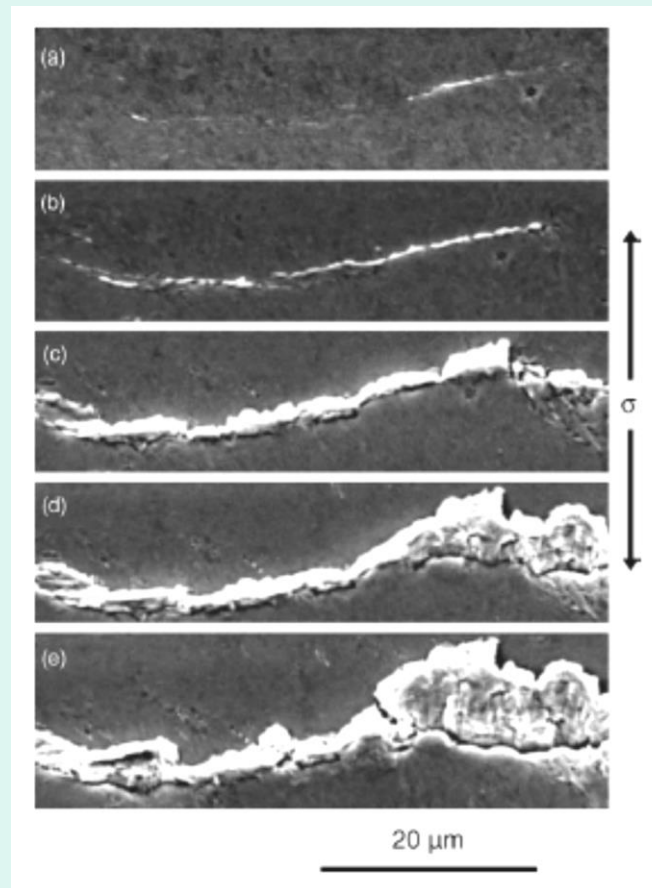


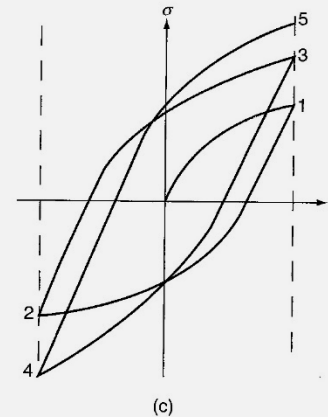
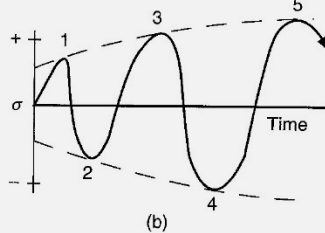
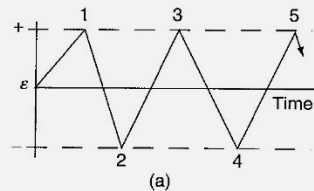
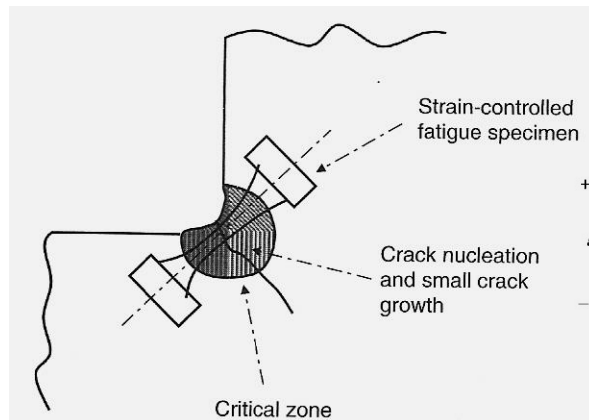
PARTE 3: O MÉTODO ϵ -N



INTRODUÇÃO

Conceito do método deformação-vida

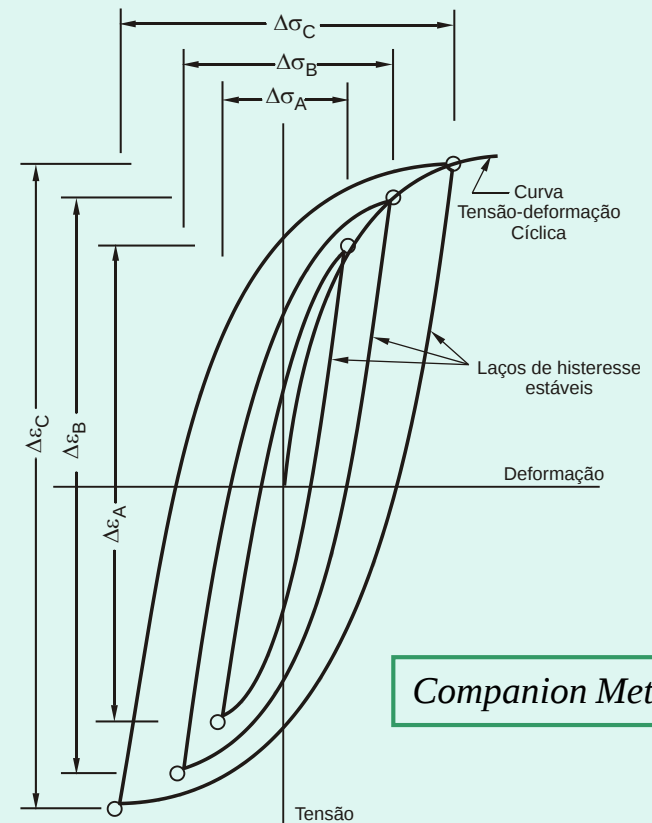
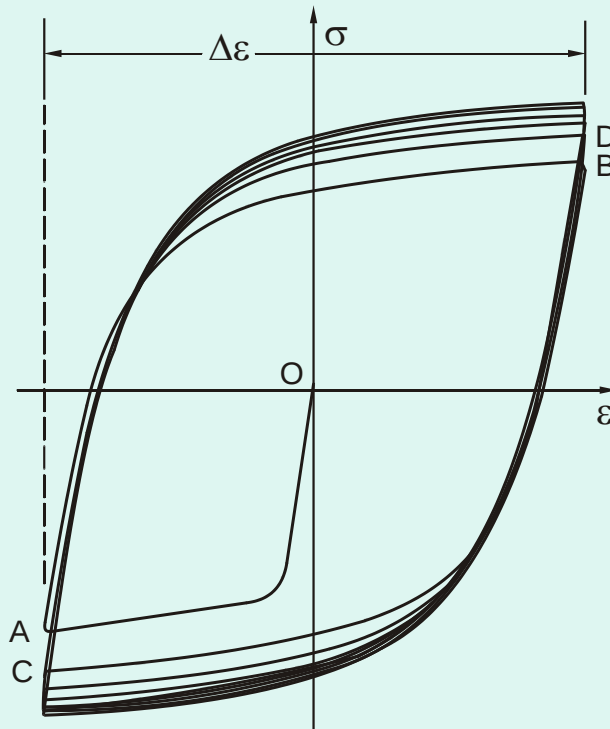
- Furos, entalhes e outros concentradores podem gerar deformação plástica cíclica.
- Considera-se que a vida para a nucleação da trinca de um componente contendo concentrador de tensão pode ser aproximada por um corpo-de-prova liso submetido à mesma deformação cíclica verificada no ponto crítico deste componente.



A CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO CÍCLICA

Comportamento tensão-deformação cíclico

- Nos ensaios com amplitude de deformação constante, os laços de histerese tornam-se estáveis após um amolecimento / endurecimento inicial.
- A CTDC é obtida a partir dos bicos dos laços de histerese estáveis.

