



**Assimetria do ciclo
Sensibilidade ao entalhe**

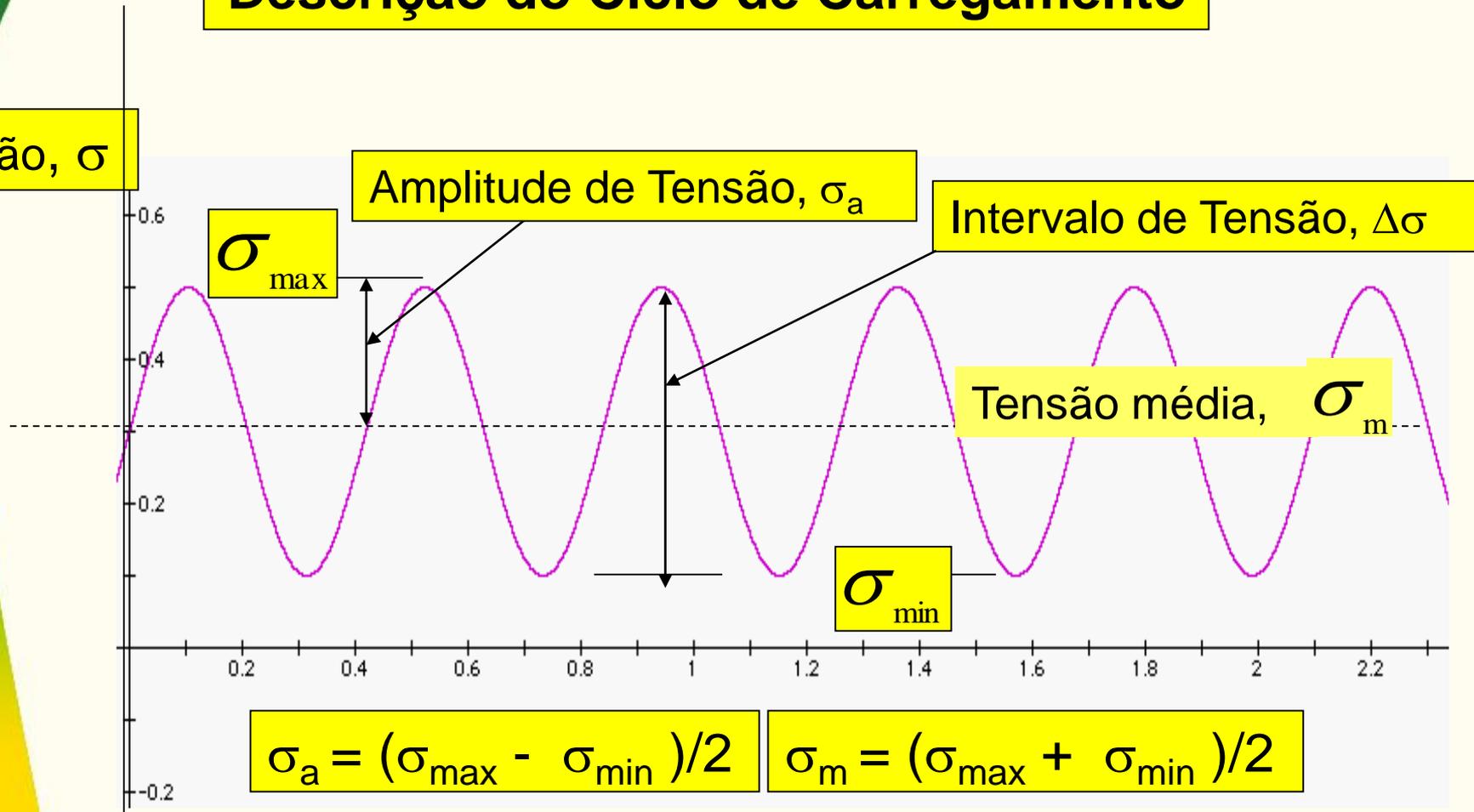
Carregamento de Amplitude Variável

Deformação-Vida ($\epsilon \times N$)

DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão, σ



$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2$$

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2$$

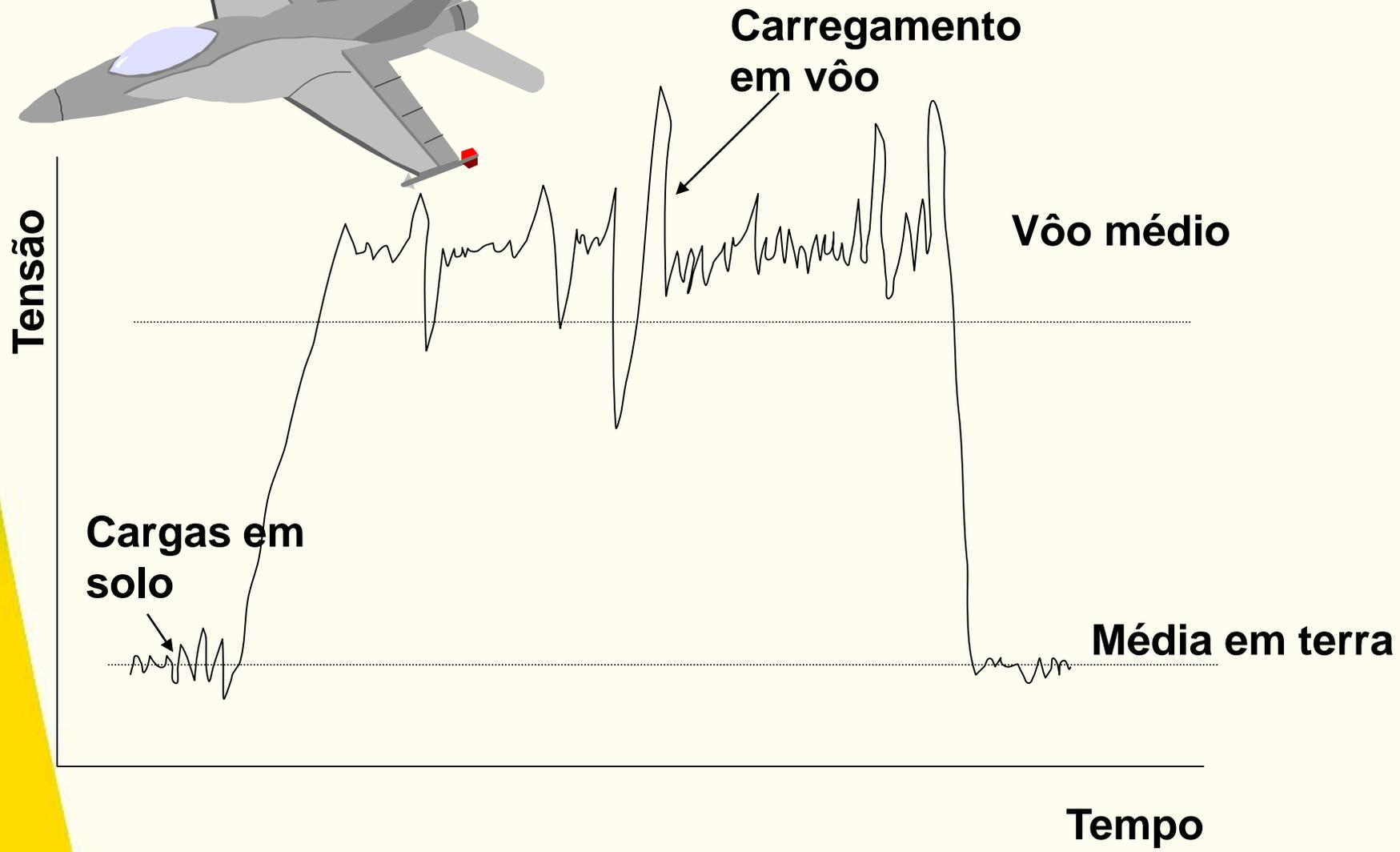
$$\Delta\sigma = (\sigma_{max} - \sigma_{min})$$

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

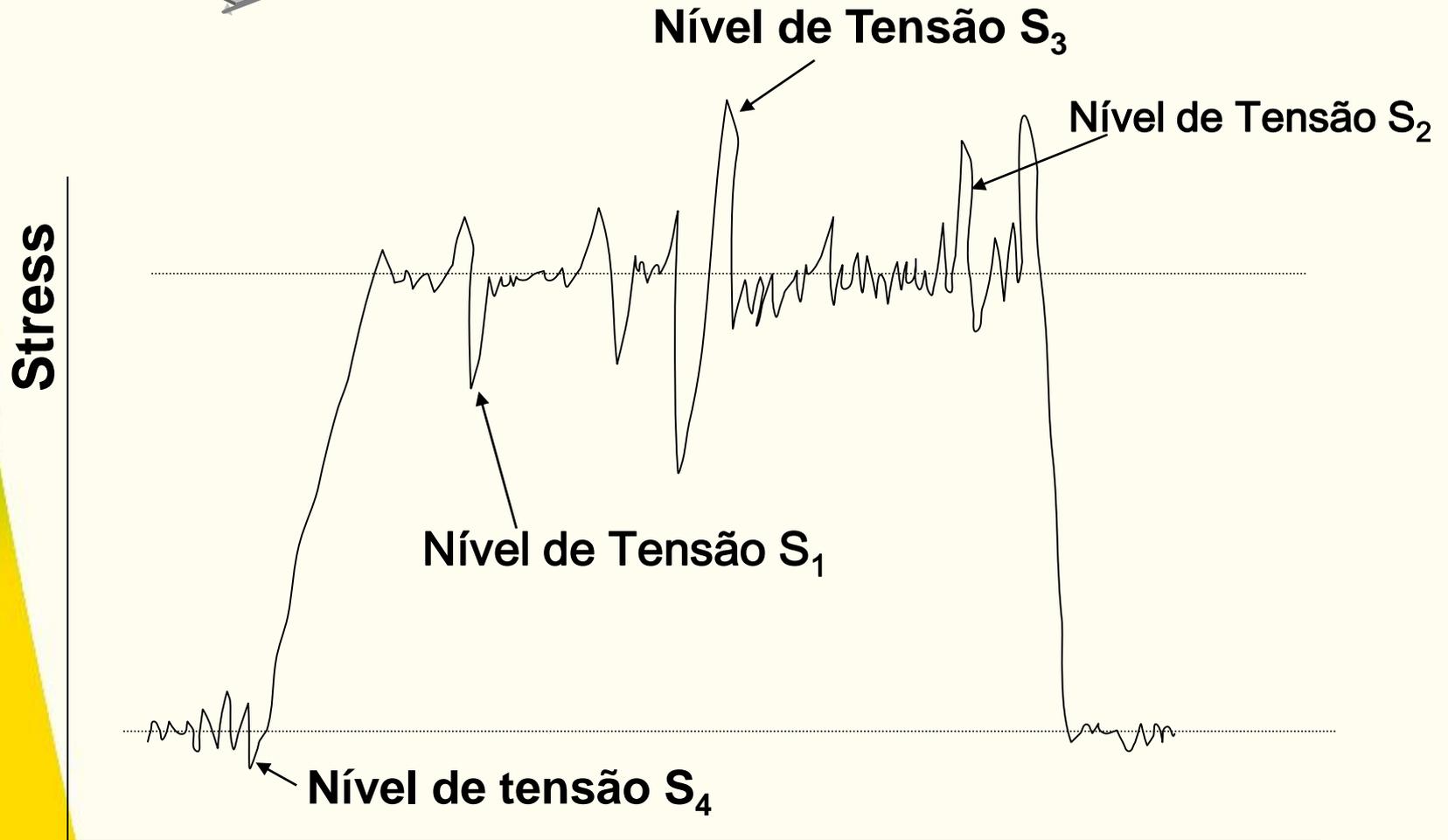
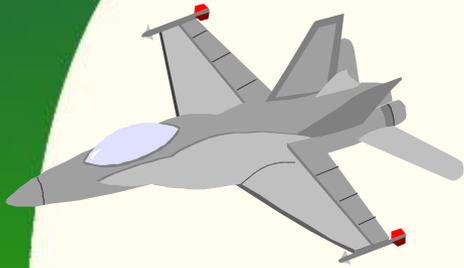
RAZÃO DE AMPLITUDE

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$

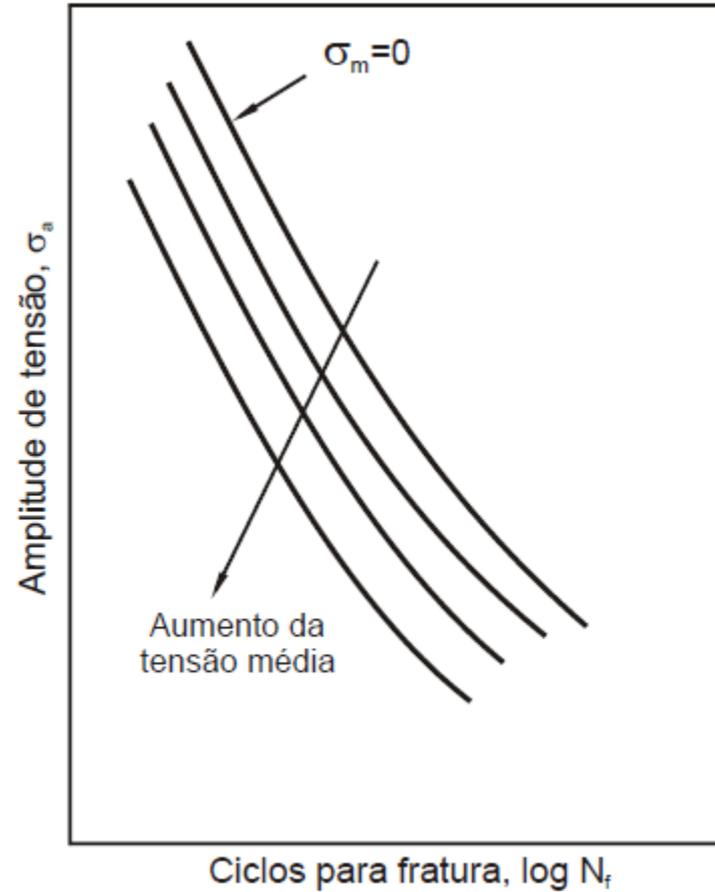
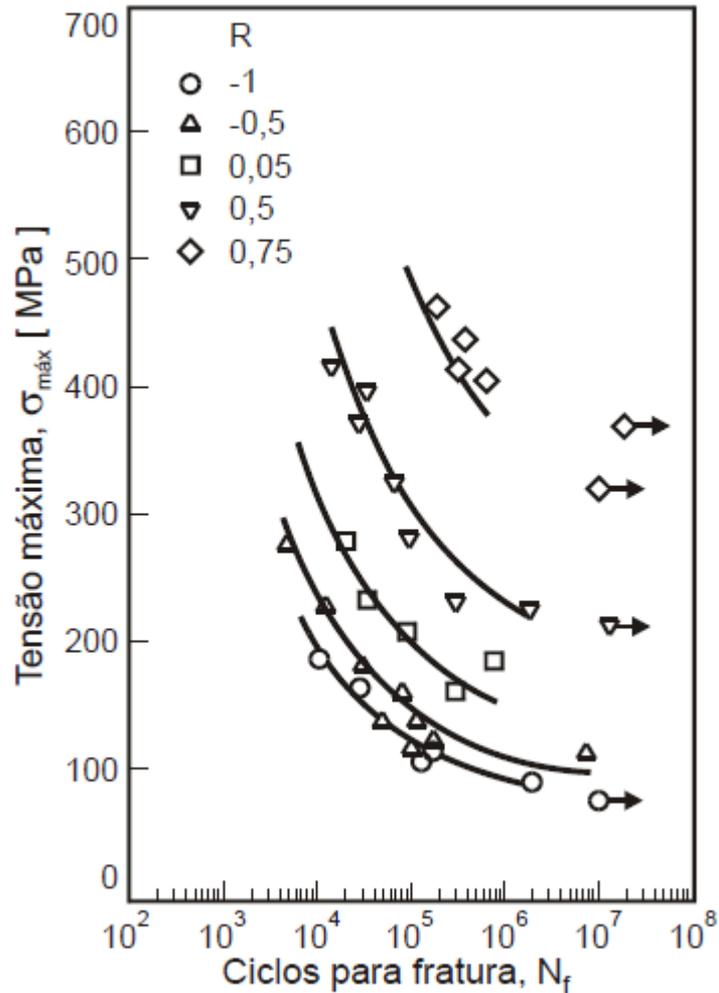
Repetição ou Variação de Carga



