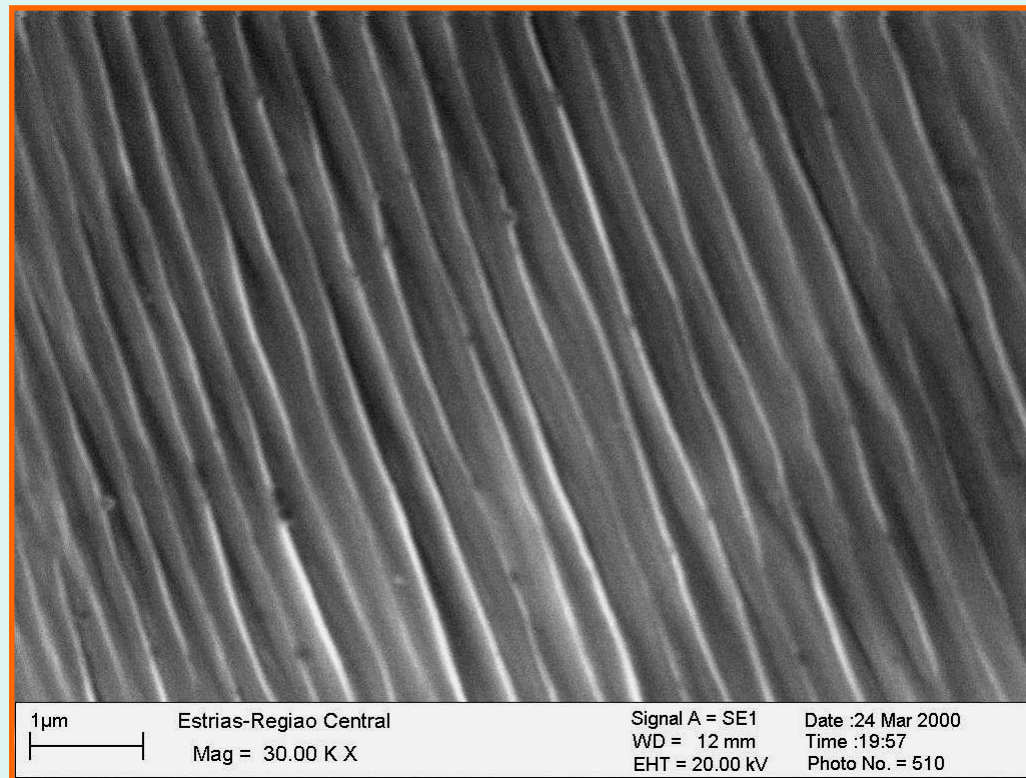


Cap. 1: INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA FADIGA

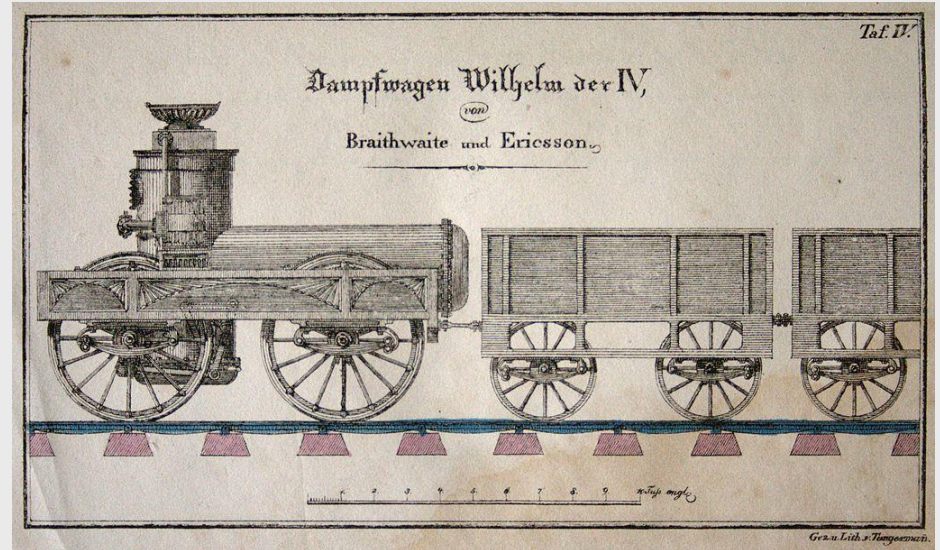


OS PIONEIROS

John Braithwaite (1797-1870)

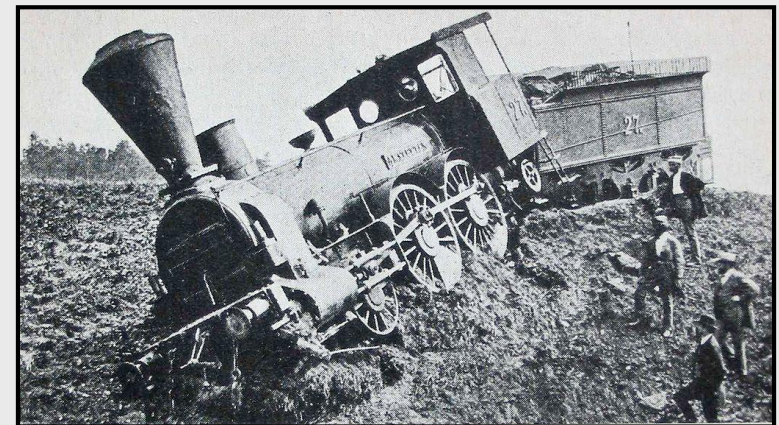
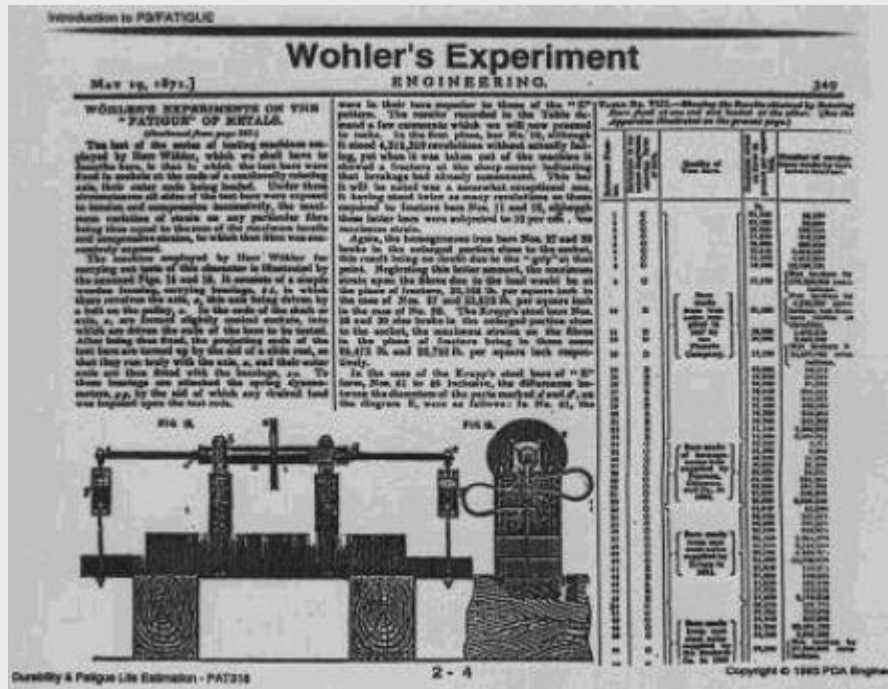
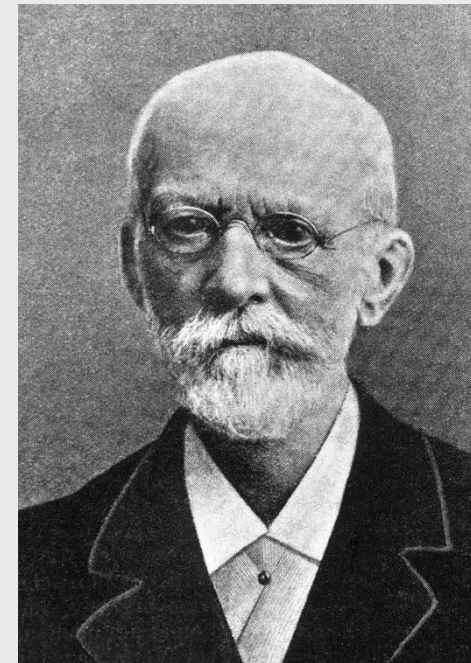


JOHN BRAITHWAITE, Builder of the "Novelty."
(From an engraving in the *Mechanics' Magazine*.)



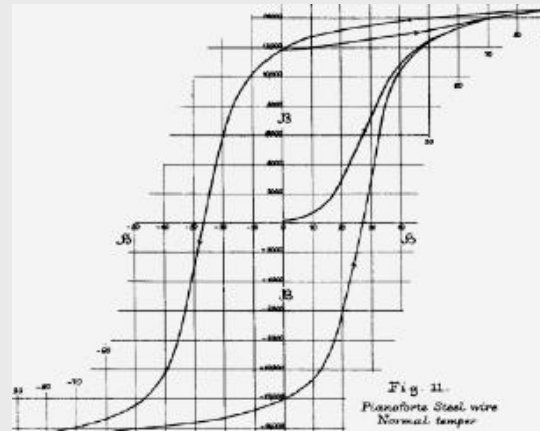
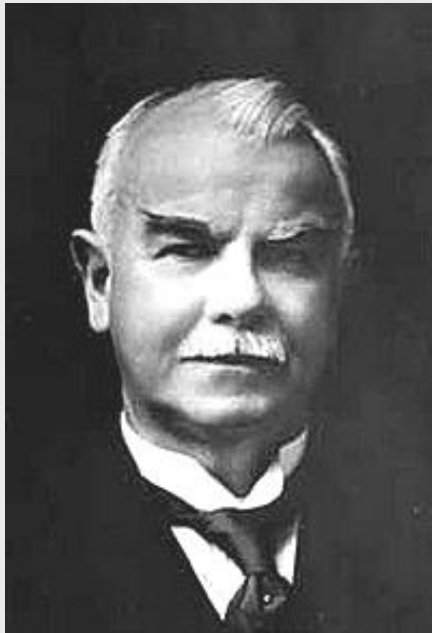
OS PIONEIROS

August Wöhler (1819-1914)



OS PIONEIROS

James Alfred Ewing (1855-1935)



J. A. Ewing and J. C. W. Hussey

Phil. Trans., A, vol. 200, Plate 9

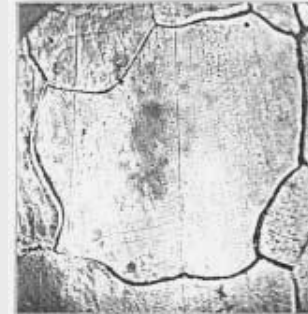


Fig. 9. Specimen after 1000 reversals of a stress of 12.4 tons per sq. inch. $\times 1000$.