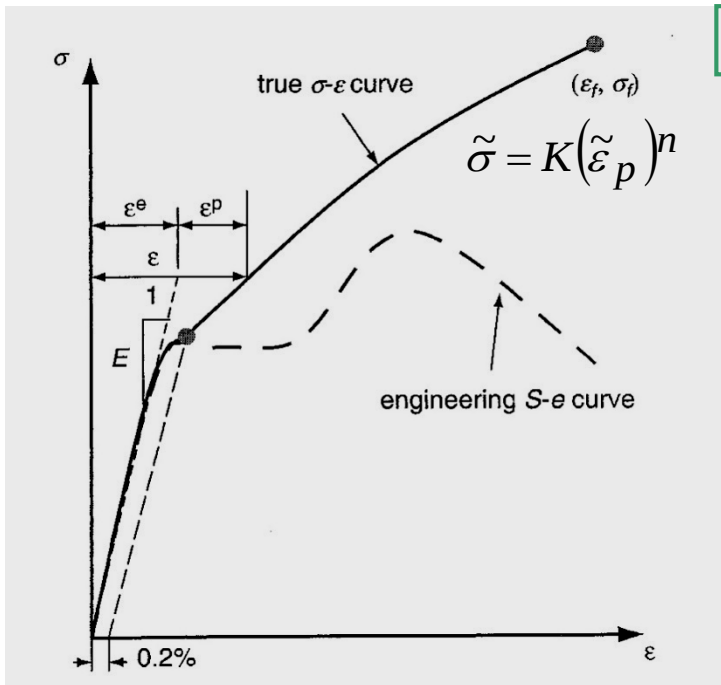


A CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO CÍCLICA

Propriedades mecânicas monotônicas e cíclicas

- Material “tipo Masing”: o laço de histerese é o dobro da CTDC.

$$\sigma_e \quad \sigma_t \quad \Delta L \quad RA \quad E \quad K \quad n \quad \tilde{\sigma}_R \quad \tilde{\varepsilon}_R \quad \tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \tilde{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon)$$

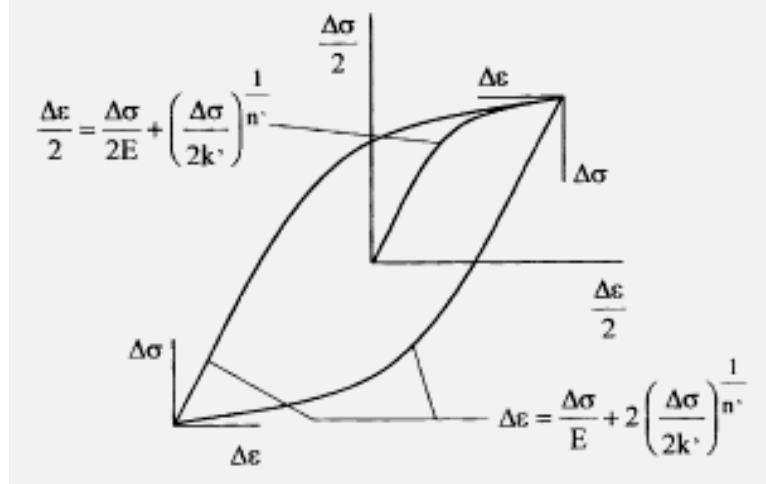


Ramberg-Osgood (curva verdadeira):

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n}$$

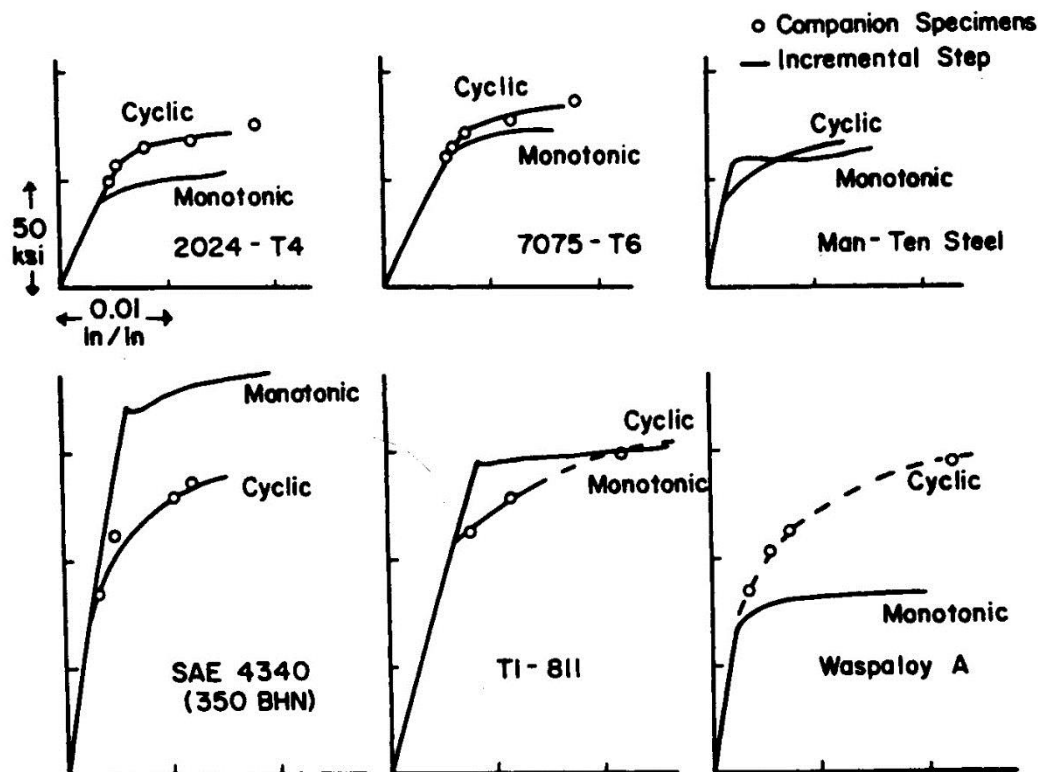
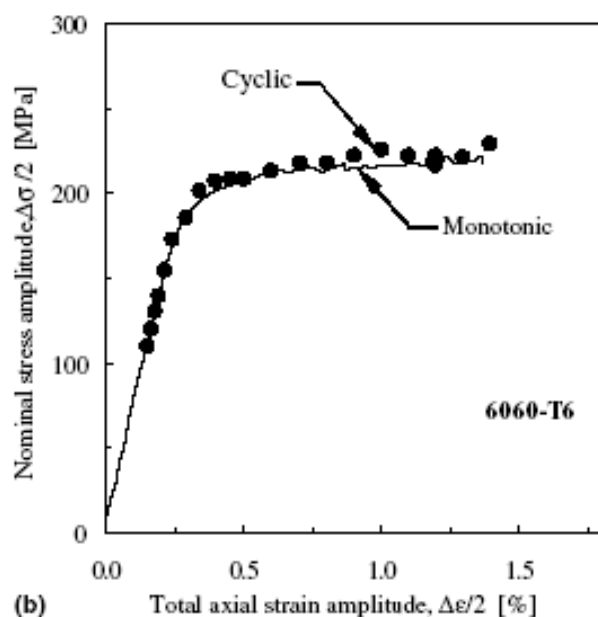
Curva Cíclica:

$K' \quad n'$



A CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO CÍCLICA

A CTDC comparada à curva tensão-deformação verdadeira

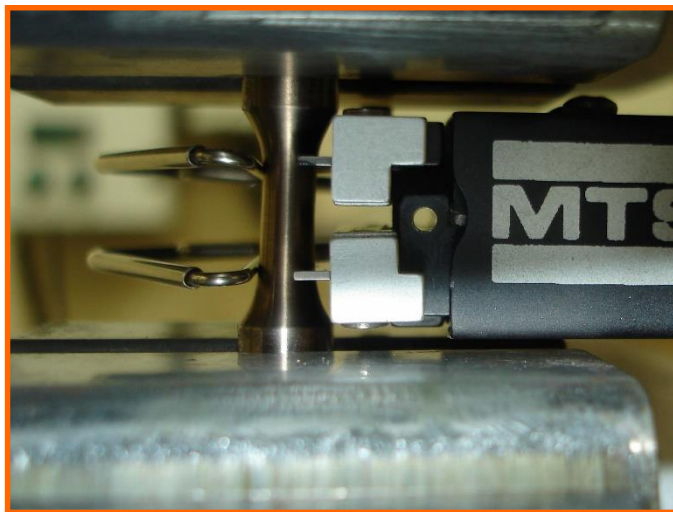


O ENSAIO DE FADIGA DE BAIXO CICLO

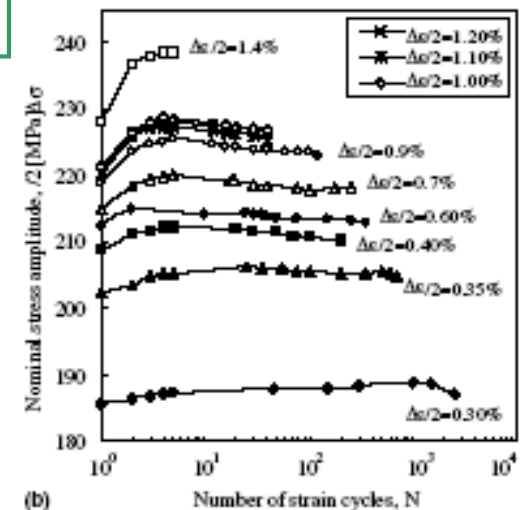
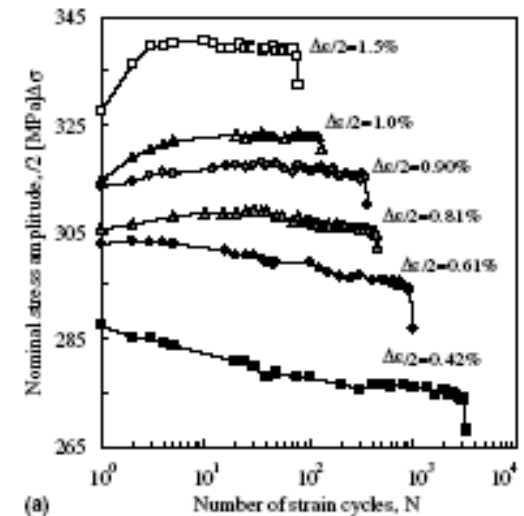
AA 6082 T6

Considerações e Recomendações Práticas

- Controle de deformação
- Forma de onda: triangular
- Manter a mesma taxa de deformação em todos os ensaios
- Coletar os laços de histerese com pelo menos 200 pontos
- Usar tensões e deformações verdadeiras
- Critério de parada: queda de 30-50% na tensão de pico
- Avaliar o laço de histerese correspondente a 50% da vida



AA 6060 T6



O ENSAIO DE FADIGA DE BAIXO CICLO

Análise dos Laços de Histerese

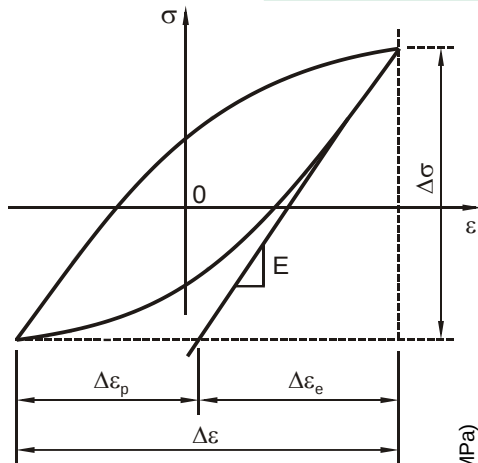
- Existem diferentes métodos para se determinar as parcelas da deformação
- Kandil (1999) observou diferenças de 30% ou mais entre os métodos
- Recomenda-se a definição usada na norma ISO/DIS 12106

A deformação total é dividida nas parcelas elástica e plástica:

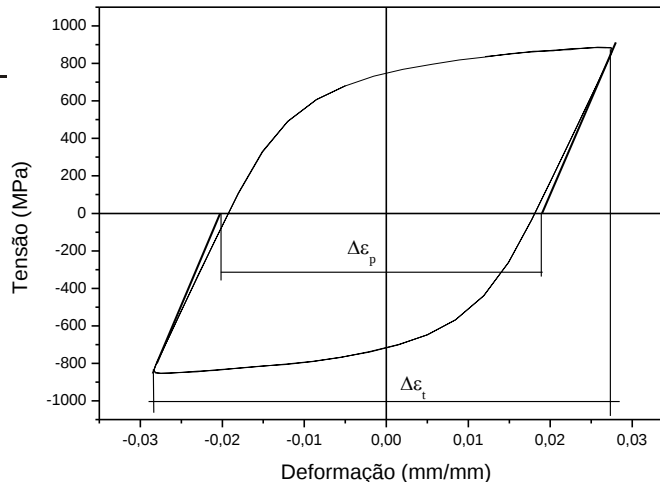
$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap}$$

Equação de Coffin-Manson (1962):

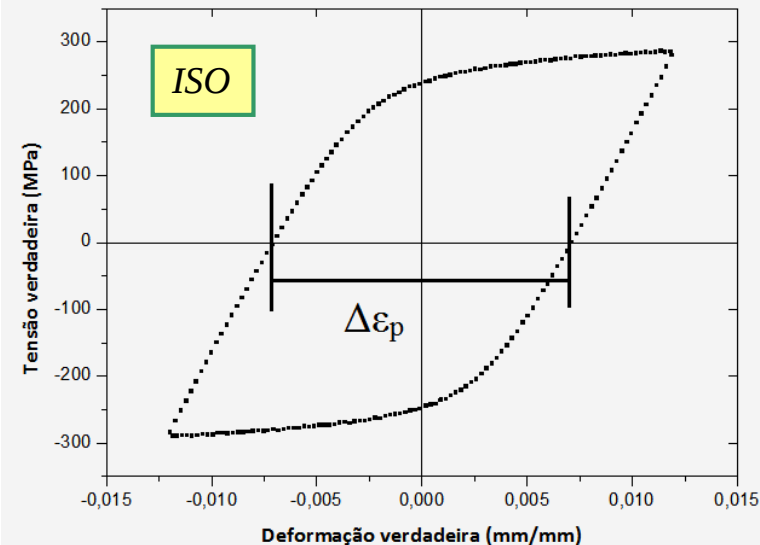
$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$$



AECMA



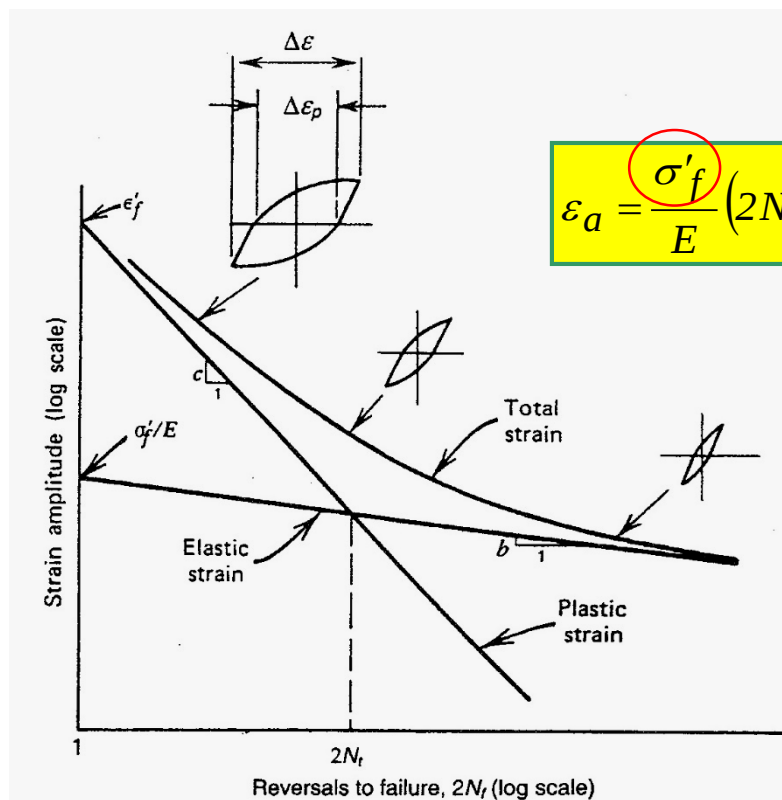
ISO



O ENSAIO DE FADIGA DE BAIXO CICLO

Determinação das Propriedades de Fadiga

- Morrow: junção das equações de Basquin e Coffin-Manson
- As 4 propriedades básicas de fadiga são determinadas

