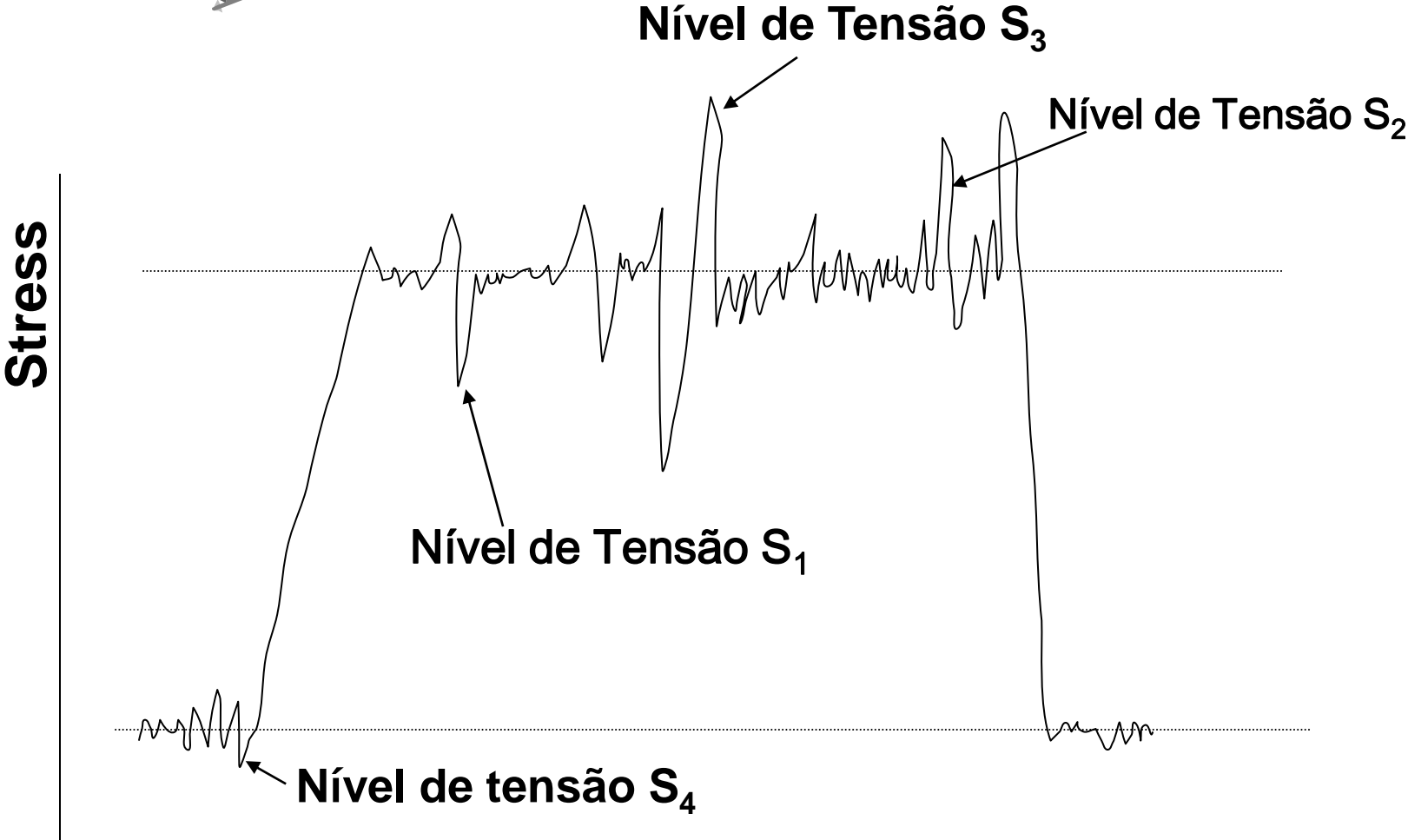
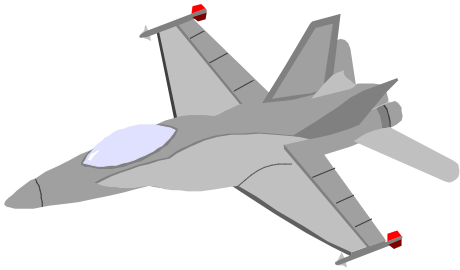
RAZÃO DE AMPLITUDE

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$

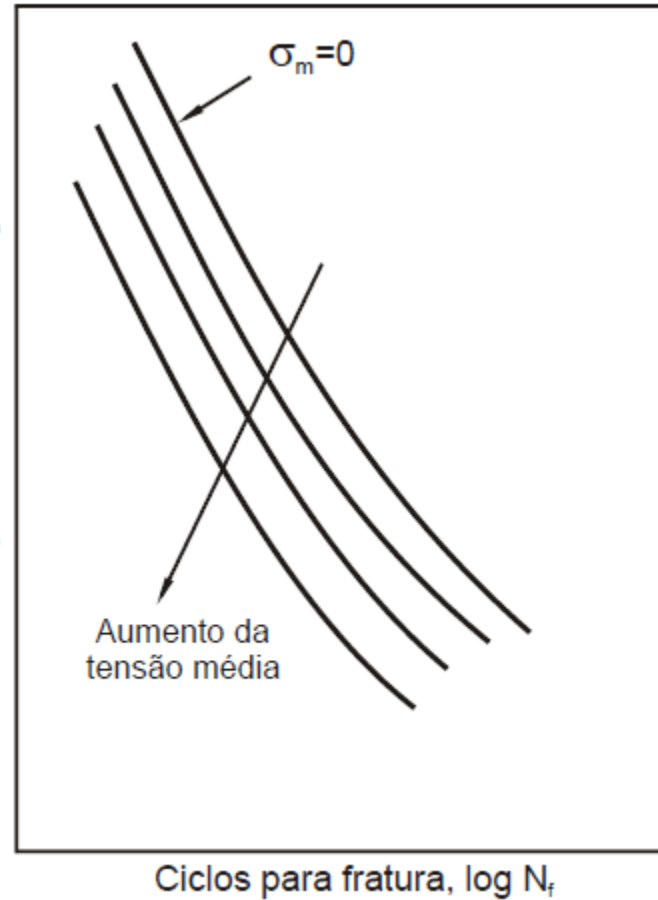
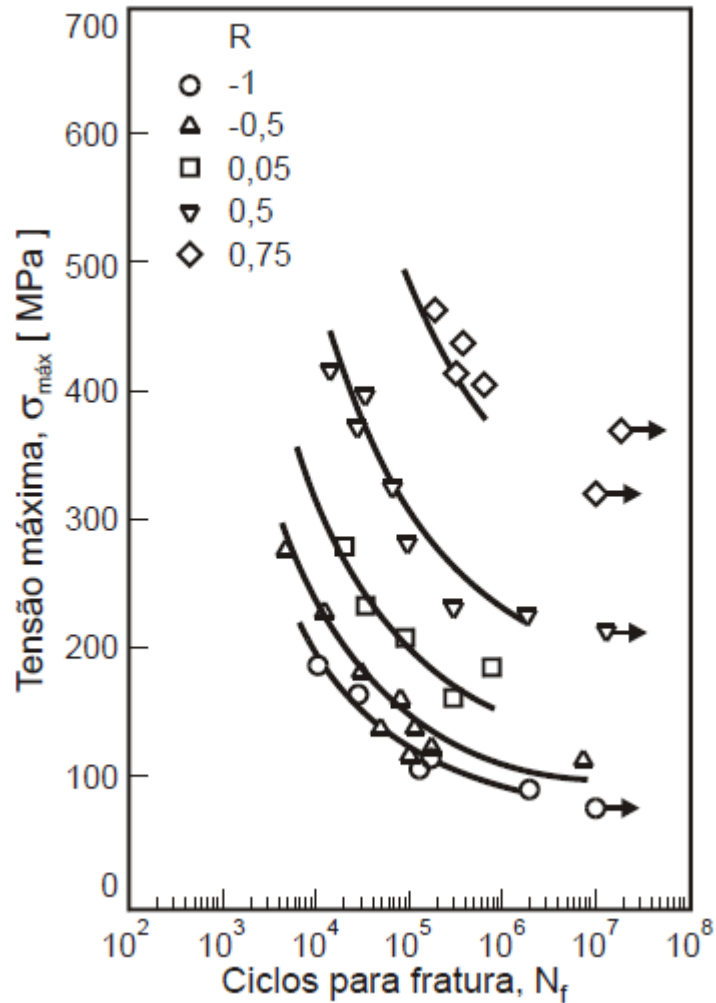
Repetição ou Variação de Carga



Estudo do Espectro de Tensão Aplicada



Efeito da Assimetria do Ciclo



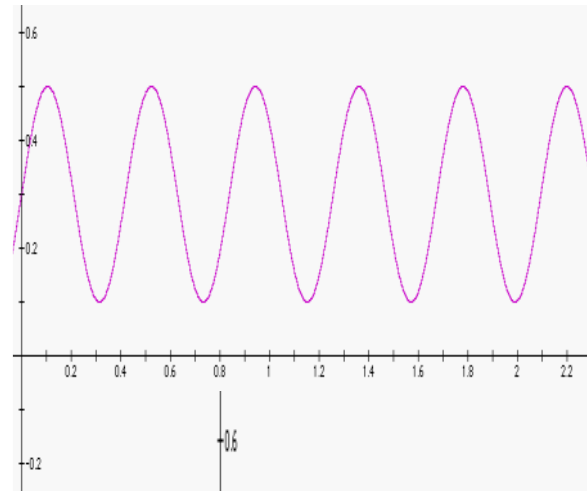
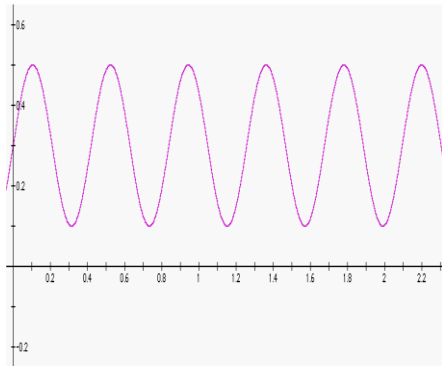
Lei de Basquin modificada

J. D. Morrow e verificada por R. Landgraf (1970)

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m)(2N_f)^b$$

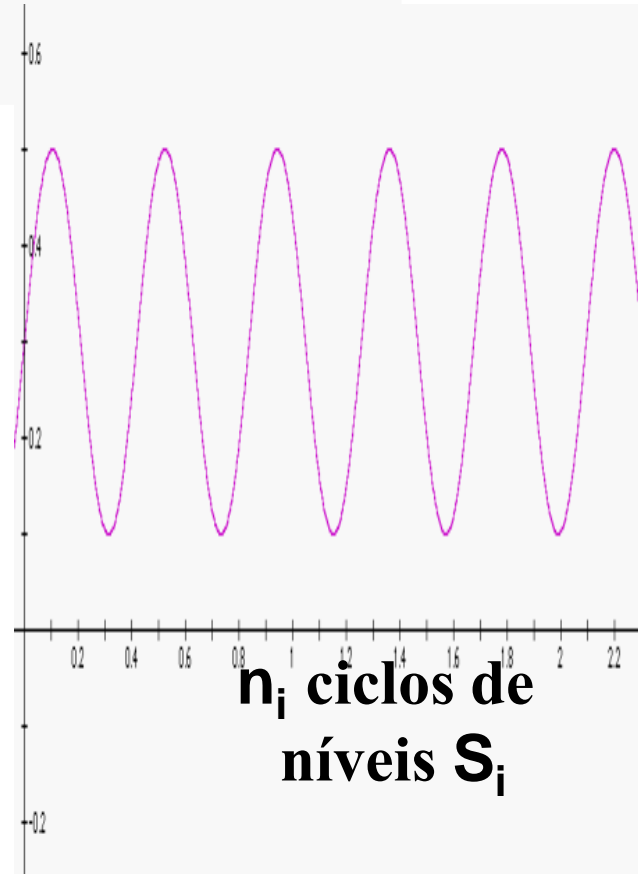
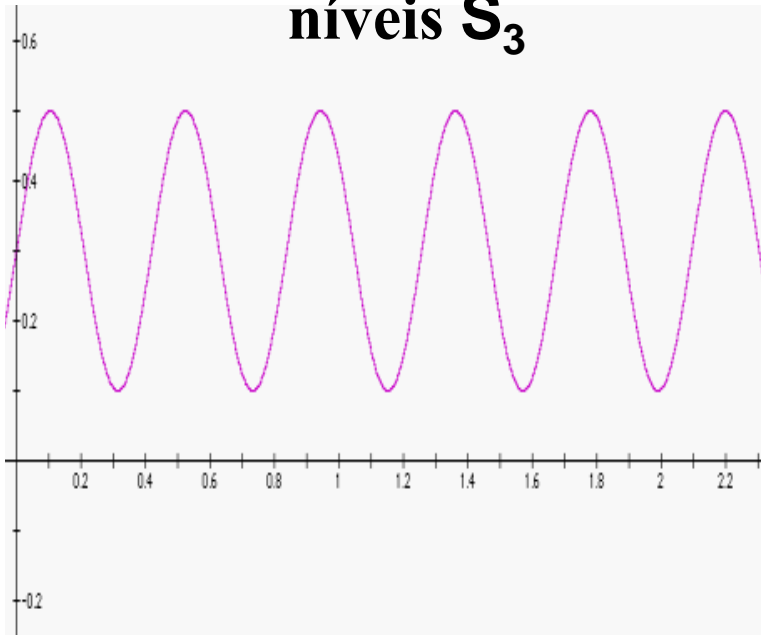
Frequência dos Níveis de tensão Aplicados

n_1 Ciclos de níveis S_1



n_2 ciclos de níveis S_2

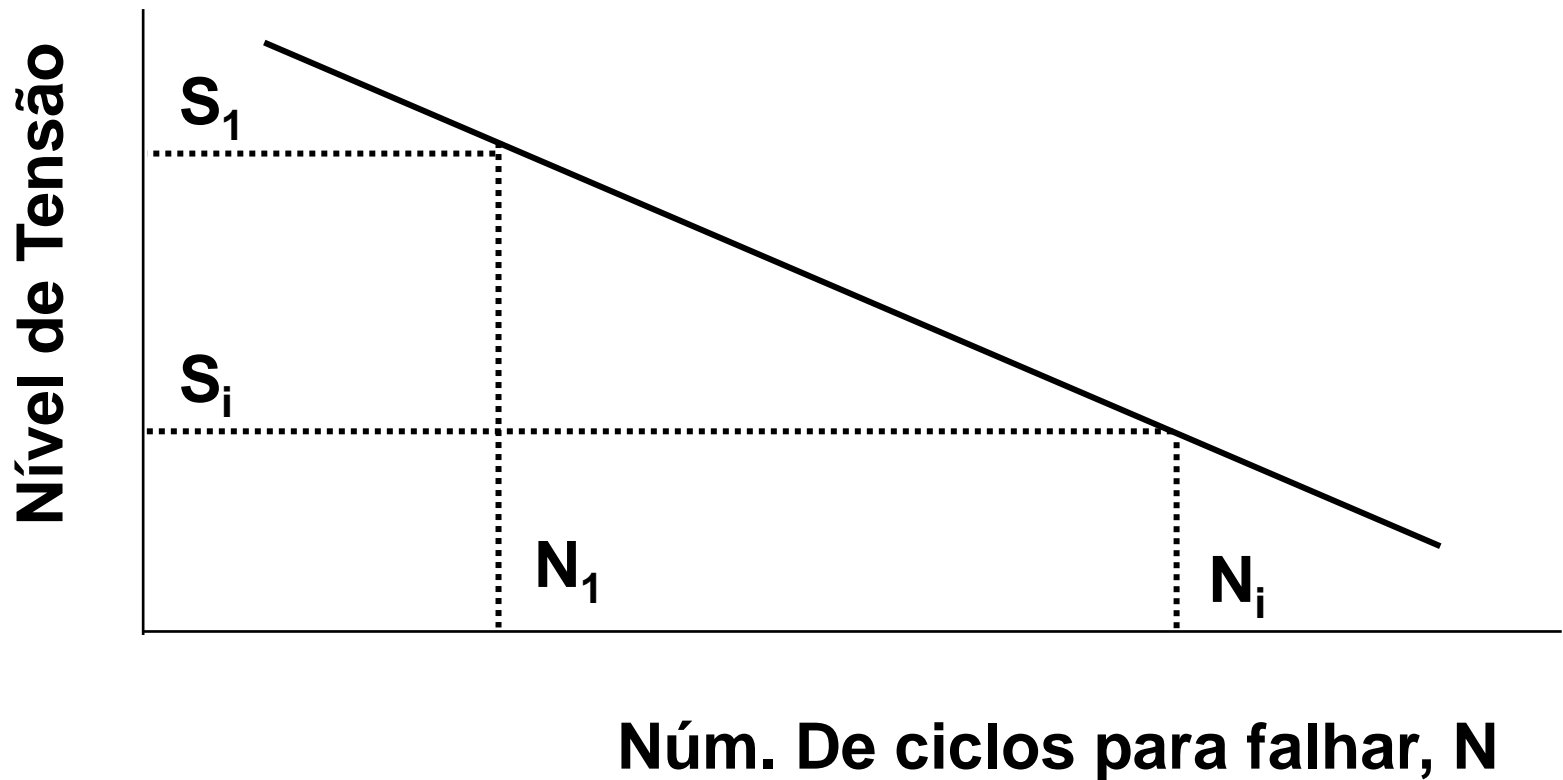
n_3 ciclos de níveis S_3



n_i ciclos de níveis S_i

Dados S - N para vários níveis de tensão

N_1 Números de ciclos para falhar se o componente é submetido a somente S_1 e assim por diante, sendo N_i Números de ciclos para falhar se o componente é submetido a somente S_i



Assim, a fração de dano causado por S_i em 01 ciclo

$$D_i = \frac{1}{N_i}$$

O dano acumulado total devido a uma história de tensão aplicada

$$\begin{aligned} D &= \sum_1^n D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \\ &= \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_k}{N_k} \end{aligned}$$

A falha irá acontecer se

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \geq 1$$

**Regra de Palmgren – Miner
ou regra de Miner**

Comentários sobre a regra de MINER

- **Modelo linear de dano acumulado;**
- **Não leva em conta a sequência de aplicação de cargas ou tensões;**

