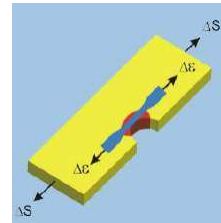
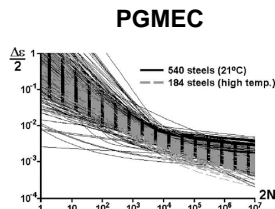
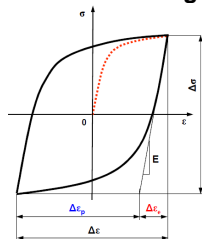


7. CURVAS ϵN

Prof. Dr. Julio Almeida

Universidade Federal do Paraná

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica



1

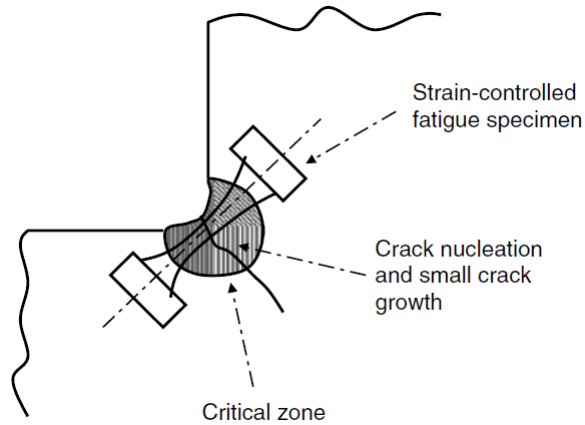
CURVAS DEFORMAÇÃO x NÚMERO DE CICLOS

Determinadas situações fazem com que a deformação plástica passe a ter um papel importante no fenômeno da fadiga.

Coffin (1954) e *Manson* (1953) começaram a investigar o que hoje em dia é conhecido como fadiga sob controle de deformação (*strain control*).

2

CURVAS DEFORMAÇÃO x NÚMERO DE CICLOS



Ainda que a tensão nominal esteja dentro do intervalo elástico, a tensão localizada nos entalhes pode ser mais elevada, caracterizando a condição de uma deformação permanente num eventual descarregamento (cargas cíclicas).

3

CURVAS DEFORMAÇÃO x NÚMERO DE CICLOS

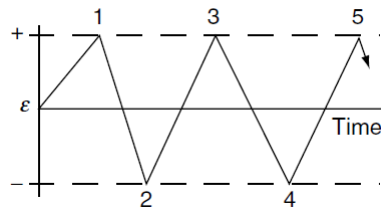
Curvas podem assim serem obtidas experimentalmente mediante um regime de controle da deformação.

Trata-se de método aplicado no projeto de fadiga de baixo ciclo com altas amplitudes de deformação.

4

CURVAS DEFORMAÇÃO x NÚMERO DE CICLOS

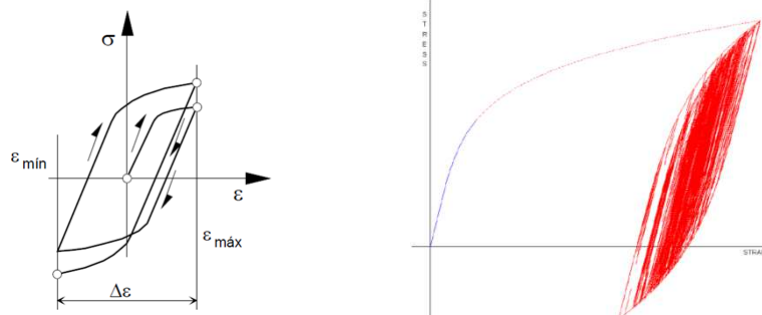
Nesses ensaios a deformação oscila ciclicamente entre ε_{\min} e ε_{\max} , enquanto que a tensão pode variar livremente, dependendo apenas da resposta cíclica do material. A forma da curva $\varepsilon(t)$ geralmente preferida é uma onda triangular.