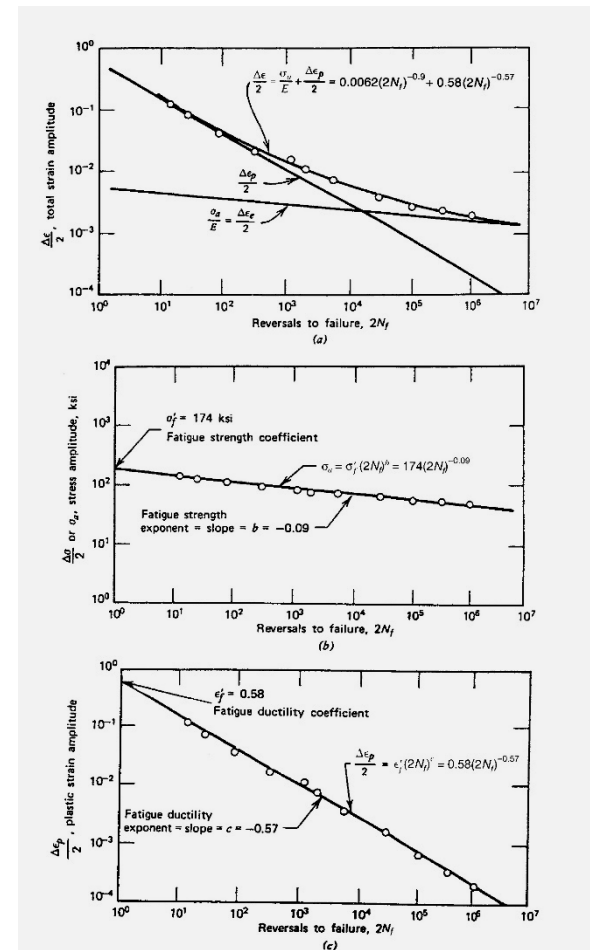


$$\epsilon_{ae} = \frac{\sigma_a}{E}$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$$

Vida de transição

$$N_t = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma'_f}{\epsilon'_f E} \right)^{\frac{1}{c-b}}$$



MÉTODOS ESTIMATIVOS DAS PROPRIEDADES DE FADIGA

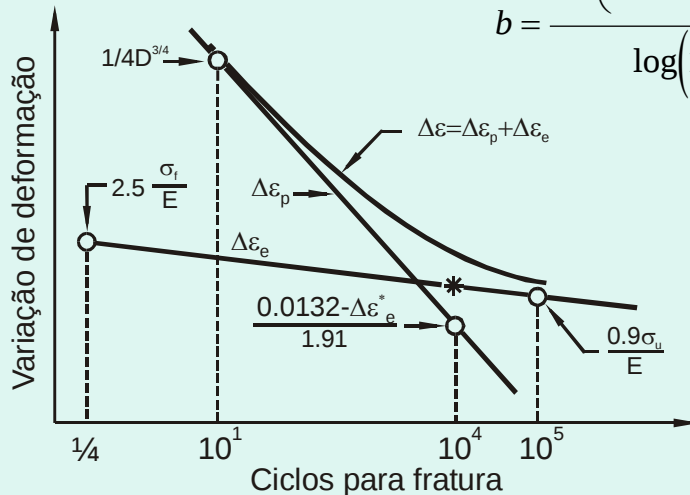
Quando as Propriedades de Fadiga não são disponíveis

- Método das Inclinações Universais
- Correlação a 4 pontos

Inclinações Universais:

$$\varepsilon_a = 0,623 \left(\frac{\sigma_t}{E} \right)^{0,832} (2N_f)^{-0,09} + 0,0196 (\tilde{\varepsilon}_R)^{0,155} \left(\frac{\sigma_t}{E} \right)^{-0,53} (2N_f)^{-0,56}$$

Correlação a 4 pontos:



$$b = \frac{\log \left(\frac{2,5(1 + \ln(1/(1-RA)))}{0,9} \right)}{\log(1/(4 \times 10^5))}$$

$$\frac{\sigma'_f}{E} = \frac{1}{2} \times 10^{\left(b \log(2) + \log \left(\frac{2,5\sigma_t(1 + \ln(1/(1-RA)))}{E} \right) \right)}$$

$$\Delta \varepsilon_e^* = 10^{\left(b \log(4 \times 10^4) + \log \left(\frac{2,5\sigma_t(1 + \ln(1/(1-RA)))}{E} \right) \right)}$$

$$c = \frac{1}{3} \log \left(\frac{0,0132 - \Delta \varepsilon_e^*}{1,91} \right) - \frac{1}{3} \log \left(\frac{1}{4} (\ln(1/(1-RA)))^{3/4} \right)$$

$$\varepsilon'_f = \frac{1}{2} \times 10^{\left(c \log \left(\frac{1}{20} \right) + \log \left(\frac{1}{4} (\ln(1/(1-RA)))^{3/4} \right) \right)}$$

CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PROPRIEDADES DE FADIGA

Ensaio de tração interpretado como ensaio de fadiga com $N_f = 0,5$

- Tensão e deformação verdadeiras de ruptura seriam as propriedades de fadiga
- A conveniência dessa comparação explica o porque das propriedades de fadiga de baixo ciclo serem definidas como os interceptos em $N_f = 0,5$ ciclo.

$$\sigma'_f \approx \tilde{\sigma}_R$$

$$\varepsilon'_f \approx \tilde{\varepsilon}_R$$

Relação entre a CTDC e as propriedades de fadiga

- Tome-se o termo da deformação plástica na CTDC $\rightarrow \sigma_a = K'(\varepsilon_{ap})^{n'}$
- Extraíndo-se N_f das equações de Basquin e Coffin-Manson e comparando-se com o termo anterior, obtém-se as relações:

$$n' = \frac{b}{c}$$

$$K' = \frac{\sigma'_f}{(\varepsilon'_f)^{b/c}}$$

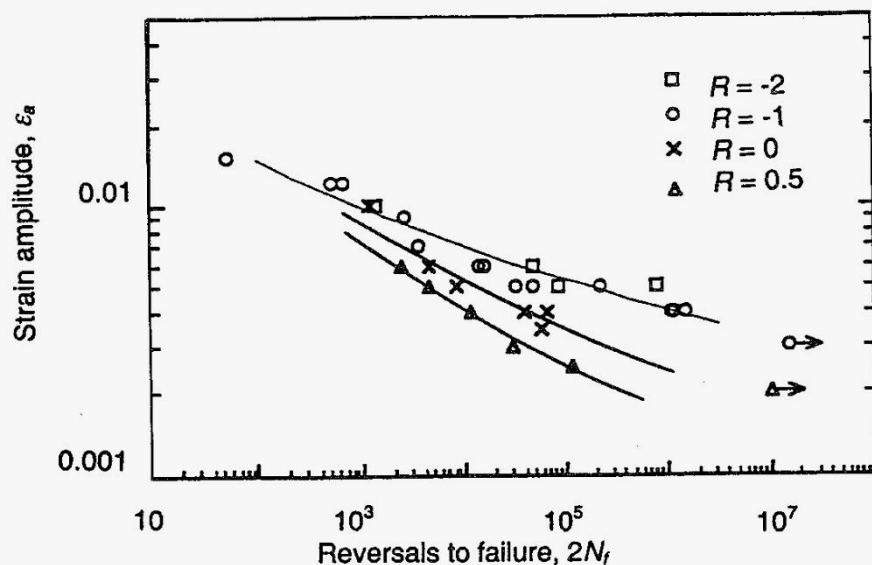
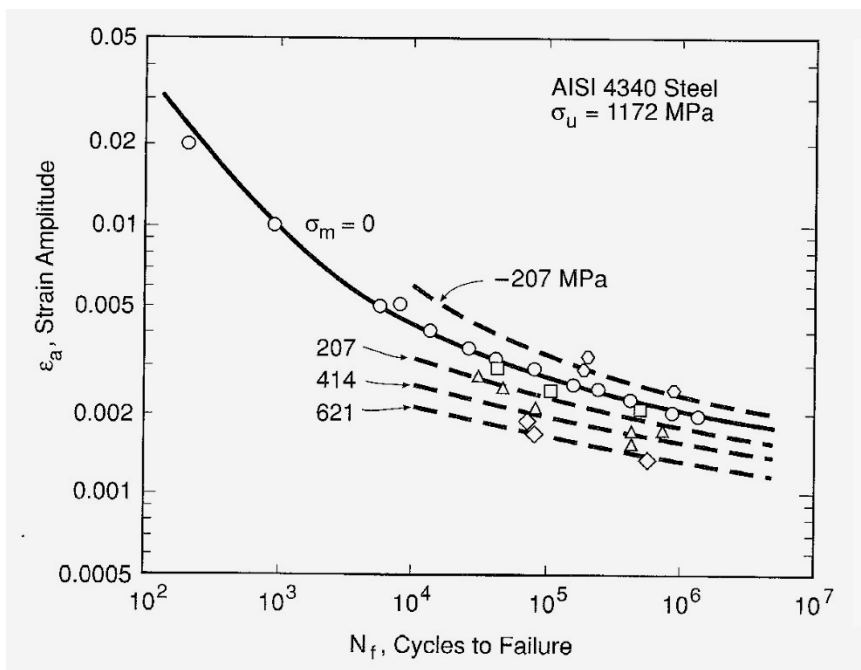
Das 6 constantes cíclicas do material, somente 4 são independentes.

É preferível usar as constantes de ajuste de dados da CTDC do que essas relações

EFEITOS DE ASSIMETRIA

Observação do Efeito da Tensão Média na Vida em Fadiga

- A curva deformação-vida para carregamento totalmente reverso é modificada
- É conveniente considerar famílias de curvas deformação-vida
- Em ensaio com deformação média, pode haver relaxação cíclica da tensão média
- Alternativamente, pode-se realizar ensaios com controle da tensão (*cyclic creep*)



EFEITOS DE ASSIMETRIA

Quantificação do Efeito da Tensão Média

- A literatura apresenta diferentes métodos: Morrow, Morrow modificado, SWT, ...

Equação da Tensão Média de Morrow:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}}$$

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

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N^*)^b + \varepsilon'_f (2N^*)^c$$

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

$$N^* = N_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}}$$

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

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

A vida real N_f é obtida:

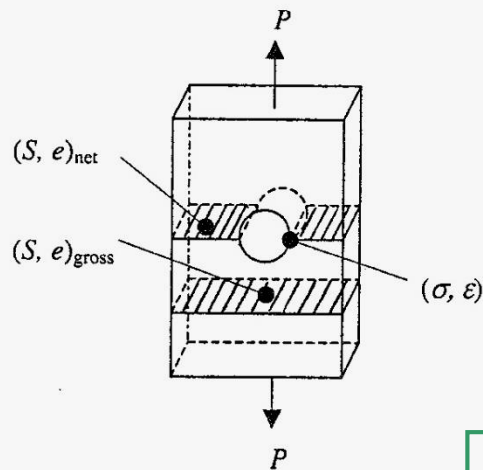
$$N_f = \frac{N^*}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{1/b}}$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right) (2N_f)^b + \varepsilon'_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{c/b} (2N_f)^c$$

EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÃO

Tensões e Deformações na Raiz de Entalhes

- O material na raiz de entalhes está sob “controle de deformação”
- O comportamento em fadiga é melhor descrito em termos da deformação
- A aplicação do método envolve dois passos:
 1. Determinar as tensões e deformações locais
 2. Prever a vida usando as deformações locais e relação ε/N



$$S_{\text{net}} = \text{net nominal stress} = P/A_{\text{net}}$$

$$e_{\text{net}} = \text{net nominal strain}$$

$$S_{\text{gross}} = \text{gross nominal stress} = P/A_{\text{gross}}$$

$$e_{\text{gross}} = \text{gross nominal strain}$$

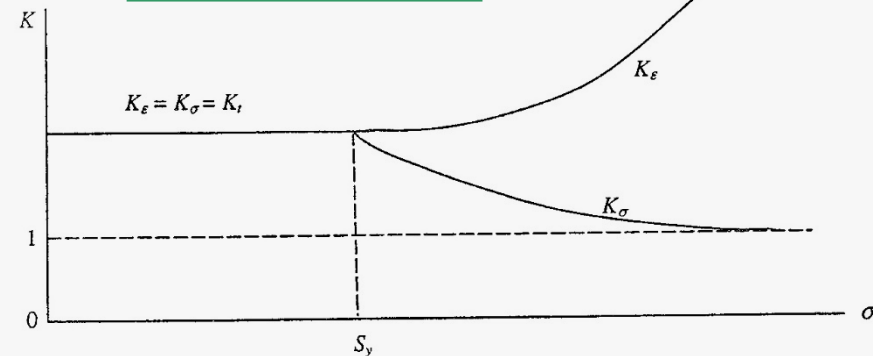
$$\sigma = \text{local stress at the notch}$$

$$\varepsilon = \text{local strain at the notch}$$

Fator de concentração de tensão teórico (elástico): K_t

Carregamentos Monotônicos:

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{e}; \quad K_\sigma = \frac{\sigma}{S}$$



- Para se determinar as tensões-deformações locais:
 - Métodos Experimentais
 - Método Numérico (Elementos Finitos)
 - Métodos Analíticos

EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÃO

Métodos Analíticos

- Regra Linear (deformação plana)
- Regra de Neuber (tensão plana)
- Regra de Glinka (densidade de energia de deformação)

- Modelos Analíticos requerem conhecer o valor de K_t
- Para geometrias complexas, as tensões elásticas podem ser determinadas por Elementos Finitos (análise linear)

Regra Linear:

$$K_\varepsilon = K_t = \frac{\varepsilon}{e}; \quad \varepsilon = K_t e$$

Regra de Neuber:

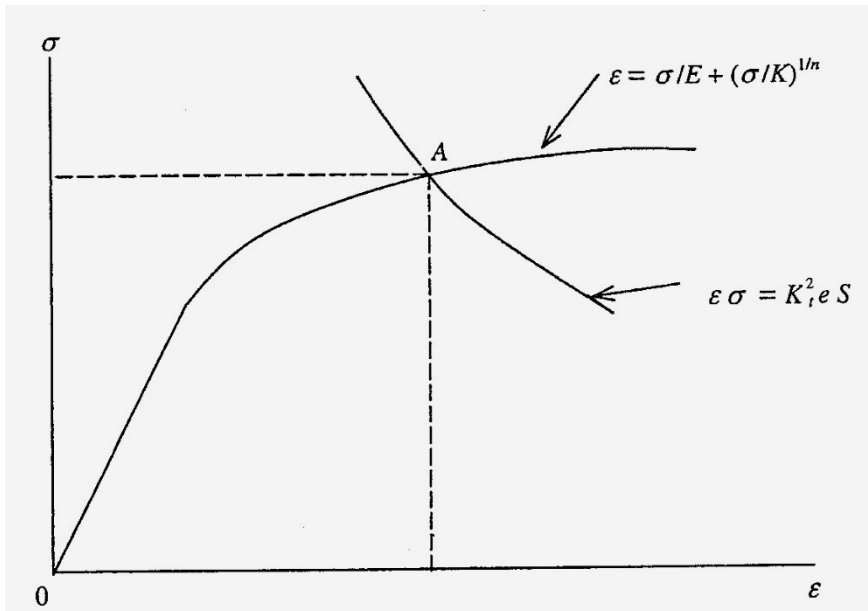
$$K_\varepsilon K_\sigma = K_t^2; \quad \varepsilon \sigma = K_t^2 e S$$