Fig. 10. Specimen after 2500 reversals. $\times 1000$.

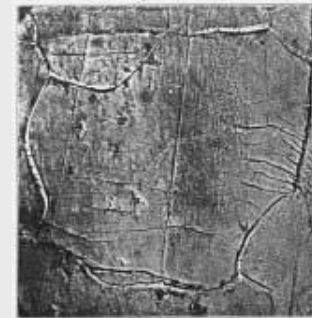


Fig. 11. Specimen after 50,000 reversals. $\times 1000$.

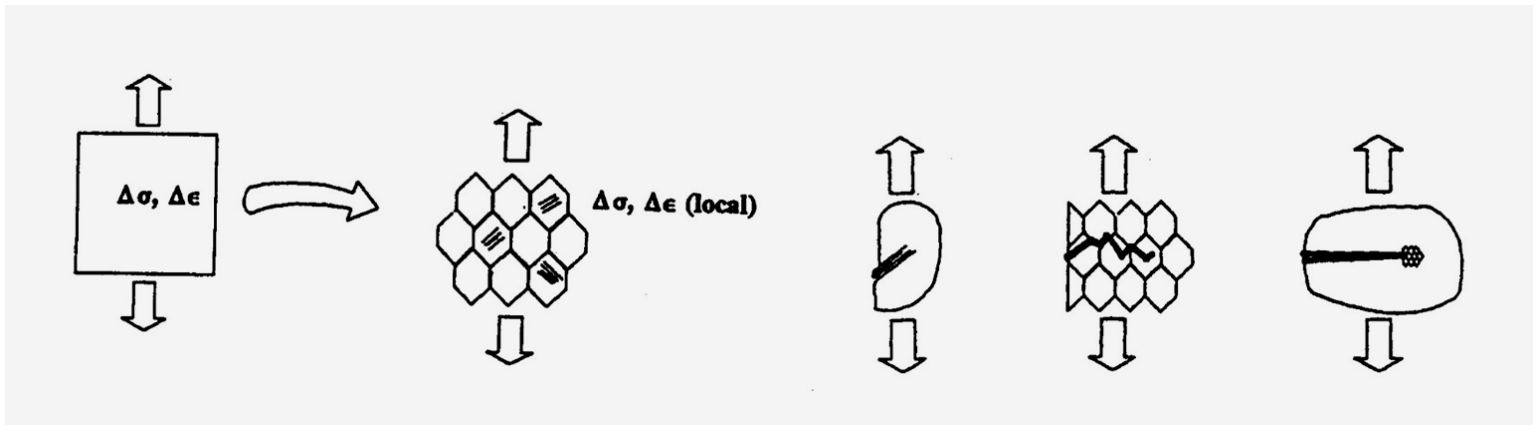


Fig. 12. Specimen after 40,000 reversals. $\times 1000$.

O FENÔMENO DA FADIGA

Ocorrência

- Processo de Dano devido a Cargas Cíclicas
- Alteração Estrutural Progressiva por Deformações Flutuantes
- Ocorre mesmo a Tensões inferiores ao Limite de Escoamento
- Desenvolve-se em Estágios parcialmente sobrepostos:
 - Amolecimento/Endurecimento Cíclico;*
 - Iniciação de Microtrincas;*
 - Propagação de uma ou mais Macrotrincas;*
 - Ruptura Final.*



FALHAS POR FADIGA

Fadiga é o modo mais comum de falha mecânica (~90% dos casos)

Modos de falha por fadiga em metais:

- Nucleação de trincas
- Propagação de trincas por fadiga
- Carregamentos uniaxiais ou multiaxiais
- Carregamentos de amplitude constante ou variável
- Fadiga sob corrosão
- Fadiga por *fretting*
- Fadiga térmica
- Interações fadiga-fluência:
 - Isotérmica
 - Termo-mecânica

MÉTODOS DE PROJETO EM FADIGA

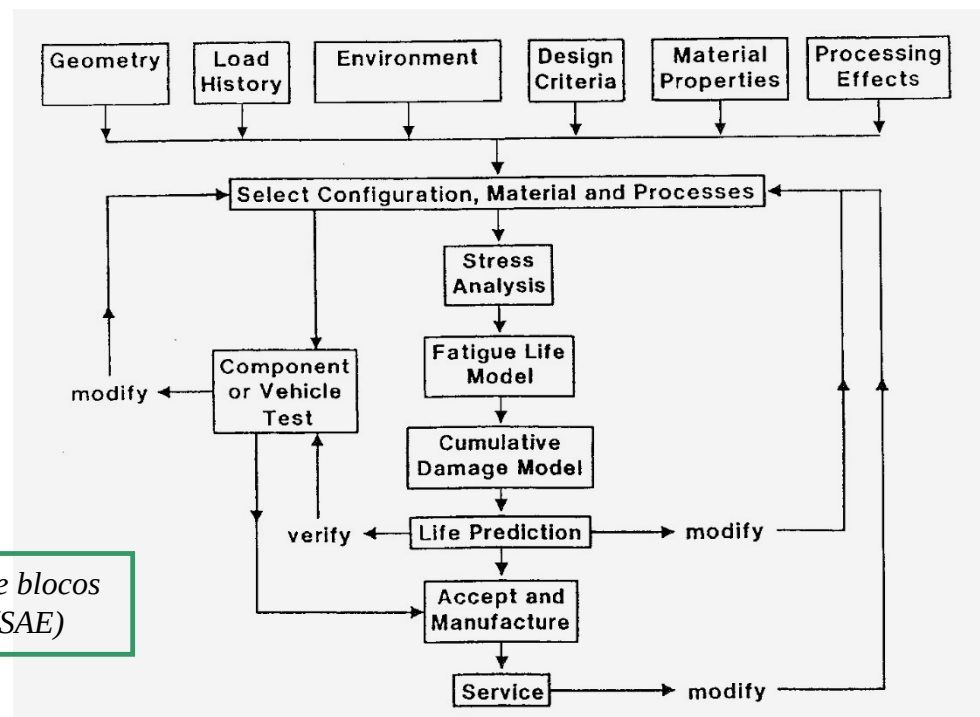
Modelos de vida em fadiga

- Tensão-vida (S/N), formulado no séc. XIX
- Deformação local-vida (ϵ/N), anos 1960s
- Propagação de trincas por fadiga, anos 1960s
- Modelo de dois estágios (iniciação-propagação)

Crítérios de projeto em fadiga

- Vida infinita
- Vida segura (*safe life*)
- Falha segura (*fail safe*)
- Tolerância ao dano

Exemplo: diagrama de blocos de projeto em fadiga (SAE)



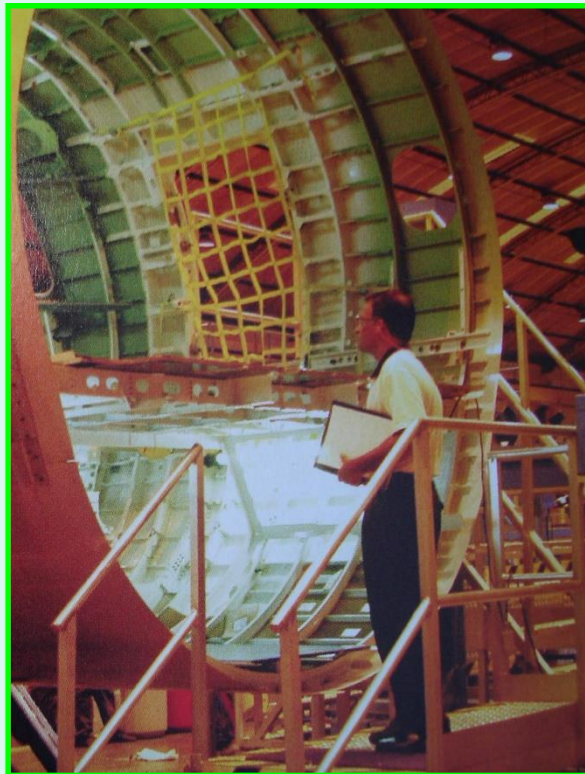
ENSAIOS DE FADIGA

Objetivos

- Propriedades dos materiais (dados de projeto)
- Avaliar processo tecnológico
- Verificar o comportamento de componentes e estruturas