5

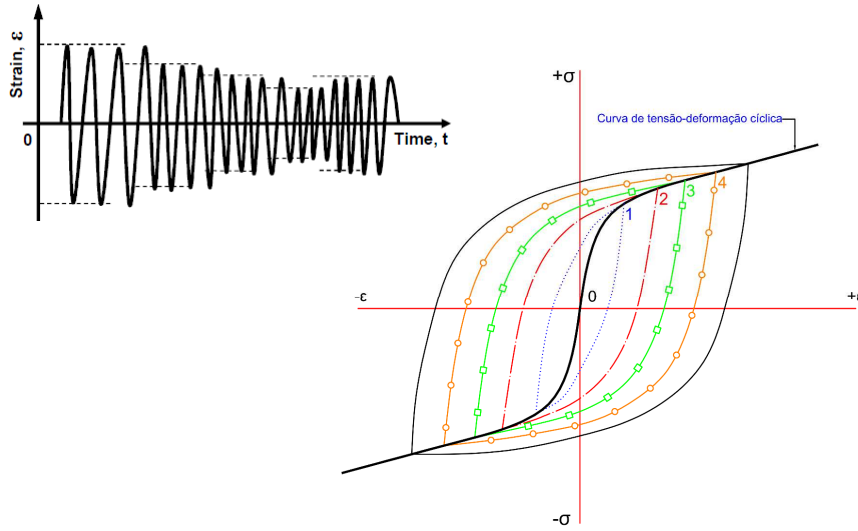
EFEITO BAUSCHINGER

Durante o processo de deformação cíclica desenvolve-se um laço de histerese provocado pela deformação plástica cíclica. Trata-se do efeito Bauschinger.