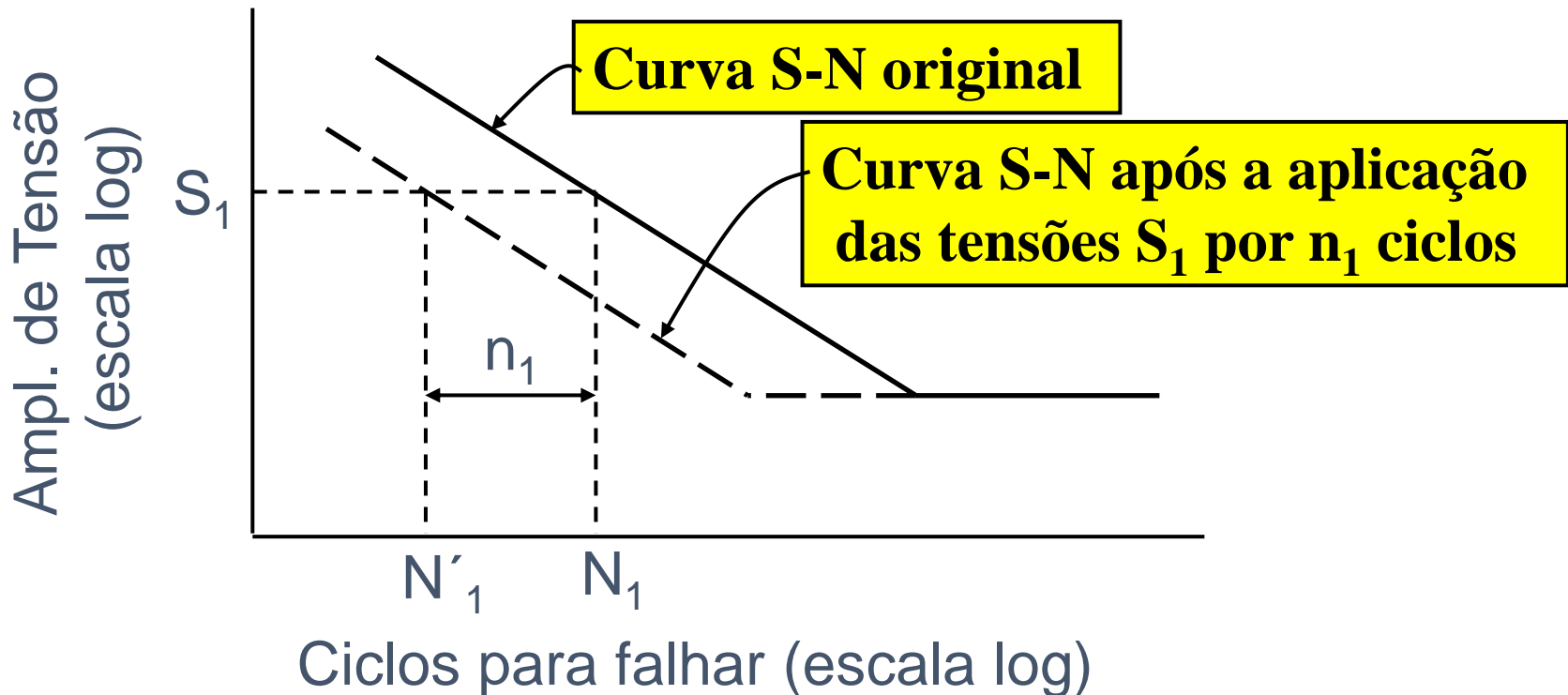
Exemplo: A regra de Miner prediz o mesmo dano para sequências de alta para baixa tensões e de baixa para alta tensões. Na prática, estas histórias de carregamentos apresentam diferentes danos.

-Prediz que a taxa de dano acumulado é independente do nível de tensão.

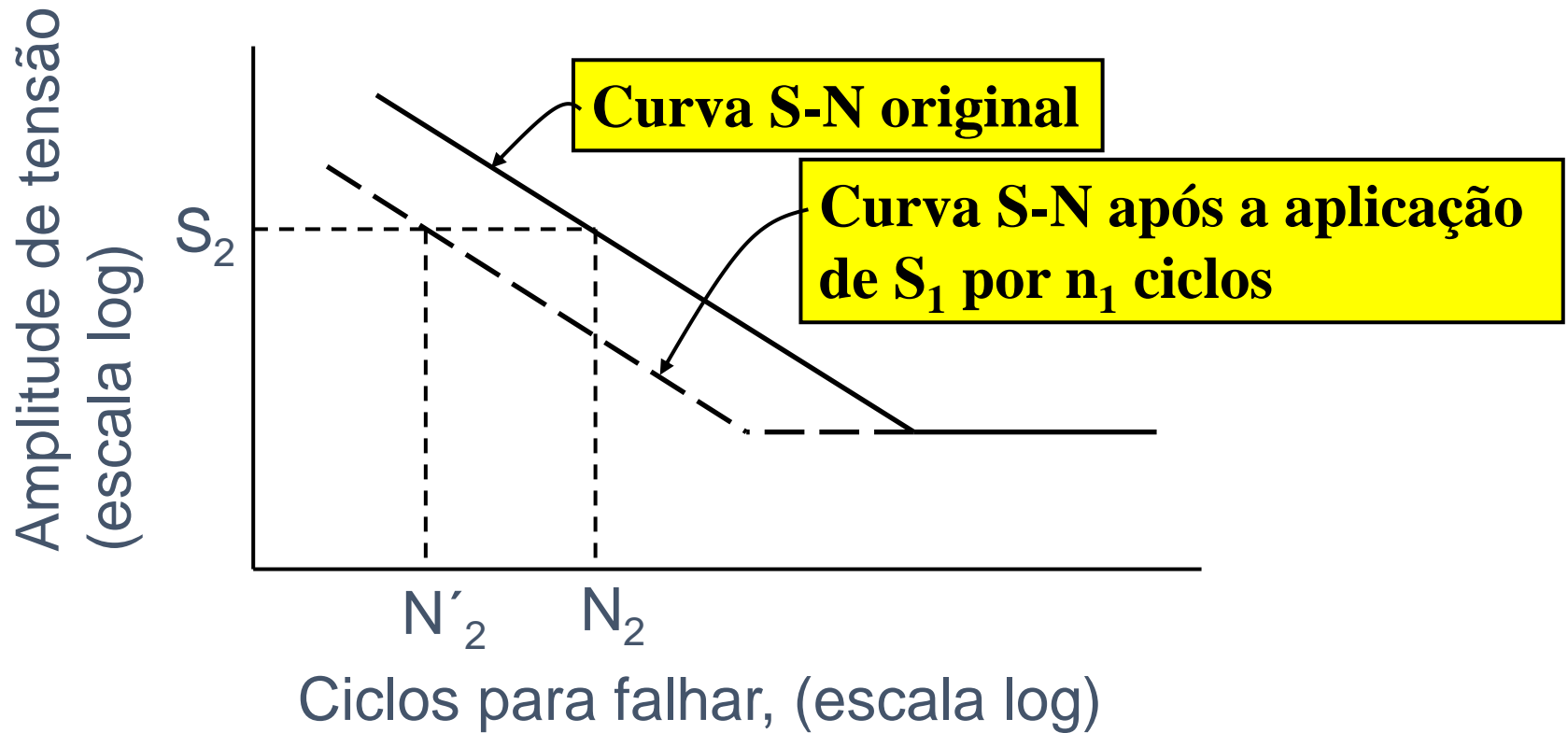
Em altas amplitudes de tensão, a nucleação de trincas ocorrerá em poucos ciclos e em baixas amplitudes de tensão, quase toda vida é gasta para nucleação.

Efeitos da regra de Miner sobre a curva S-N

$N'_1 = (N_1 - n_1)$ é o novo valor de vida no nível S_1 após ter sido submetido a n_1 ciclos.



Se o nível S_2 é aplicado, o componente falhará em N'_2 ciclos, ao invés de N_2 .



Implementação da regra de Miner

1. Estabeleça a história de carregamento/tensão para a estrutura;

2. Espectro de tensão:

Nível de tensão (Tensão alternada e média) versus o número de ocorrências em uma unidade de operação (tal como dia, hora, ano, vôos, etc.)

3. Analise a geometria do componente para K_t , etc.;

4. Obtenha os dados S-N para o material correspondente ao K_t e níveis de tensão.

5. Calcule o dano acumulado por unidade de operação usando a regra de Miner.

Teoria do Dano Não Linear

Para superar os problemas na regra de Miner

- As teorias não lineares exigem constantes adicionais do material e de geometria que devem ser obtidas a partir de ensaios.**
- A teoria não linear leva em conta o efeito da história. Cálculo pode ser trabalhoso.**
- Elas fornecem uma melhor previsão do que a regra de Miner em alguns históricos de carregamentos simples, mas não é garantia de que ela funciona melhor do que a aplicação real da historia de carregamento real.**

Descrição geral das teorias não lineares

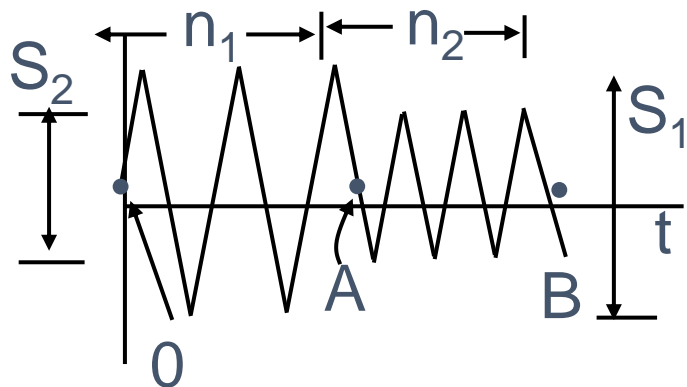
$$D = \left(\frac{n}{N} \right)^p$$

O expoente, p , é função do nível de tensão.

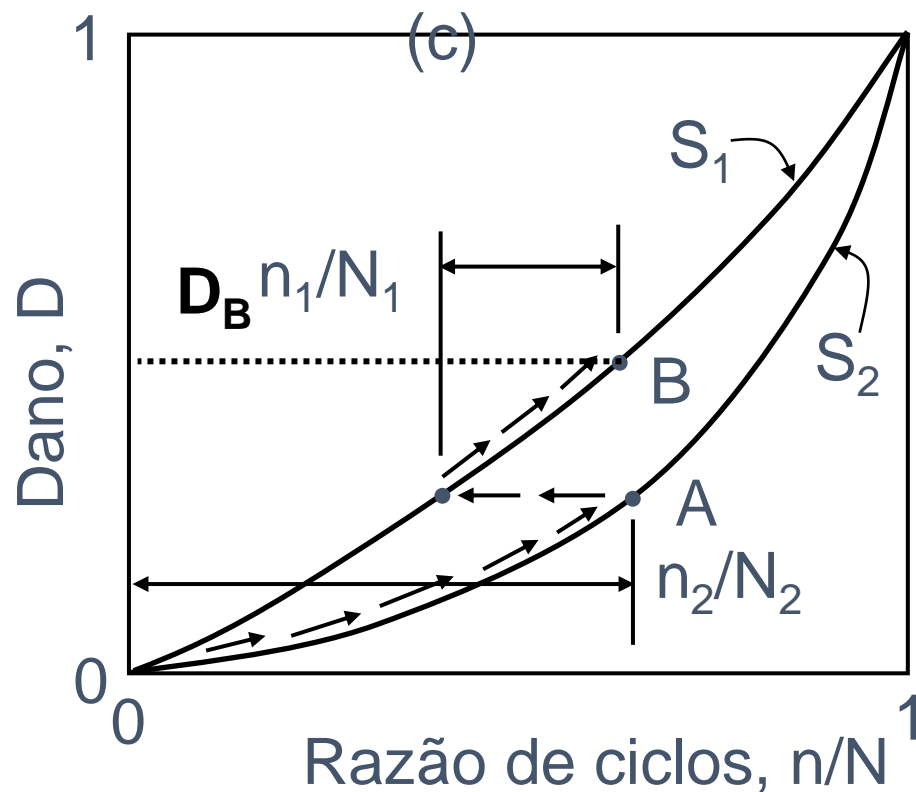
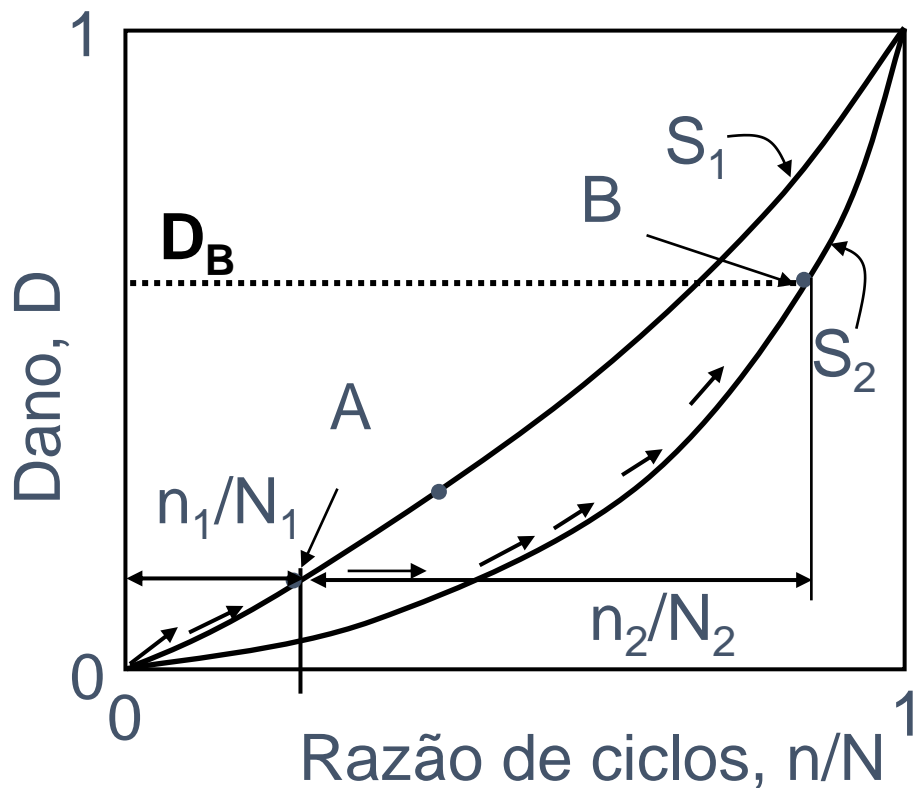
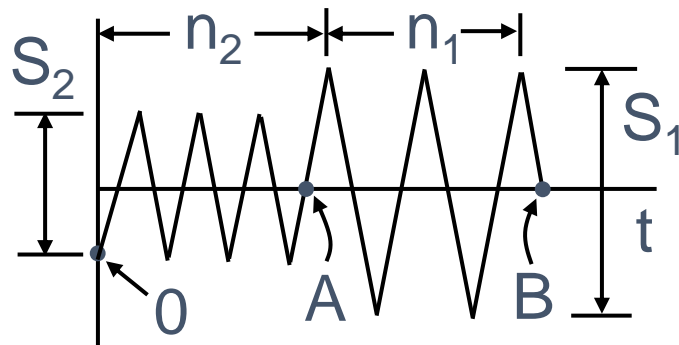
Geralmente, $0 < p < 1$

para $p = 1$, recorre-se a regra linear do dano de Miner

Alta - Baixa



Baixa - Alta



Dano D_B no final dos blocos de carregamentos são diferentes.

Efeito de Entalhes – Fator Concentrador de Tensão



S – tensão nominal (baseada na área da seção)

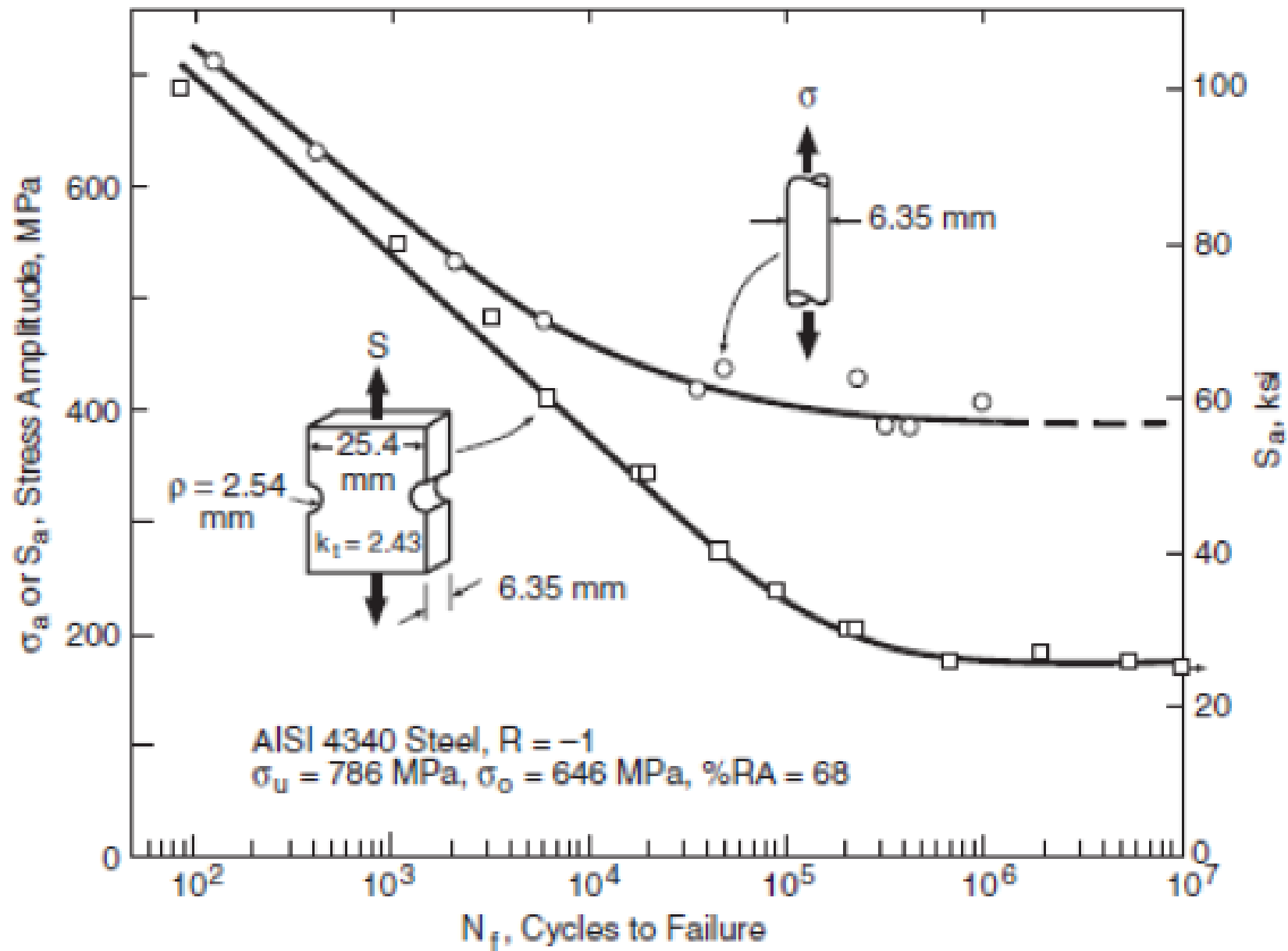
Fator concentrador de tensão estático:

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{S}$$

- K_t é um fator teórico dependente da geometria
- K_t depende do modo de carregamento
- K_t não depende da magnitude do carregamento
- K_t não depende das propriedades do material

Os resultados dos ensaios com peças contendo entalhes podem ser comparados à curva S/N obtida com corpos de prova polidos e a relação entre as tensões nominais correspondentes à vida em fadiga define o chamado **fator de concentração de tensão em fadiga**, ou fator de entalhe à fadiga K_f , dado pela equação, onde σ_{fe} e σ_{fu} são os valores da tensão (para um determinado número de ciclos) das peças **com e sem entalhe**, respectivamente.

$$K_f = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{fe}}$$



Uma das formas de se avaliar o efeito do entalhe é definir a **“sensibilidade ao entalhe” em fadiga (q)**. O máximo efeito possível, de modo que $K_f = K_t$, então $q = 1$. Se iguala a zero quando $K_f = 1$, ou seja, o entalhe não tem efeito sobre a resistência à fadiga. O valor de q varia com a severidade e tipo do entalhe, com o tamanho do corpo-de-prova e com a forma do carregamento e, portanto, não é uma constante do material. A sensibilidade ao entalhe aumenta com a **resistência à tração**, ou seja, se a dureza ou resistência de um material for aumentada por meio de **tratamentos térmicos**, é possível que seu desempenho piore em termos da sensibilidade ao entalhe:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

Relação Empírica (Peterson, 1974)

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\rho}}$$

A constante de Peterson, α , depende da resistência do material e ductilidade obtidas experimentalmente

$$\alpha = \left[\frac{300}{S_u (\text{ksi})} \right]^{1.8} \times 10^{-3} \text{ pol.}$$

Para ligas ferrosas
 $S_u > 550 \text{ MPa}$ ou
 $S_u > 80 \text{ ksi}$

$$\alpha = 0,025 \left(\frac{2070}{S_u (\text{MPa})} \right) \text{ mm}$$

Usando a aproximação,

$$S_u \approx 0.5 \text{ BHN}$$

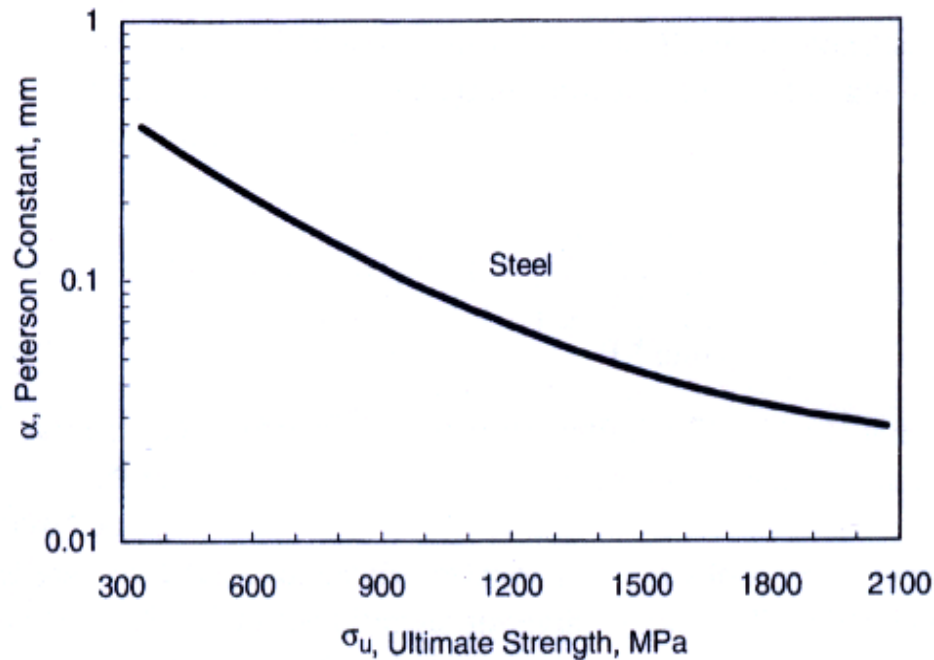
$$\alpha = \left[\frac{300}{0.5 \text{ BHN}} \right]^{1.8} \times 10^{-3} \text{ pol}$$

• De maneira geral:

- $\alpha=0,51$ mm (0,02") para ligas de Al
- $\alpha=0,25$ mm (0,01") para aço carbono recoz. ou norm.
- $\alpha=0,064$ mm (0,0025") para aços temperados e revenidos.

Combinando as equações tem-se que:

$$\log \alpha = 2,654 \times 10^{-7} \sigma_u^2 - 1,309 \times 10^{-3} \sigma_u + 0,001103$$



$$k_f = 1 + \frac{k_t - 1}{\left(1 + \frac{\alpha}{\rho}\right)}$$

Figure 10.7 Peterson constant α as a function of ultimate tensile strength for carbon and low-alloy steels. Typical values from [Peterson 59] closely fit the curve shown.

Relação Empírica (Neuber)

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\beta / \rho}} \quad (4.9)$$

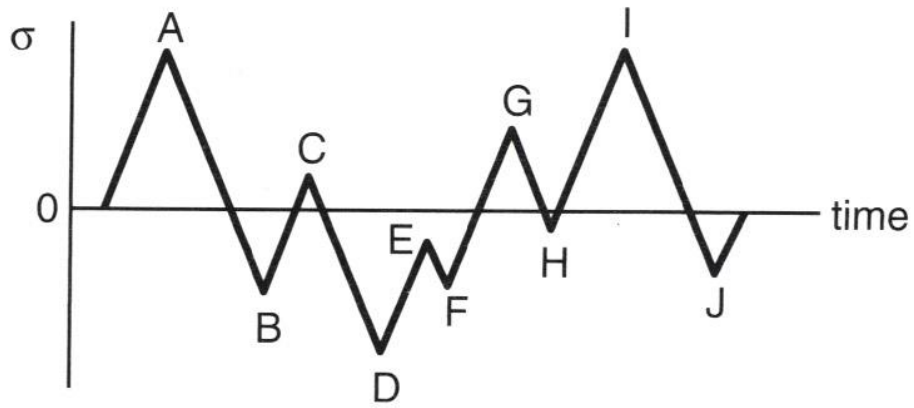
ρ – é o raio do entalhe

β - é uma constante do material

Relacionando à sensibilidade ao entalhe

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\beta / \rho}} \quad (4.10)$$

**CONTAGEM DE CICLOS PARA HISTÓRICO DE
CARREGAMENTOS IRREGULARES
MÉTODO RAINFLOW**

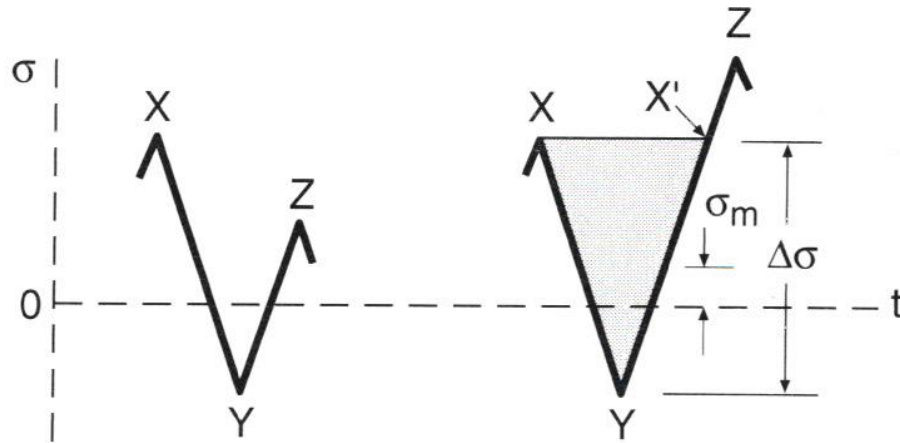


Peaks: A, C

Valleys: B, D

Simple ranges: A-B, B-C

Overall ranges: A-D, D-G



$\Delta\sigma_{YZ} < \Delta\sigma_{XY}$
No cycle

$\Delta\sigma_{YZ} \geq \Delta\sigma_{XY}$
X-Y = cycle

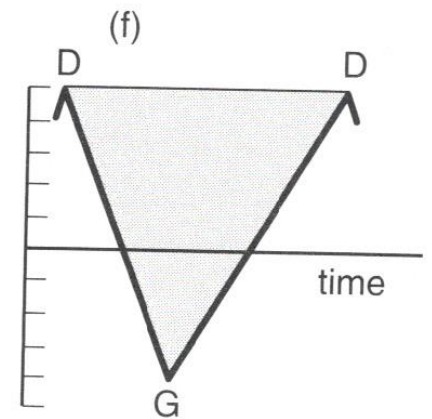
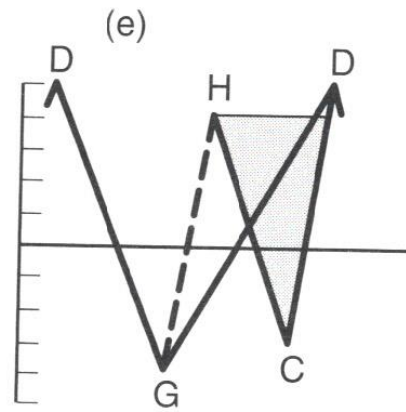
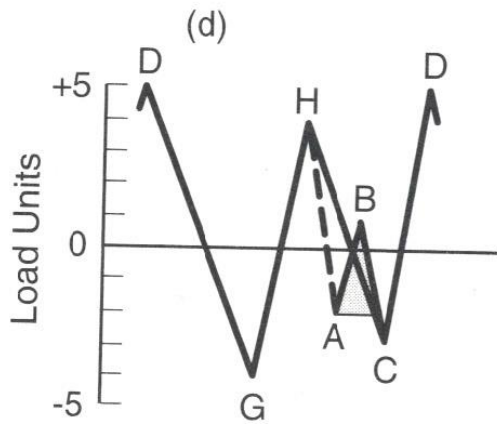
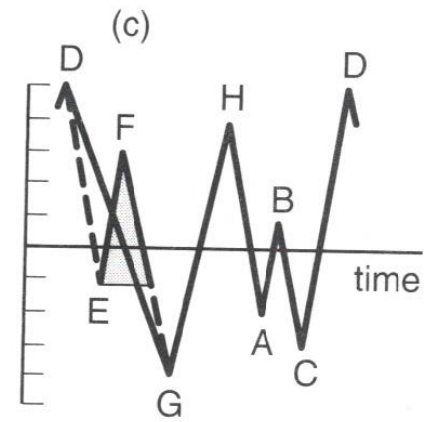
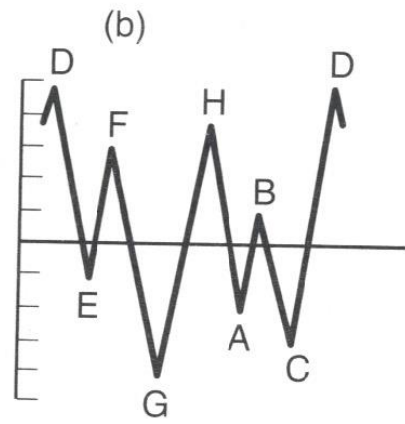
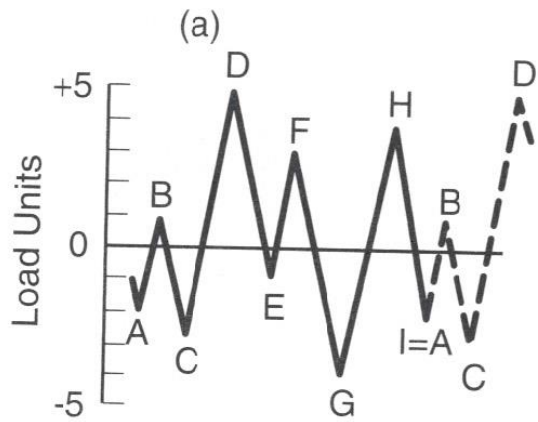
For cycle X-Y

Peak: σ_X

Valley: σ_Y

Range: $\Delta\sigma = \sigma_X - \sigma_Y$

Mean: $\sigma_m = (\sigma_X + \sigma_Y)/2$



| Cycle | Range | Mean |
|-------|-------|------|
| E-F | 4.0 | 1.0 |
| A-B | 3.0 | -0.5 |
| H-C | 7.0 | 0.5 |
| D-G | 9.0 | 0.5 |

DEFORMAÇÃO-VIDA ($\epsilon \times N$)

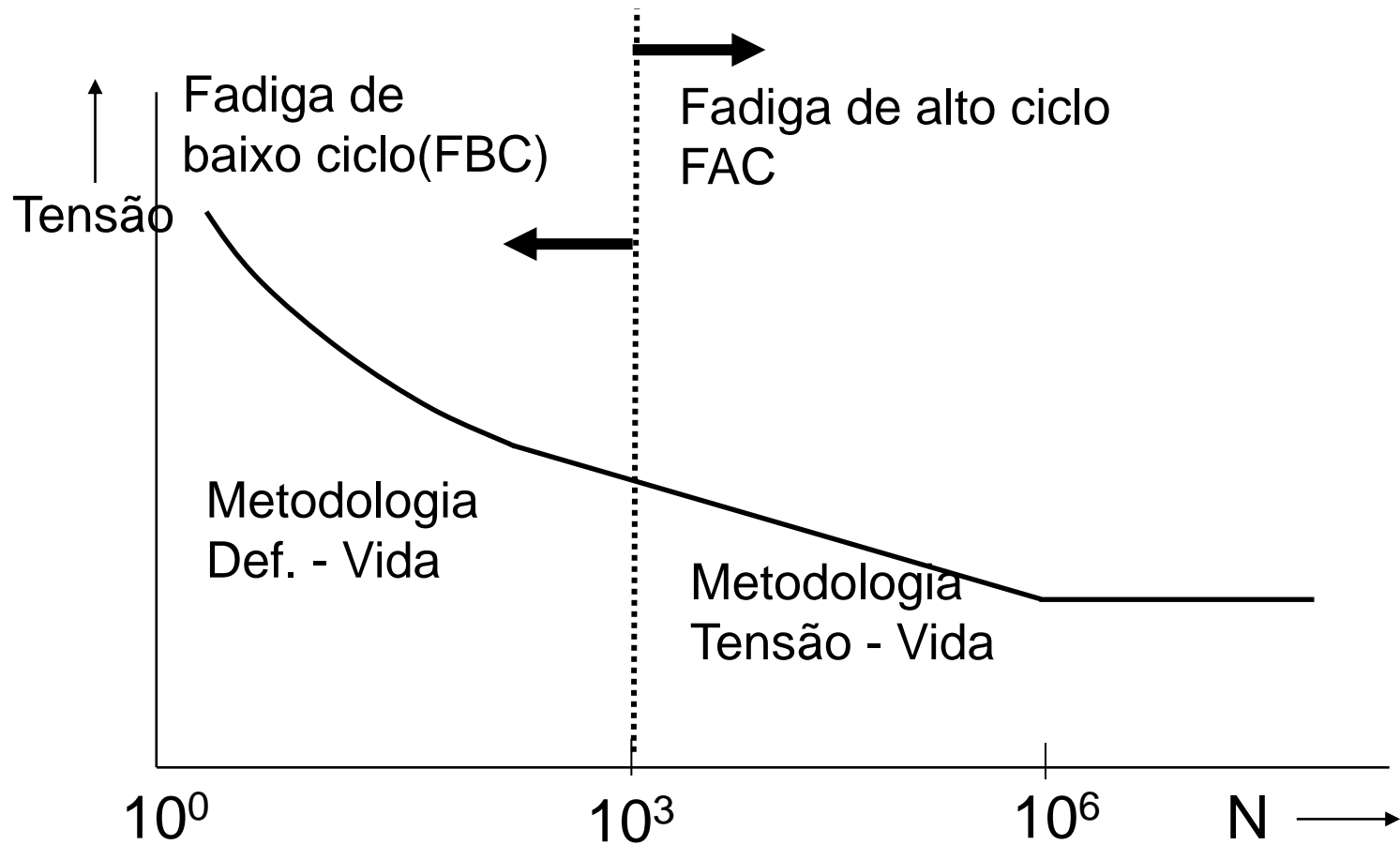
Fadiga controlada pela deformação, fadiga de baixo ciclo deformação-vida.

A apresentação dos dados de fadiga em termos da amplitude de deformação apareceu na literatura técnica pela primeira vez no início da **década de 1950**.