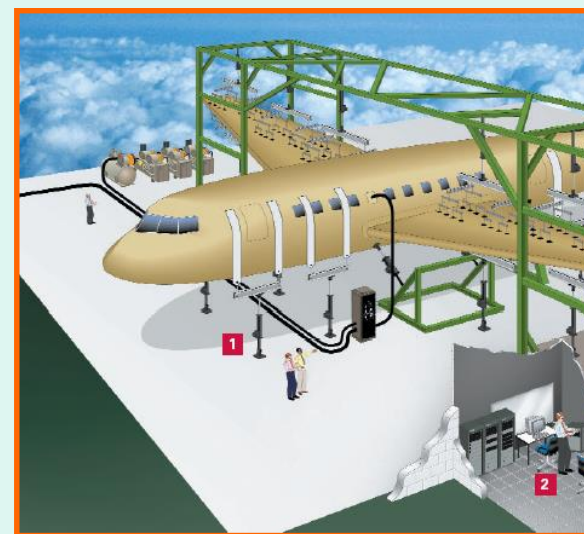


- Exemplos de Ensaios de Fadiga



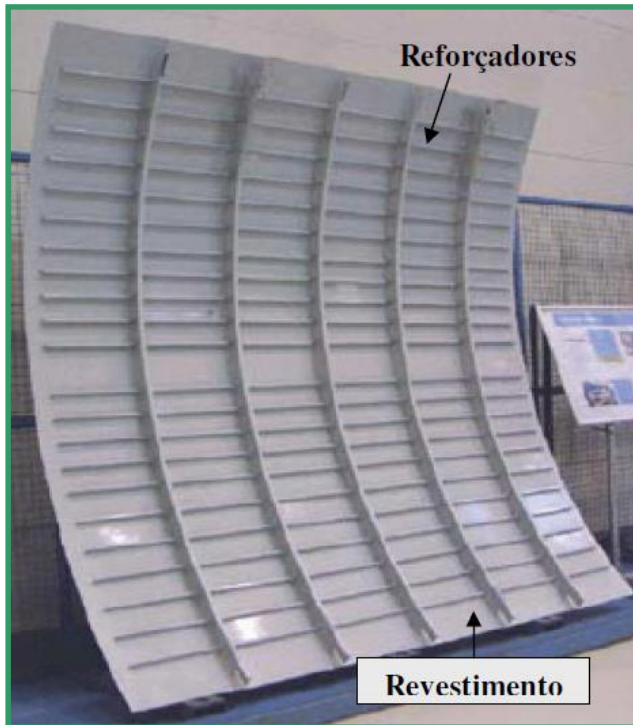
- Material

- Produto Acabado

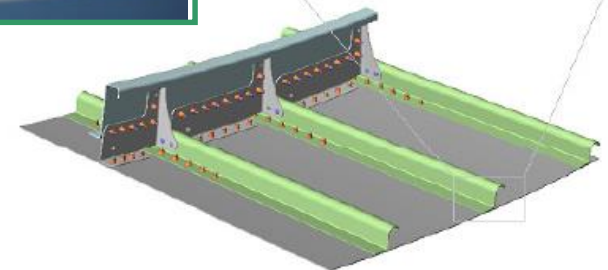
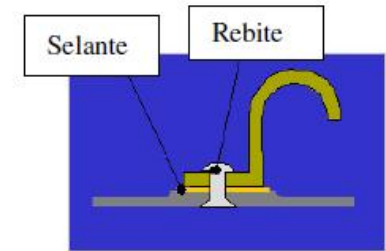


- **Exemplo de Ensaio de Fadiga**

- Soldagem a laser de reforçadores longitudinais em revestimento de avião



- Substituição do método convencional com rebites

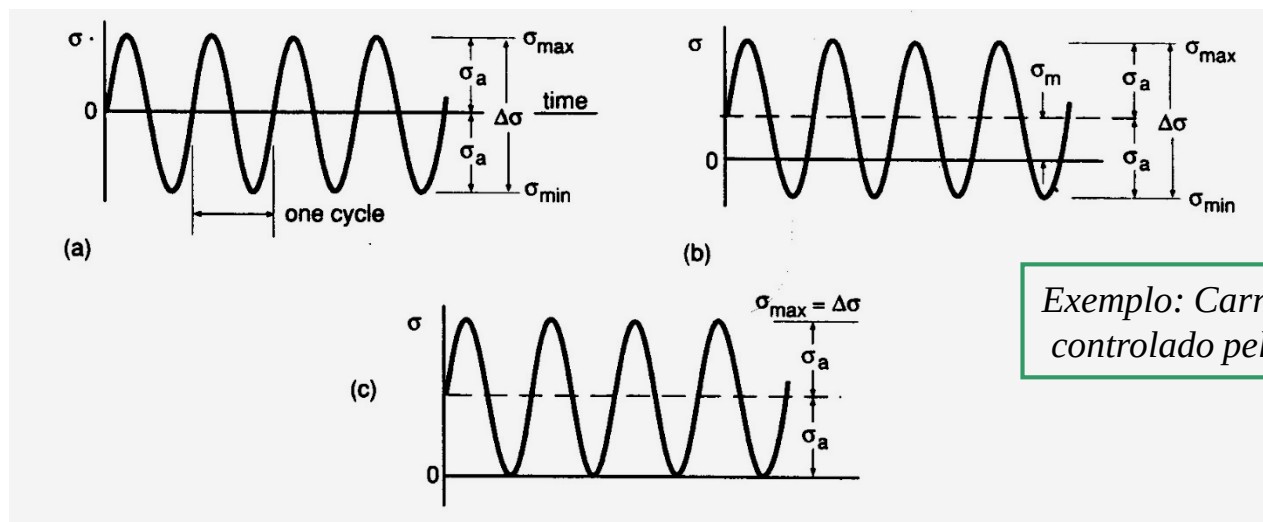


- Ensaio de corpo-de-prova para avaliar o novo processo

CARACTERIZAÇÃO DAS SOLICITAÇÕES CÍCLICAS

Definições

- Vida em fadiga de um corpo-de-prova ou estrutura
- Ciclo de carregamento



Exemplo: Carregamento cíclico estacionário controlado pela tensão, com onda senoidal.

O Carregamento Cíclico é Função de Dois Parâmetros

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

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

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

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

CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE VARIÁVEL

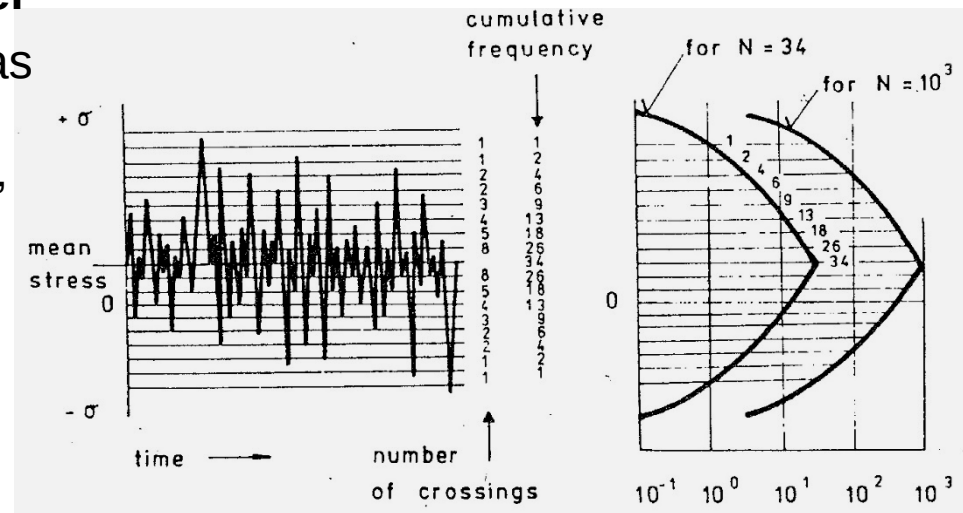
Dano em fadiga

-Modelos de dano acumulado

Carregamentos de amplitude variável

- Sobrecargas e/ou subcargas periódicas
- Blocos de carregamentos
- Espectros de carregamento “aleatório”
- Contagem de ciclos (ASTM E1049):
 - *Level Crossing*
 - *Range Counting*
 - *Rainflow Method*
- Amplitude constante “equivalente” (RMS)

Exemplo: Método “level Crossing”

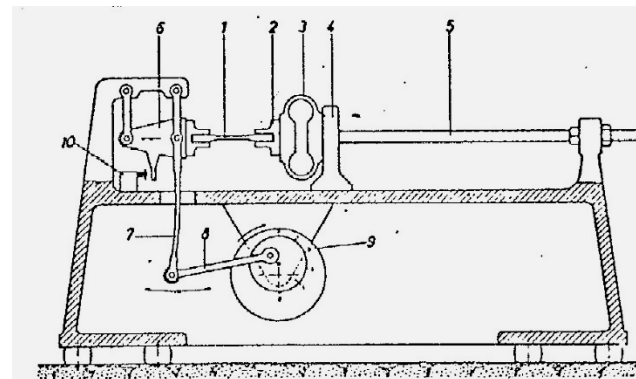
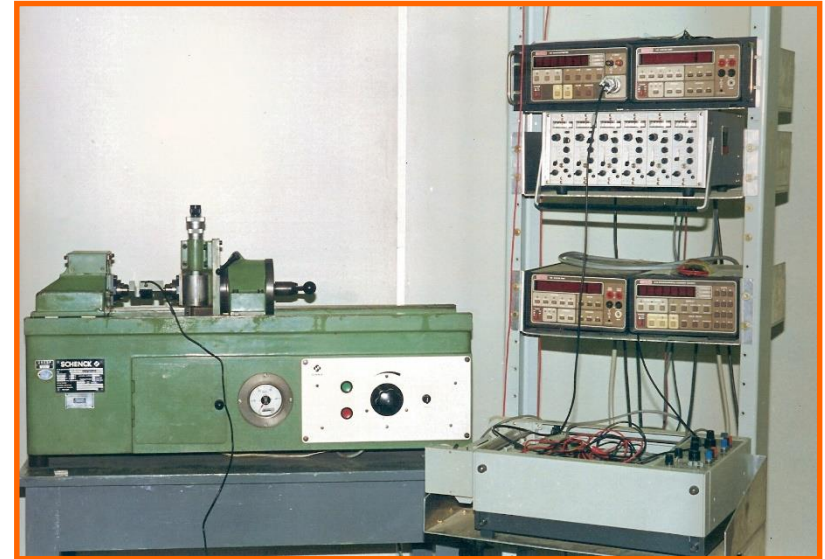


MÁQUINAS PARA ENSAIOS DE FADIGA

Máquinas Convencionais

- Ação direta (uniaxial)
- Flexão rotativa
- Flexão alternada
- Tensões combinadas (multiaxiais)