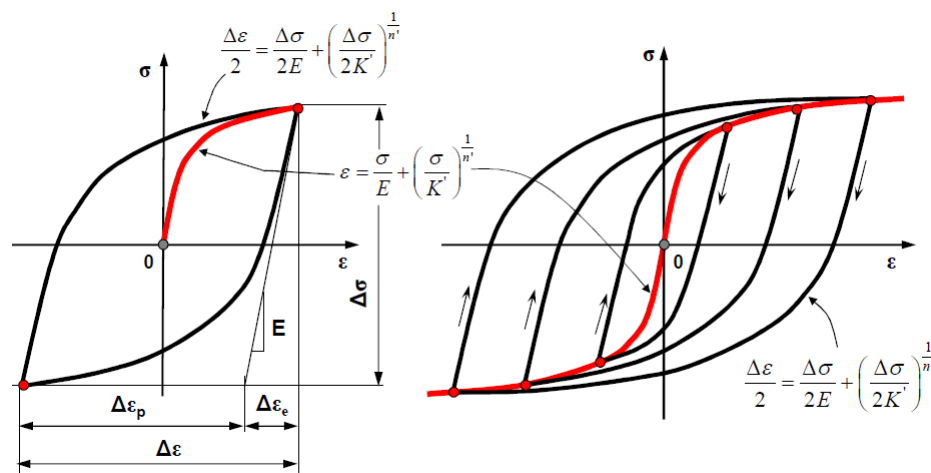
6

CURVAS TENSÃO x DEFORMAÇÃO CÍCLICA



7

CURVAS TENSÃO x DEFORMAÇÃO CÍCLICA

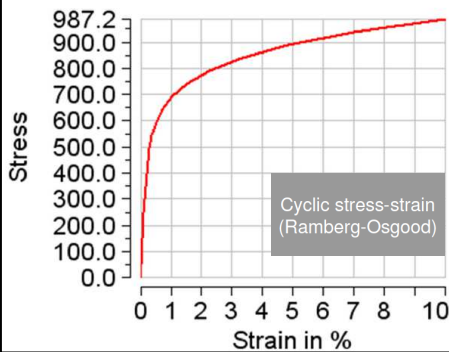


8

CURVA TENSÃO x DEFORMAÇÃO CÍCLICA

Equação da curva σ x ϵ cíclica

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n}$$

Equação de *Ramberg-Osgood*

K' = coeficiente de encruamento cíclico

n = expoente de encruamento cíclico

9

CURVA TENSÃO x DEFORMAÇÃO CÍCLICA

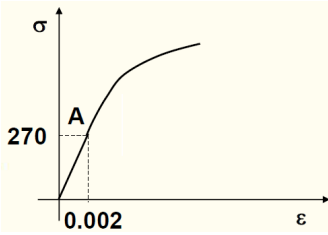
Equação do *looping* de histerese

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

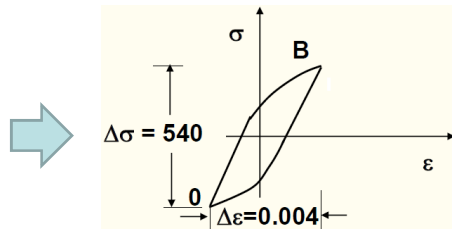
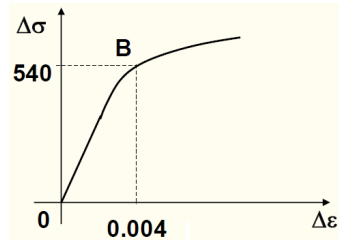
10