Pode ser resolvida por método gráfico

Para comportamento nominal elástico, vem:

$$e = \frac{S}{E}; \quad \varepsilon \sigma = \frac{(K_t S)^2}{E}$$

$$\frac{\sigma^2}{E} + \sigma \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n} = \frac{(K_t S)^2}{E}$$



EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÃO

Extensão para Carregamentos Cíclicos

- A curva tensão-deformação monotônica é substituída pela curva de histerese
- Tensões e deformações são substituídas pelas respectivas variações no ciclo
- Sugere-se também usar o fator de entalhe à fadiga K_f em vez de K_t

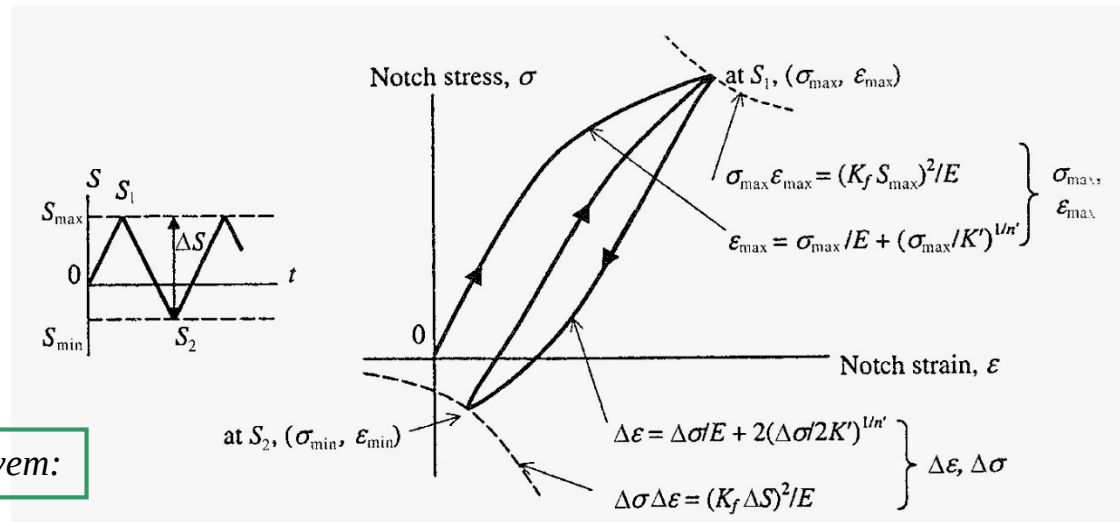
Regra de Neuber:

$$\Delta \varepsilon \Delta \sigma = K_f^2 \Delta e \Delta S$$

Para comportamento nominal elástico, vem:

$$\Delta e = \frac{\Delta S}{E}; \quad \Delta \varepsilon \Delta \sigma = \frac{(K_f \Delta S)^2}{E}$$

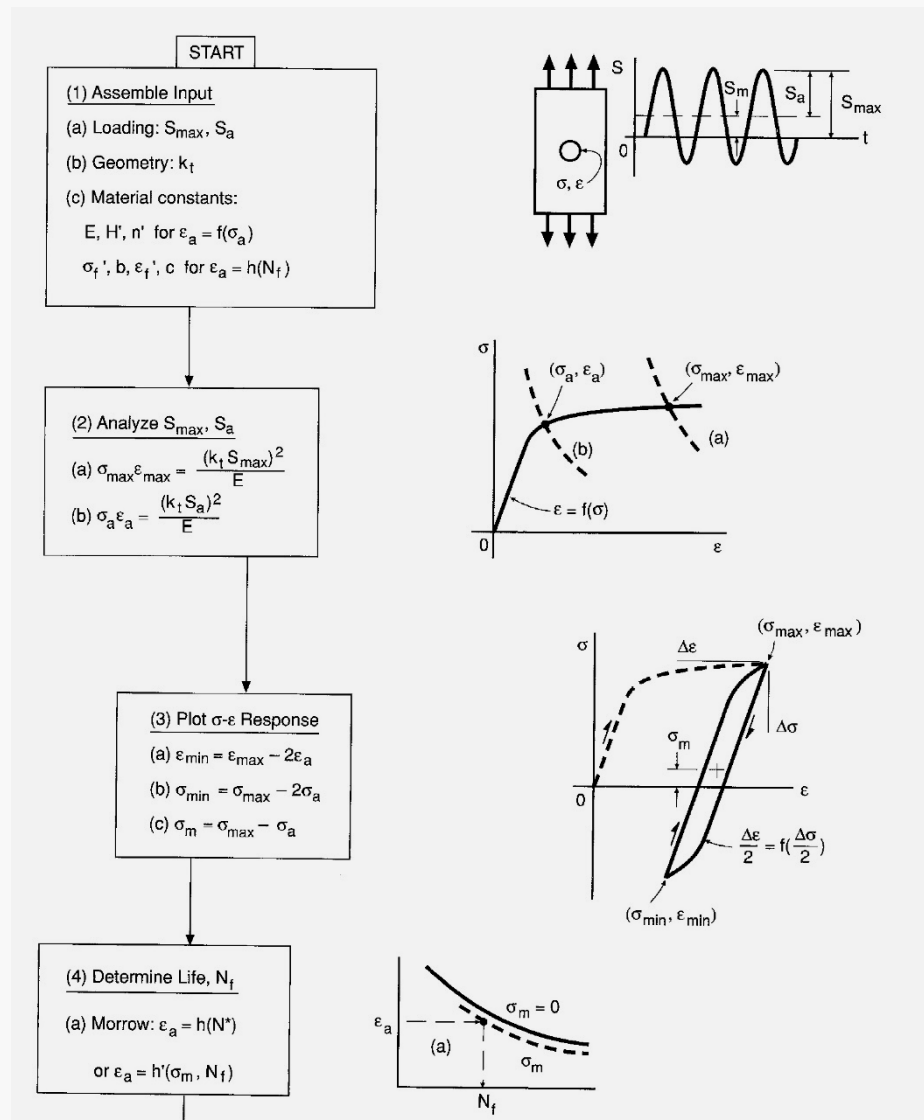
$$\frac{(\Delta \sigma)^2}{E} + 2\Delta \sigma \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{(K_f \Delta S)^2}{E}$$



• Aplicação da regra de Neuber:

- Carregamento inicial de zero a $S_{\max}$ (S_1)
- Descarregamento de S_1 a S_2
- Calcule a amplitude de deformação e a tensão média
- Previsão de vida empregando a equação adequada