Estudo do Espectro de Tensão Aplicada



Efeito da Assimetria do Ciclo



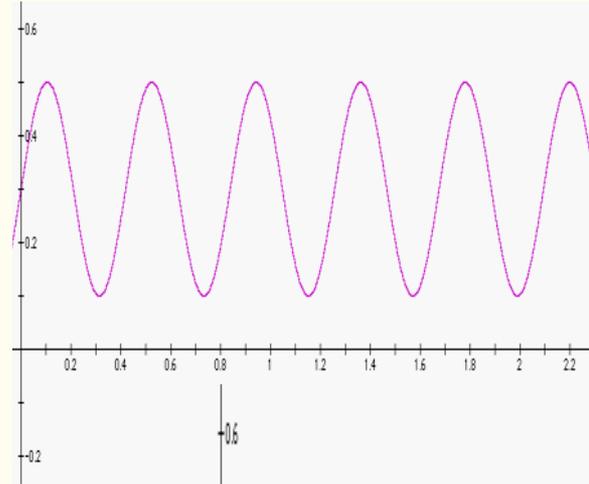
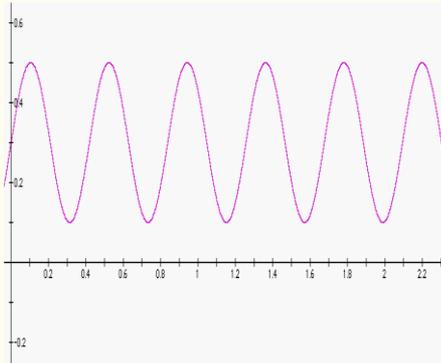
Lei de Basquin modificada

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

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

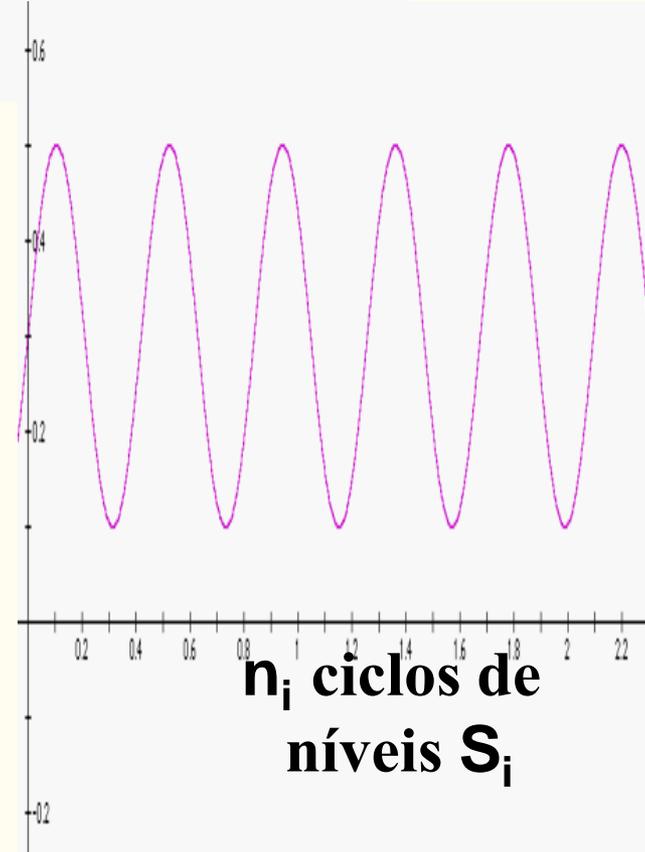
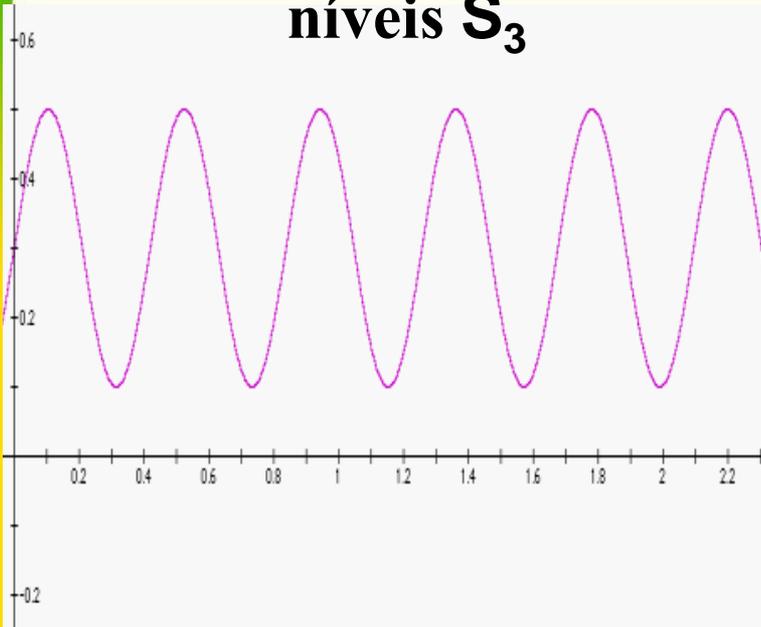
Frequencia dos Níveis de tensão Aplicados

n_1 Ciclos de níveis S_1



n_2 ciclos de níveis S_2

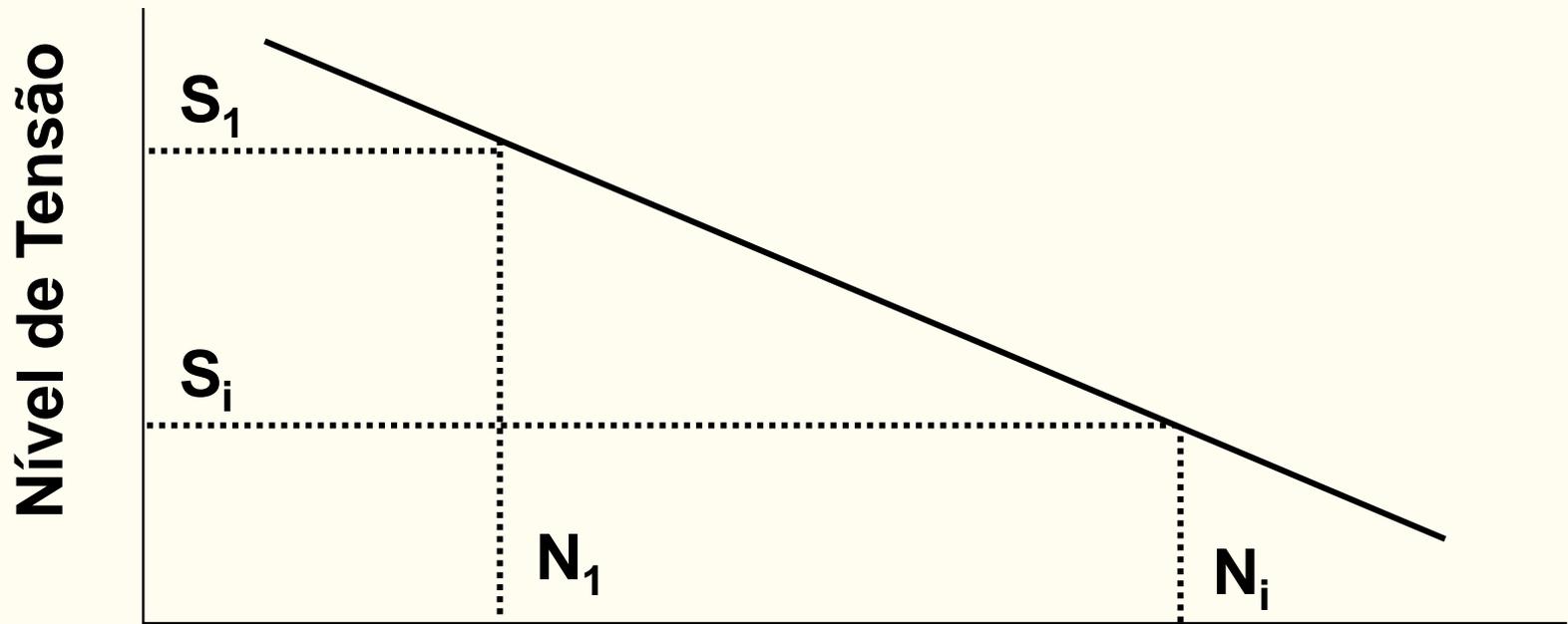
n_3 ciclos de níveis S_3



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



Núm. De ciclos para falhar, N

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.

Efeito de Entalhes – Fator Concentrador de Tensão



S – tensão nominal (baseada na área da seção)

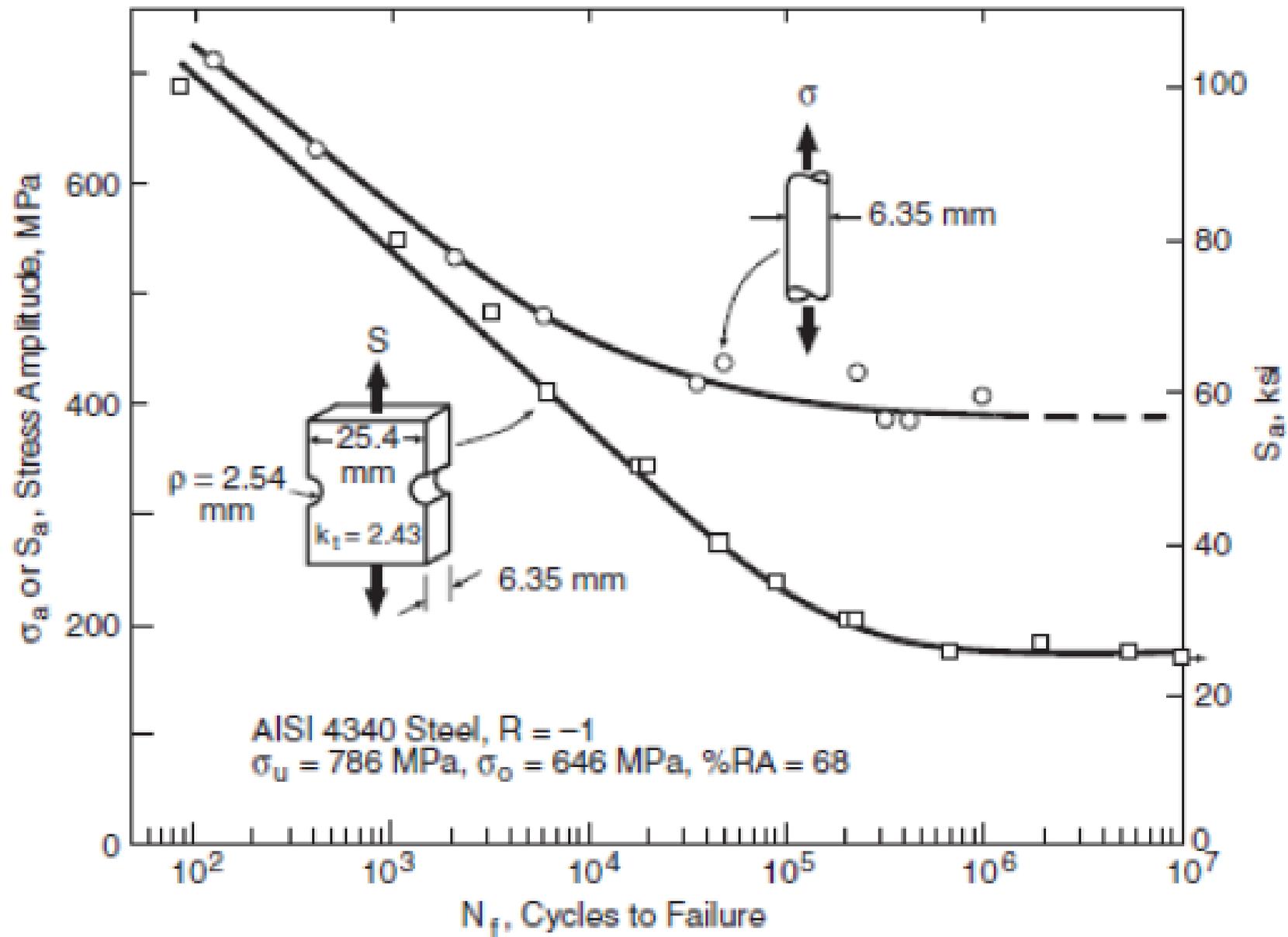
Fator concentrador de tensão estático:

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

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

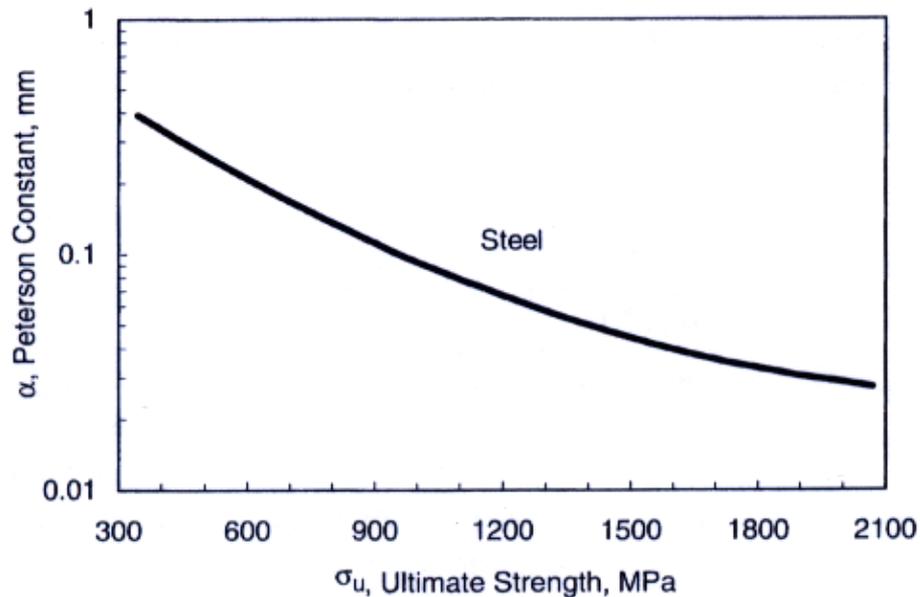
$$\alpha = \left[\frac{300}{0.5 \text{ BHN}} \right]^{1.8} \times 10^{-3} \text{ pol}$$