CURVA TENSÃO x DEFORMAÇÃO CÍCLICA

Curva σ x ϵ cíclica



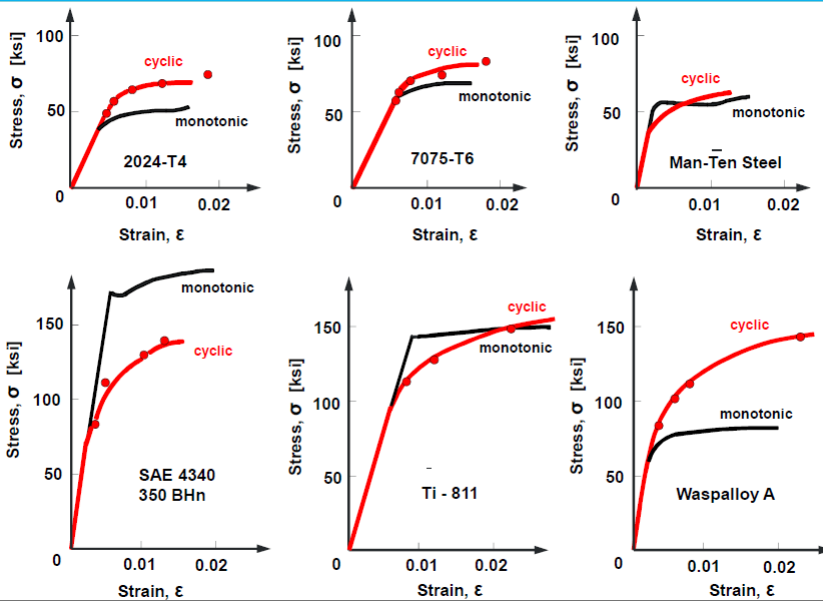
Curva de histerese estabilizada



Laço de histerese estabilizado

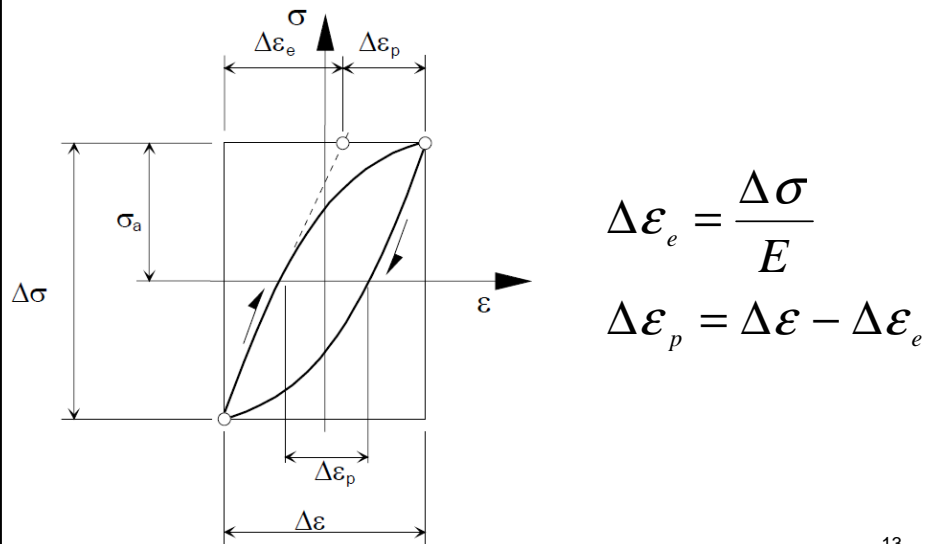
11

CURVAS σ x ϵ CÍCLICAS – EXEMPLOS



12

CURVA DEFORMAÇÃO x NÚMERO DE CICLOS



13

CURVA DEFORMAÇÃO x NÚMERO DE CICLOS

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_F' (2N)^c$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{1}{E} \frac{\Delta \sigma}{2} = \frac{\sigma_a}{E}$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \varepsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b + \varepsilon_F' (2N)^c$$

Equação Morrow

14

CURVA DEFORMAÇÃO x NÚMERO DE CICLOS

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \varepsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b + \varepsilon_F' (2N)^c$$

σ_f' = coeficiente de resistência à fadiga;

b = expoente de resistência à fadiga, o qual varia entre (-0,05) e (-0,12) para a maioria dos metais;

ε_F' = coeficiente de ductibilidade à fadiga (\cong deformação real ou verdadeira em fratura);

c = expoente de ductibilidade em fadiga, o qual varia entre (-0,4) e (-0,7) para a maioria dos metais.

15

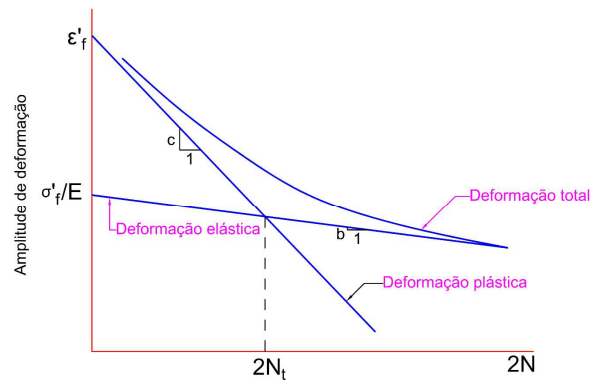
PARÂMETROS CÍCLICOS - VALORES

Material	ε_F'	σ_f' (MPa)	b	c
Aço 1010 LQ	0,15	580	-0,09	-0,43
Aço 1010 LF	0,30	515	-0,059	-0,51
Aço 1045 Q&T, 225 Brinell	1,00	1225	-0,095	-0,66
Aço 1045 Q&T, 410 Brinell	0,60	1860	-0,073	-0,70
Aço 1045 Q&T, 225 Brinell	1,00	1225	-0,095	-0,66
Alumínio 2014-T6	0,42	848	-0,106	-0,65
Alumínio 2024-T4	0,21	1014	-0,110	-0,52

16

CURVA DEFORMAÇÃO x NÚMERO DE CICLOS

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \varepsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b + \varepsilon_F' (2N)^c$$



17

MÉTODOS ESTIMATIVOS DAS PROPRIEDADES DE FADIGA

Válidos quando as propriedades de fadiga do material não são disponíveis

- Método das inclinações universais

$$\Delta \varepsilon = 3,5 \frac{\sigma_{rup}}{E} (N)^{-0,12} + (\varepsilon_F)^{0,6} (N)^{-0,6}$$