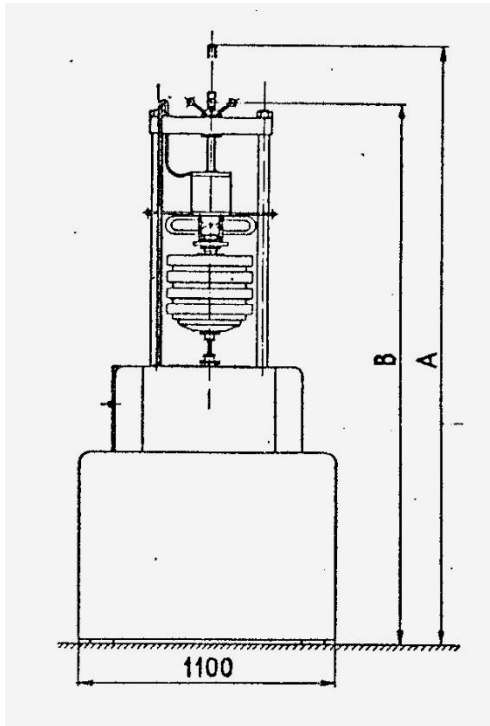
Exemplo: Máquina uniaxial eletromecânica



1. Specimen
2. Specimen grips
3. Load proving ring.
4. Fixed head assembly
5. Mean load spindle
6. Moving head assembly
7. Load lever
8. Connecting rod
9. Variable cam motor
10. Shut-down contact

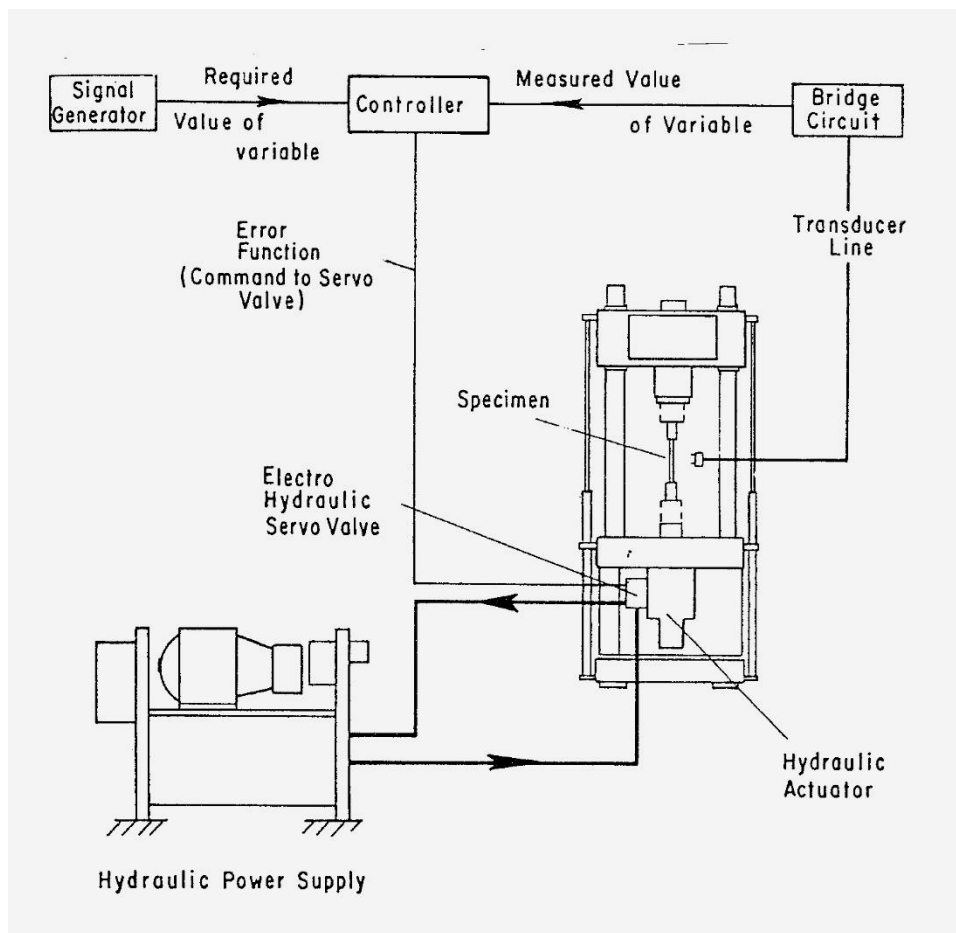
• Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

Exemplo: Vibróforo de Amsler



• Máquinas para Ensaios de Fadiga (continuação)

Exemplo: Máquinas Servo-Hidráulicas



• Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

Personal Computer

The personal computer provides the primary operator interface to the system. The TestStar software resides on the computer's hard disk.



Digital Controller

The digital controller provides the interface between the computer and the rest of the system. Plug-in modules supply machine control, sensor conditioning, and connections for external equipment.

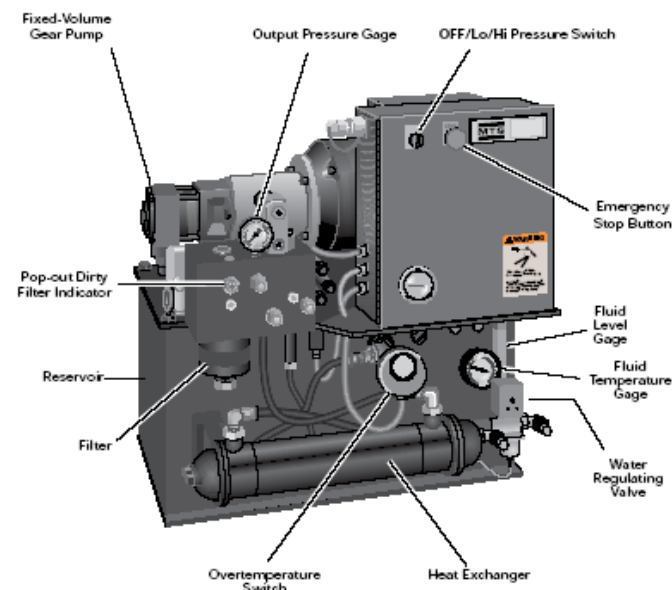
Load Unit Control Panel

The LUCP provides the operator with control of this test station's hydraulics. It is particularly useful when installing a specimen.



Load Unit

This is a typical load unit. Load units apply mechanical forces to the specimen in response to commands from the digital controller.



Hydraulic Power Supply

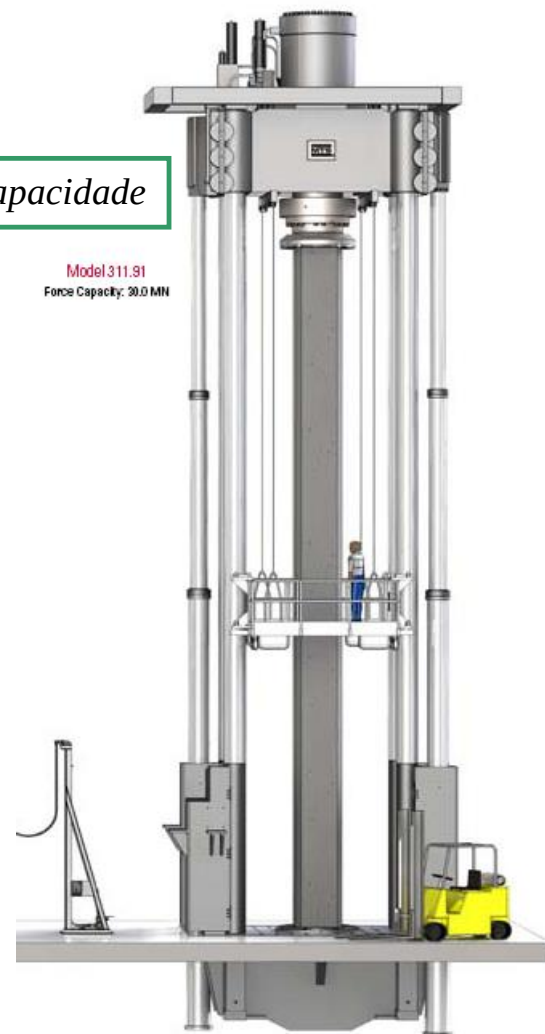
This is a typical HPS. Not all units have all the parts shown in this illustration.

• Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

Exemplo: Máquina Eletrodinâmica (polímeros, compósitos)