■ 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

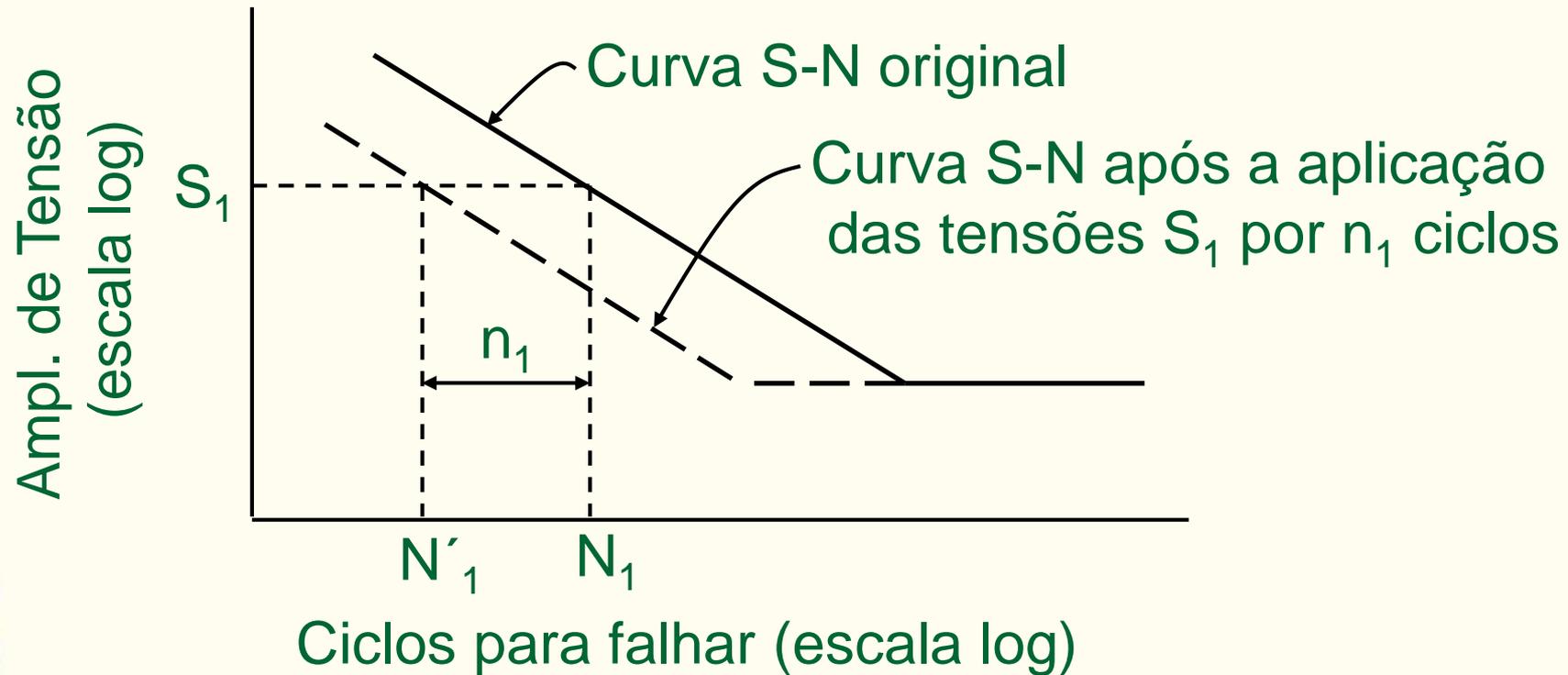
Relacionando à sensibilidade ao entalhe

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

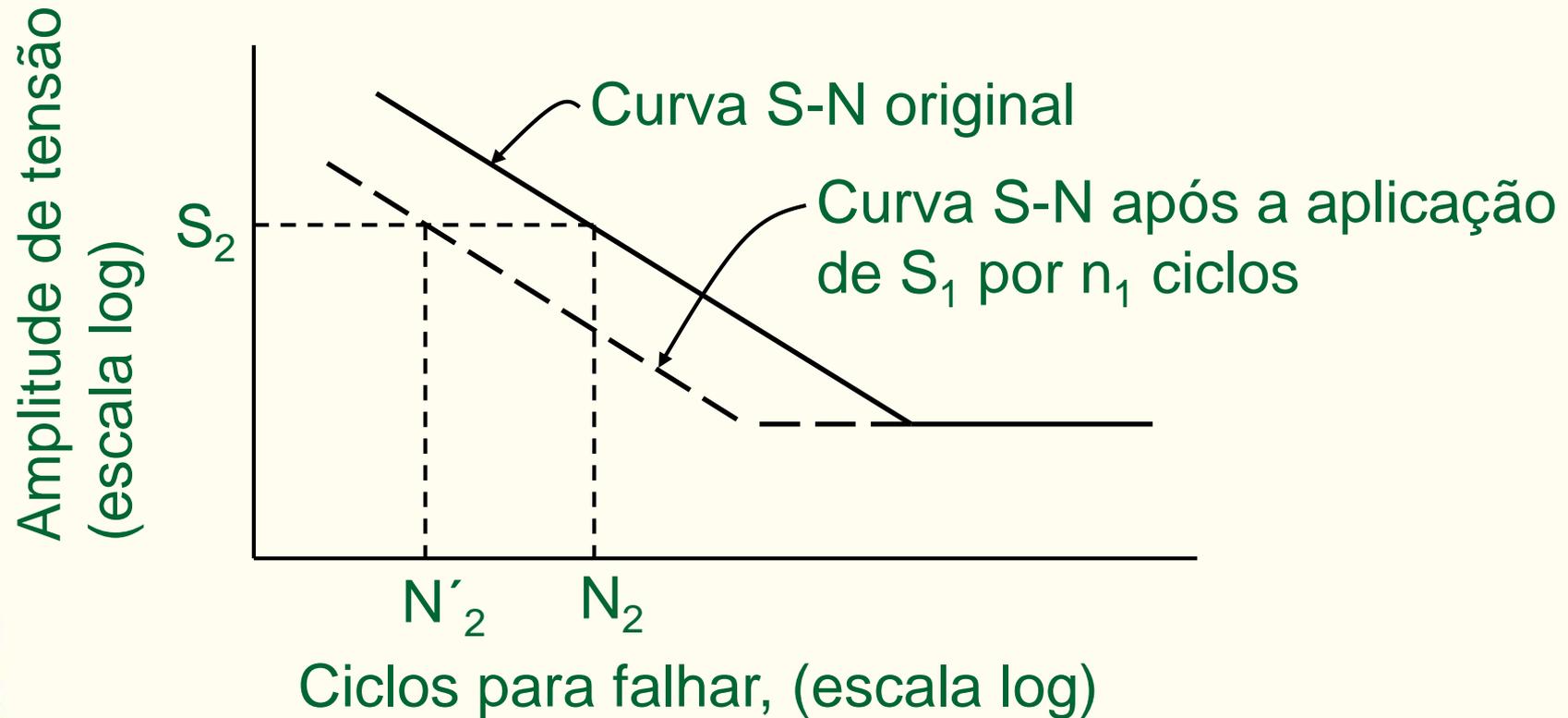
Valores típicos de β são dados na Fig. 4.4 do livro (Pg 129)

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 história de carregamento real.**

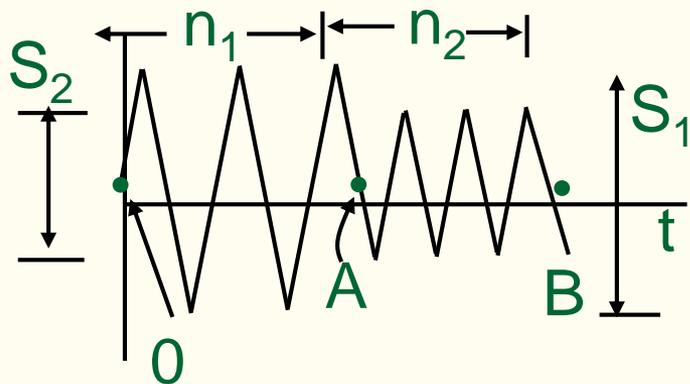
Descrição geral das teorias não lineares:

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

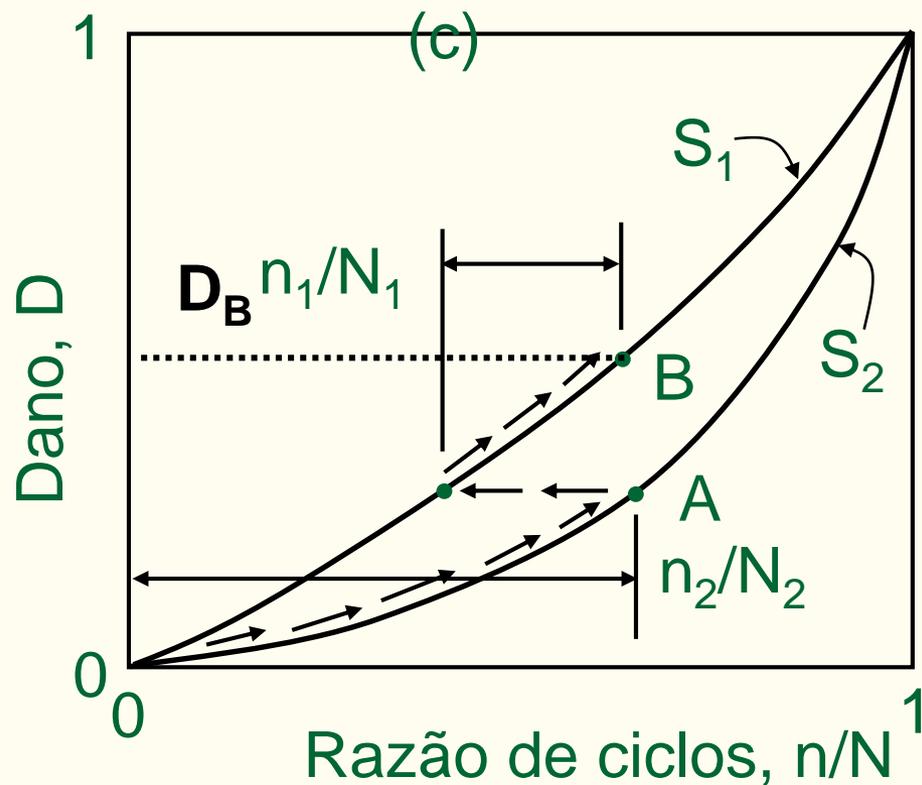
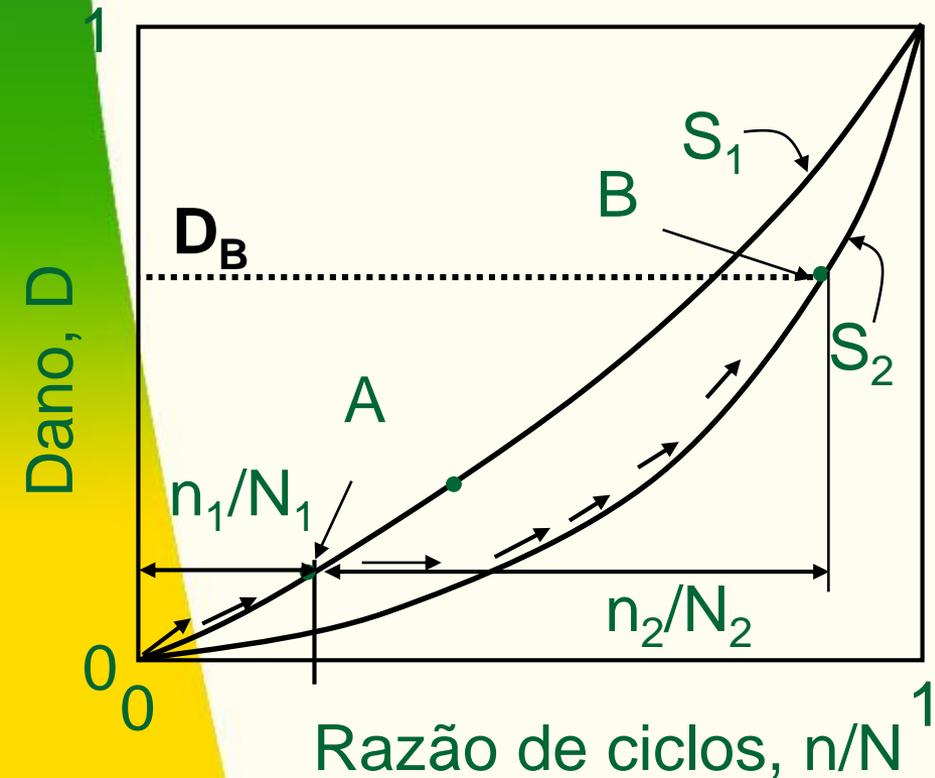
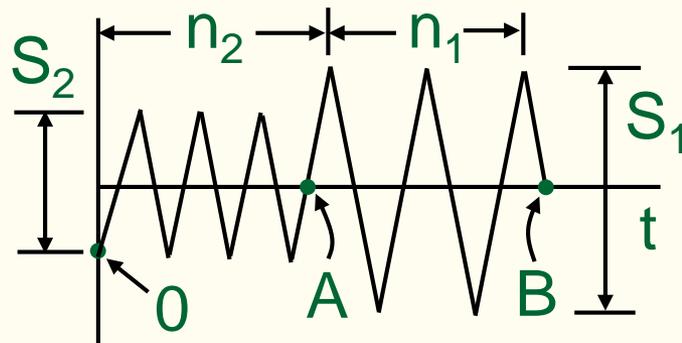
O expoente, p , é função do nível de tensão.
Geralmente, $0 < p < 1$

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

Alta - Baixa

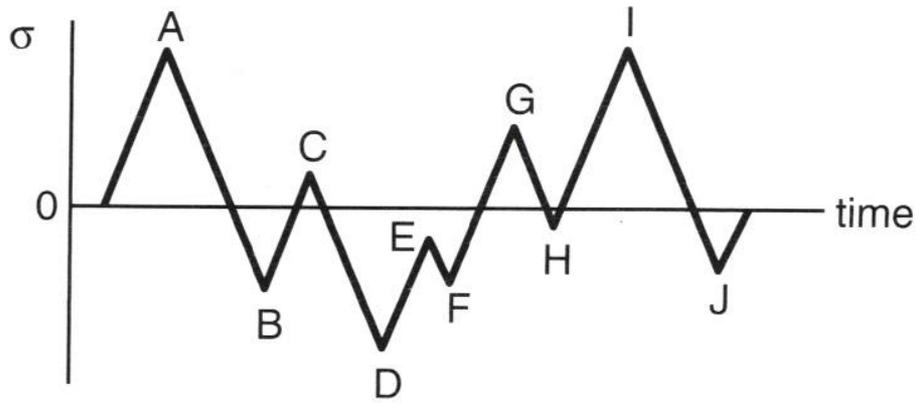


Baixa - Alta



Dano D_B no final dos blocos de carregamentos são diferentes.

**CONTAGEM DE CICLOS PARA HISTÓRICO
DE CARREGAMENTOS IRREGULARES
RAIN FLOW**

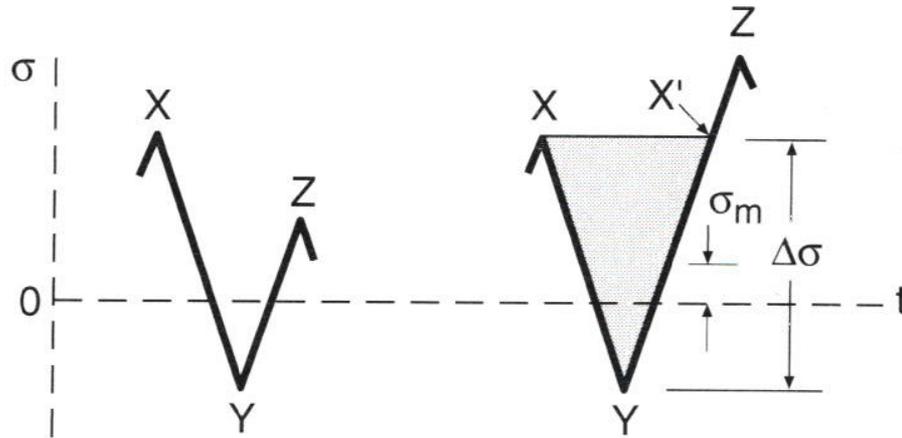


Peaks: A, C

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

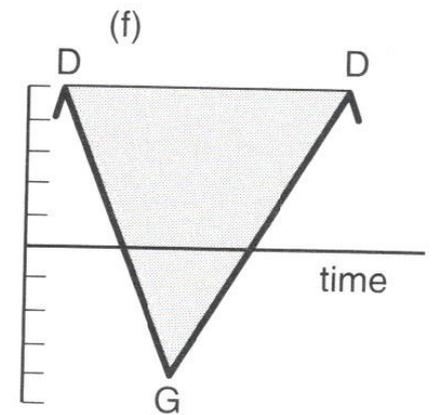
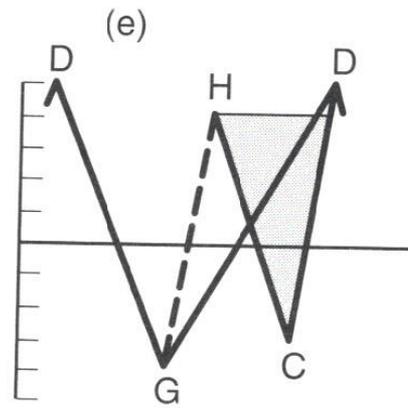
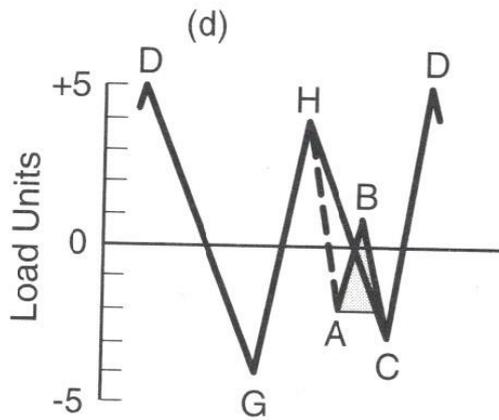
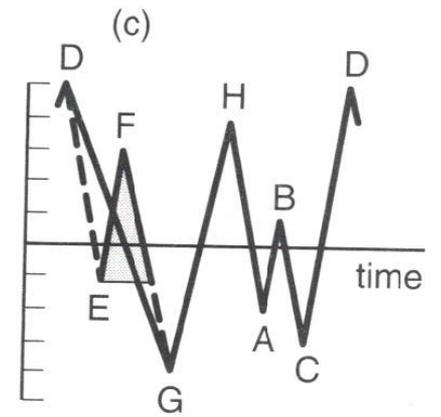
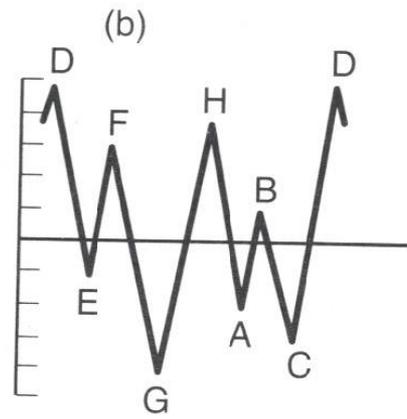
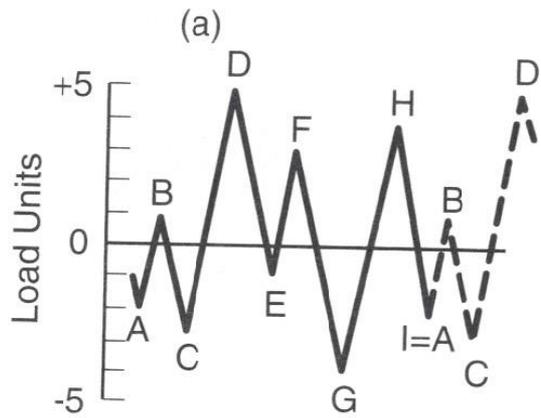
For cycle X-Y