RESUMO DO MÉTODO ϵ -N



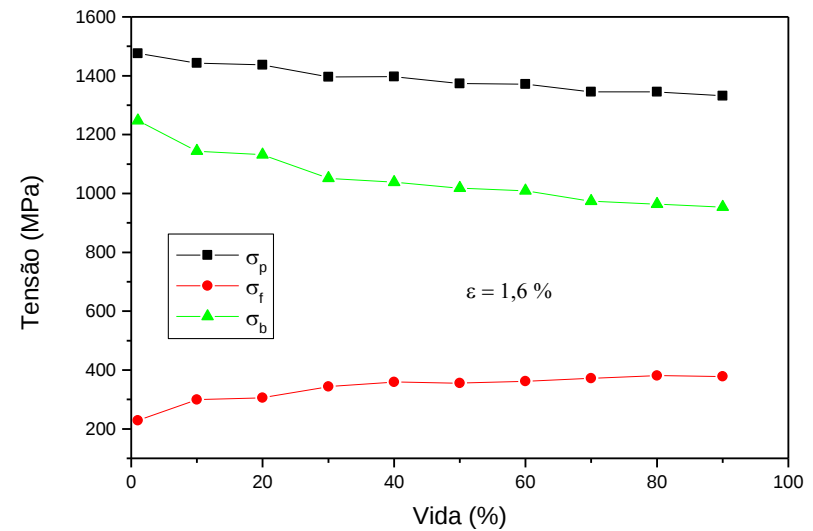
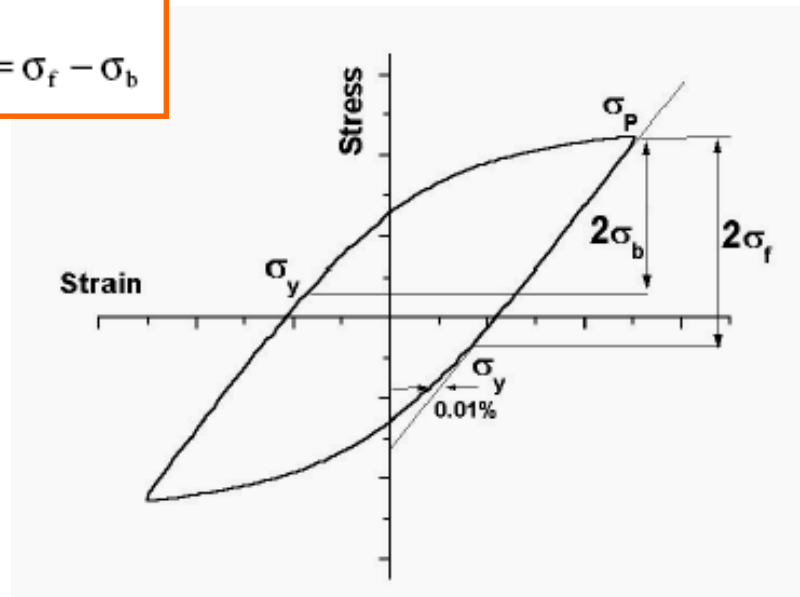
TENSÕES INTERNAS

Método de Cottrell

- Determinação das tensões de atrito e de recuo
 - A tensão de atrito corresponde à resistência que as discordâncias devem vencer para se moverem (tensões que se opõem ao deslizamento).
 - A tensão de recuo está relacionada com o empilhamento (*pile-up*); interações de longo alcance com discordâncias móveis.

$$\sigma_p = \sigma_f + \sigma_b$$

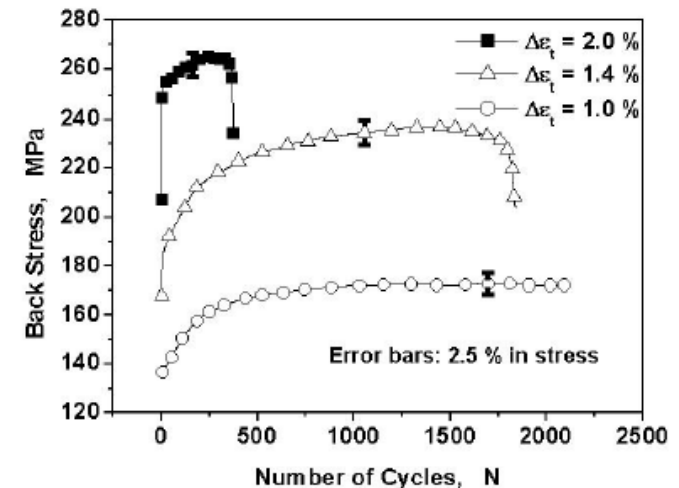
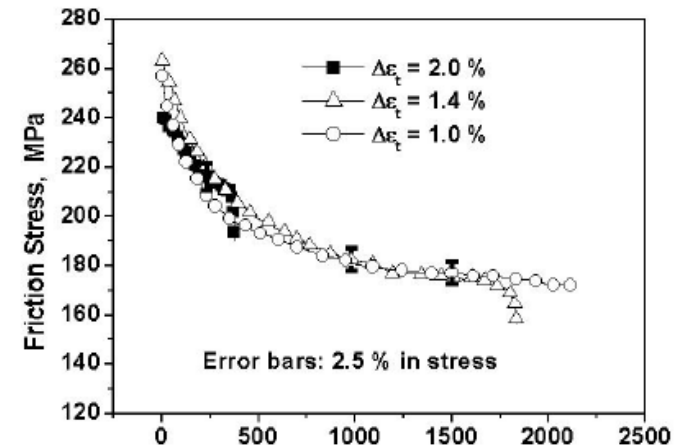
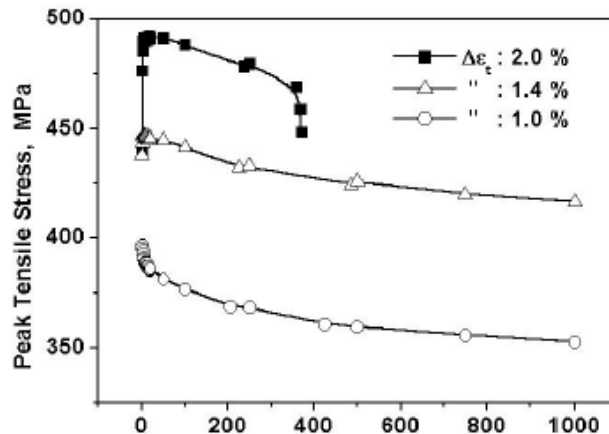
$$\sigma_y = \sigma_f - \sigma_b$$



TENSÕES INTERNAS

Método de Cottrell (cont.)

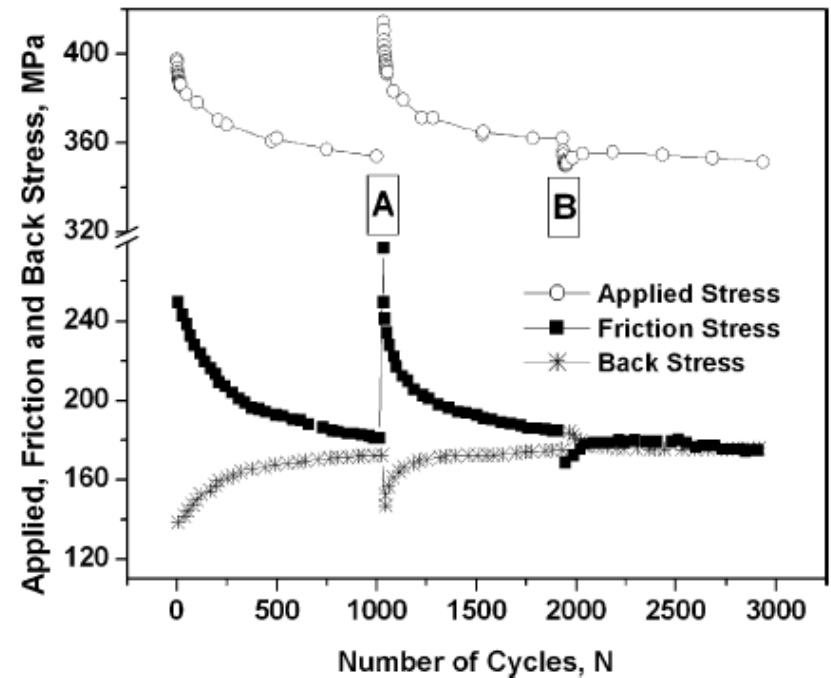
- Exemplo: resultados obtidos para Zircaloy-4 (Armas et al, 2004).
- Observou-se amolecimento cíclico em todas as amplitudes de deformação testadas.
- A tensão de atrito diminuiu com o número de ciclos, e houve uma superposição das curvas.
- A tensão de recuo mostrou-se dependente da amplitude de deformação no início dos ensaios.



TENSÕES INTERNAS

Método de Cottrell (cont.)