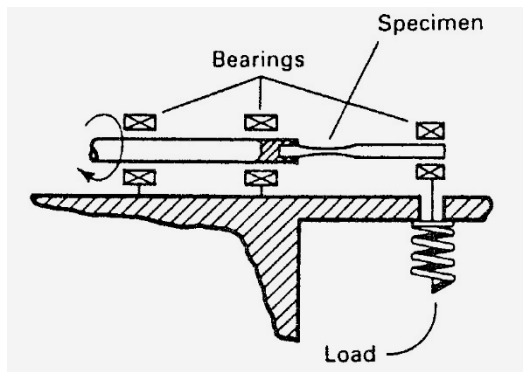


Exemplo: Máquinas de Alta Capacidade



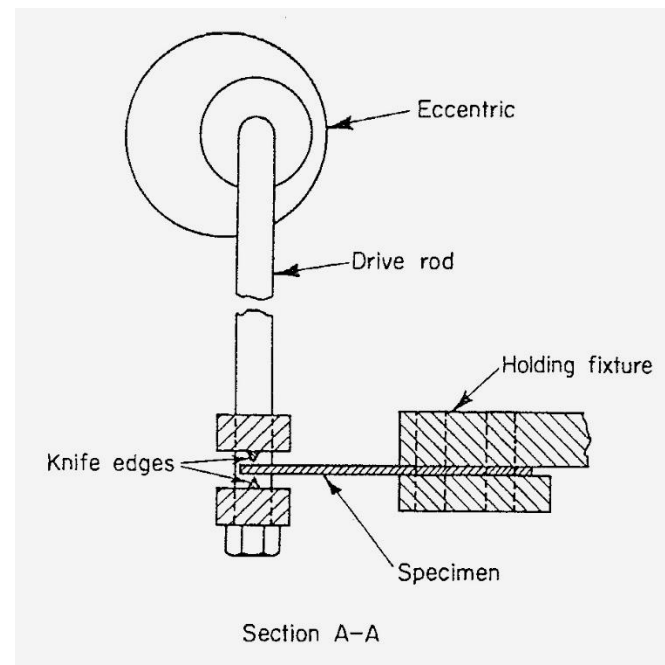
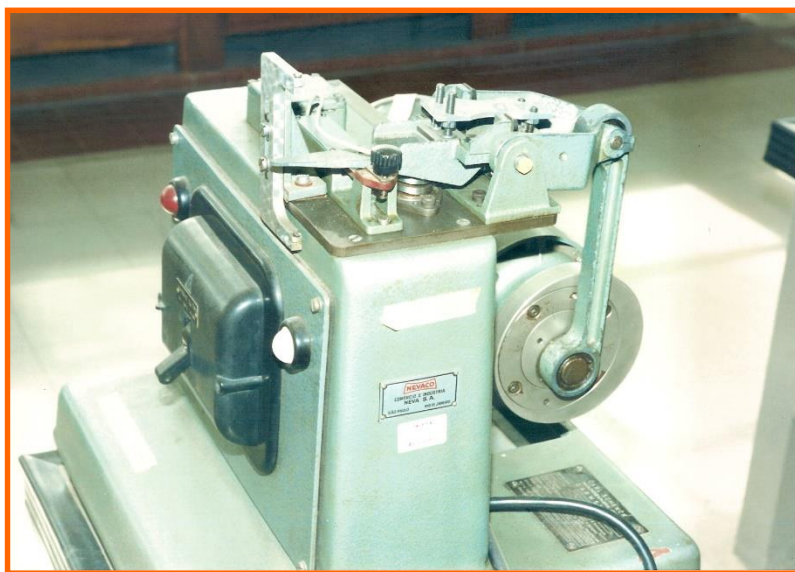
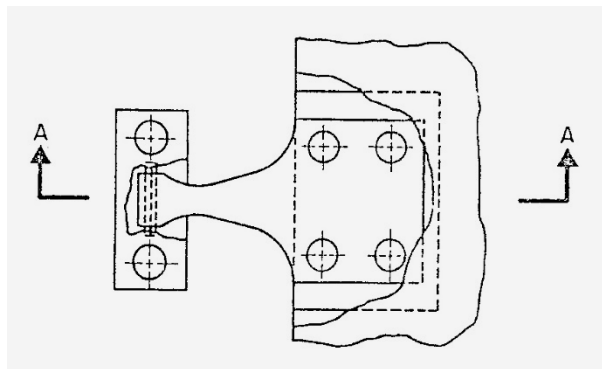
• Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

Exemplo: Máquinas de Flexão Rotativa



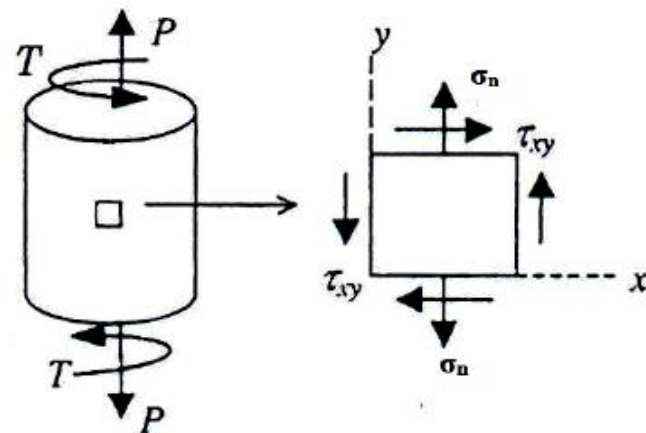
• Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

Exemplo: Máquinas de Flexão Alternada



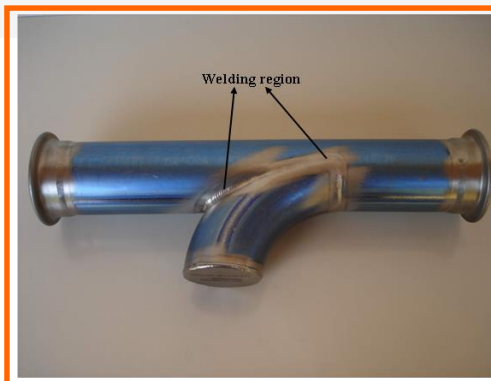
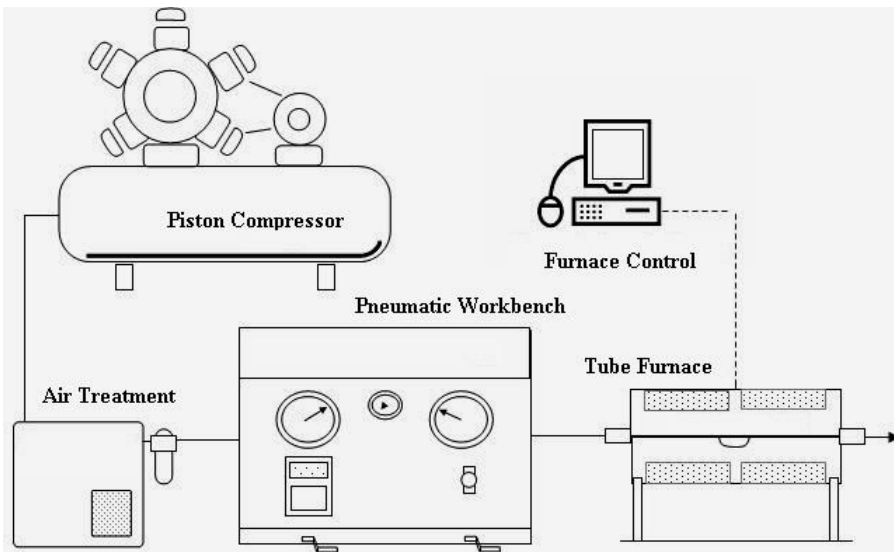
- Máquinas para Ensaios de Fadiga (continuação)

Exemplo: Máquina para Ensaios Multiaxiais (axial-torcional)



• Máquinas para Ensaios de Fadiga (continuação)

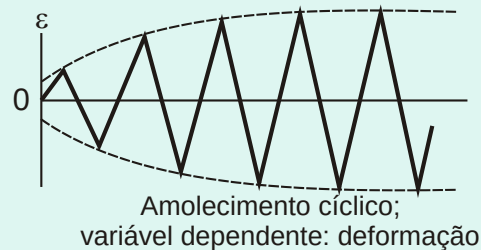
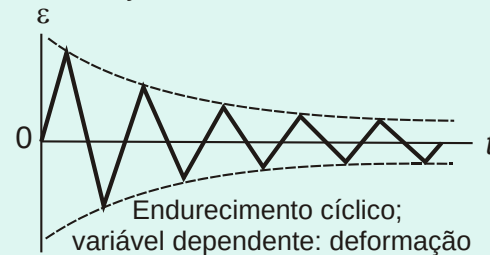
Exemplo: Bancada Pneumática para Ensaios de Pressurização em altas Temperaturas



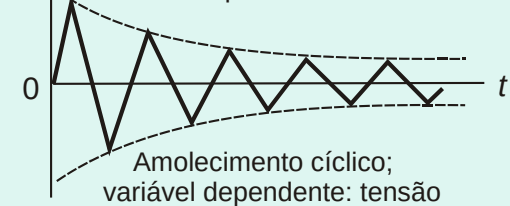
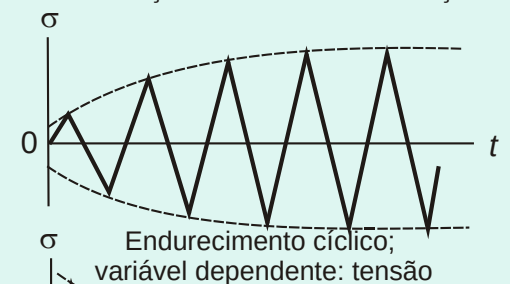
CARREGAMENTO CÍCLICO E COMPORTAMENTO MECÂNICO

Estágio Inicial da Fadiga

- Mudanças nas propriedades dos materiais
- Endurecimento e/ou amolecimento cíclico
- Evolução da estrutura de defeitos



(a)

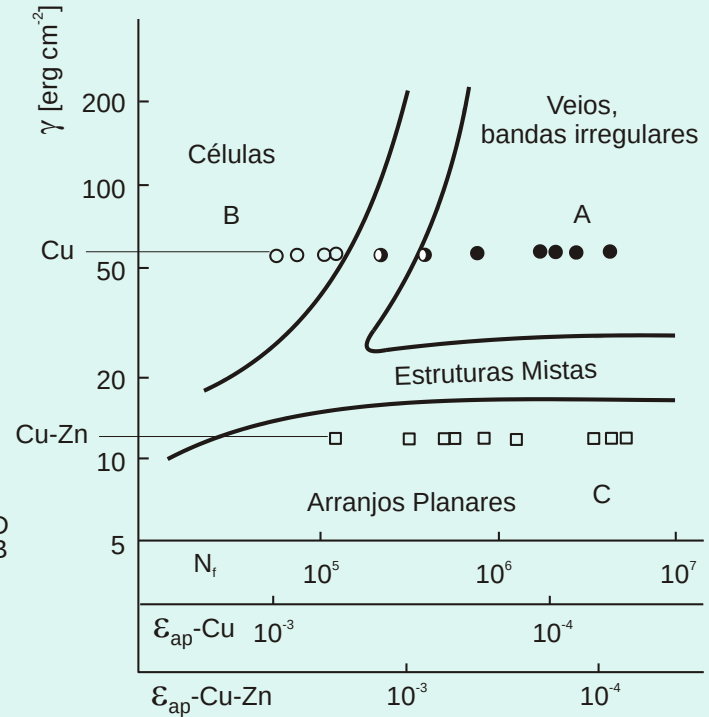
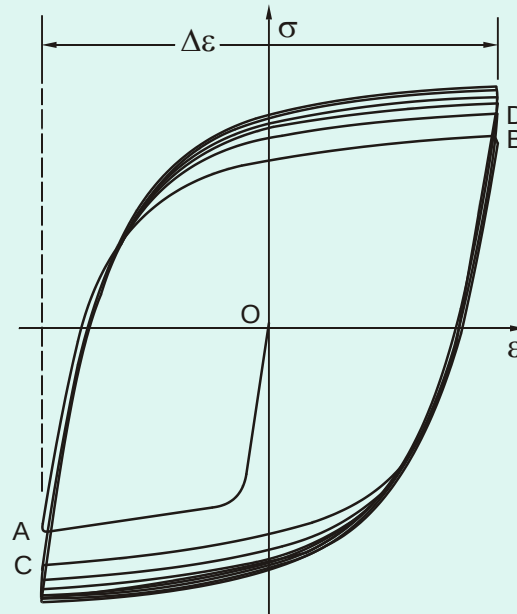