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 ($\epsilon \times N$)

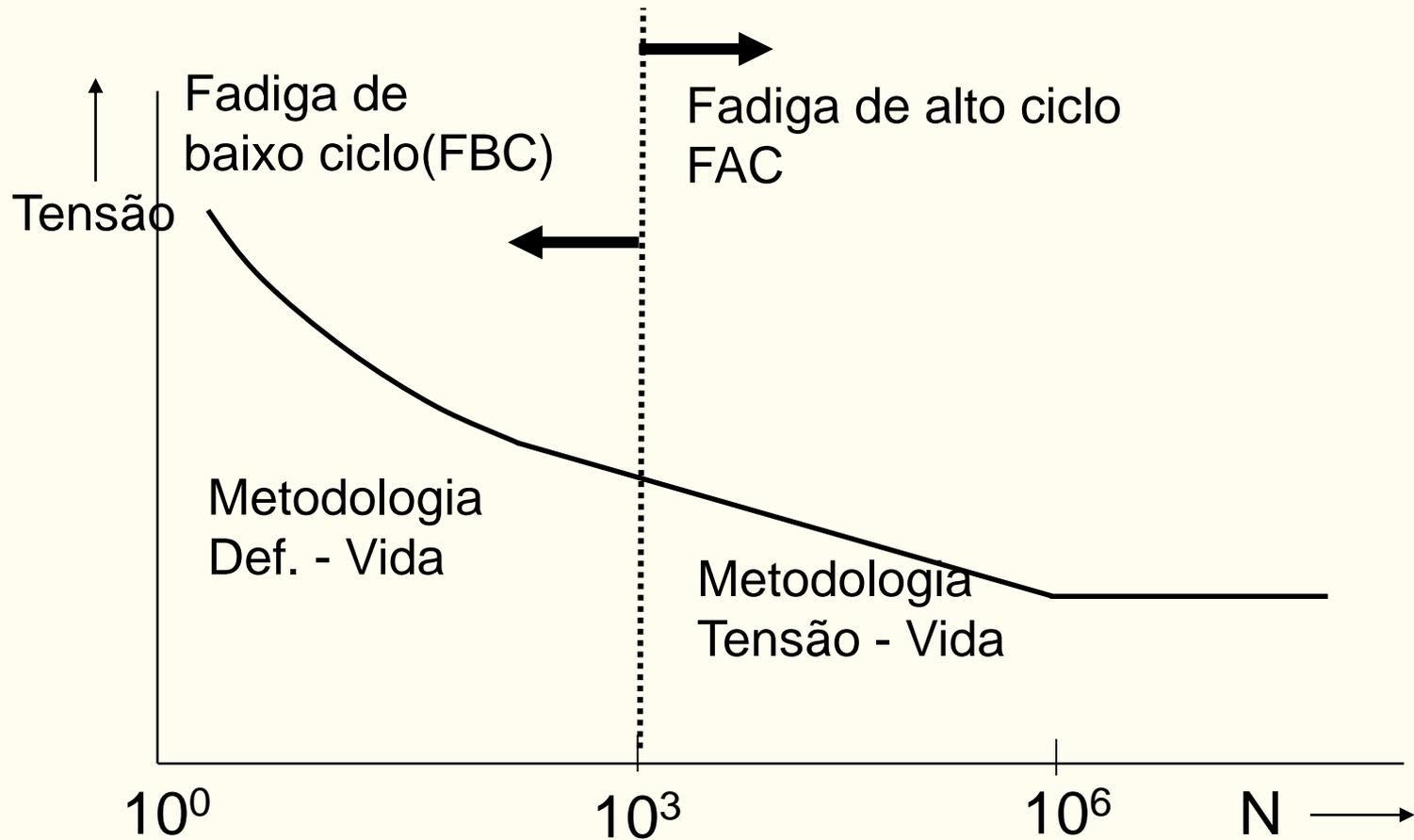
Fadiga controlada pela deformação, fadiga de baixo ciclo deformação-vida.

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.

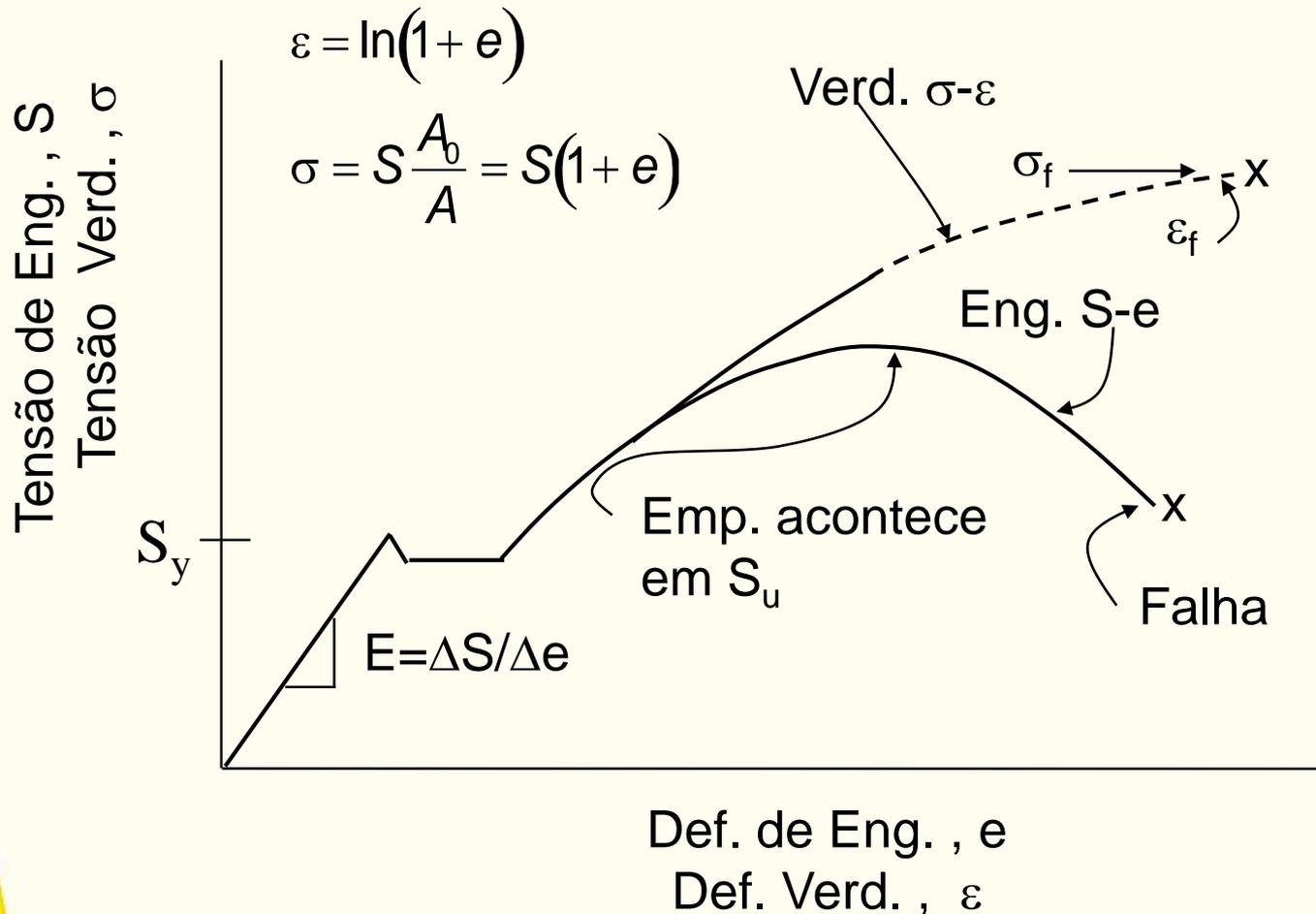
O número de ciclos para a fratura pode ser calculado pela equação de Coffin-Manson, onde ϵ'_f é o coeficiente de ductilidade à fadiga e c é o expoente de ductilidade à fadiga.

$$\epsilon_{ap} = \epsilon'_f (2N_f)^c$$

Deformação - Vida Vs. Tensão Vida

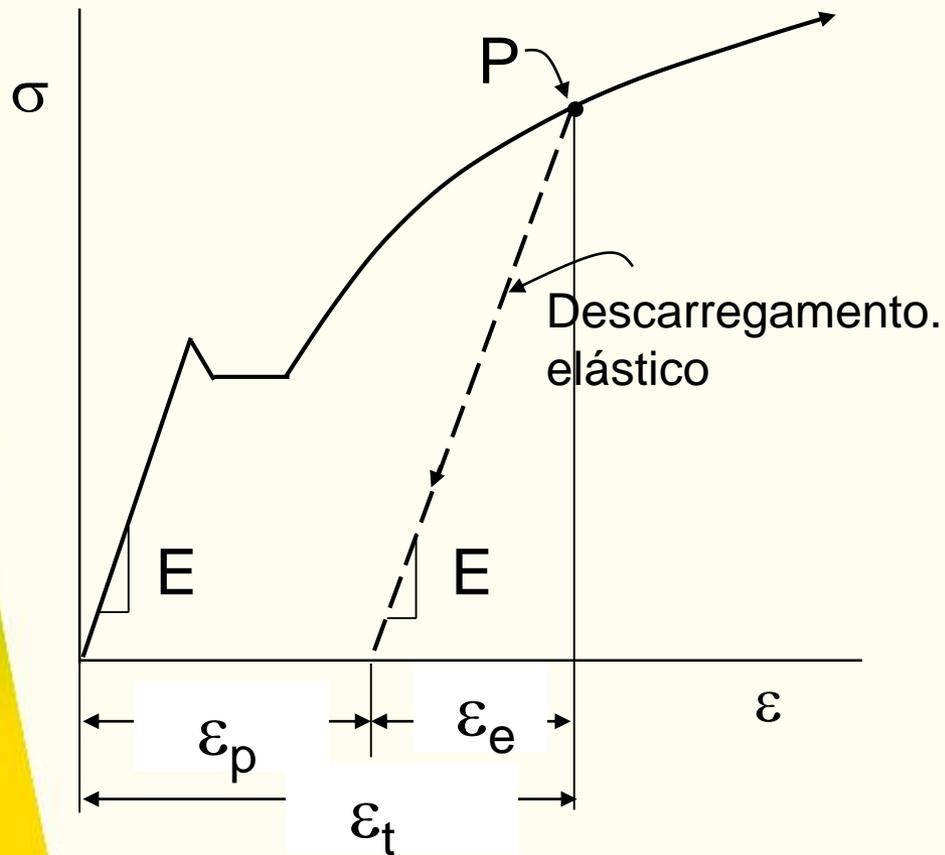


Def. de Eng. & Def. Verdadeira



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

Relação Monotônica entre Tensão-Def.



Def. total ϵ_t

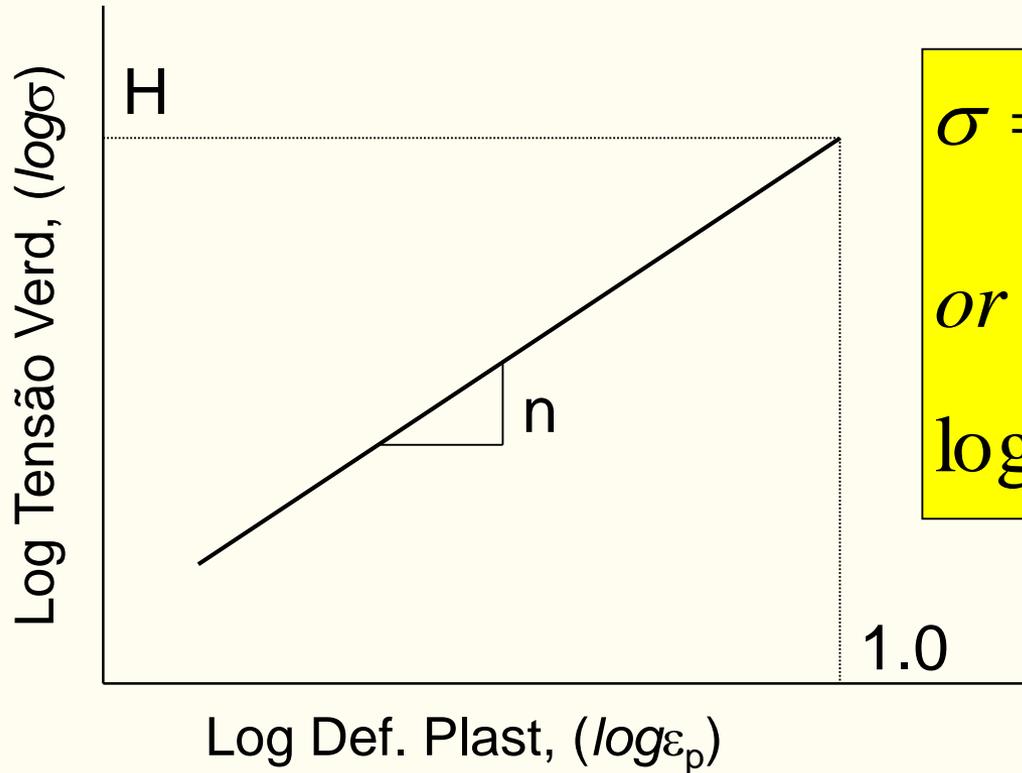
Def. Elast. ϵ_e

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

$$\text{Elástica } \varepsilon_e = \sigma / E$$

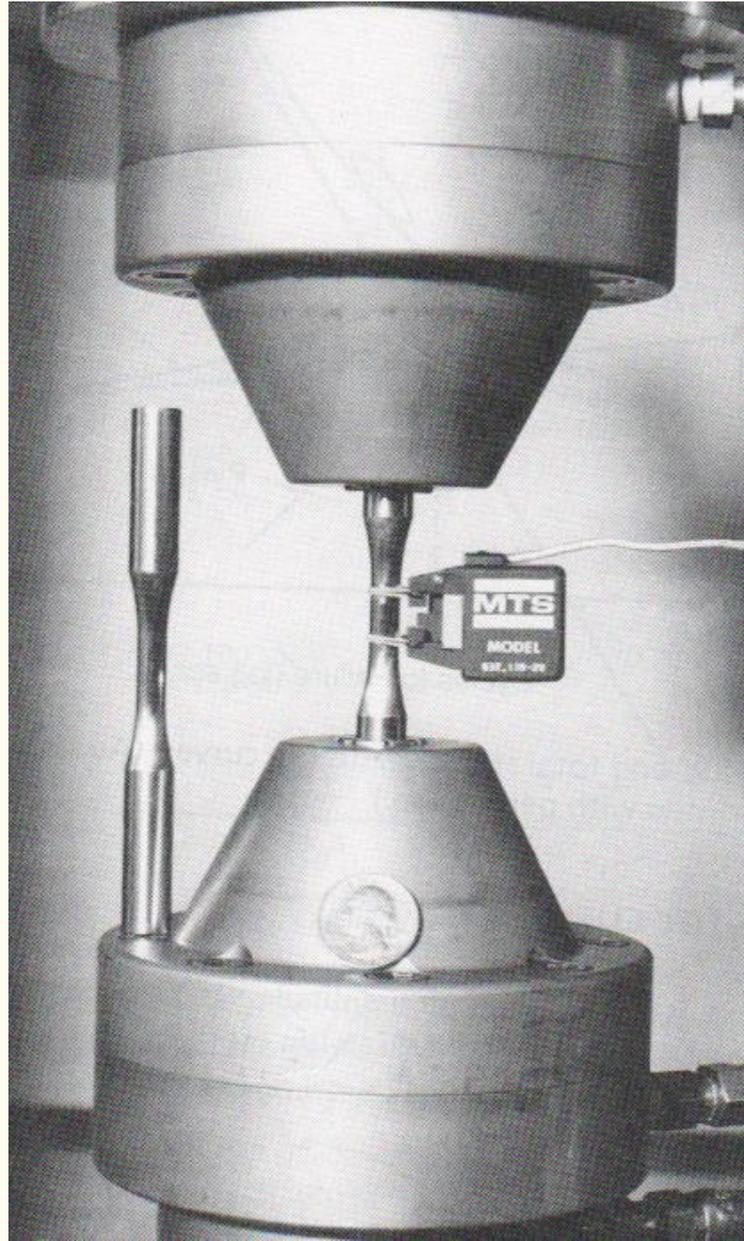
$$\text{Plástica } \varepsilon_p = \left(\sigma / H \right)^{1/n}$$