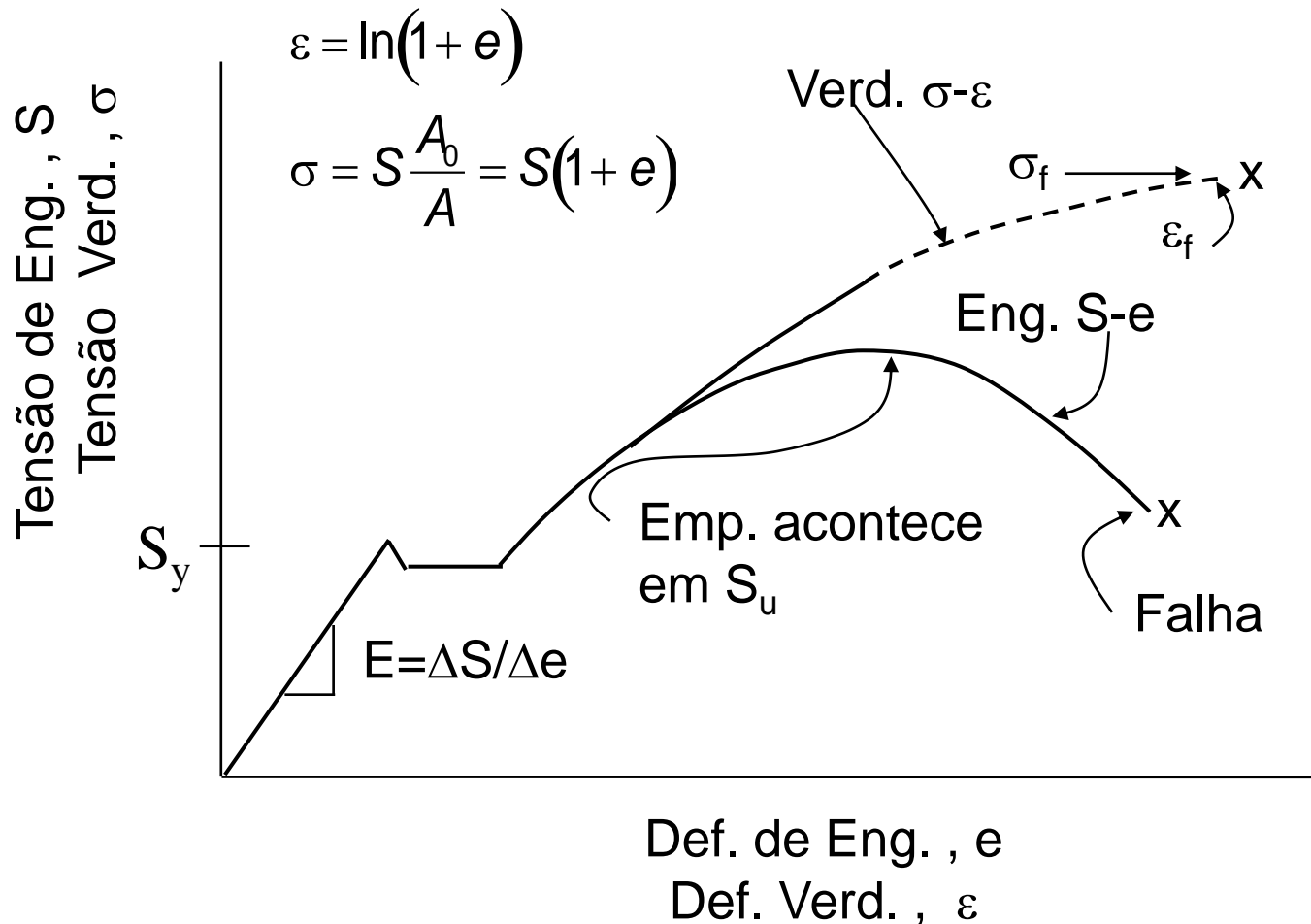
O número de ciclos para a fratura pode ser calculado pela **equação de Coffin-Manson**, onde ε'_f é o coeficiente de ductilidade à fadiga e c é o expoente de ductilidade à fadiga.

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

Deformação - Vida Vs. Tensão Vida

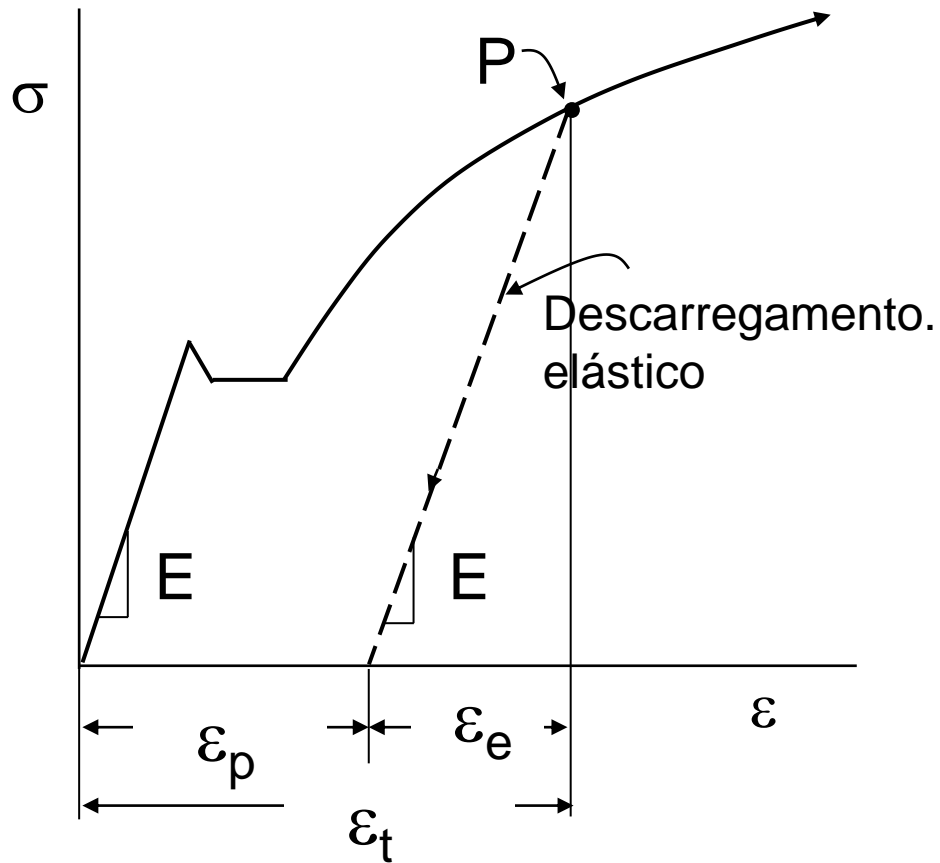


Def. de Eng. & Def. Verdadeira



Comparação entre Tensão – Def. Verd. e de Eng.

Relação Monotônica entre Tensão-Def.



Def. total ϵ_t

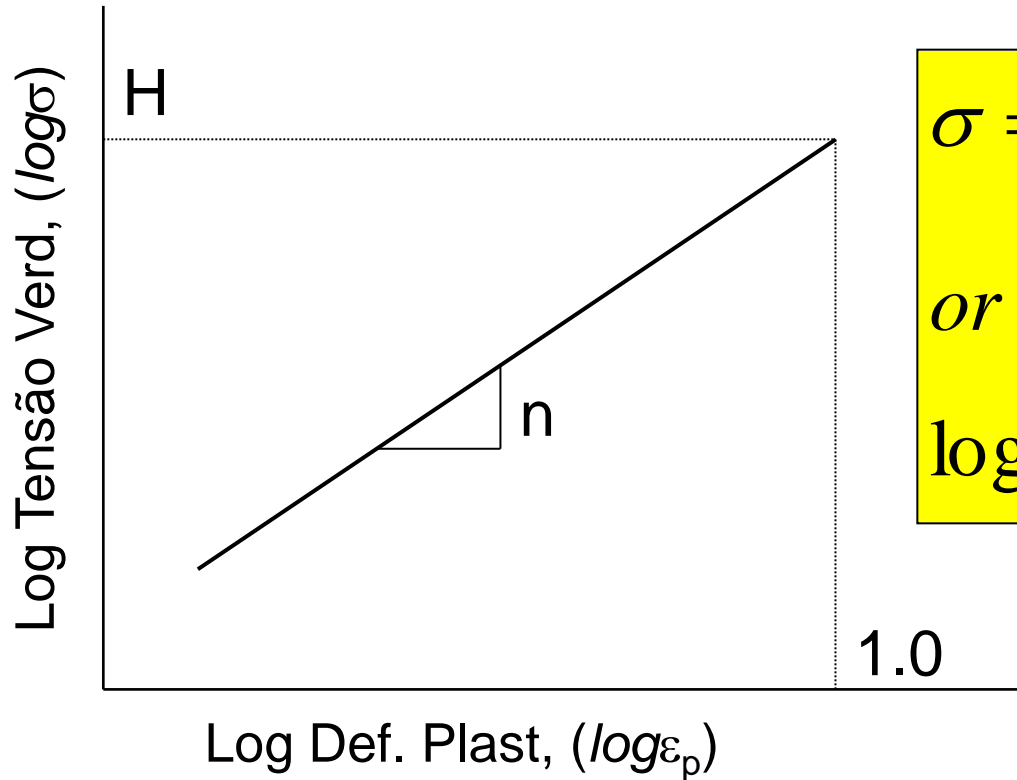
Def. Elast. ϵ_e

Def. Plast. ϵ_p

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p$$

$$\epsilon_e = \sigma / E$$

Deformação Plástica



$$\sigma = H(\epsilon_p)^n$$

$$\text{or } \epsilon_p = \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{1/n}$$

$$\log \sigma = \log H + n \log \epsilon_p$$

H – Coeficiente de resistência
n - Expoente de encruamento

Deform. Elástica, Plástica & Total

Elástica $\varepsilon_e = \sigma / E$

Plástica $\varepsilon_p = \left(\sigma / H \right)^{1/n}$

Total $\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p$

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H} \right)^{\frac{1}{n}}$$

**Relação tensão – Def.
De Ramberg-Osgood**

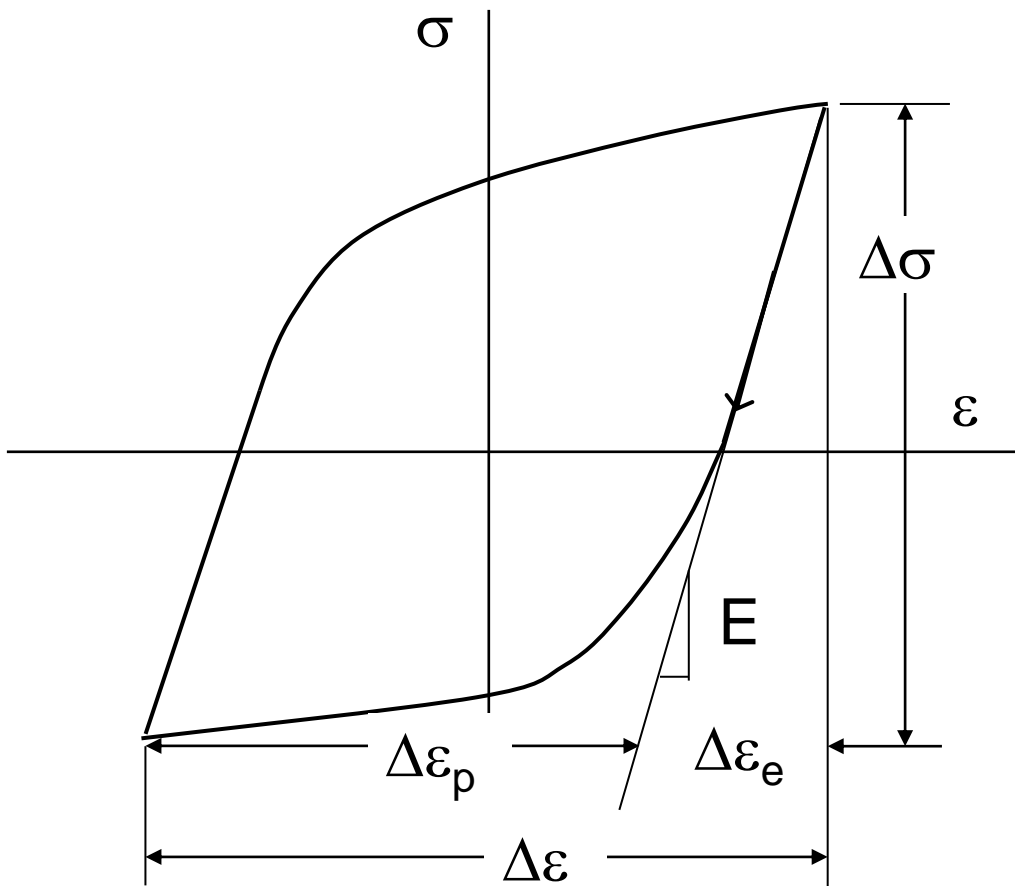
Comportamento Cíclico dos Materiais



Comportamento Cíclico dos Materiais

Laço de histerese

Resposta do Material a carregamentos cíclicos inelásticos



$\varepsilon_a = \Delta\varepsilon/2 =$ amplitude de def.

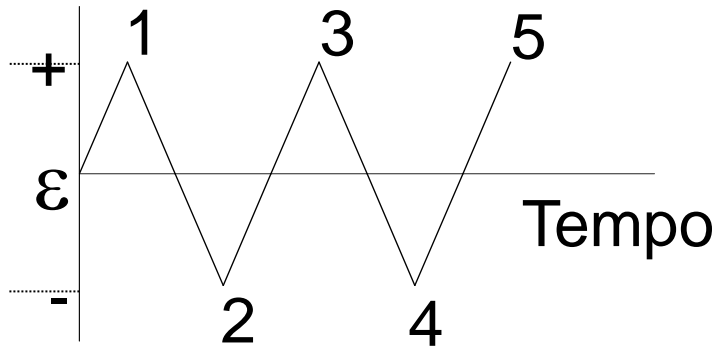
$\sigma_a = \Delta\sigma/2$ amplitude de tensão

$\Delta\varepsilon_e$ - parte elástica

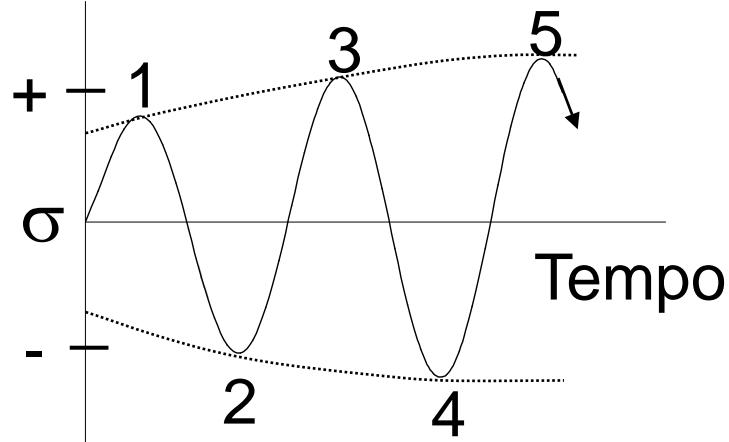
$\Delta\varepsilon_p$ - parte plástica

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2};$$
$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\sigma / E$$

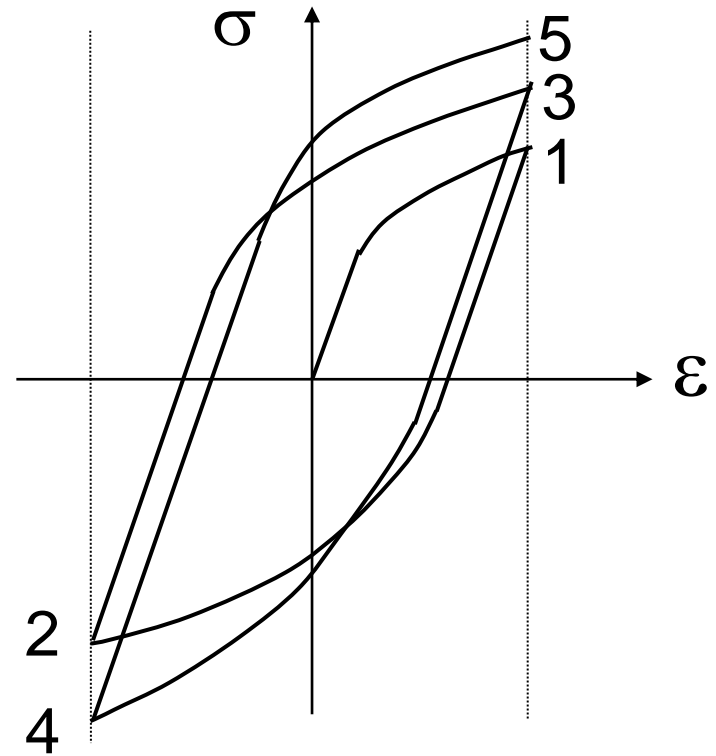
Comportamento Transiente – Encruamento



(a) Amplitude de deform. Const.

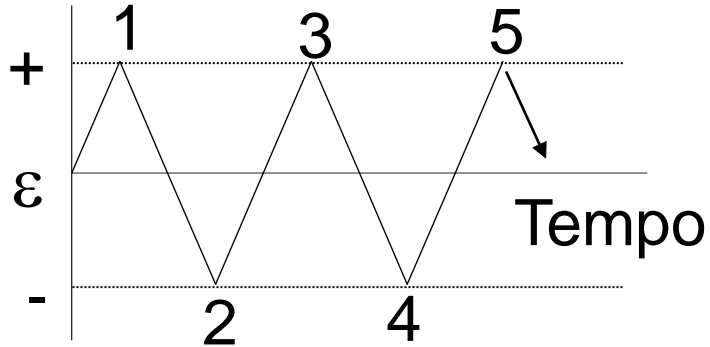


(b) Resposta da tensão
(aumentando o nível de tensão)

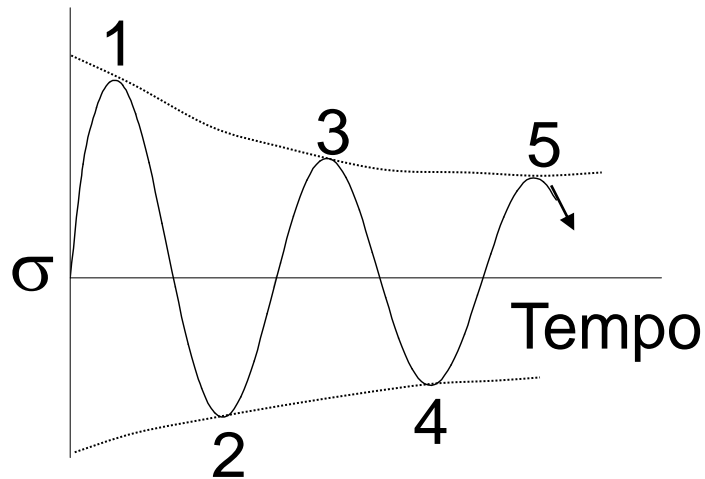


(c) Resposta Tensão-Def.