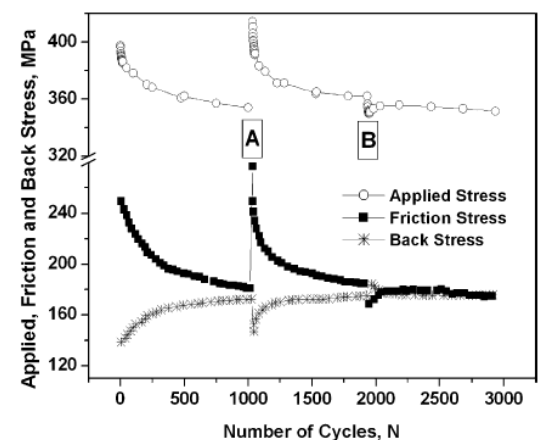
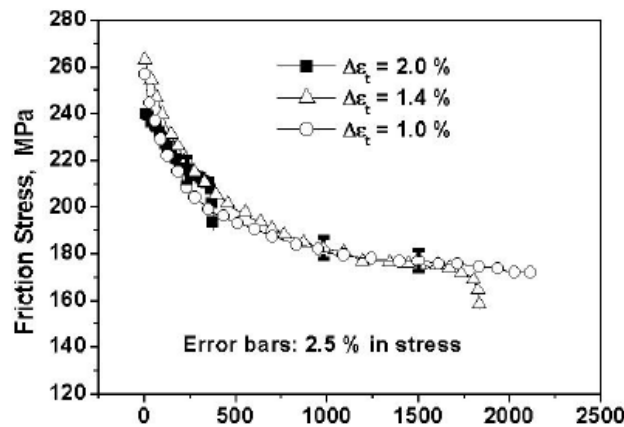
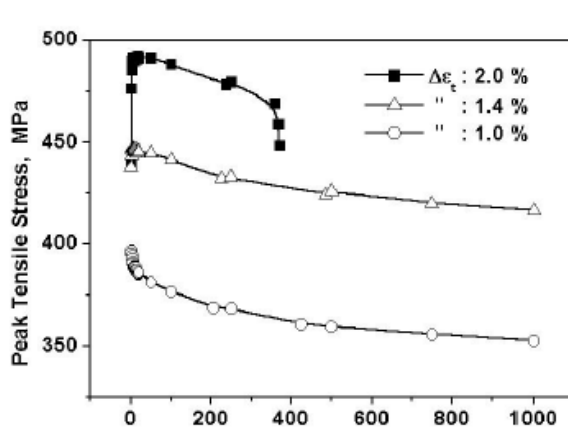
- Para investigar este comportamento, foram feitos ensaios interrompidos, com a amostra sofrendo recozimento após cada interrupção.
- A figura mostra o comportamento das tensões no ensaio interrompido realizado com variação de deformação igual a 1%. Recozimentos: pontos A = 573 K e B = 473 K.
- Este comportamento não foi relacionado a mudanças de textura ou rearranjo da estrutura de discordâncias.
- Temperatura de 573 K corresponde apenas a 0,27 do ponto de fusão.
- Nesta temperatura pode ocorrer a migração de átomos de soluto.
- A concentração de oxigênio na liga é de 0,14 (% peso), o que dá 1 átomo de soluto para 125 da matriz.
- Estimou-se a distância média a ser percorrida por átomos de O para “capturar” as discordâncias na liga.

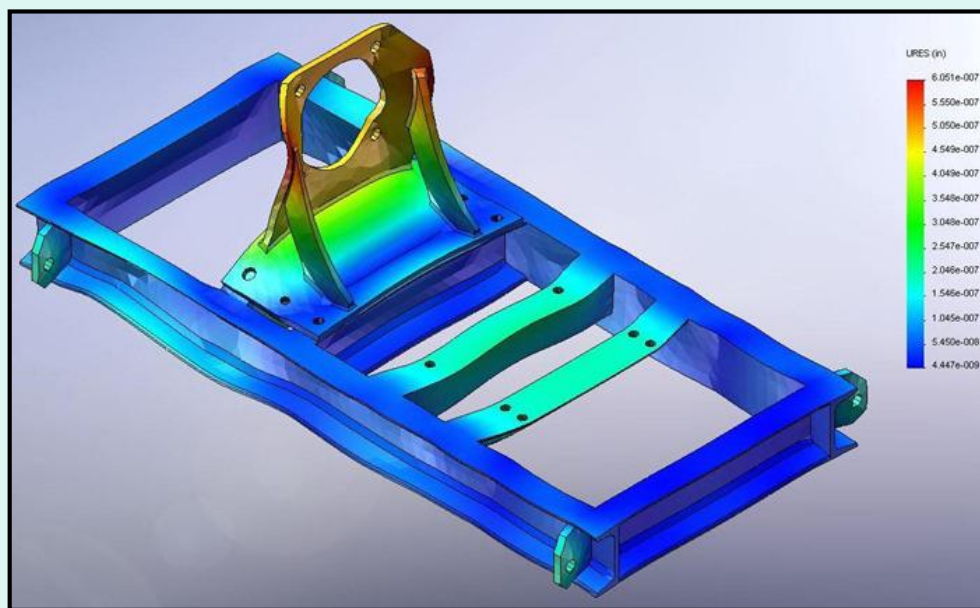
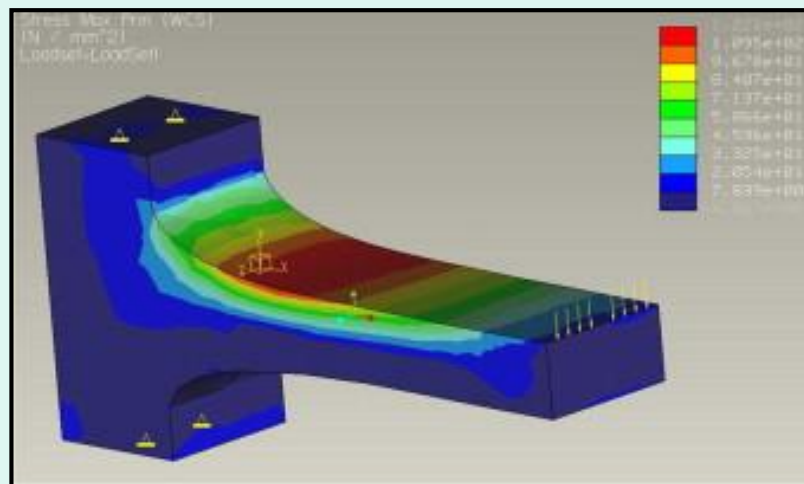
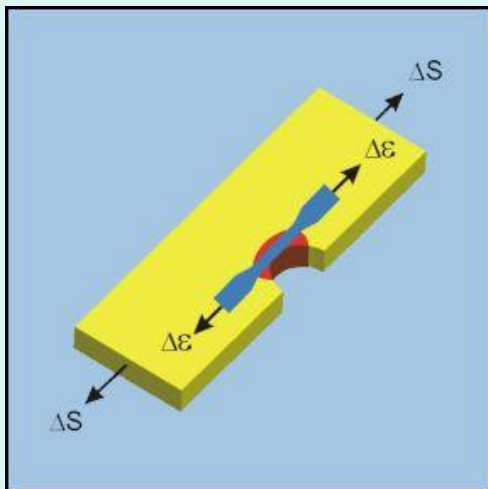


TENSÕES INTERNAS

Método de Cottrell (cont.)

- Com base na concentração de O na liga, e considerando a máxima distância a ser percorrida por um átomo até chegar a uma discordância, bem como a variação do coeficiente de difusão D com a temperatura e o cálculo da distância média percorrida pelos átomos de O em função do tempo, a temperatura necessária para os átomos percorrerem esta distância ($\approx 0,96$ nm) em 1 hora foi estimada em 560 K.
- Os resultados mostram que, após recozimento por 1 h entre 473 e 573 K, uma amostra de Zircaloy-4 recupera o valor da tensão de atrito do início do ensaio.
- Conclui-se que o amolecimento cíclico deve-se à redução da tensão de atrito causada pela liberação das discordâncias presas por átomos intersticiais de O.





FIM DA PARTE 3