$$\text{Total } \varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

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

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

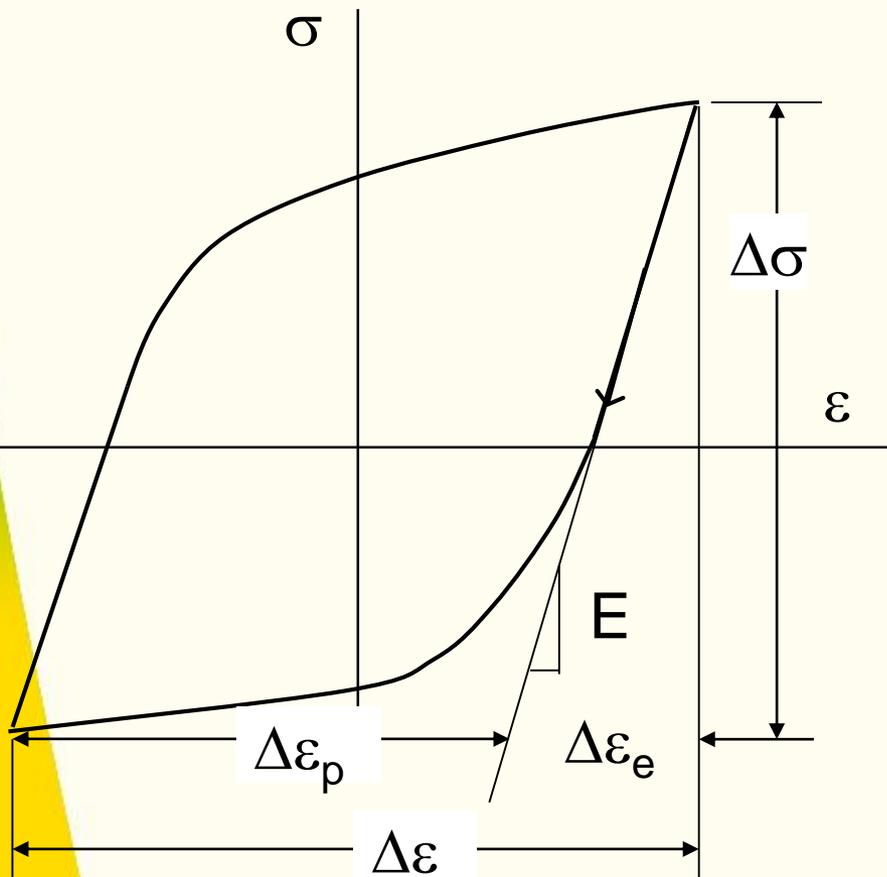
Comportamento Cíclico dos Materiais



Comportamento Cíclico dos Materiais

Laço de histerese:

Resposta do Material a carregamentos cíclicos inelásticos



$\epsilon_a = \Delta\epsilon/2 =$ amplitude de def.

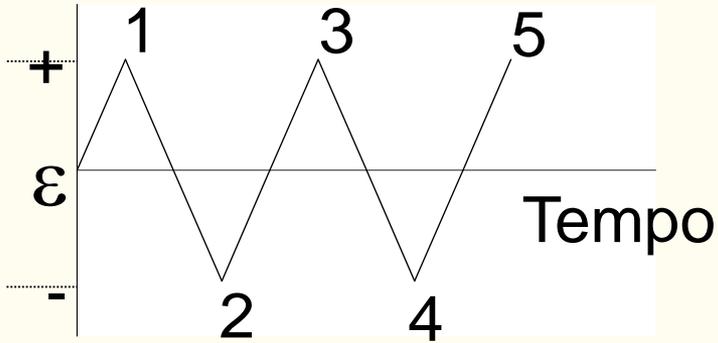
$\sigma_a = \Delta\sigma/2$ amplitude de tensão

$\Delta\epsilon_e$ - parte elástica

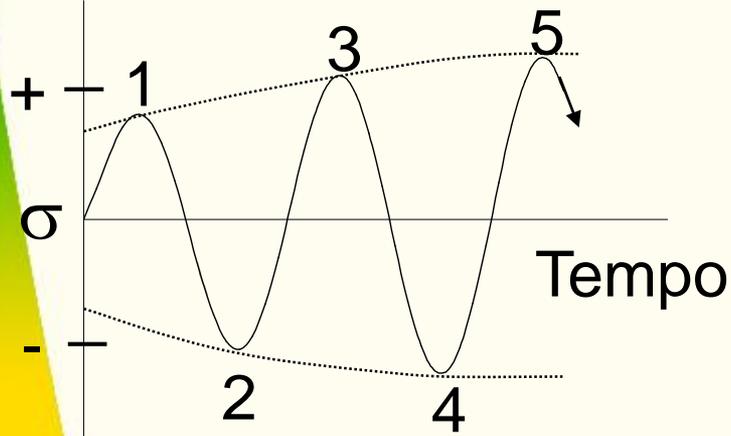
$\Delta\epsilon_p$ - parte plástica

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2};$$
$$\Delta\epsilon_e = \Delta\sigma / E$$

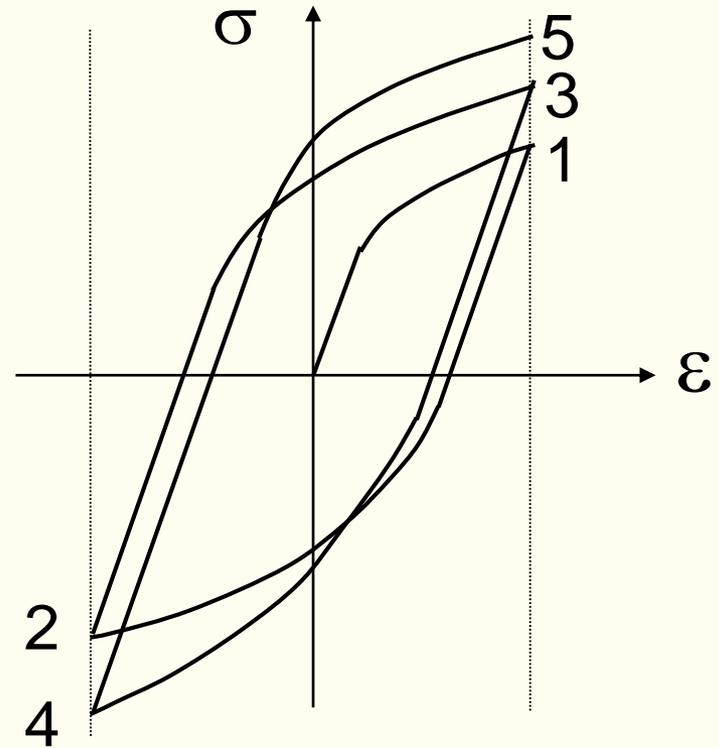
Comportamento Transiente – Encruamento



(a) Amplitude de deform. Const.

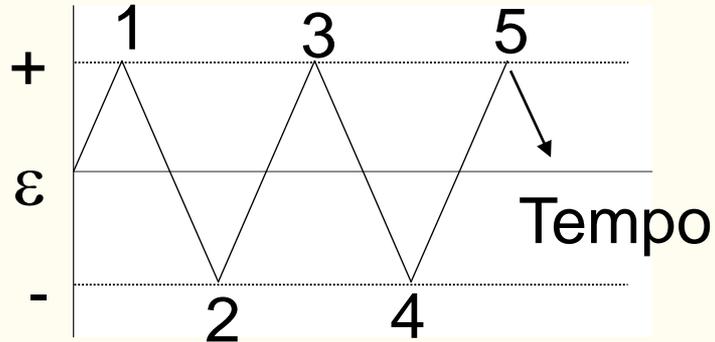


(b) Resposta da tensão
(aumentando o nível de tensão)

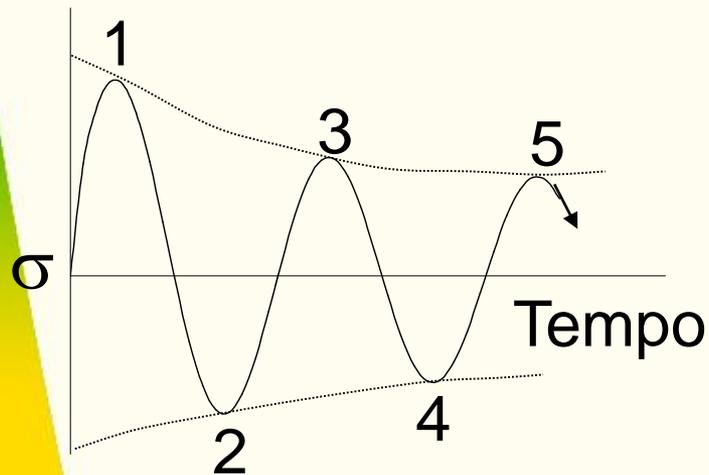


(c) Resposta Tensão-Def.

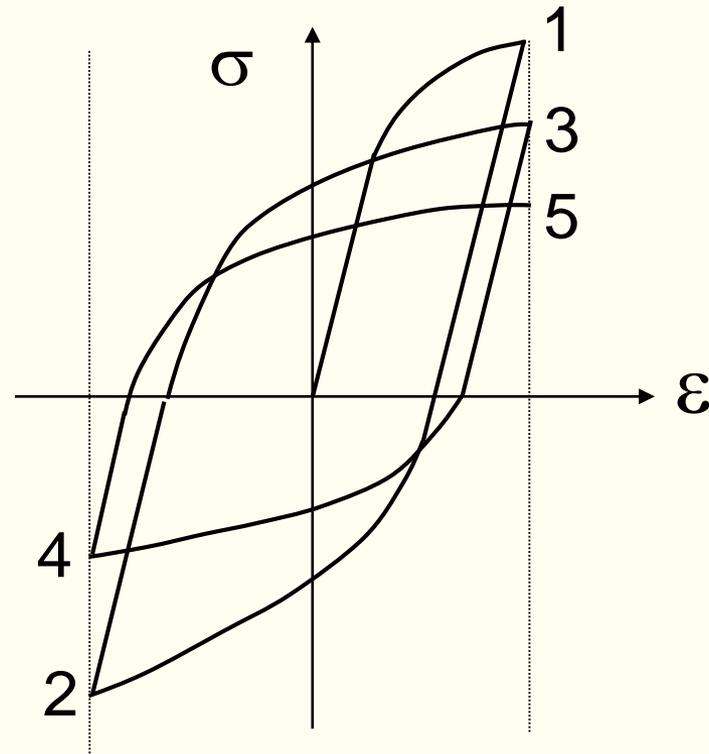
Comportamento Transiente – Amolecimento



(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.

Se $(\sigma_u / \sigma_y) > 1,4$
ou $n > 0,2$ } material ciclicamente endurece

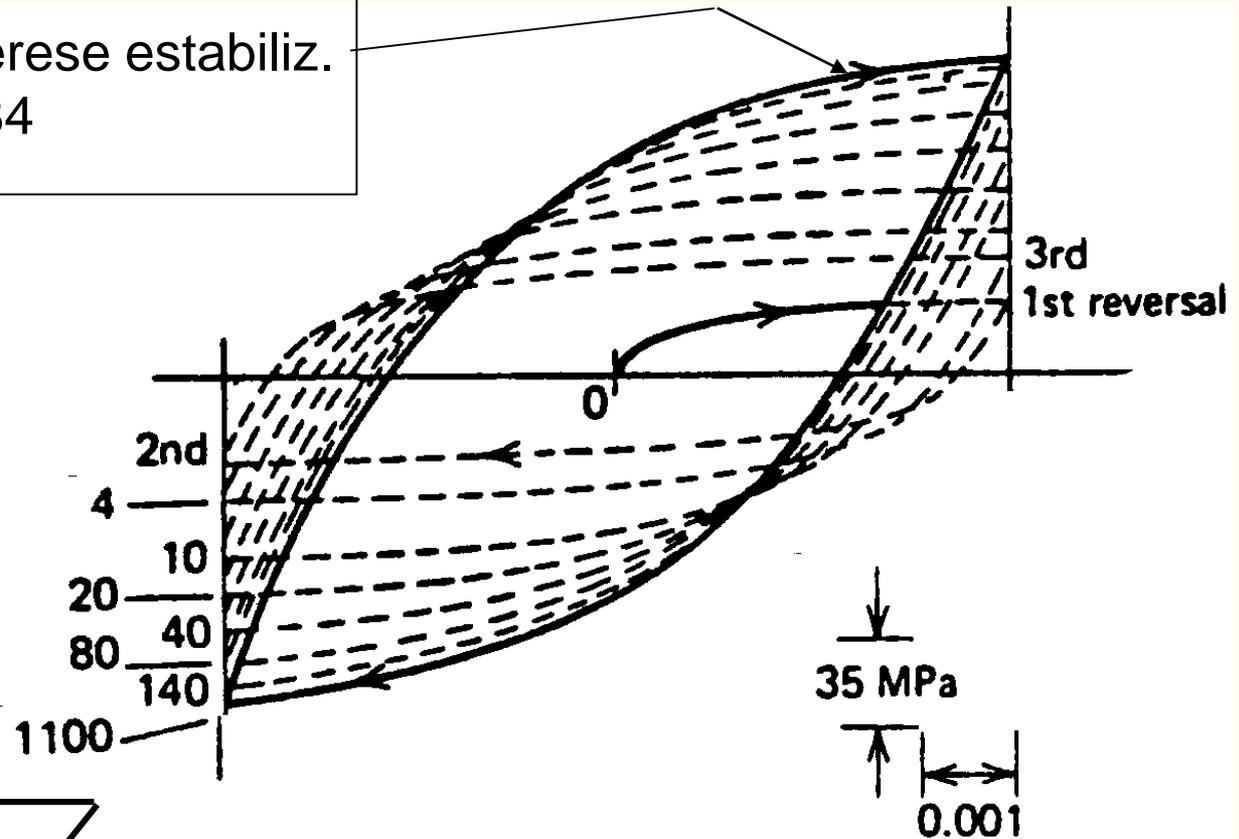
Se $(\sigma_u / \sigma_y) < 1,12$
ou $n < 0,1$ } material ciclicamente amolece

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 $\Delta\varepsilon = 0.0084$