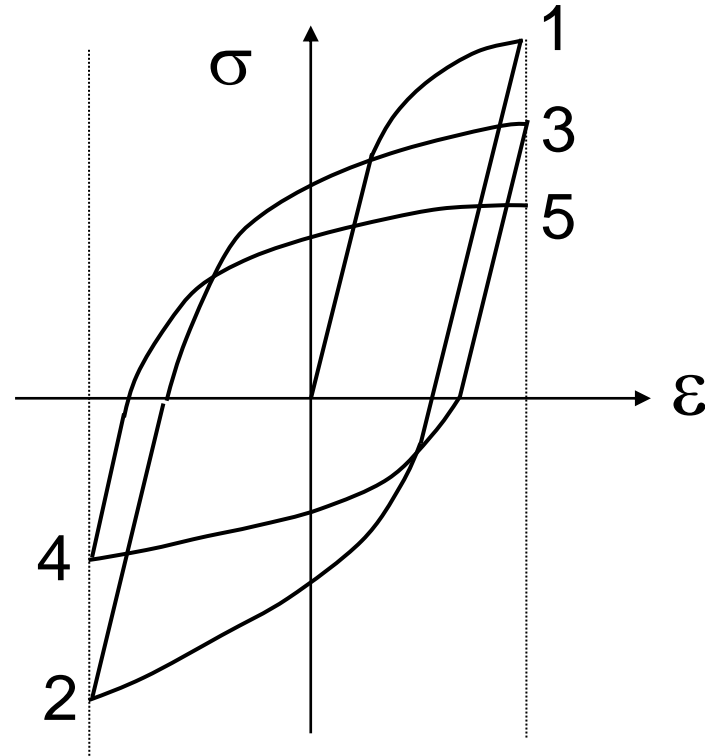
Comportamento Transiente – Amolecimento



(a) Ampl. De def. cíclica



(b) Resposta Tensão
(diminuindo o nível de tensão)



(c) Resposta cíclica tensão-def.

Materiais com **alta** energia de falha de empilhamento (**EFE**) apresentam mais facilidade de ocorrência do deslizamento cruzado. Isso facilita a formação de **subestruturas celulares** (Contornos de grão de baixo ângulo: Linhas de discordâncias). Esses contornos podem ter a densidade de discordâncias reduzidas por processos de aniquilação, levando ao amolecimento como no caso de deformação a frio, cujas paredes celulares são densas. Exemplos: **Cu, Al, Ni, Fe, aços carbono**. Os de baixa EFE, nos quais é difícil ocorrer o deslizamento cruzado e não há formação de contorno de baixo ângulo. Ex: **ligas Cu-Zn, Fe-Si, aços austeníticos**.

A ocorrência de **amolecimento ou endurecimento cíclico** depende da **estrutura inicial de LDs e sua evolução, presença de precipitados, microestrutura**.

Encruamento Vs. Amolecimento

Postulado de Manson: Baseado em observações experimentais. Utilizando as propriedades estáticas do material (limite de resist. e de escoamento e expoente de encruamento, n), pode ser previsto se o material irá encruar ou amolecer.

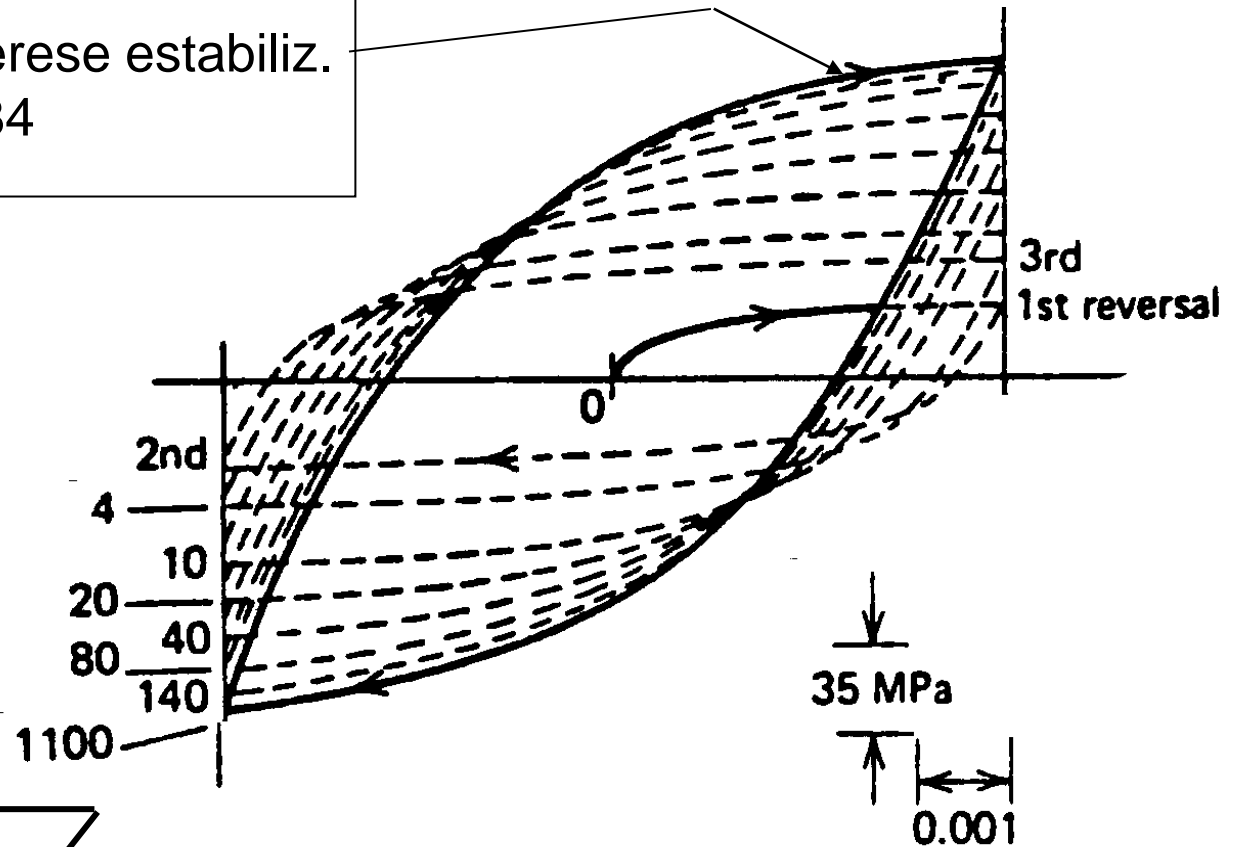
$$\left. \begin{array}{l} \text{Se } (\sigma_u / \sigma_y) > 1,4 \\ \text{ou } n > 0,2 \end{array} \right\} \text{material ciclicamente endurece}$$
$$\left. \begin{array}{l} \text{Se } (\sigma_u / \sigma_y) < 1,12 \\ \text{ou } n < 0,1 \end{array} \right\} \text{material ciclicamente amolece}$$

onde, n é dado por

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Laço de Histerese do Cobre

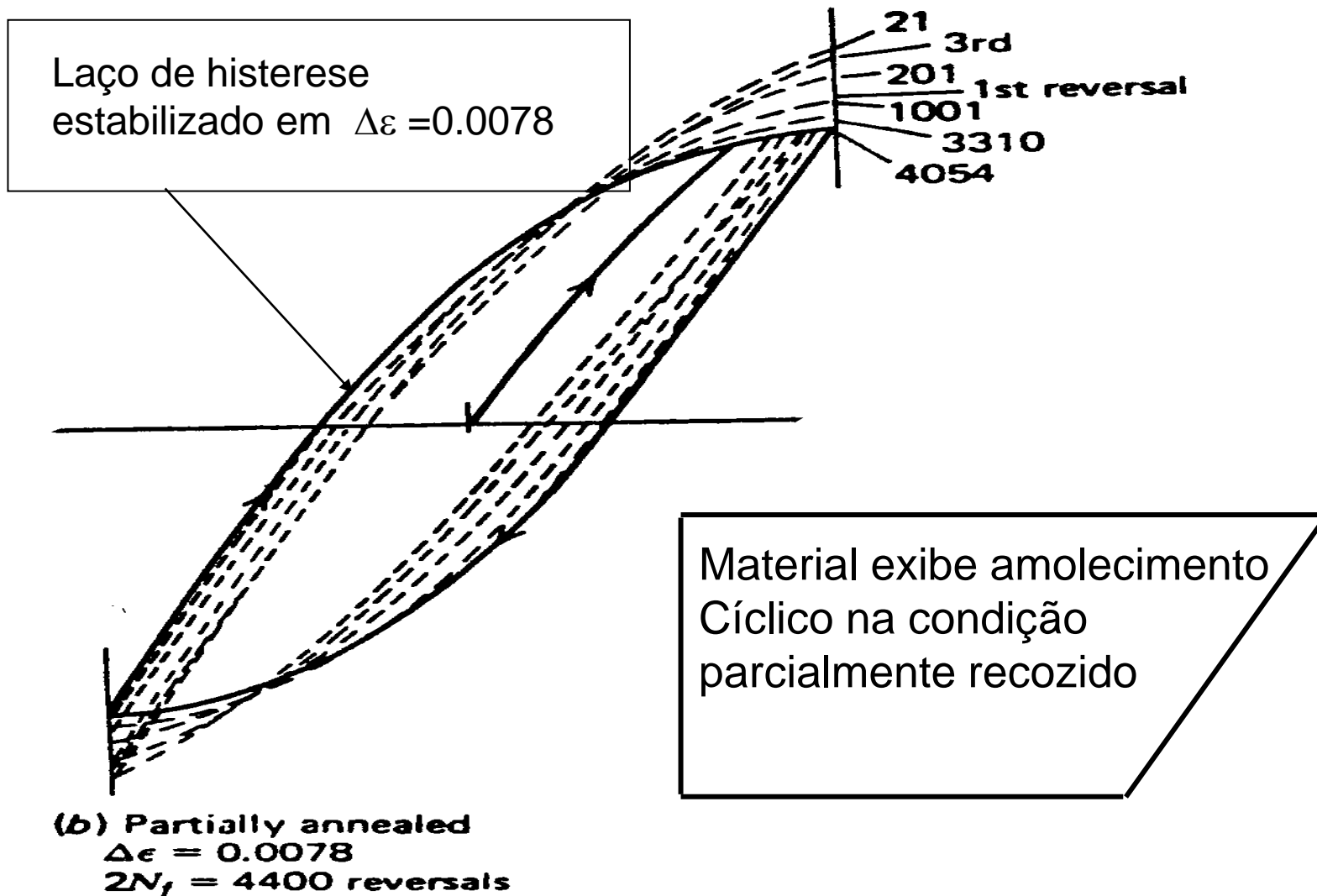
Laço de Histerese estabiliz.
em $\Delta\varepsilon = 0.0084$



Material exibe endurecimento na condição de recozido.

(a) Fully annealed
 $\Delta\varepsilon = 0.0084$
 $2N_f = 8060$ reversals

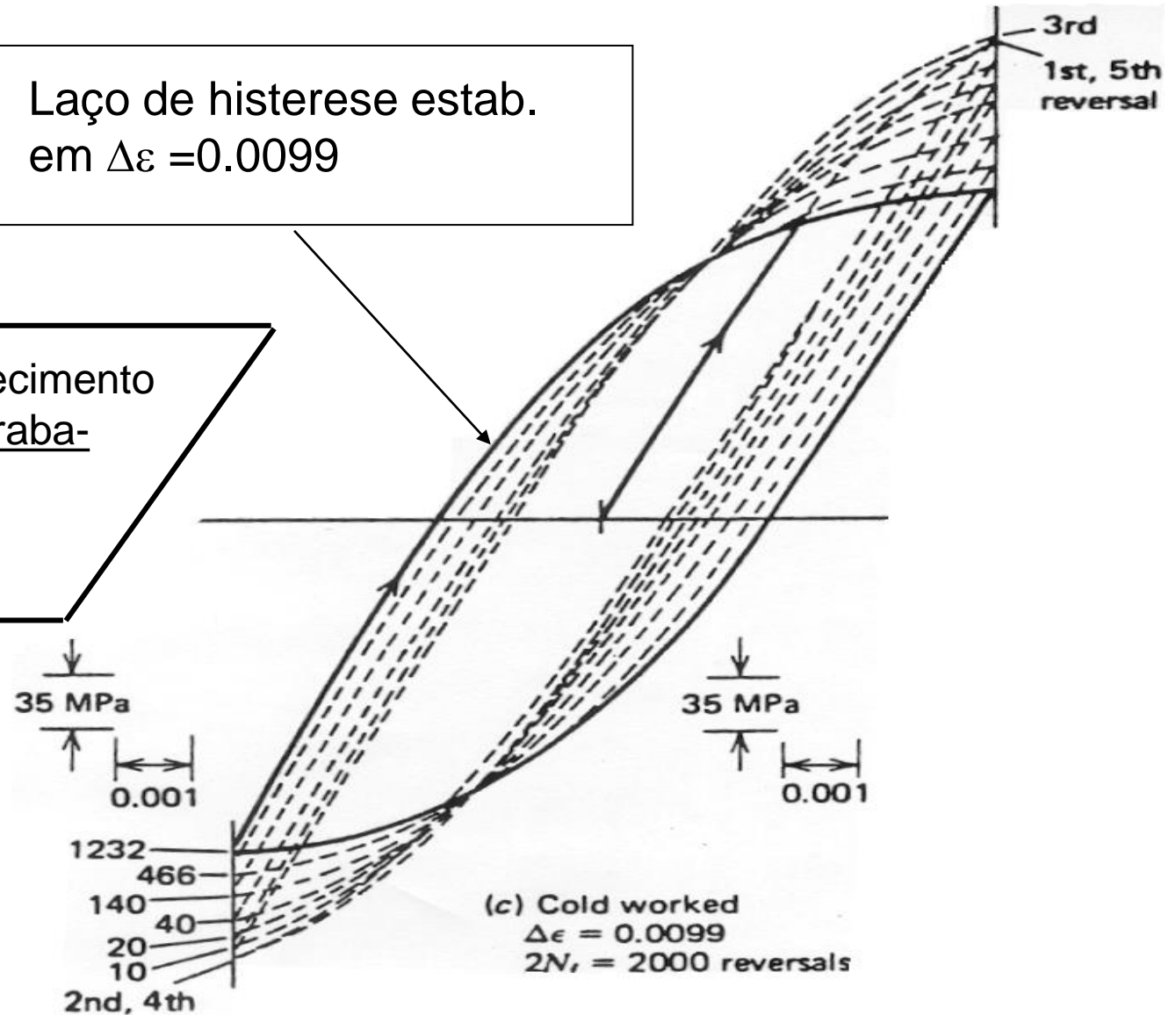
Laço de Histerese do Cobre



Laço de Histerese do Cobre

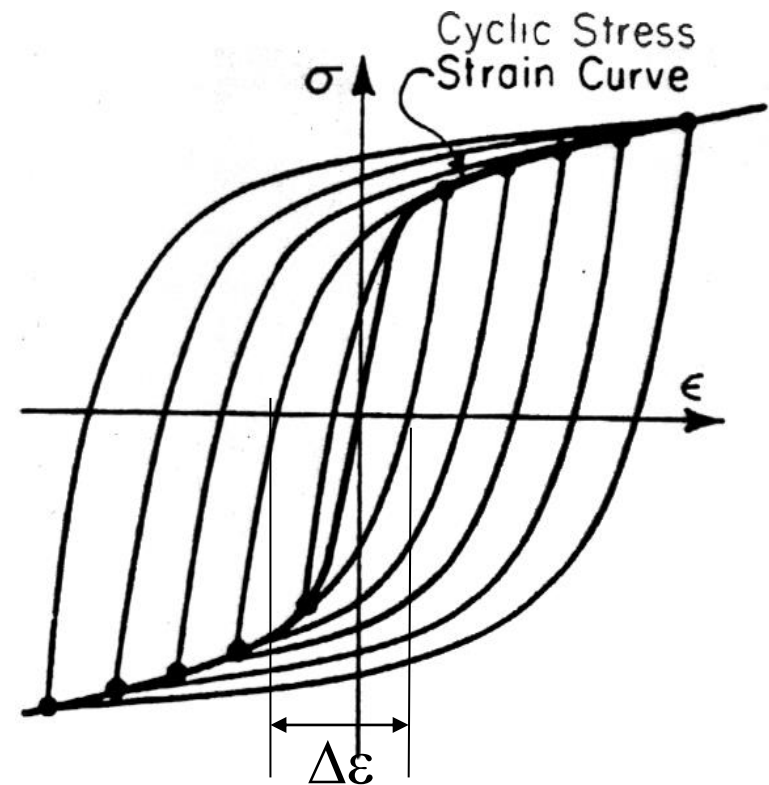
Laço de histerese estab.
em $\Delta\varepsilon = 0.0099$

Material exibe amolecimento
cíclico na cond. de traba-
lhado a frio.

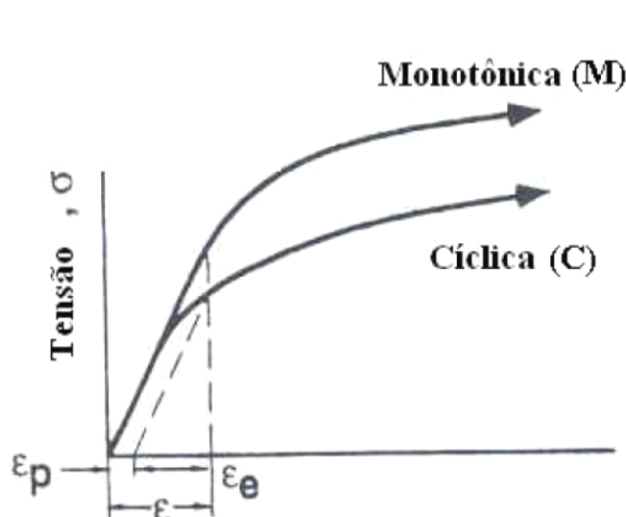


Determinação da Curva Tensão-Deformação Cíclica

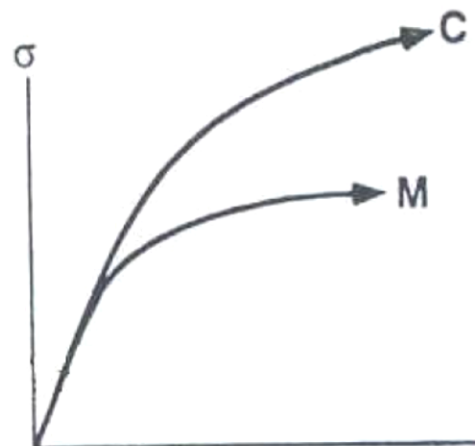
- Aplicar uma amplitude de def. de $\Delta\varepsilon/2$.
- O transiente de tensão é seguido de um laço de histerese estabilizado
- Estabeleça o laço de histerese estabilizado para este nível de def.
- Repetir o procedimento com uma diferente amplitude de def.
- Unir as pontas dos laços de histerese estabilizados.
- A CURVA TENSÃO DEF. do Material.