(b)

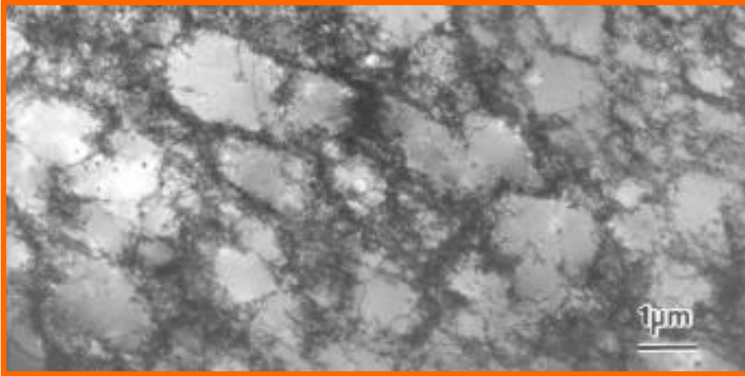
CARREGAMENTO CÍCLICO E COMPORTAMENTO MECÂNICO

Deformação Plástica Cíclica

- Laços de histerese
- Estrutura de discordâncias
 - Escorregamento com desvio
 - Energia de falha de empilhamento
- Efeito de precipitados



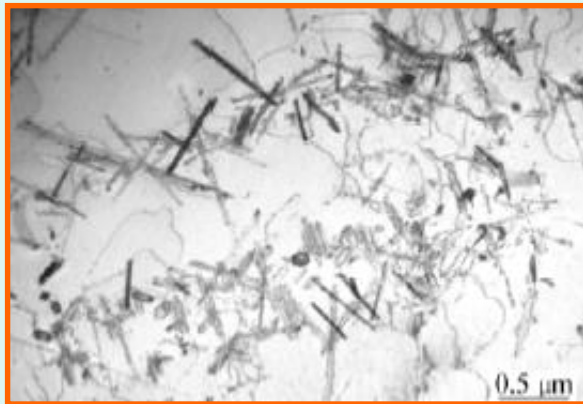
CARREGAMENTO CÍCLICO E COMPORTAMENTO MECÂNICO



Estrutura de discordâncias em cobre policristalino após 15.000 ciclos de carregamento em $R = 0,5$.



Grão ferrítico em aço bifásico após 8% da vida esperada em fadiga

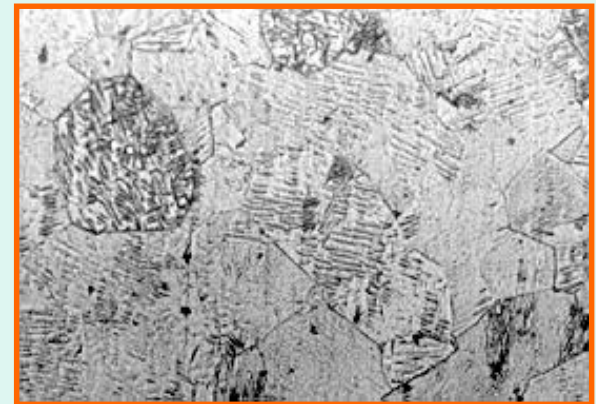


Interação entre precipitados Mg_2Si e discordâncias em fadiga em liga Al-Si-Mg sob amplitude de tensão de 115 MPa.

INICIAÇÃO DA TRINCA

Fadiga: processo sensível à superfície

- Acabamento e/ou tratamento de superfície
- Fatores Macroscópicos
 - Entalhes, furos, ...
 - Momentos de desalinhamento
- Fatores Microscópicos
 - Topografia de superfície
 - Partículas de segunda fase
 - Degraus devidos à deformação
- Casos em que não ocorre na superfície
 - Materiais não homogêneos
 - Fadiga por contato
 - Defeitos internos pré-existent

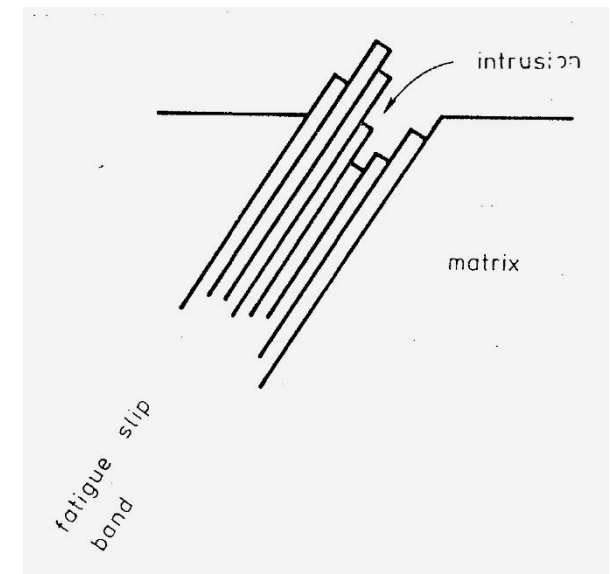
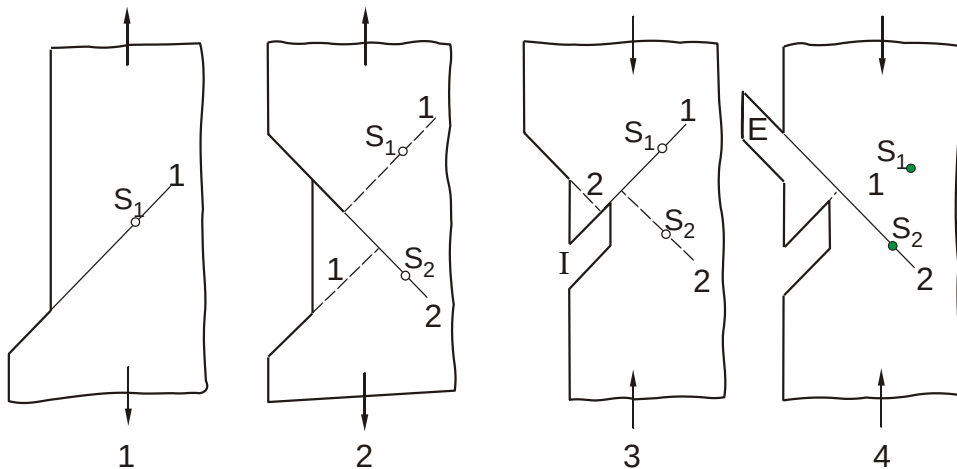
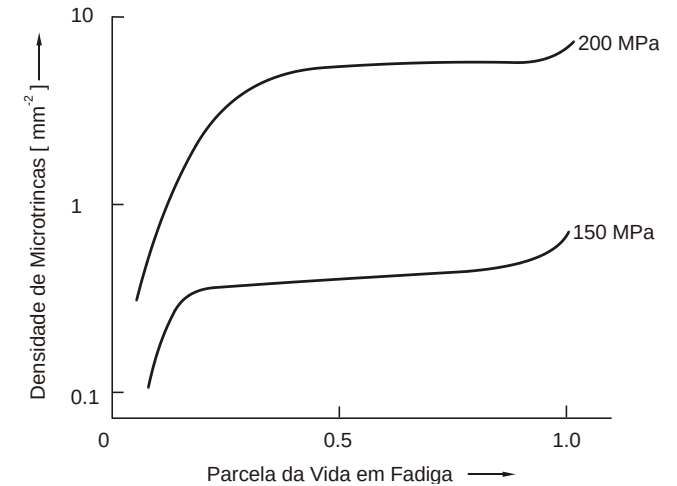


Formação de bandas de deslizamento em titânio após carregamento cíclico

INICIAÇÃO DA TRINCA

Mecanismos de nucleação de trincas

- Modelos especulativos
- Intrusões-extrusões
- Diferença entre intrusão e microtrinca?



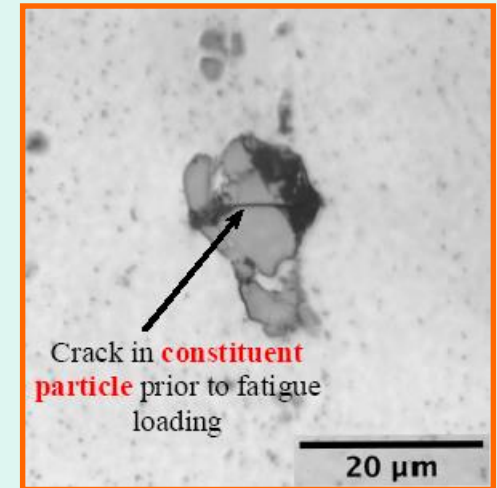
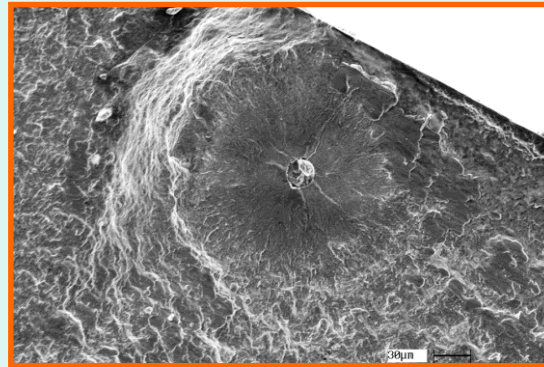
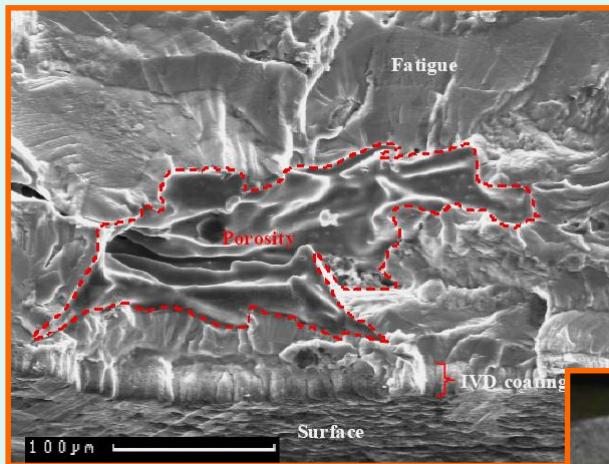
INICIAÇÃO DA TRINCA