- Método da correlação a 4 pontos

18

MÉTODOS ESTIMATIVOS DAS PROPRIEDADES DE FADIGA

- Método da correlação a 4 pontos

$$\sigma_f' = \frac{E}{2} \cdot 10^{b \log(2) + \log\left(\frac{2,5\sigma_{rup}(1+e)}{E}\right)}$$

$$b = \frac{\log\left(\frac{2,5(1+e)}{0,9}\right)}{\log\left(\frac{1}{4 \cdot 10^5}\right)} \quad c = \frac{1}{3} \log\left(\frac{0,0132 - \Delta \varepsilon^*}{1,91}\right) - \frac{1}{3} \log\left(\frac{1}{4} e^{3/4}\right)$$

$$\varepsilon_F' = \frac{1}{2} \cdot 10^{c \log\left(\frac{1}{20}\right) + \log\left(\frac{1}{4} e^{3/4}\right)} \quad \Delta \varepsilon^* = 10^{b \log(4 \cdot 10^4) + \log\left(\frac{2,5\sigma_{rup}(1+e)}{E}\right)}$$

19

ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DE FADIGA

Relações empíricas de *Boardman* (1982):

- Tensão de ruptura (ligas de aço carbono):

$$\sigma_{rup} (MPa) \cong 3,45HB \quad HB < 500$$

- Coeficiente de resistência à fadiga:

$$\sigma_f' (MPa) \cong \sigma_{rup} + 345MPa$$

- Expoente de resistência à fadiga: $b \cong -\frac{1}{6} \log\left(\frac{\sigma_f'}{0,5\sigma_{rup}}\right)$

20

ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DE FADIGA

- **Coeficiente de ductibilidade à fadiga:**

$$\varepsilon_f' \cong \ln\left(\frac{100}{100 - \%RA}\right) \quad \%RA = 100\left(\frac{A_i - A_f}{A_i}\right)$$

- **Expoente de ductibilidade em fadiga:**

$$\varepsilon_f \cong 0,5 \Rightarrow c = -0,5$$

$$\varepsilon_f \cong 1,0 \Rightarrow c = -0,6$$

- **Número de ciclos de transição:**

$$2N_t \cong \ln^{-1}(13,6 - 0,0185HB)$$

21

ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DE FADIGA

- **Expoente de encruamento cíclico:** $n \cong \frac{b}{c}$

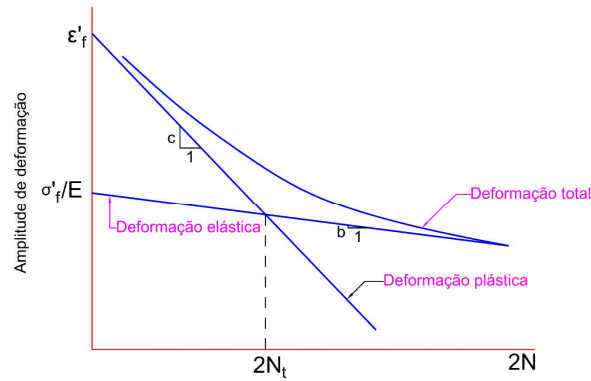
- **Coeficiente de encruamento cíclico:** $K' = \frac{\sigma_f'}{(\varepsilon_f')^n}$

22

NÚMERO DE CICLOS DE TRANSIÇÃO

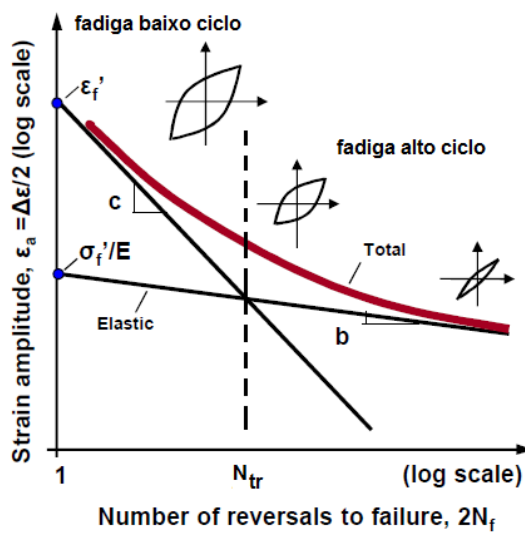
$$(2N_t) = \left(\frac{\epsilon_f' E}{\sigma_f'} \right)^{\left(\frac{1}{b-c} \right)}$$

$2N_t$ - representa as duas reversões que ocorrem a cada ciclo.