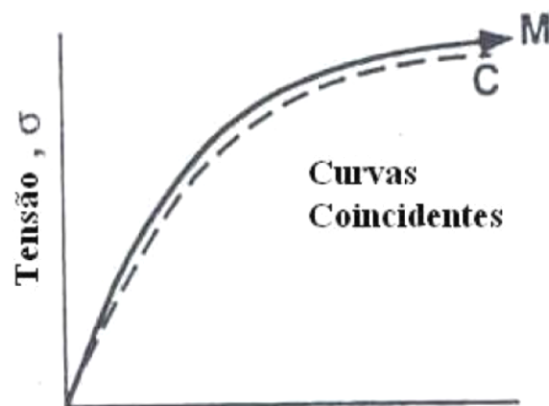
Encruamento/amolecimento



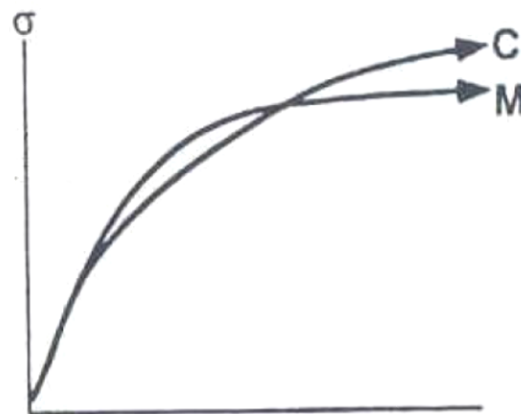
(a) Amolecimento Cíclico



(b) Endurecimento Cíclico



(c) Ciclicamente Estável



(d) Comportamento Misto

RELAÇÃO TENSÃO-DEFORMAÇÃO CÍCLICA

$$\text{Def. Total } \varepsilon_t = \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

$$\text{Def. Elast. , } \varepsilon_e = \sigma / E$$

$$\text{Def. Plast, } \varepsilon_p = \left(\frac{\sigma}{H'} \right)^{1/n'}$$

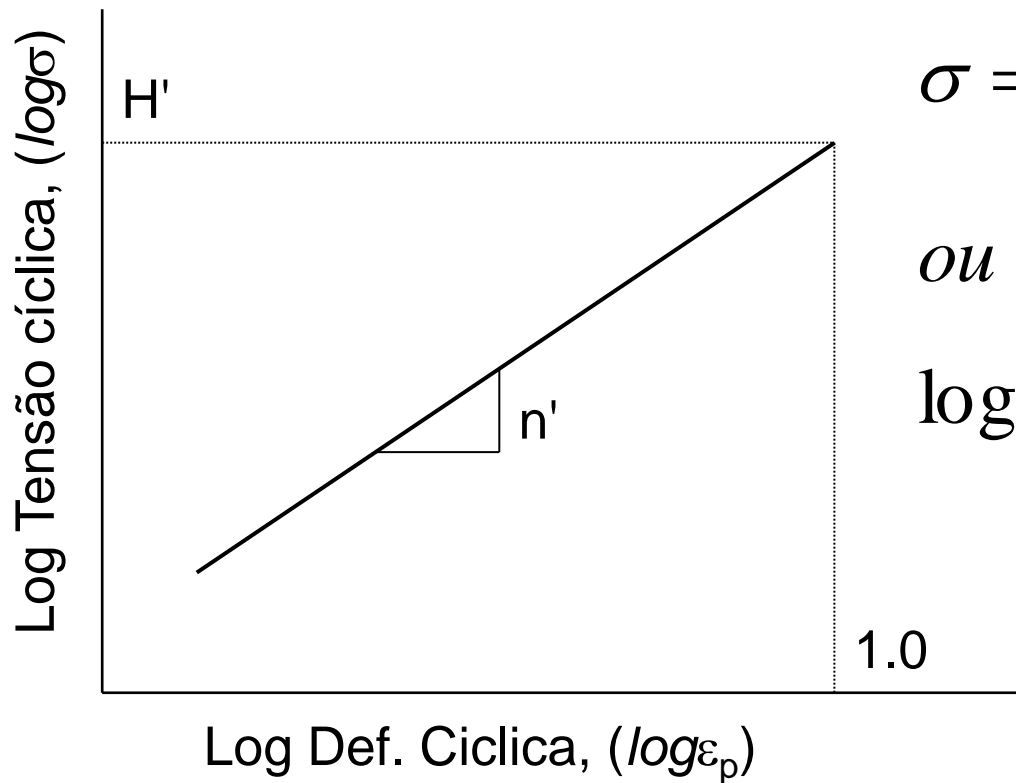
$$\sigma = H' \left(\varepsilon_p \right)^n$$

$$\text{De maneira que } \varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H'} \right)^{1/n'}$$

H' – Coef. de Resist. cíclica

n' - Expoente de encruamento cíclico.

RELAÇÃO TENSÃO-DEFORMAÇÃO CÍCLICA



$$\sigma = H' (\epsilon_p)^n$$

$$\text{ou } \epsilon_p = \left(\frac{\sigma}{H'} \right)^{1/n'}$$

$$\log \sigma = \log H' + n' \log \epsilon_p$$

CURVA DE HISTERESE ESTABILIZADA

O processo **tende à saturação** (geralmente dentro de 10 a 20% da vida em fadiga) quando os **laços de histerese tornam-se coincidentes**, ou a **variação** do comportamento tensão-deformação **diminui** com o aumento do número de ciclos: **comportamento tensão-deformação cíclico estável.**

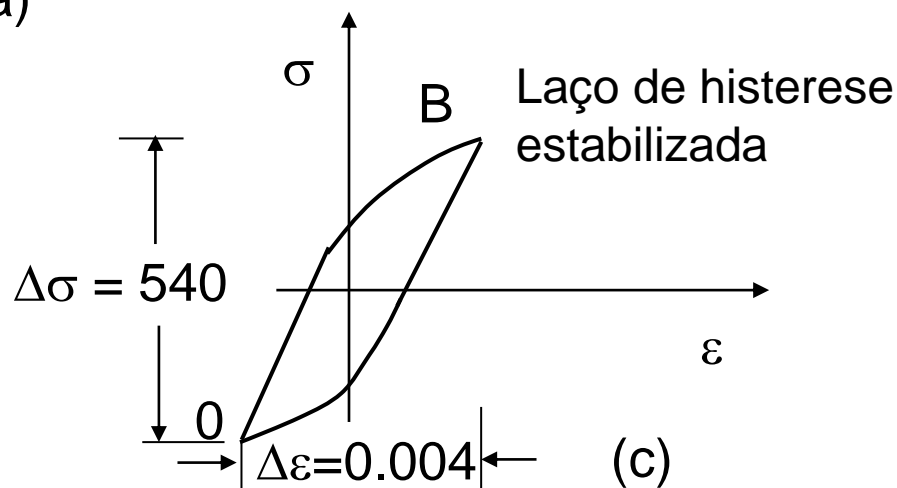
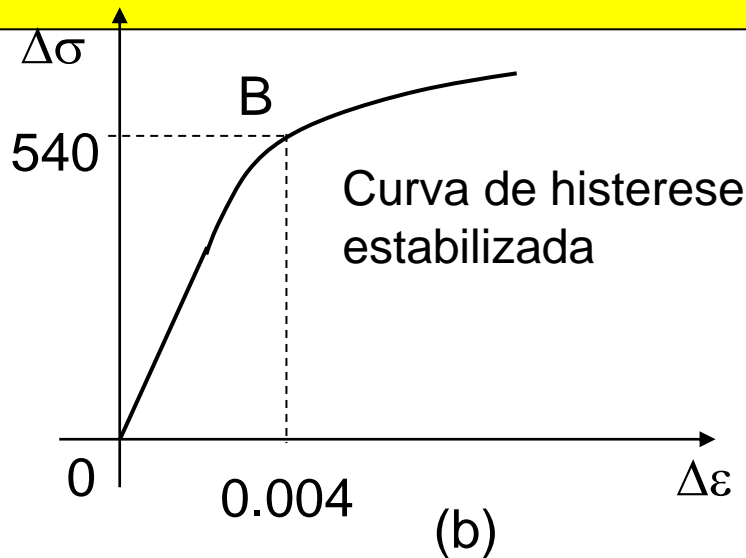
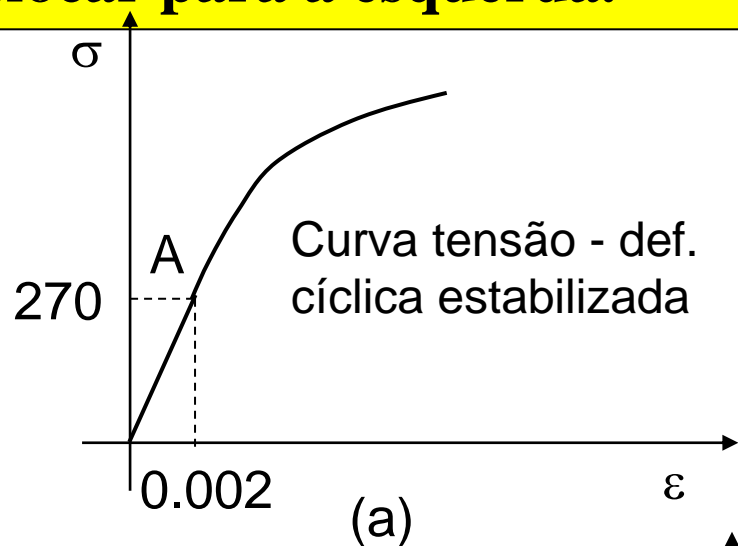
Hipótese de Masing:

-Para **materiais** exibindo comportamento **simétrico em tração e compressão.**

-Curva de histerese pode ser **ESTIMADA** a partir da curva Tensão - Def. cíclica estabilizada.

CURVA DE HISTERESE ESTABILIZADA

Segundo a hipótese de **Masing**: Dada uma curva tensão – def. cíclica, obter o ponto **B** sobre a curva dobrando o valor correspondente ao ponto **A** na curva tensão - deformação cíclica, estabilizada e deslocar para a esquerda.



EQUAÇÕES PARA O LAÇO DE HISTERESE

Relembre $\varepsilon = \varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H'}\right)^{\frac{1}{n'}}$

Seguindo a hipótese de Masing:

$$\begin{array}{l} \Delta\sigma = 2\sigma \\ \Delta\varepsilon = 2\varepsilon \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \sigma = \Delta\sigma/2 \\ \varepsilon = \Delta\varepsilon/2 \end{array}$$

De maneira que $\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2H'}\right)^{\frac{1}{n'}}$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{2H'}\right)^{\frac{1}{n'}}$$

**Equação da
Histerese**

Curvas Deformação-Vida

Conforme já visto, usando a **amplitude de tensão verdadeira** ($\Delta\sigma/2$), os dados **Tensão-vida (S-N)** podem ser plotados **linearmente na escala log-log**,

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_f' (2N_f)^b$$

$2N_f$ = reversos para falhar (um reverso = $\frac{1}{2}$ ciclo)

σ_f' = coef. de resist. a fadiga

b = expoente de resist. a fadiga

} Propriedade de fadiga do material

$\sigma_f' \approx$ resist. verdadeira a fadiga, σ_f

Curvas Deformação-Vida

Manson & Coffin encontraram que os dados def.-vida (ε_p -N) podem ser, também, linearizados na coord. log-log. (**Coffin-Manson**)

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c$$

$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$ = amplitude de def. plástica

$2N_f$ = reversos para falhar (um reverso = $\frac{1}{2}$ ciclo)

ε_f' = coef. de ductilidade em fadiga.

c = expoente de ductilidade em fadiga

$$\varepsilon_f \approx \varepsilon_f'$$

Propriedade de
Fadiga do material

Curvas Deformação-Vida

Como podemos relacionar a vida à Ampl. De Def. Total $\Delta\varepsilon/2$?

$$\text{Relembre, } \frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} \quad (2.39)$$

**Relação
Def-vida**

De 2.37 & 2.39

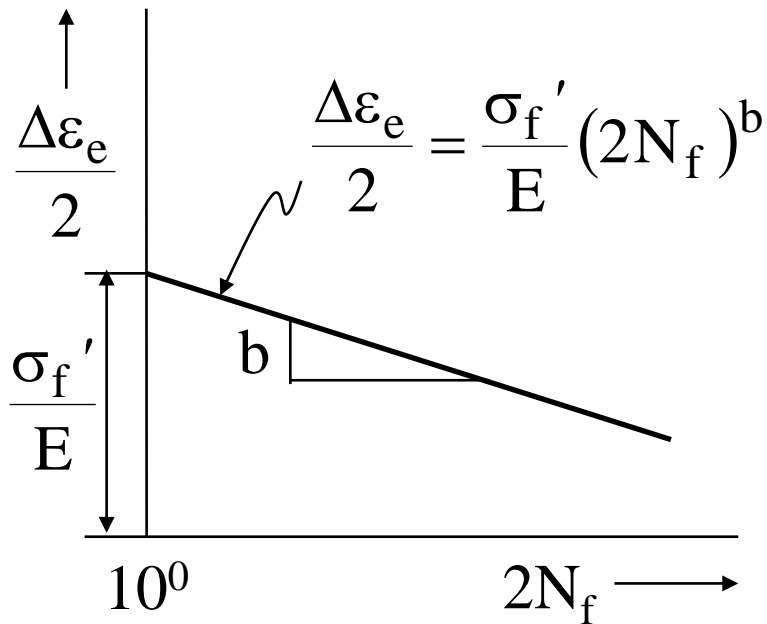
$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b \quad (2.40)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (2.41)$$