Trincas iniciando a partir de descontinuidades

- Diferença entre componentes e testes de laboratório

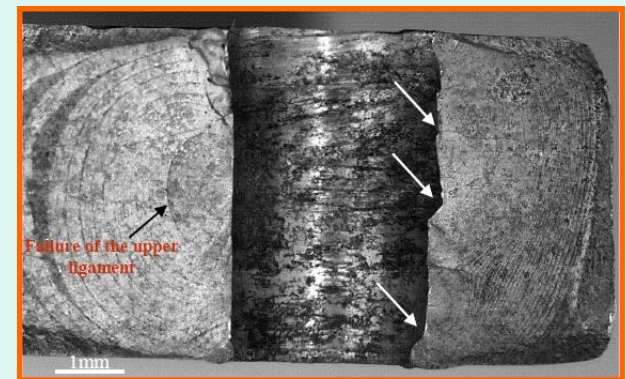
Inclusão sub-superficial

Trinca iniciando em poro



Partícula fraturada

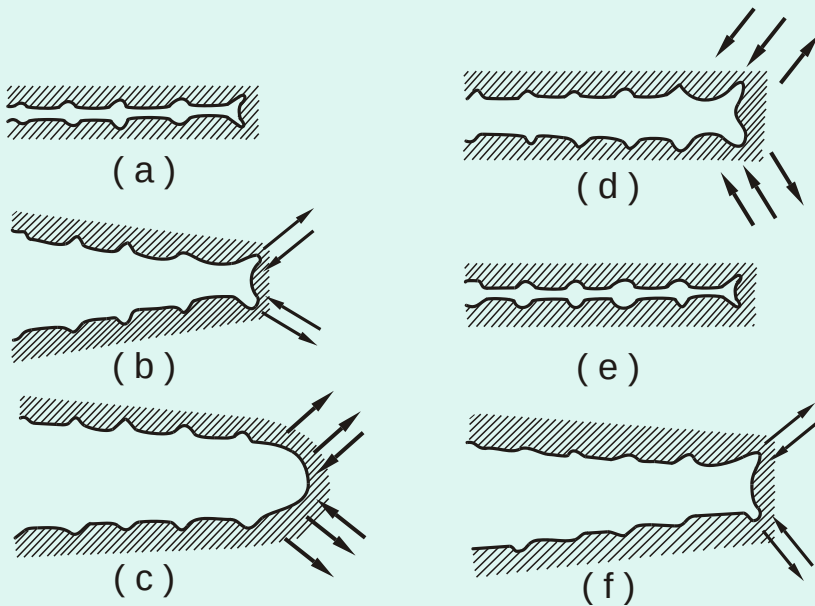
Furo mal-executado



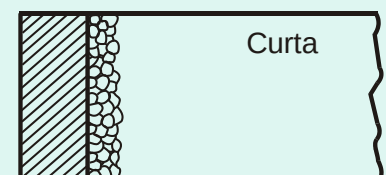
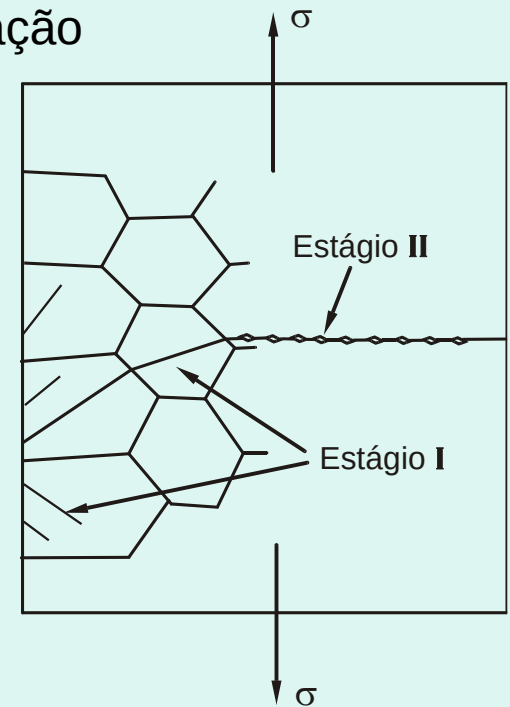
PROPAGAÇÃO DA TRINCA

Estágios da propagação

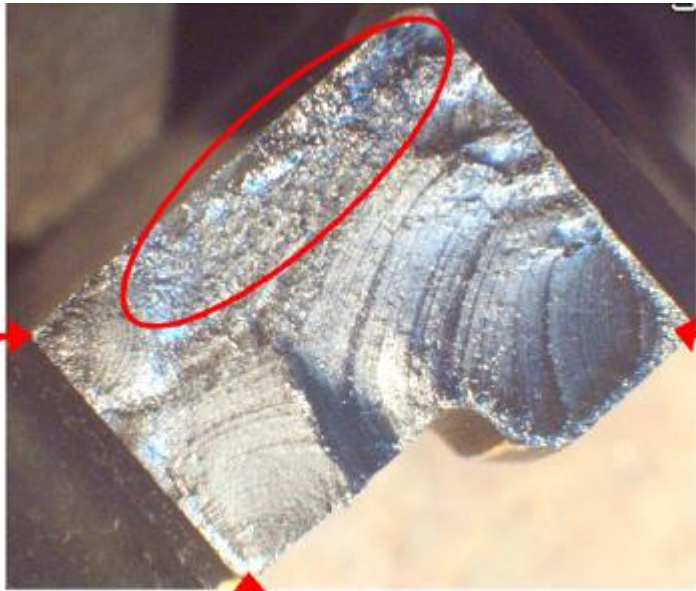
- Inicialmente na direção dos planos de escorregamento
- Segundo estágio: perpendicular à máxima tensão de tração



Modelo de C. Laird para propagação da trinca

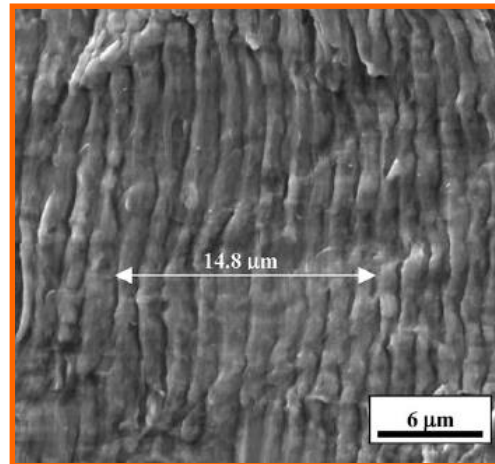
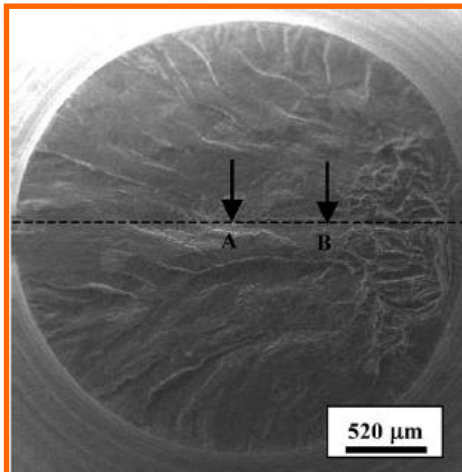
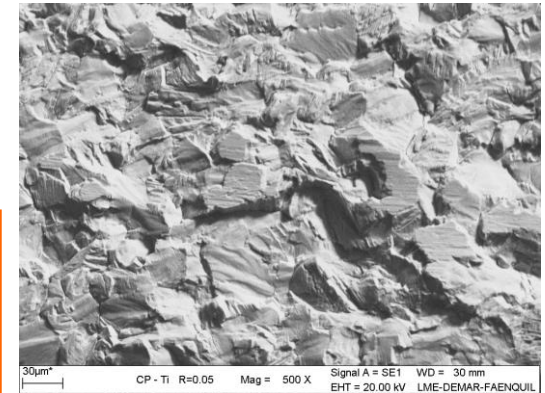
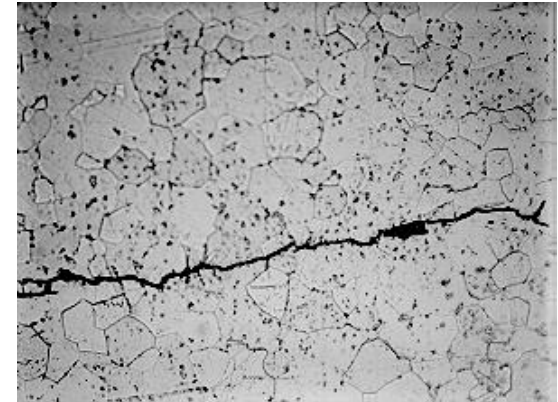