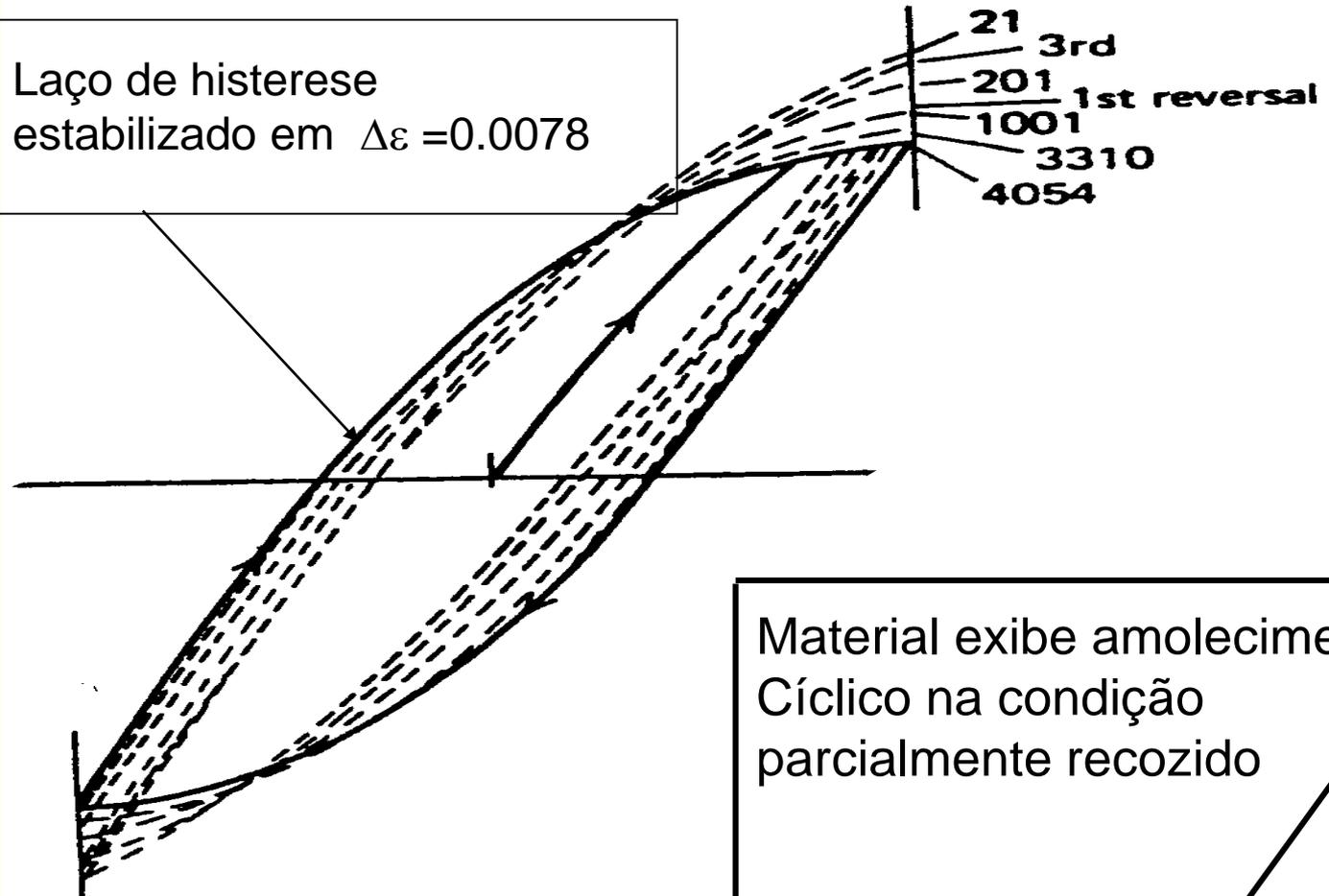


Material exibe endurecimento na condição de recozido.

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

Laço de Histerese do Cobre

Laço de histerese estabilizado em $\Delta\varepsilon = 0.0078$

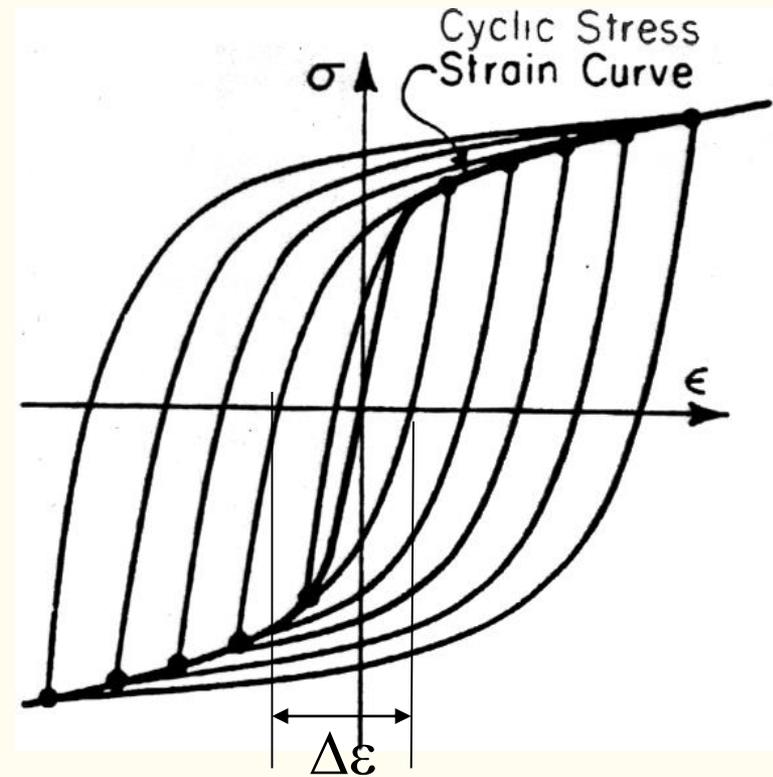


Material exhibe amolecimento Cíclico na condição parcialmente recozido

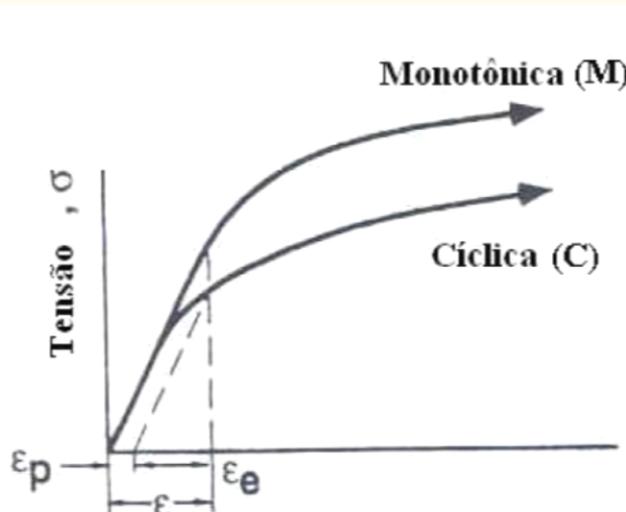
(b) Partially annealed
 $\Delta\varepsilon = 0.0078$
 $2N_f = 4400$ reversals

Determinação da Curva Tensão-Deformação Cíclica

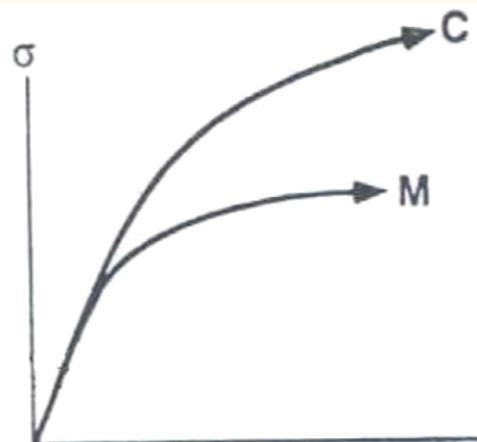
- Aplicar uma amplitude de def. de $\Delta\varepsilon/2$.
- O transiente de tensão é seguido de um laço de histerese estabilizado
- Estabeleça o laço de histerese estabilizado para este nível de def.
- Repetir o procedimento com uma diferente amplitude de def.
- Unir as pontas dos laços de histerese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



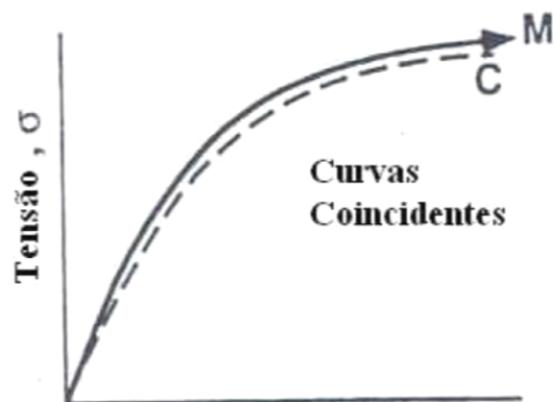
Encruamento/amolecimento



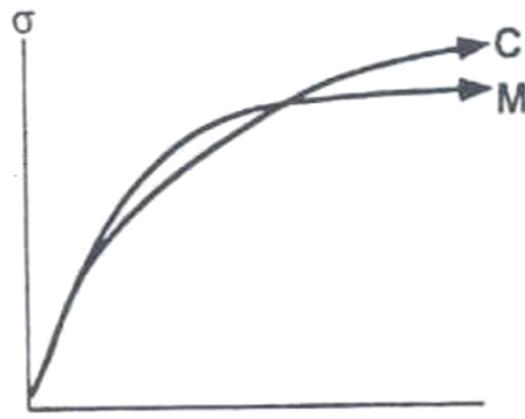
(a) Amolecimento Cíclico



(b) Endurecimento Cíclico



(c) Ciclicamente Estável



(d) Comportamento Misto

RELAÇÃO TENSÃO-DEFORMAÇÃO CÍCLICA

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

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

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

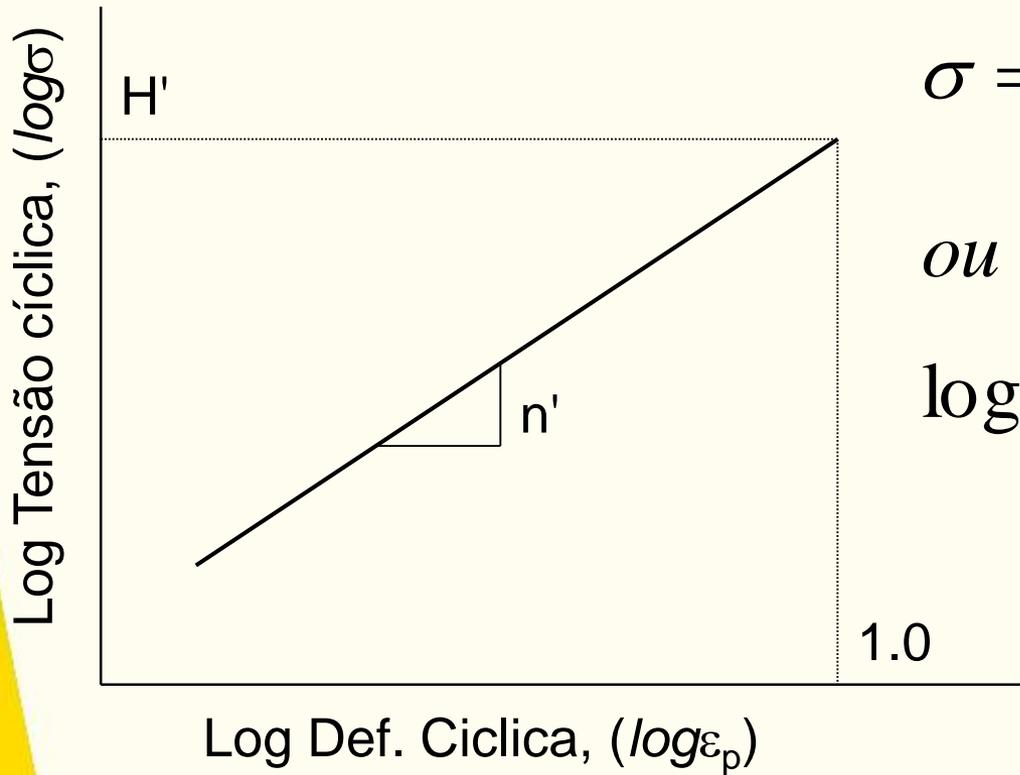
$$\sigma = H' \left(\varepsilon_p \right)^n$$

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

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

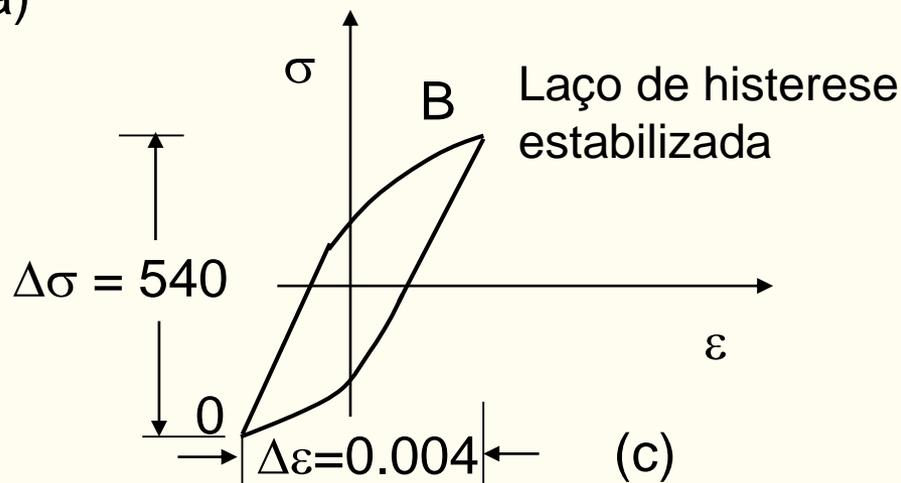
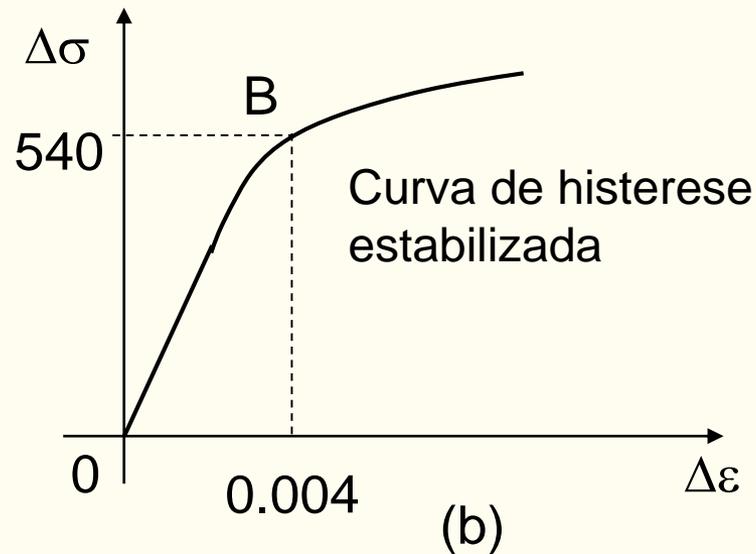
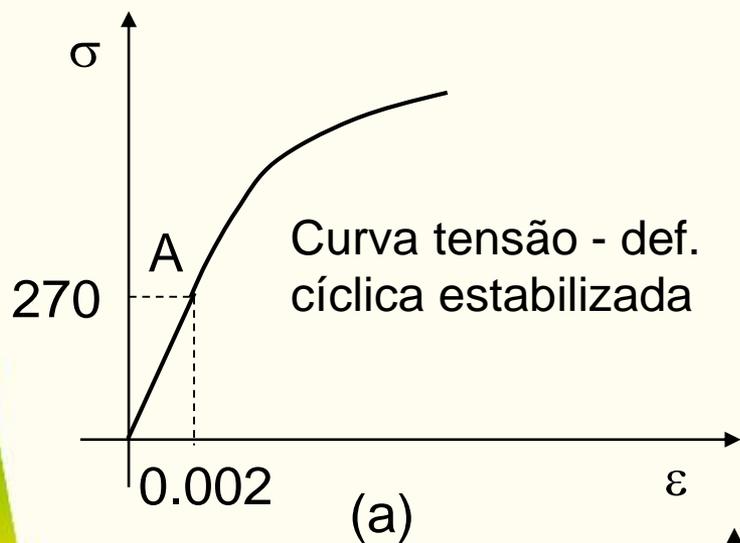
O processo **tende à saturação** (geralmente dentro de 10 a 20% da vida em fadiga) quando os **laços de histerese tornam-se coincidentes**, ou a **variação** do comportamento tensão-deformação **diminui** com o aumento do número de ciclos: **comportamento tensão-deformação cíclico estável.**

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.
- Dobrar os valores de tensão e def. da curva estabilizada da curva tensão- def. cíclica.