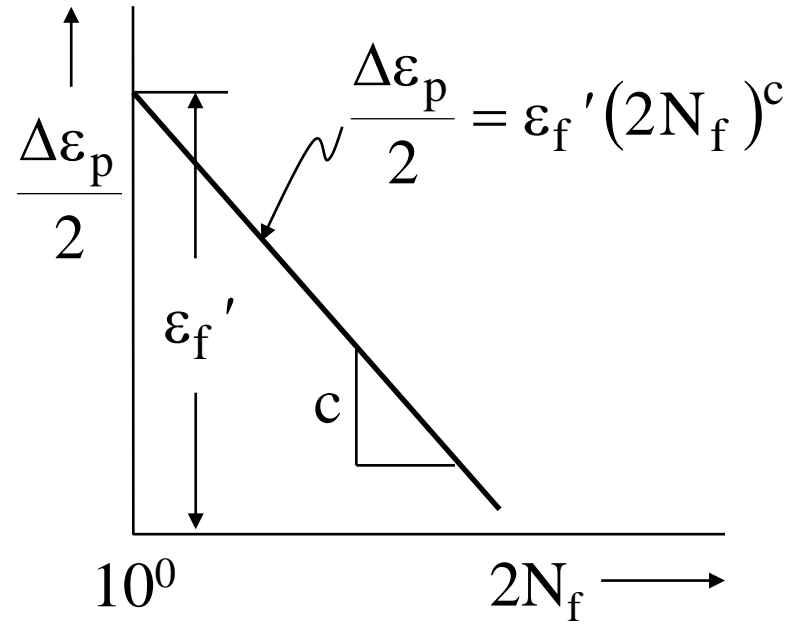
↑
elástica

↑
plástica

As equações apresentadas são lineares no plano log-log

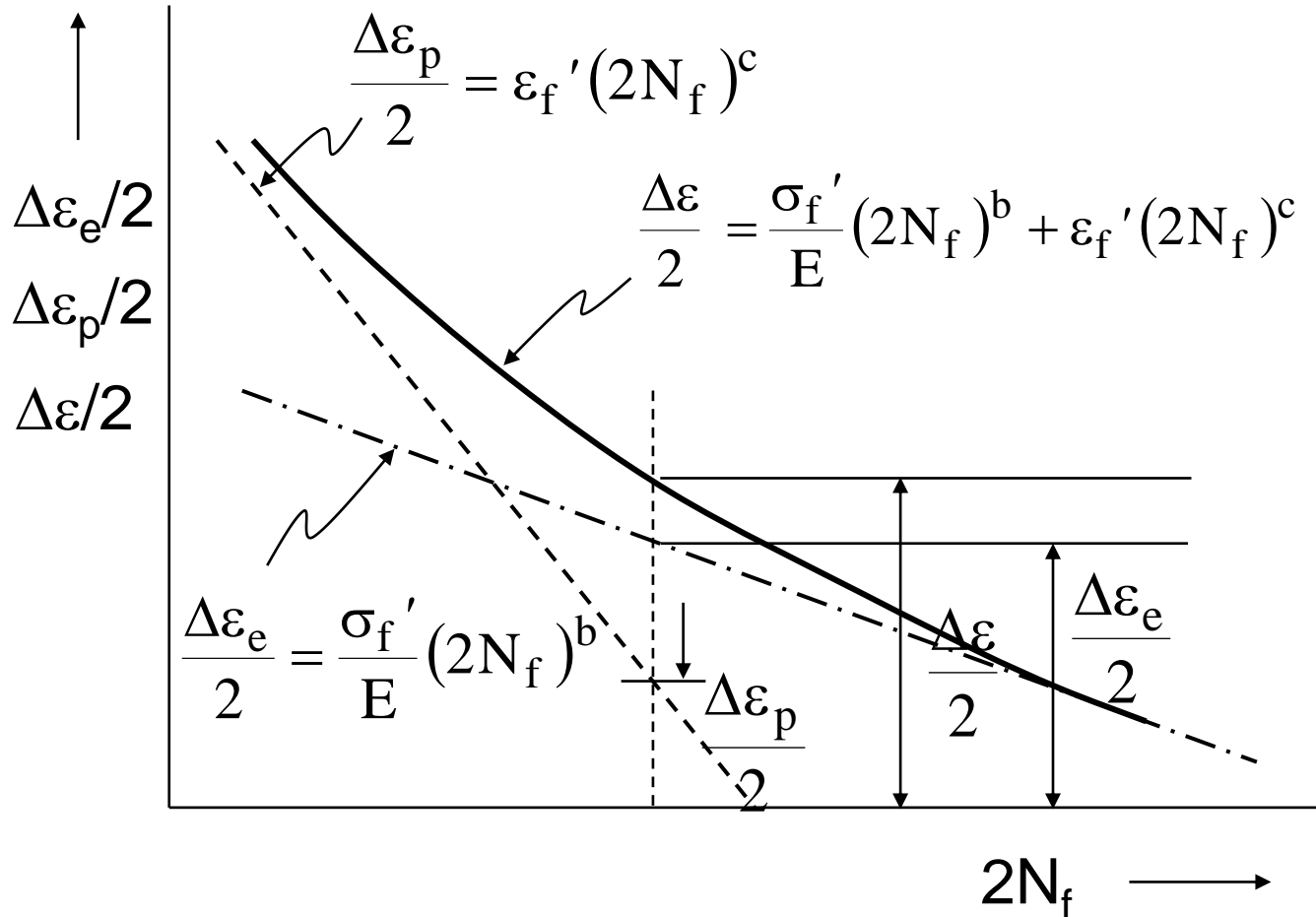


Def. – Vida Elástica

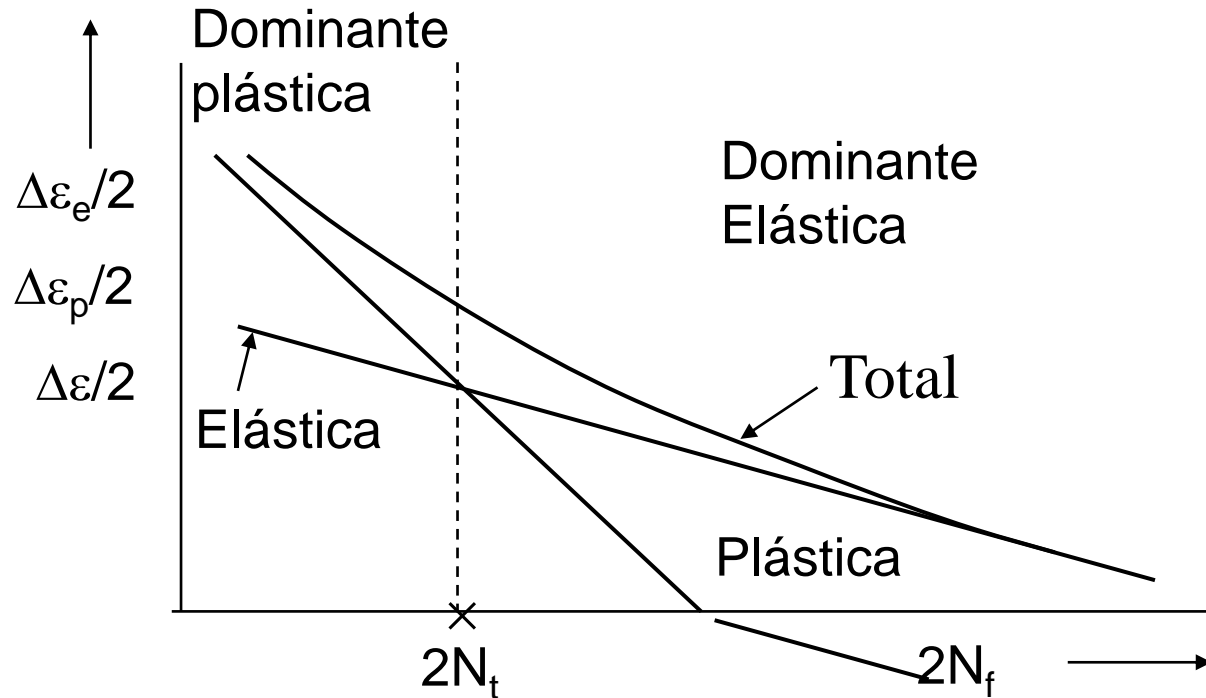


Def. – Vida plástica

Relação Tensão – Vida Total



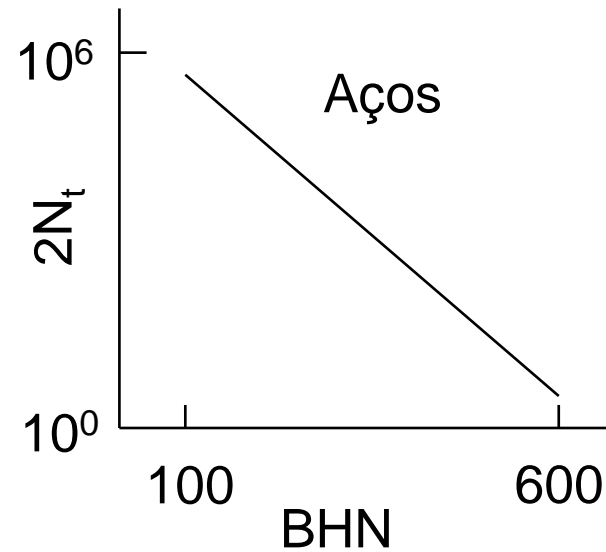
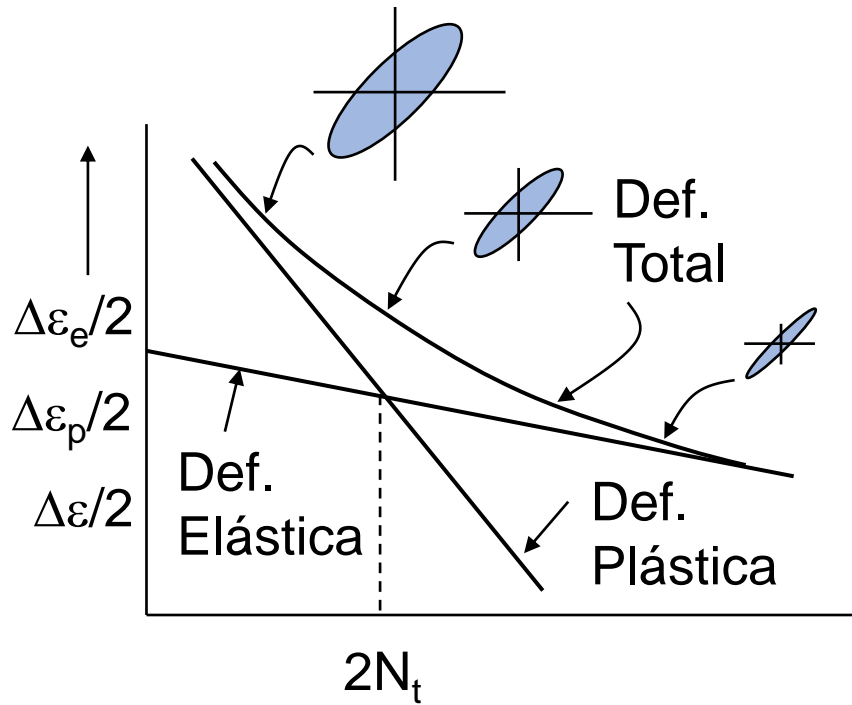
Vida de Transição



$$\text{Em } 2N_f = 2N_t : \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$$

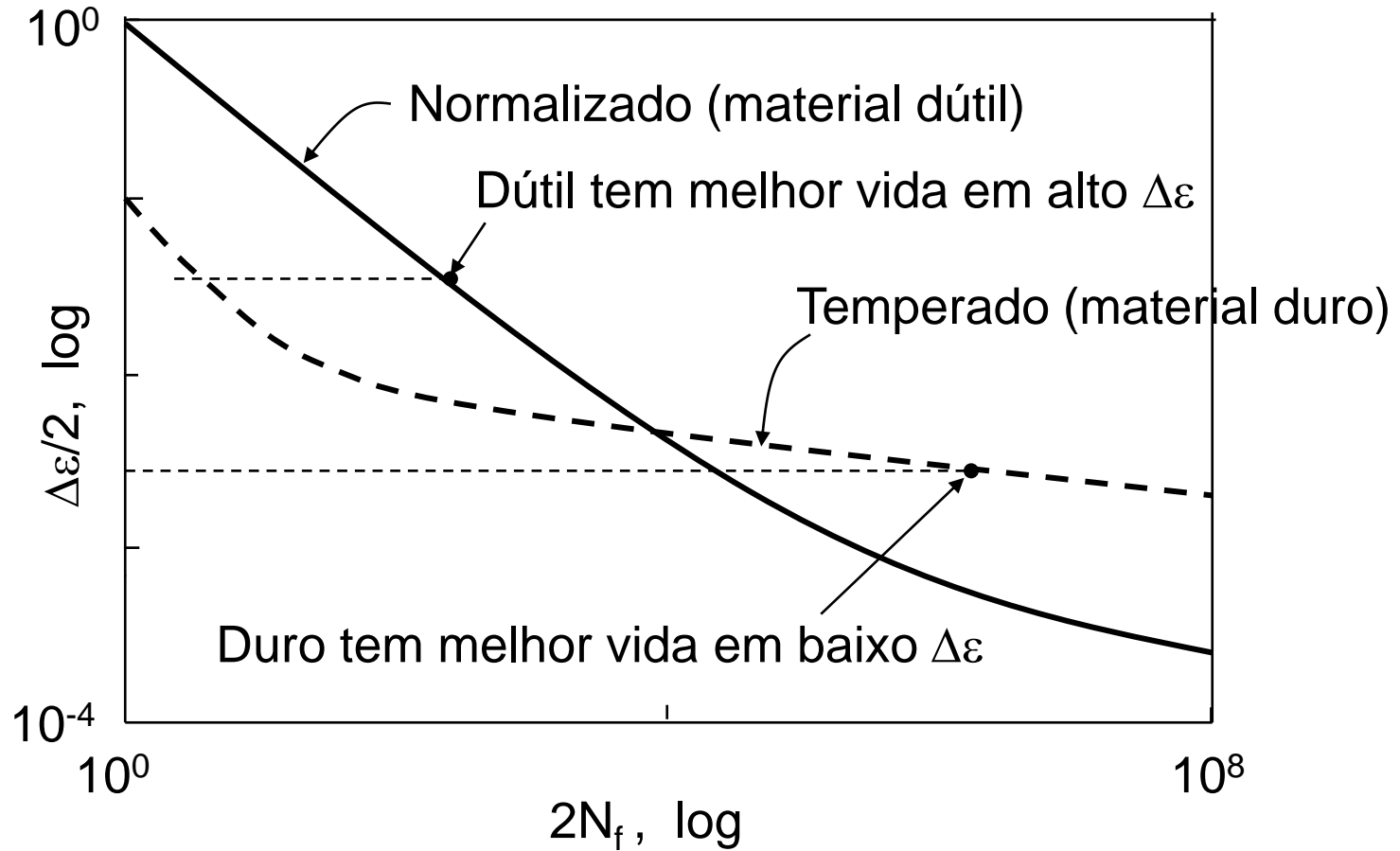
$$\frac{\sigma_f'}{E} (2N_t)^b = \varepsilon_f' (2N_t)^c \Rightarrow 2N_t = \left(\frac{\varepsilon_f' E}{\sigma_f'} \right)^{1/b-c}$$

Vida de Transição



Duro $\rightarrow 2N_t$ é pequena – mais de $2N_f$ é elástica
Mole $\rightarrow 2N_t$ é grande – mais de $2N_f$ é plástica

Resistência e Dutilidade



Propriedades de Fadiga

Na ausência de “dados cíclicos”, os parâmetros de fadiga podem ser obtidos por estimativas grosseiras a partir das “propriedades monotônicas”

$$\sigma_f' \approx \sigma_f \quad \sigma_f \approx S_u + 50 \text{ ksi para aços com BHN} < 500$$
$$S_u + 345 \text{ [MPa]}$$

b varia com $-0,05$ a $-0,12$ com uma média de $-0,085$
(a mesma que nós temos no modelo tensão-vida)

$$\varepsilon_f' \approx \varepsilon_f \quad \text{onde} \quad \varepsilon_f = \ln \frac{1}{1 - RA}$$

c varia entre -0.5 to -0.7

Para metais muito dútil $c \approx -0.6$

Para metais muito resist. $c \approx -0.5$

Table 14.1 Cyclic Stress–Strain and Strain–Life Constants for Selected Engineering Metals.¹

| Material | Source | Tensile Properties | | | | Cyclic σ - ϵ Curve | | | Strain–Life Curve | | | |
|--------------------------------------|--------|--------------------|---------------|-----------------------|------|------------------------------------|---------------|--------|-------------------|---------|---------------|--------|
| | | σ_o | σ_u | $\tilde{\sigma}_{fB}$ | % RA | E | H' | n' | σ'_f | b | ϵ'_f | c |
| <i>(a) Steels</i> | | | | | | | | | | | | |
| SAE 1015 (normalized) | (8) | 228 (33.0) | 415 (60.2) | 726 (105) | 68 | 207,000 (30,000) | 1349 (196) | 0.282 | 1020 (148) | −0.138 | 0.439 | −0.513 |
| Man-Ten ² (hot rolled) | (7) | 322 (46.7) | 557 (80.8) | 990 (144) | 67 | 203,000 (29,500) | 1096 (159) | 0.187 | 1089 (158) | −0.115 | 0.912 | −0.606 |
| RQC-100 (roller Q & T) | (2) | 683 (99.0) | 758 (110) | 1186 (172) | 64 | 200,000 (29,000) | 903 (131) | 0.0905 | 938 (136) | −0.0648 | 1.38 | −0.704 |
| SAE 1045 (HR & norm.) | (6) | 382 (55.4) | 621 (90.1) | 985 (143) | 51 | 202,000 (29,400) | 1258 (182) | 0.208 | 948 (137) | −0.092 | 0.260 | −0.445 |
| SAE 4142 (As Q, 670 HB) | (1) | 1619 (235) | 2450 (355) | 2580 (375) | 6 | 200,000 (29,000) | 2810 (407) | 0.040 | 2550 (370) | −0.0778 | 0.0032 | −0.436 |
| SAE 4142 (As Q & T, 560 HB) | (1) | 1688 (245) | 2240 (325) | 2650 (385) | 27 | 207,000 (30,000) | 4140 (580) | 0.126 | 3410 (494) | −0.121 | 0.0732 | −0.805 |

Exemplo

A partir dos dados monotônicos e cíclicos de tensão-Def. Determine as constantes cíclicas de tensão-def & def. – vida)

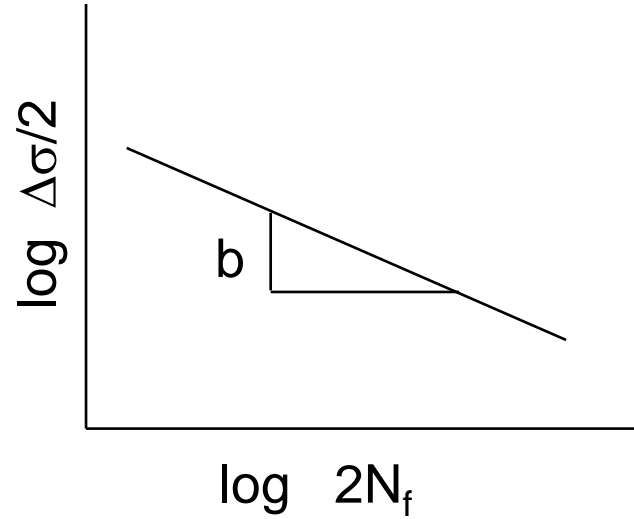
Dados monotônicos: $S_y = 158$ ksi $E = 28.4 \times 10^3$ ksi
 $S_u = 168$ ksi $\sigma_f = 228$ ksi
 $\%RA = 52$ $\epsilon_f = 0.734$

| Ampl. de Def. Total, $\Delta\varepsilon/2$ | Ampl. De tensão $\Delta\sigma/2$ (ksi) | Ampl. Def. Plástica, $\Delta\varepsilon_p/2^*$ | Reversos para Falhar, $2N_f$ |
|--|--|--|------------------------------|
| 0.0393 | 162.5 | 0.0336 | 50 |
| 0.0393 | 162 | 0.0336 | 68 |
| 0.02925 | 155 | 0.0238 | 122 |
| 0.01975 | 143.5 | 0.0147 | 256 |
| 0.0196 | 143.5 | 0.0145 | 350 |
| 0.01375 | 136.5 | 0.00894 | 488 |
| 0.00980 | 130.5 | 0.00521 | 1,364 |
| 0.00980 | 126.5 | 0.00534 | 1,386 |
| 0.00655 | 121 | 0.00229 | 3,540 |
| 0.00630 | 119 | 0.00211 | 3,590 |
| 0.00460 | 114 | 0.00059 | 9,100 |
| 0.00360 | 106 | 0.00000 | 35,200 |
| 0.00295 | 84.5 | 0.00000 | 140,000 |

$$* \quad \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\Delta\varepsilon}{2} - \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\Delta\varepsilon}{2} - \frac{\Delta\sigma}{2E}$$