23

NÚMERO DE CICLOS DE TRANSIÇÃO

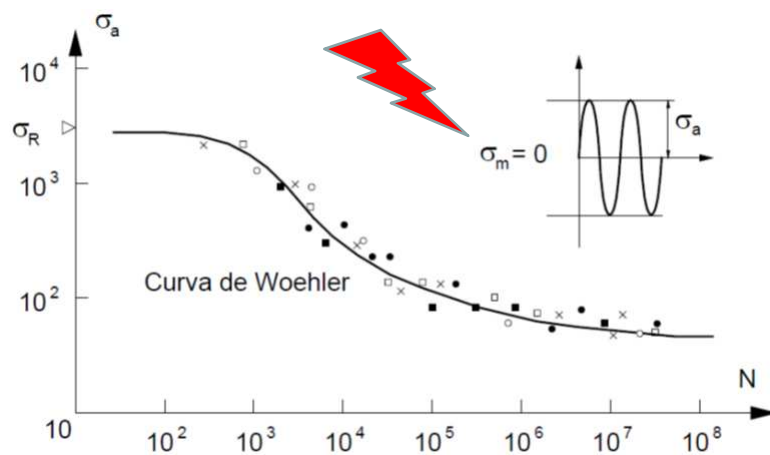


24

EXEMPLO 01

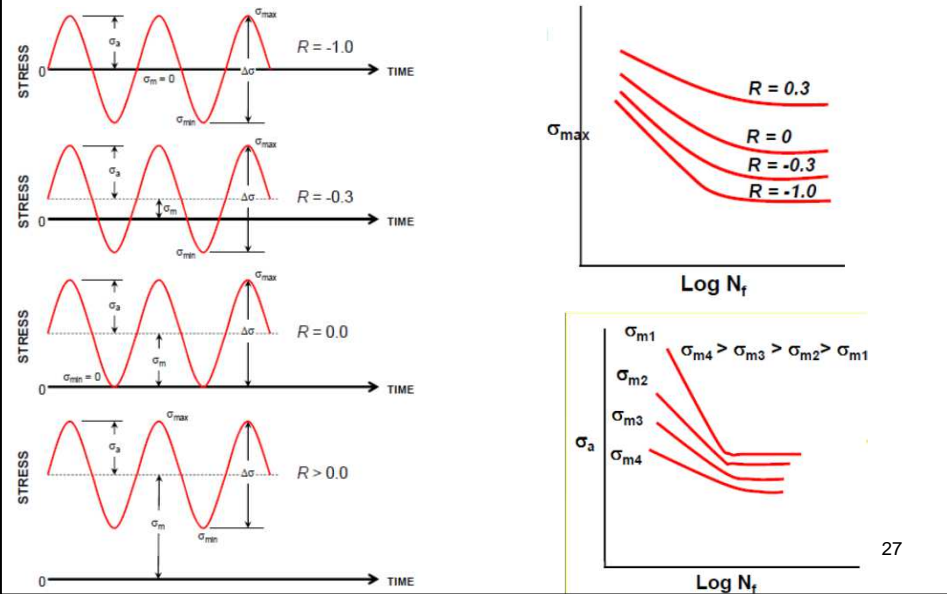
Estimar a curva deformação-número de ciclos do aço SAE ABNT 4340, com dureza de 350HB, $\varepsilon_f = 0,84$ e $E = 210$ GPa. Supor o método das inclinações universais e o método da correlação a 4 pontos. Determinar o range de deformação na condição de 10000 ciclos.