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 T X Def. cíclica



EQUAÇÕES PARA O LAÇO DE HISTERESE

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

Seguindo a hipótese de Masing:

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

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

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

} Eq. 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,

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_f' (2N_f)^b \quad (2.37)$$

$2N_f$ = 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 Tensão-Deformação

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 e em fadiga

$$\varepsilon_f \approx \varepsilon_f'$$

Propriedade de Fadiga do material

Curvas Tensão-Deformação

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

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

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

De 2.37 & 2.39

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

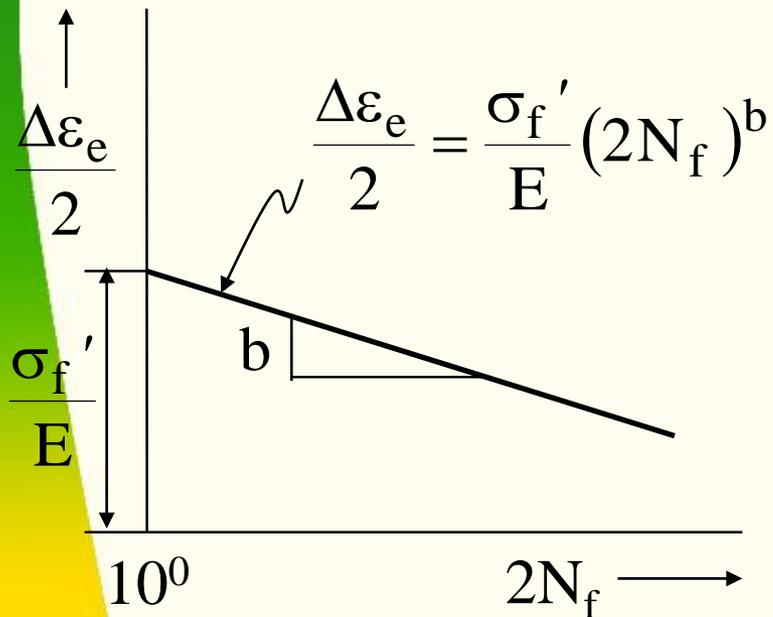
$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (2.41)$$

↑
elástica

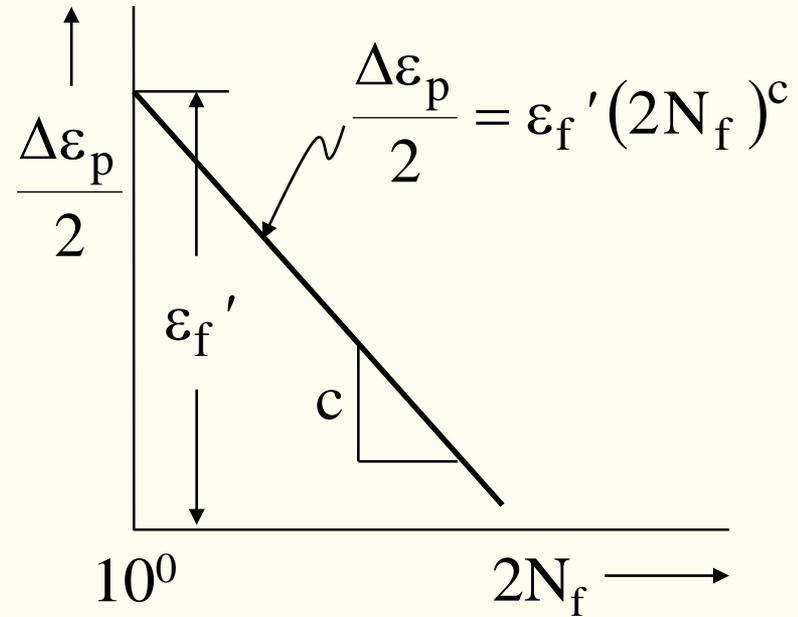
↑
plástica

Relação
Def-vida

As equações apresentadas são lineares no plano log-log

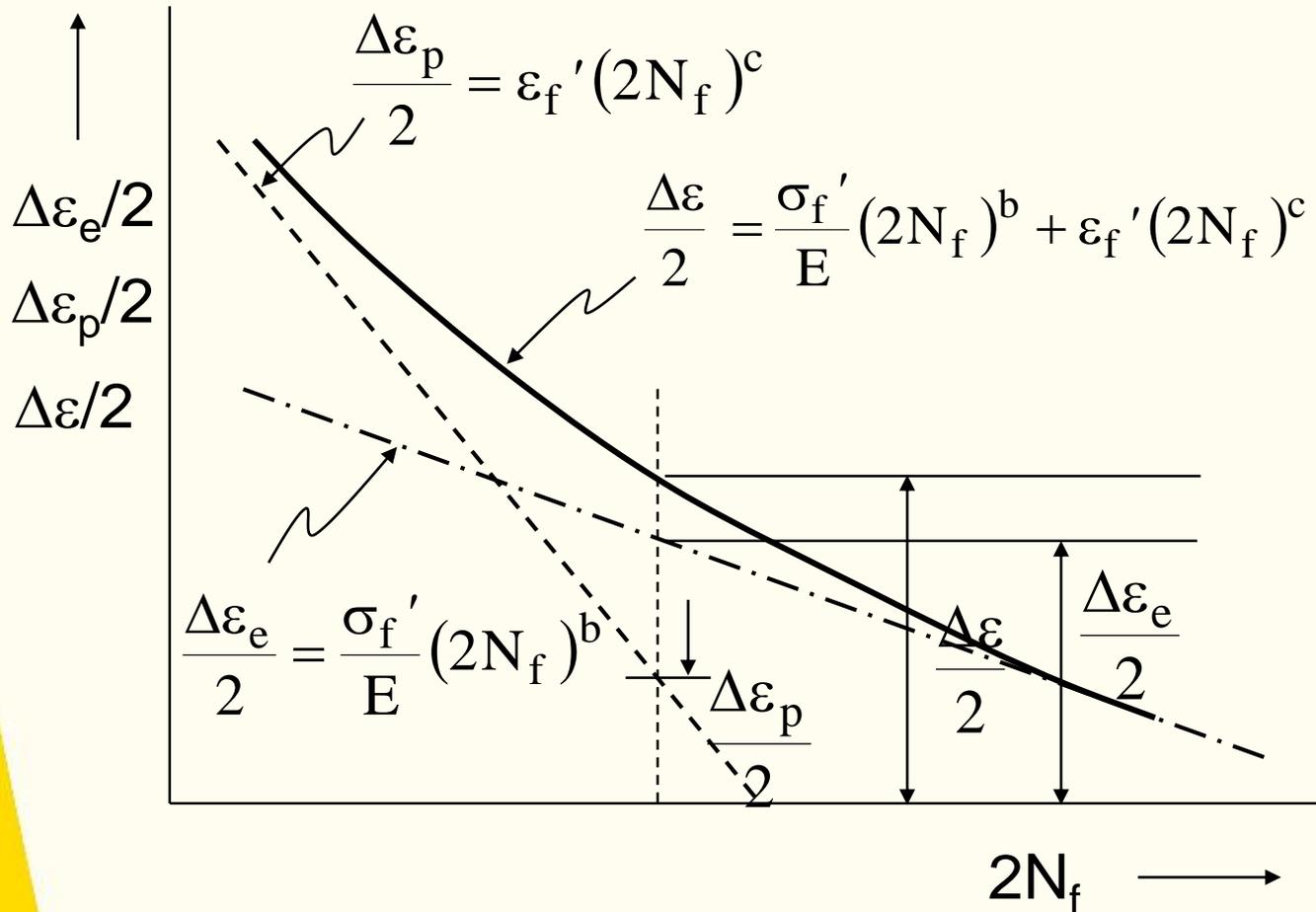


Def. – Vida Elástica

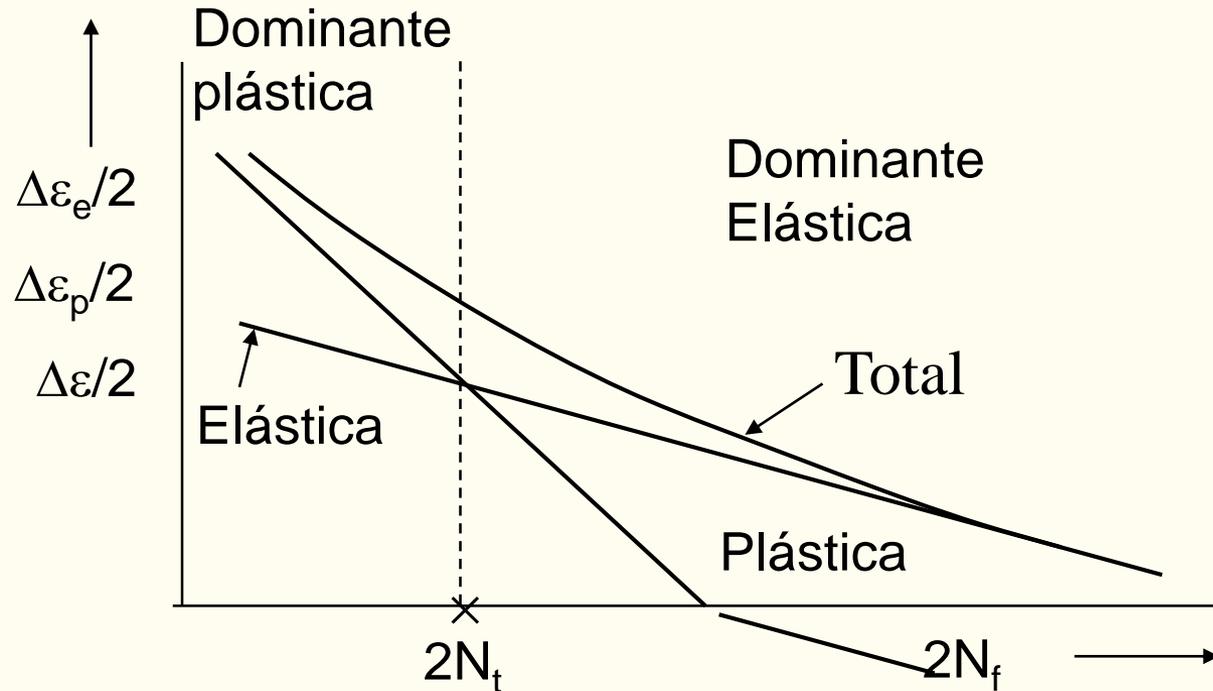


Def. – Vida plástica

Relação Tensão – Vida Total



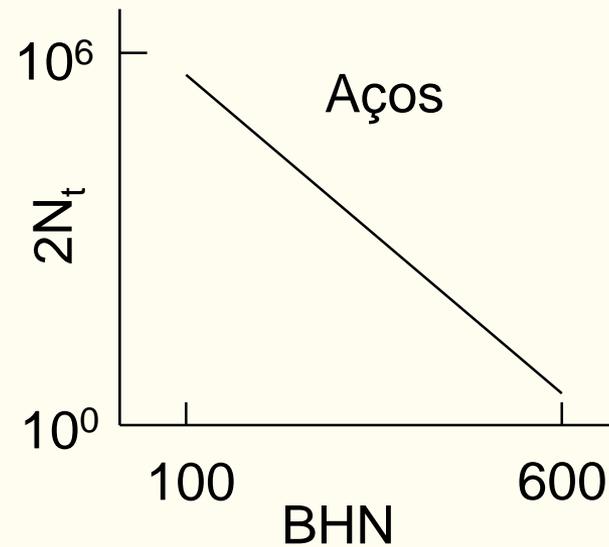
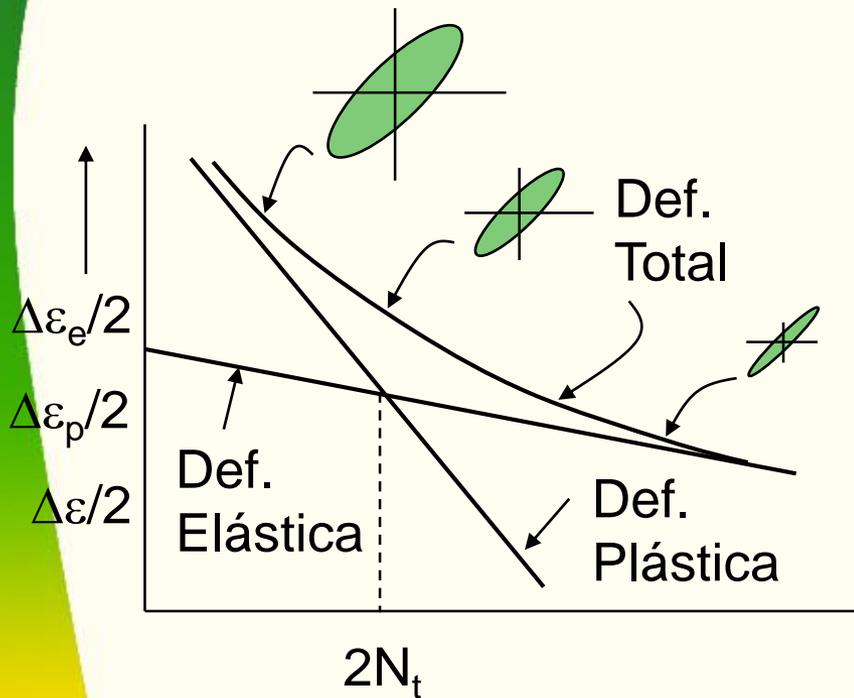
Vida de Transição



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

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

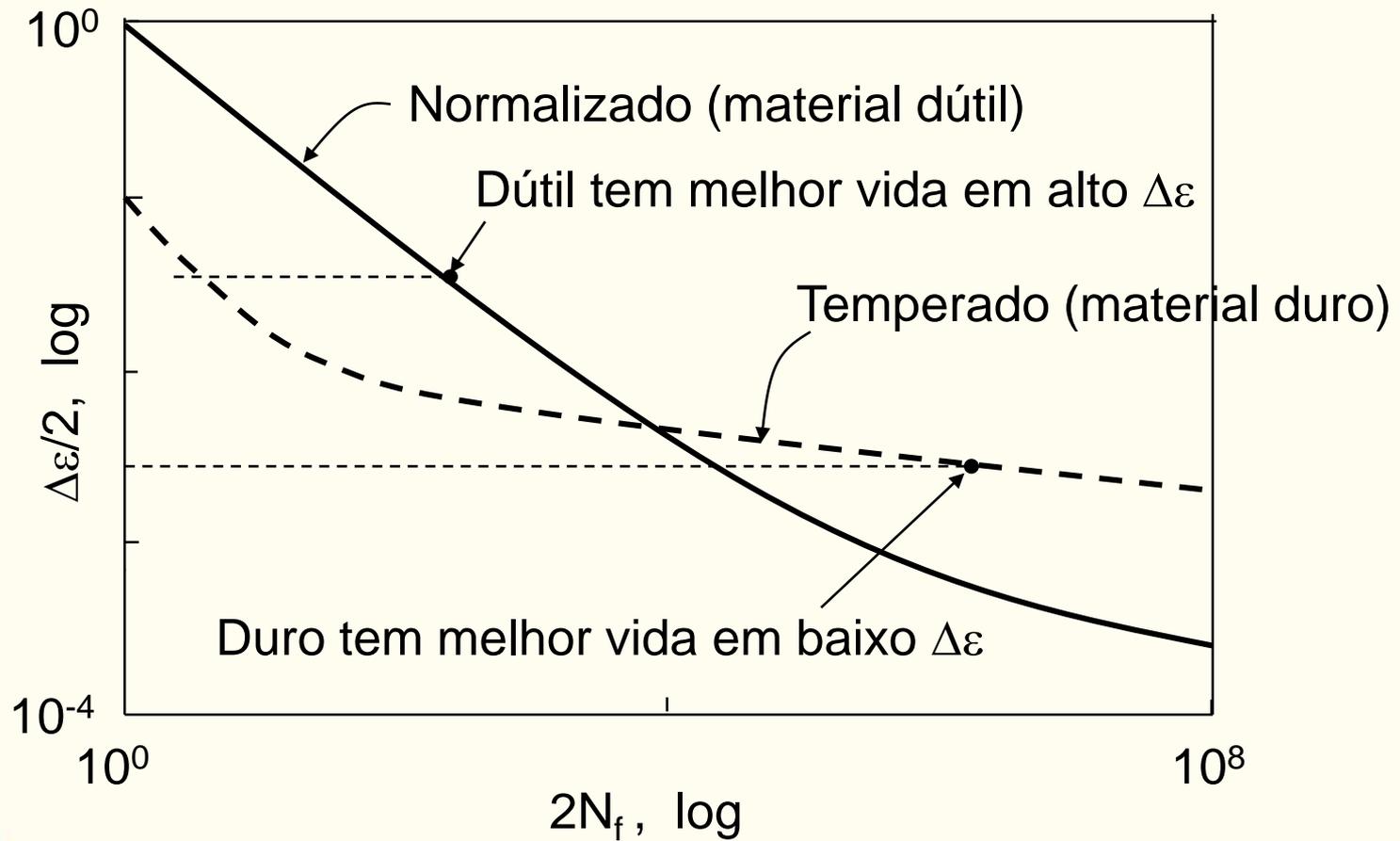
Vida de Transição



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, 560 HB)	(1)	1688 (245)	2240 (325)	2650 (385)	27	207,000 (30,000)	4140 (580)	0.126	3410 (490)	−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:

$$S_y = 158 \text{ ksi}$$

$$S_u = 168 \text{ ksi}$$

$$\%RA = 52$$

$$E = 28.4 \times 10^3 \text{ ksi}$$

$$\sigma_f = 228 \text{ ksi}$$

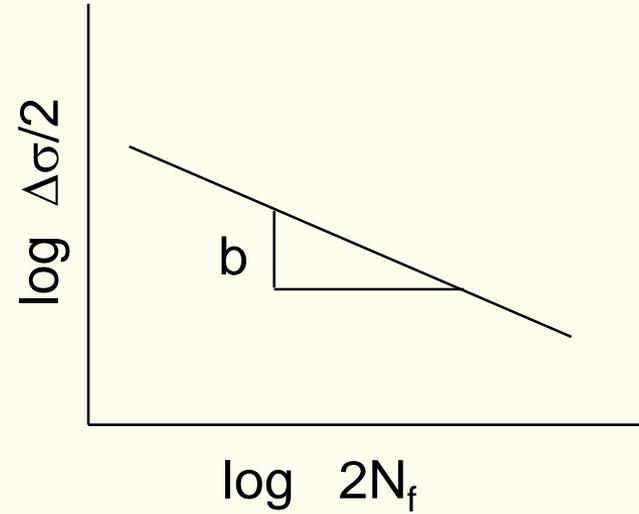
$$\varepsilon_f = 0.734$$

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

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

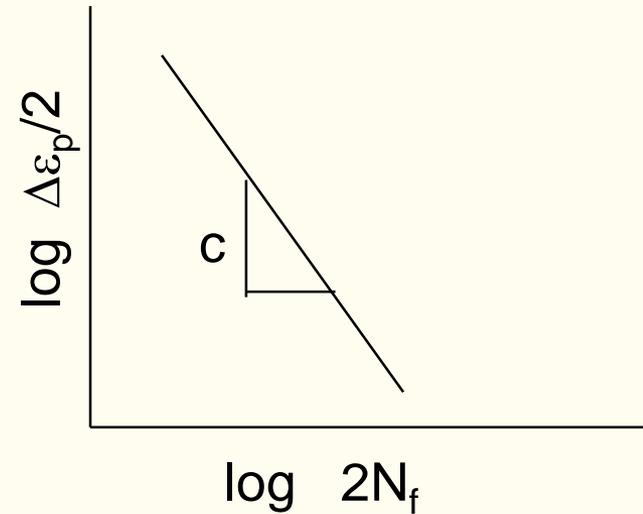
$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_f' (2N_f)^b$$

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



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

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

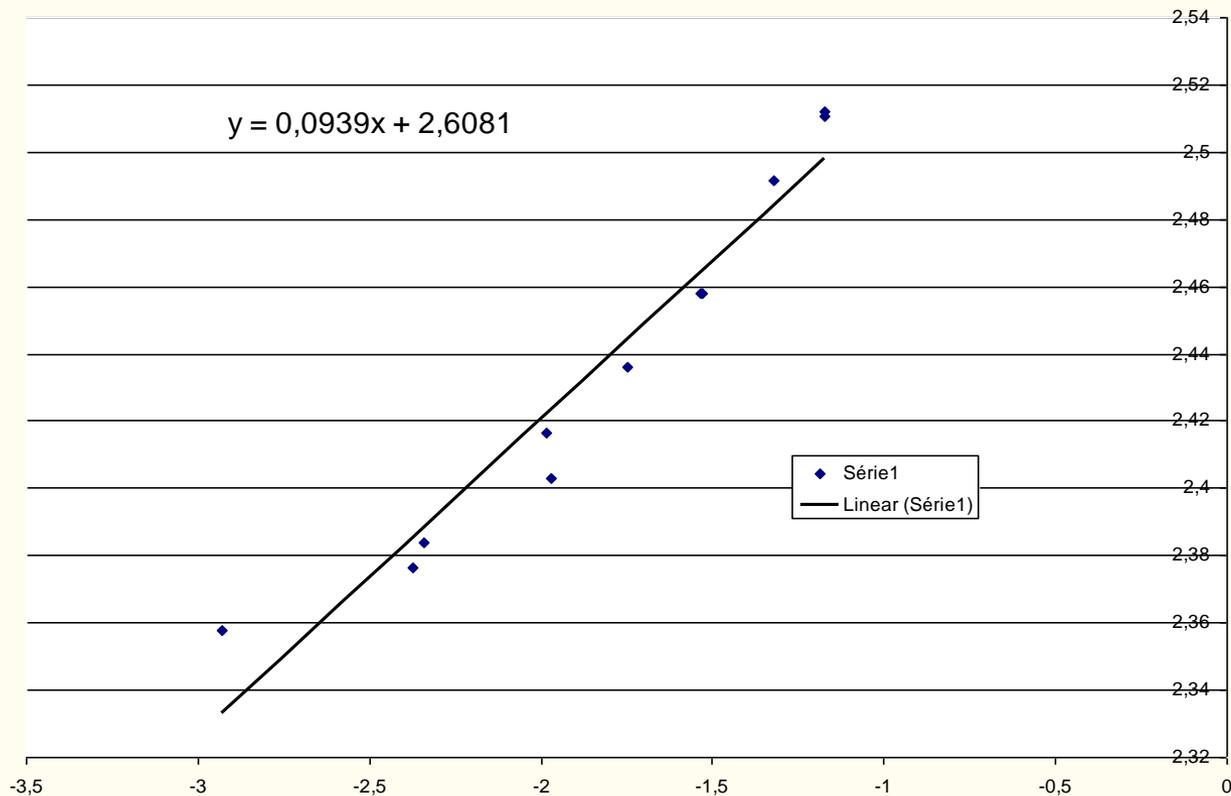


Para determinar H' e n' (Dois métodos)

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

a ampl. def. plástica, $\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$ $\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\sigma}{H'} \right)^{\frac{1}{n'}}$

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

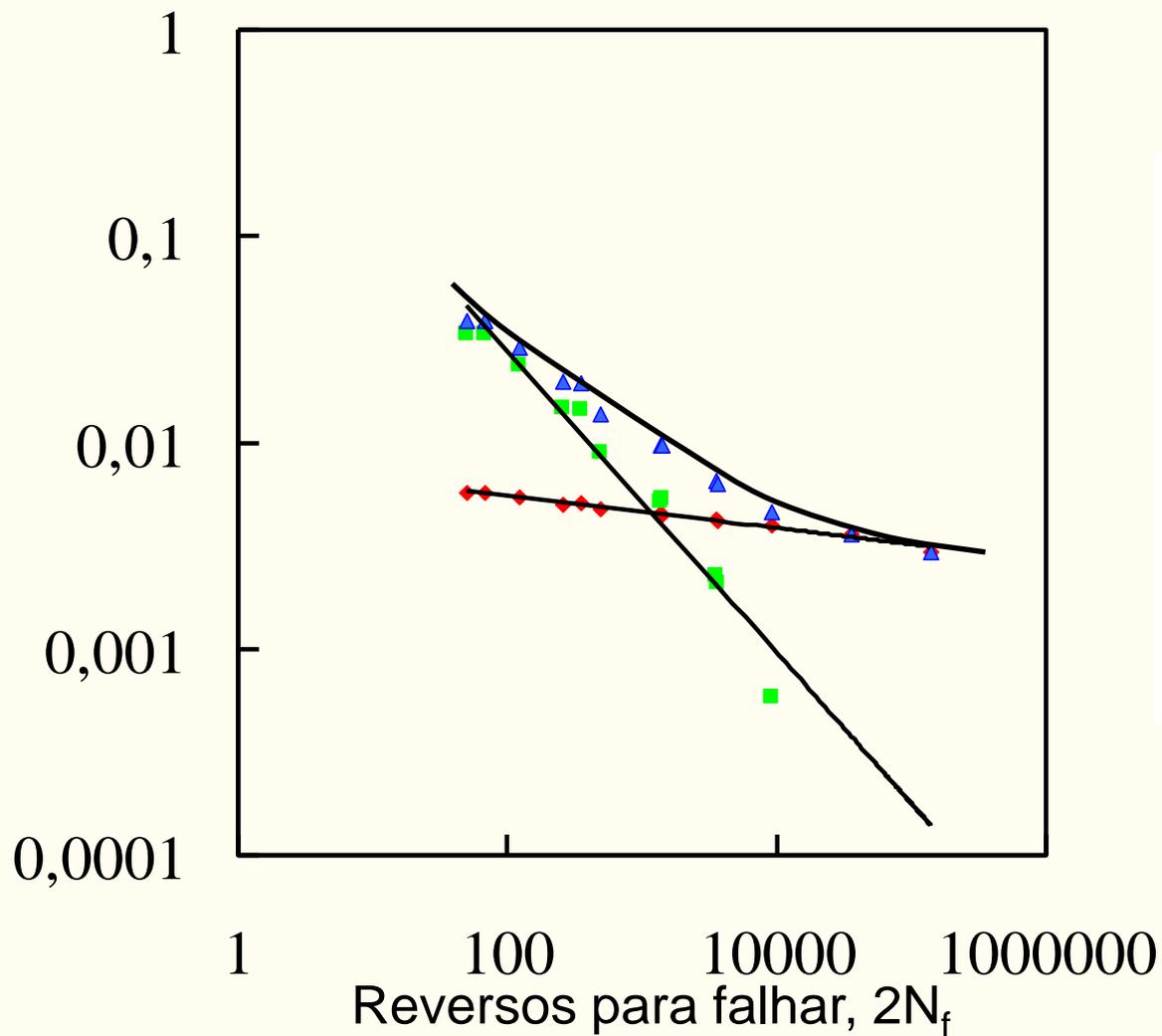


(B) Relembre $H' = \frac{\sigma_f'}{(\varepsilon_f')^{n'}}$

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

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

Ampl. de Def., $\Delta\varepsilon/2$



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	$S = \sigma'_f (2N_f)^b = A(N_f)^b$			$\sigma_a = C + D \log N_f$	
			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 $10^3 < N < 10^6$

- 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.

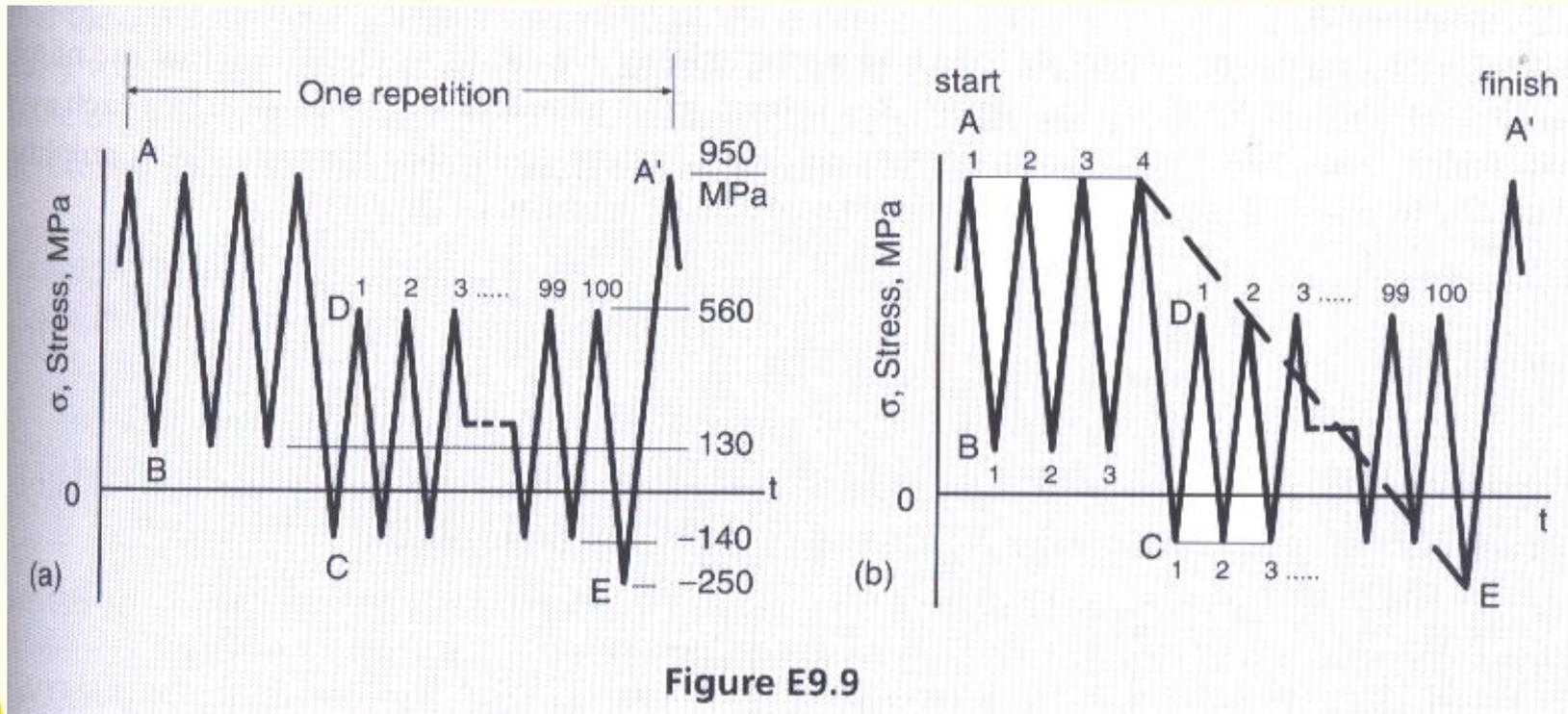


Figure E9.9

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

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

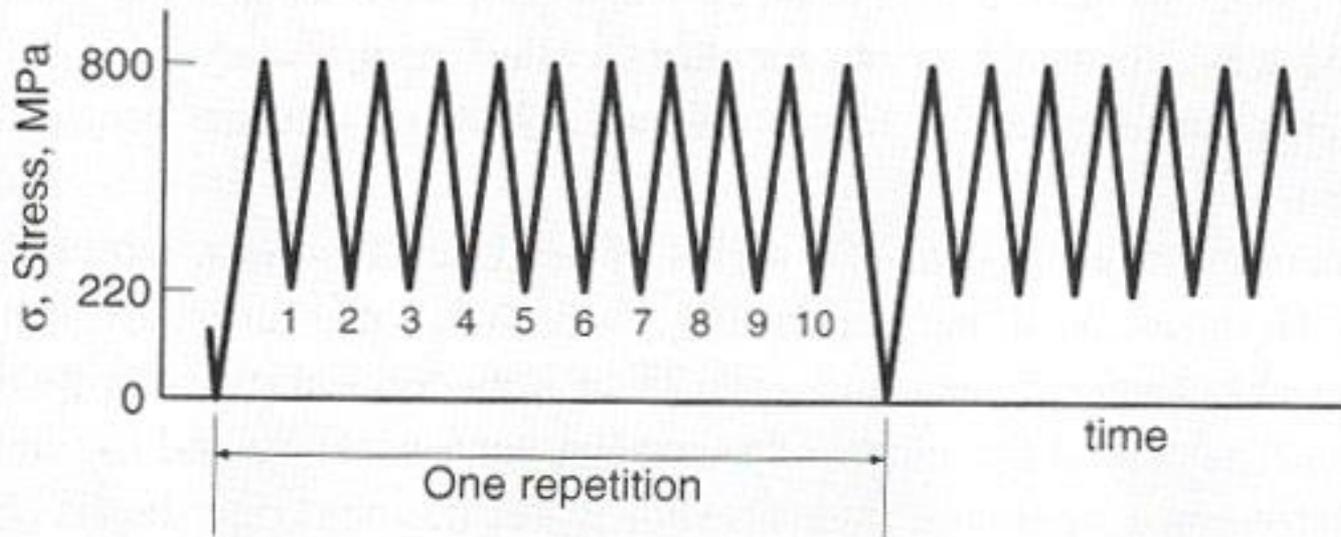
$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a}}{\sigma'_f} \right)^{1/b}$$

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	Nj	σ_{\min}	σ_{\max}	σ_a	σ_m	Nfj	Nj/Nfj
1	1	0	800	400	400	$1,36 \times 10^5$	$7,37 \times 10^{-6}$
2	10	220	800	290	510	$1,54 \times 10^6$	$6,51 \times 10^{-6}$

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

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

$$b = -0,0977$$

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

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

Considere a hist3ria de carregamento anterior e:

- Estime a vida usando o m3todo da tens3o equivalente com amplitude constante.
- 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