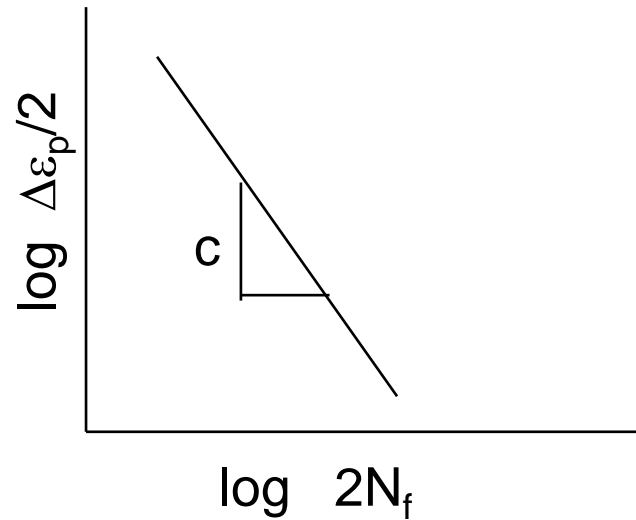
$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_f' (2N_f)^b$$

$$\sigma_f' = 222 \text{ ksi} \quad b = -0.076$$



$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c$$

$$\varepsilon_f' = 0.811 \quad c = -0.732$$



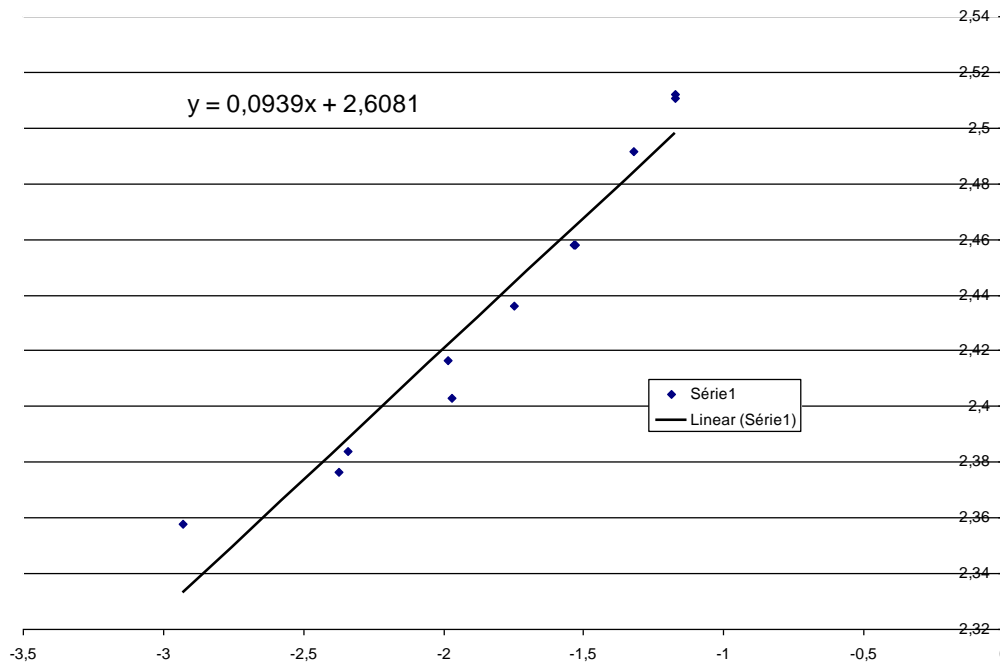
Para determinar H' e n' (Dois métodos)

(A) ajuste uma curva de potência entre, $\frac{\Delta\sigma}{2}$ e

a ampl. def. plástica, $\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\sigma}{H'} \right)^{\frac{1}{n'}}$$

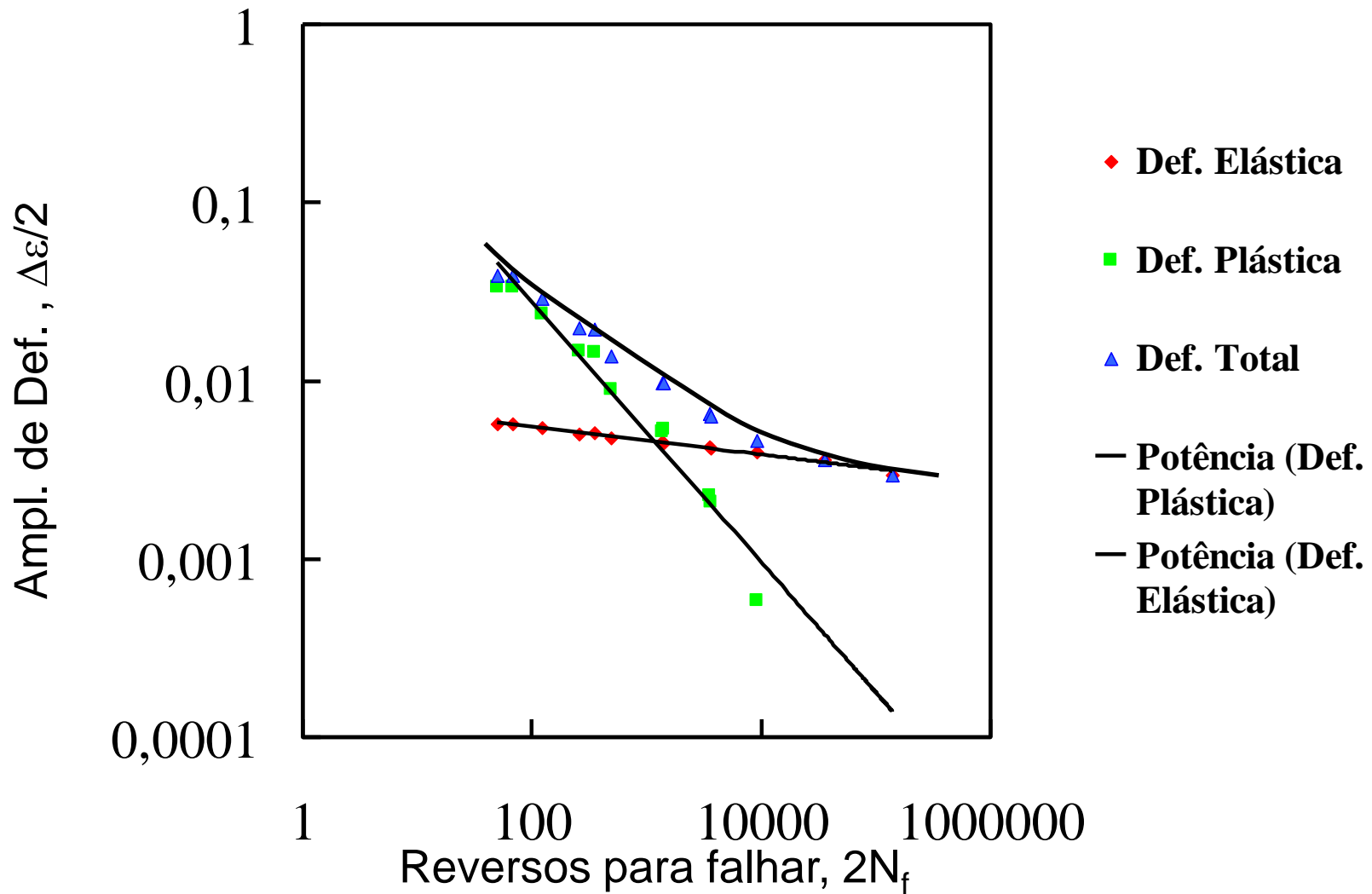
$$\Delta\sigma = H' (\Delta\varepsilon_p)^{n'} \quad \longrightarrow \quad H' = 216 \text{ ksi} \quad n' = 0,094$$



(B) Relembre $H' = \frac{\sigma_f'}{(\varepsilon_f')^{n'}}$

$$n' = b/c = \frac{-0,076}{-0,732} = 0,104$$

$$H' = \frac{222}{(0,811)^{0,104}} = 227 \text{ ksi}$$



EXEMPLO

Em um local de interesse em um componente aeronáutico feito de uma liga de Ti-6Al-4V da Tabela abaixo; o material é repetidamente carregado uniaxialmente com uma história de carregamento da figura abaixo. Estime o número de repetições necessárias para causar a falha do componente.

**Constantes para a curva S-N para materiais estruturais
-CPS ensaiados com tensão média igual a zero e sem entalhe e
carregamento axial(Ref: Dowling)**

| Materiais | S _y | S _u | S = σ' _f (2N _f) ^b = A(N _f) ^b | | | σ _a =C+D logN _f | |
|--|----------------|----------------|---|------|---------|---------------------------------------|-------|
| | | | σ' _f | A | b | C | D |
| <u>Aços</u> | | | | | | | |
| AISI 1015 (N) | 227 | 415 | 976 | 886 | -0.14 | 545 | -69.6 |
| Man-Ten (HR) | 322 | 557 | 1089 | 1006 | -0.115 | 703 | -83.0 |
| RQC-100 (R Q&T) | 683 | 758 | 938 | 897 | -0.0648 | 780 | -68.9 |
| AISI 4142 (Q&T, 450 HB) | 1584 | 1757 | 1937 | 1837 | -0.0762 | 1529 | -148 |
| AISI 4340 (qualidade aeronáutica) | 1103 | 1172 | 1758 | 1643 | -0.0977 | 1247 | -137 |
| <u>Liga de Al</u> | | | | | | | |
| 2024-T4 | 303 | 476 | 900 | 839 | -0.102 | 624 | -69.9 |
| <u>Liga de Ti</u> | | | | | | | |
| Ti-6Al-4V (Solubilizada e envelhecida) | 1185 | 1233 | 2030 | 1889 | -0.104 | 1393 | -157 |

(N) Normalizada, (HR) laminado a quente. S_y, S_u, σ'_f, A,C e D estão em MPa. Os dados são para fadiga de alto ciclo 10³ < N < 10⁶

- A contagem de ciclos inicia no primeiro ponto no nível A e termina quando a história retorna a este ponto, em A'. Considerando os eventos:
 - A1-B1-A2 um ciclo é contado neste nível.
 - A2-B2-A3
 - A3-B3-A4
 - O próximo evento A4-C1-D1 será considerado mas não contado.
 - C1-D1-C2 outro ciclo de outro nível e assim por diante até 100 ciclos serem formados.
 - Neste ponto todos os ciclos foram considerados menos os ciclos A4, E e A'. Estes foram o maior ciclo que pode ser formado.

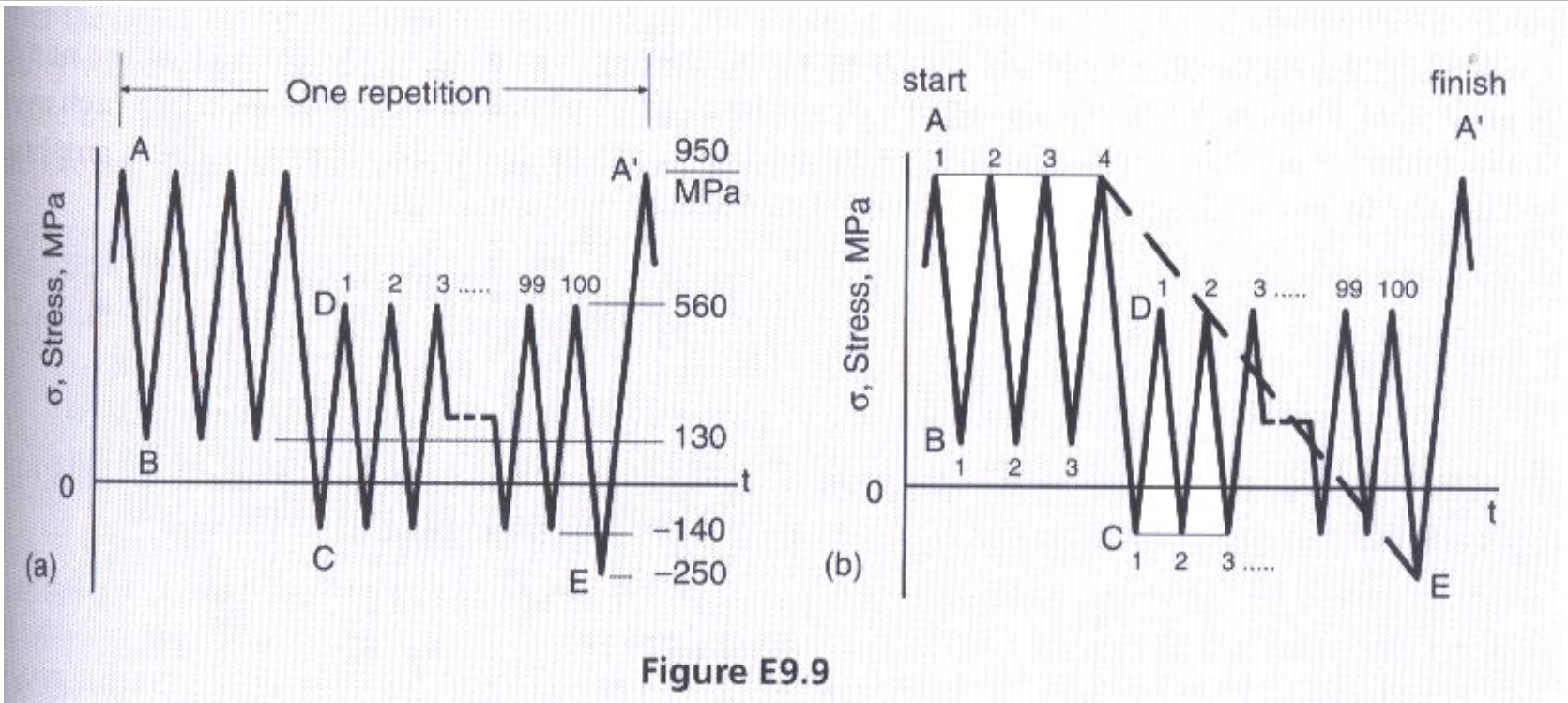


Figure E9.9

| Ciclo | j | N _j | σ _{min} MPa | σ _{max} MPa | σ _a MPa | N _{fj} | N _j /N _{fj} |
|-------|---|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|
| A-B | 1 | 3 | 130 | 950 | 410 | 4,21X10 ⁴ | 7,12X10 ⁻⁵ |
| C-D | 2 | 100 | -140 | 560 | 350 | 1,14X10 ⁶ | 8,74X10 ⁻⁵ |
| A-E | 3 | 1 | -250 | 950 | 600 | 6,75X10 ³ | 1,481X10 ⁻⁴ |
| | | | | | | | Σ=3,068 x10⁻⁴ |

As constantes σ'_f e b para a liga de Ti-4Al-4V e a equação de SWT

$$\sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a} = \sigma'_f (2 N_f)^b \dots\dots\dots (\sigma_{\max} > 0)$$

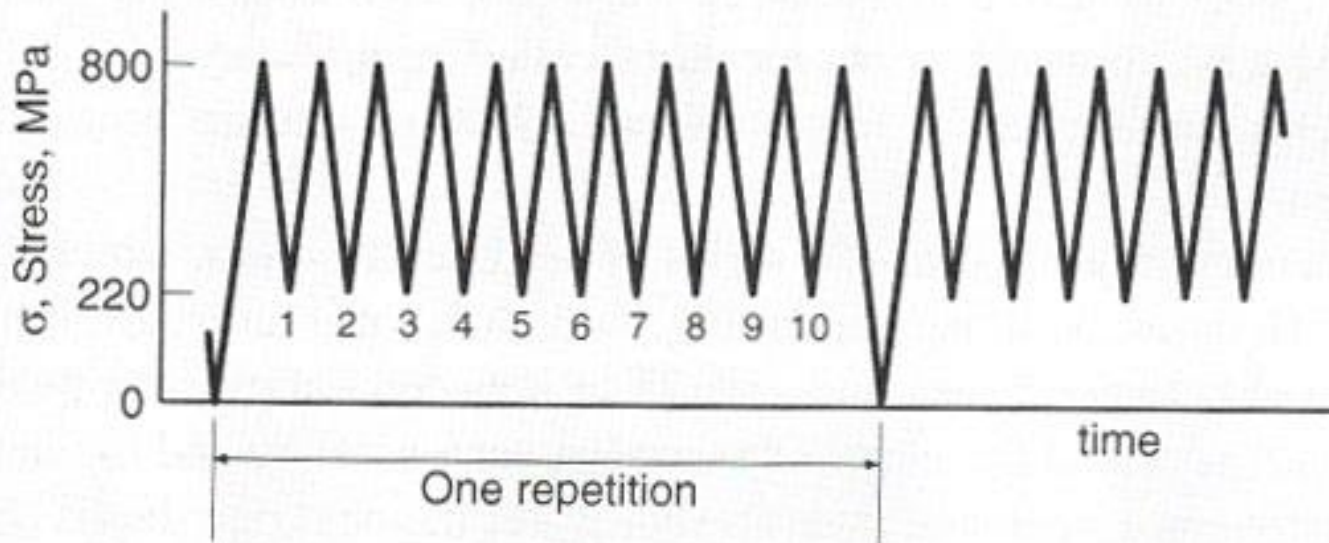
$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a}}{\sigma'_f} \right)^{1/b}$$

A estimativa do número de repetições pode ser obtida para :

$$D = B_f \sum \frac{n_i}{N_i} = 1$$

$$B_f = \frac{1}{3,068 \times 10^{-4}} = 3259 \text{ repetições}$$

Uma história de carregamento é apresentada a seguir, sendo o carregamento uniaxial aplicado em um CP não entalhado fabricado de um aço AISI 4340. Estime o número de repetições necessárias para falhar o CP.



| j | N _j | σ _{min} | σ _{max} | σ _a | σ _m | N _{fj} | N _j /N _{fj} |
|---|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|------------------------|---------------------------------|
| 1 | 1 | 0 | 800 | 400 | 400 | 1,36 x 10 ⁵ | 7,37 x 10 ⁻⁶ |
| 2 | 10 | 220 | 800 | 290 | 510 | 1,54 x 10 ⁶ | 6,51 x 10 ⁻⁶ |

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \dots \dots \dots \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma'_f = 1758 \text{ MPa e}$$

$$b = -0,0977$$

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f - \sigma_m} \right)^{1/b}$$

$$B_f \left[\sum_{j=1}^{N_B} \frac{N_j}{N_{fj}} \right] = 1 \Rightarrow B_f = 1/1,388 \times 10^{-5} = 72.000 \dots \text{repeti\c{c}oes}$$

Considere a hist3ria de carregamento anterior e:

- a) Estime a vida usando o m3todo da tens3o equivalente com amplitude constante.
- b) Se para esta hist3ria de tens3es 3 esperada 1000 repeti33es, qual o fator de seguran3a em vida e em tens3o?

| j | N _j | σ _{min} | σ _{max} | σ _a | σ _m | σ _{arj} | N _j x (σ _{arj}) ^{-1/b} |
|---|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|--|
| 1 | 1 | 0 | 800 | 400 | 400 | 517,8 | 6,036 x 10 ²⁷ |
| 2 | 10 | 220 | 800 | 290 | 510 | 408,5 | 5,330 x 10 ²⁷ |

$$\sigma_{aq} = \left[\sum_{j=1}^k N_j (\sigma_{arj})^{-1/b} / N_B \right]^{-b} = [1,137 \times 10^{28} / 11]^{-(-0,0977)} = 435,8 \text{ MPa}$$

Substituindo este valor em e calculando N_f:

$$\sigma_{aq} = \sigma'_f (2 N_f)^b \Rightarrow N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{aq}}{\sigma'_f} \right)^{1/b} = \frac{1}{2} \left(\frac{435,8}{1758} \right)^{1/-0,0977} = 792.300$$

$$B_f = \frac{N_f}{\sigma'_f} = \frac{792.300}{11} = 72.000$$

O fator de segurança pode ser calculado como:

$$X_N = \frac{N_{f2}}{\hat{N}} = \frac{792.300}{11 \times 1000} = 72,0$$

$$X_S = X_N^{-b} = 72^{-0,0977} = 1,52$$

FIM