25

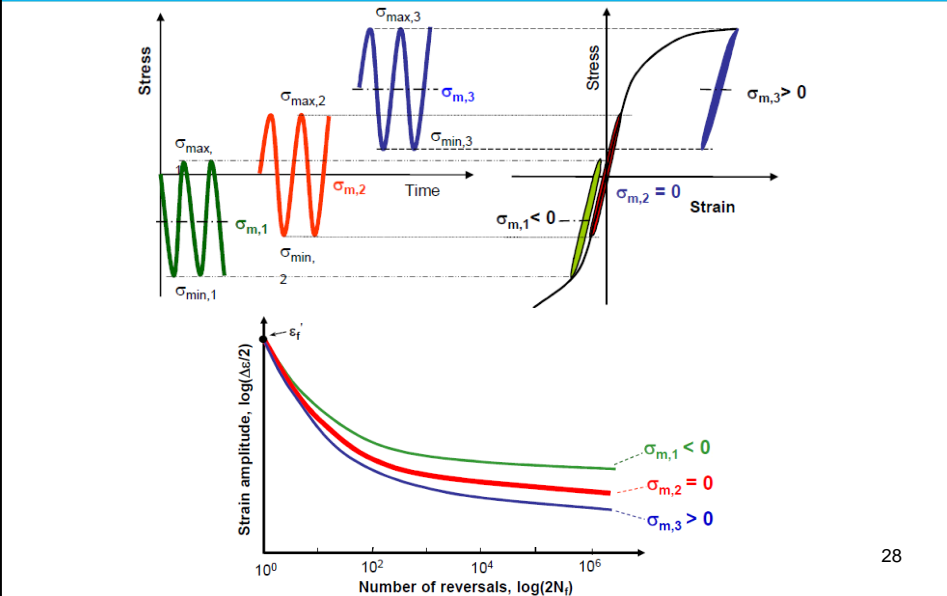
EFEITO DA TENSÃO MÉDIA

26

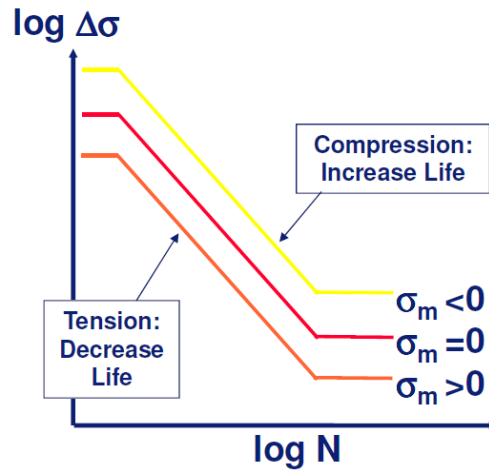
EFEITO DA TENSÃO MÉDIA



EFEITO DA TENSÃO MÉDIA



EFEITO DA TENSÃO MÉDIA



29

TENSÃO MÉDIA – MODELOS DE CORREÇÃO

Morrow

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N)^b + \epsilon_F' (2N)^c$$

Manson-Halford

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N)^b + \epsilon_F' \left(\frac{\sigma_f' - \sigma_m}{\sigma_f'} \right)^{c/b} (2N)^c$$

Smith-Watson-Topper (SWT)

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N)^{2b} + \epsilon_F' \sigma_f' (2N)^{b+c} \quad \sigma_{\max} > 0$$

30

EXEMPLO 02

Uma liga de alumínio 2024-T351 apresenta um range de deformação de 0,016. Estimar a expectativa de vida pela equação de *Morrow* para:

- uma tensão média de 70MPa
- uma tensão média de -70MPa

Dados do material:

$$\sigma_f' = 927 \text{ MPa}, \varepsilon_f' = 0,409, b = -0,113, c = -0,713,$$

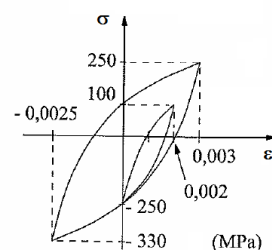
$$E = 73,1 \text{ GPa}, n' = 0,070$$

31

EXEMPLO 03

O diagrama ilustra um loop de histerese estabilizado para um material submetido a uma sequência de carga de 2 ciclos. Por *Morrow*, qual o número de ciclos para fadiga?

Dados material: $\sigma_f' = 900 \text{ MPa}$, $\varepsilon_f' = 0,26$, $E = 200 \text{ GPa}$, $b = -0,095$, $c = -0,47$



32

EXEMPLO 04

A tabela a seguir ilustra os dados de ensaios de fadiga de deformação completamente reversa para um determinado aço carbono ($E = 200 \text{ GPa}$). Supondo que σ_a e ϵ_a são medidos próximo ao ponto $N_f/2$, determine pelo método dos mínimos quadrados, as constantes para a curva ϵ - N .

ϵ_a	σ_a (MPa)	ϵ_{pa}	N_f
0,0202	631	0,01695	227
0,0100	574	0,00705	1030
0,0045	505	0,00193	6450
0,0030	472	0,00064	22250
0,0023	455	(0,00010)	110000

33

ENCRUAMENTO x AMOLECIMENTO

Materiais encruados (trefilação ou laminação) apresentam uma alta densidade de discordâncias (ordem de $10^8/\text{cm}^2$).

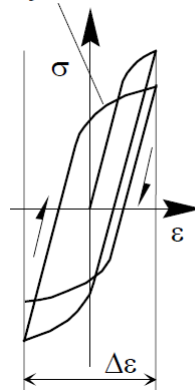
A presença de deformações plásticas possibilita o aniquilamento dessas discordâncias (sinais contrários), fazendo com que a sua densidade de discordâncias seja reduzido de forma significativa.

34

ENCRUAMENTO x AMOLECIMENTO

Tal redução, caracteriza uma diminuição da tensão de escoamento do material (material amolece ciclicamente).

Laços de histerese



35

ENCRUAMENTO x AMOLECIMENTO

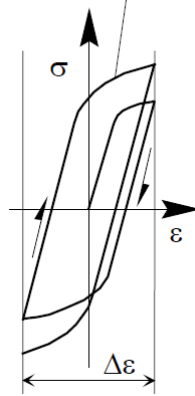
Contrariamente, materiais recozidos apresentam uma baixa densidade de discordâncias (ordem de $10^5/\text{cm}^2$).

Deformações plásticas caracterizam agora um aumento dessas discordâncias, fazendo com que o material ganhe resistência à deformação plástica, ou seja, venha a encruar.

36

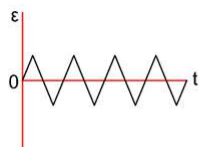
ENCRUAMENTO x AMOLECIMENTO

Laços de histerese

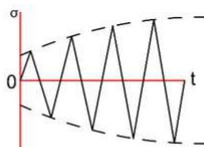


37

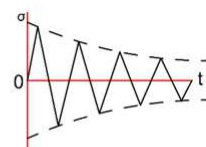
ENCRUAMENTO x AMOLECIMENTO



Carregamento controlado pela deformação



Resposta da tensão quando do endurecimento cíclico



Resposta da tensão quando do amolecimento cíclico

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

38

ENCRUAMENTO x AMOLECIMENTO

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

- o expoente de encruamento cíclico varia entre (0,1) e (0,2) para a maioria dos metais;
- metais com elevado expoente de encruamento cíclico ($n > 0,15$) experimentam endurecimento cíclico;
- metais com expoente cíclico menor ($n < 0,15$) apresentam amolecimento cíclico.

39

REGRA PRÁTICA – POSTULADO DE MANSON

$$\frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{esc}} > 1,4 \Rightarrow \textit{endurecimento cíclico}$$

$$\frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{esc}} < 1,2 \Rightarrow \textit{amaciamento cíclico}$$

40

BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

Morales, M. B. M., *Variabilidad en el crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias*, Universidad de Málaga, Málaga (2002) .

Rosa, E., *Análise de Resistência Mecânica*, UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Análise e Projeto Mecânica, Santa Catarina (2002).

Udomphol, T., *Fatigue of Metals*, Suranaree University of Technology, 2007.

Weaber, M. L., *Fatigue of Materials – Module #39*.

Zhen, Y., *Introduction to creep, fatigue and fracture*. (2012).