PROPAGAÇÃO DA TRINCA



Caminho da trinca

Marcas de praia em fratura por fadiga



RESUMO DOS MODELOS DE VIDA EM FADIGA

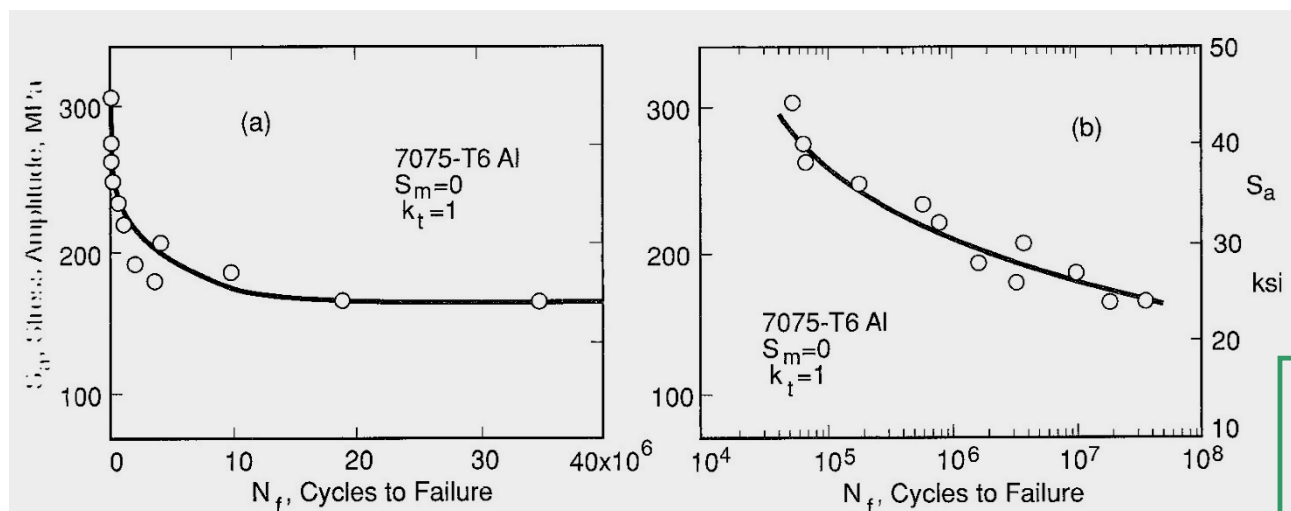
Modelo tensão nominal versus vida (S-N)

- Tensões governam a falha quando a deformação plástica devida ao carregamento cíclico é pequena.
- Ensaios usualmente empregam carregamento totalmente reverso
- Relaciona-se um parâmetro da tensão com a vida em fadiga
- Na representação gráfica usa-se escala log-linear ou log-log.

$$\begin{cases} \sigma_m = 0 \\ R = -1 \end{cases}$$

$$\{\sigma_a \text{ ou } \sigma_{m\acute{a}x}\}$$

$$\{N_f \text{ ou } 2N_f\}$$

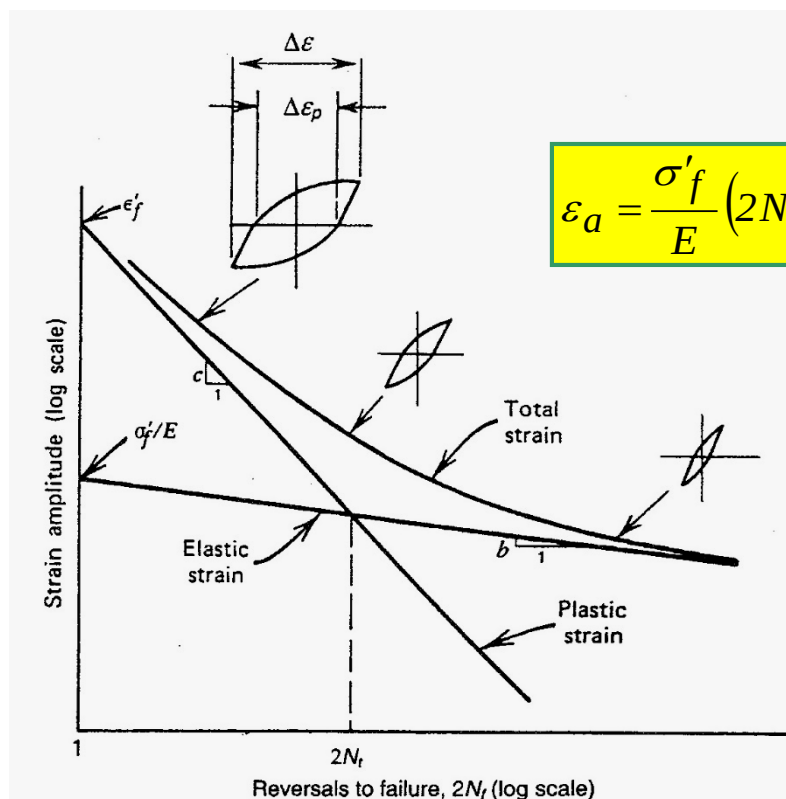


Note que, na escala linear, os valores de N_f não são lidos com precisão.

RESUMO DOS MODELOS DE VIDA EM FADIGA

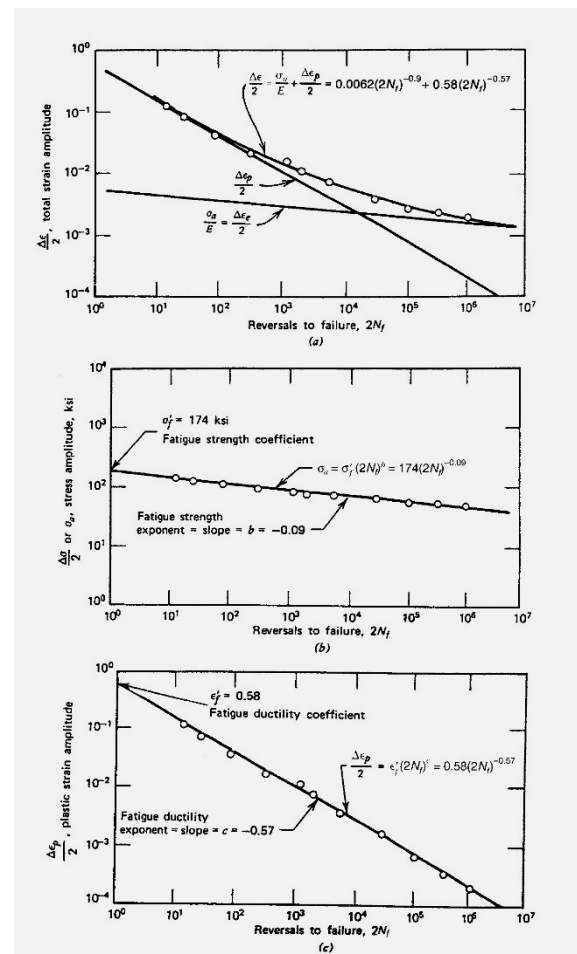
Modelo deformação local *versus* vida (ϵ - N)

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



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

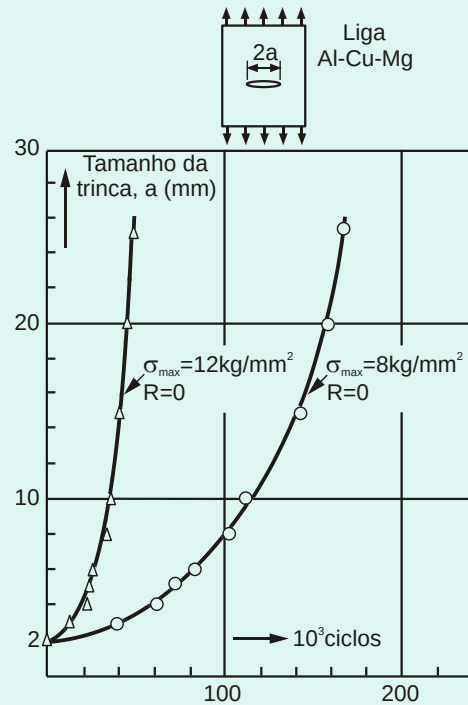
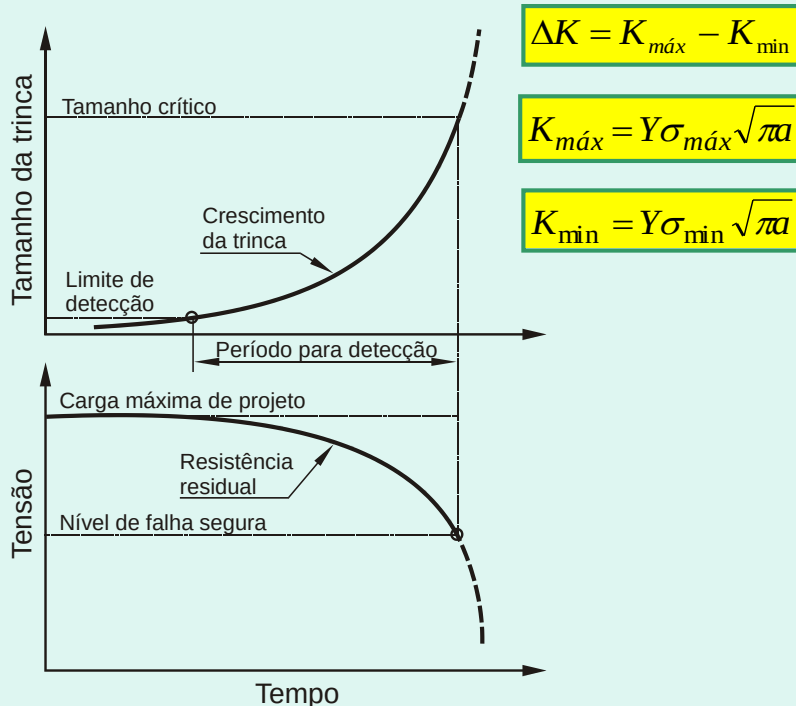
$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$$



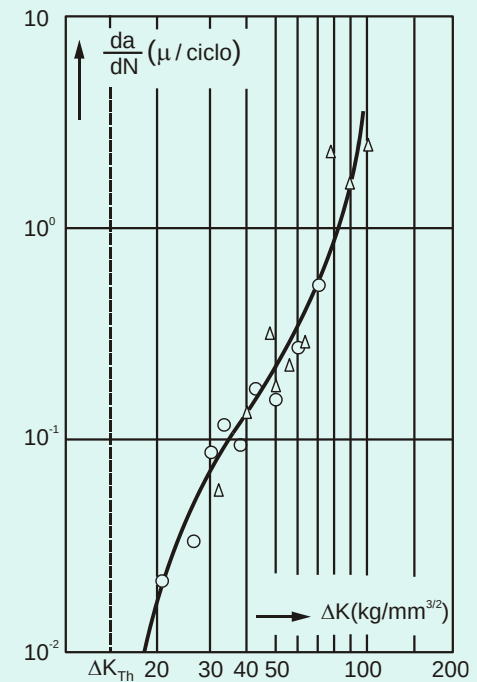
RESUMO DOS MODELOS DE VIDA EM FADIGA

Propagação de trinca por fadiga

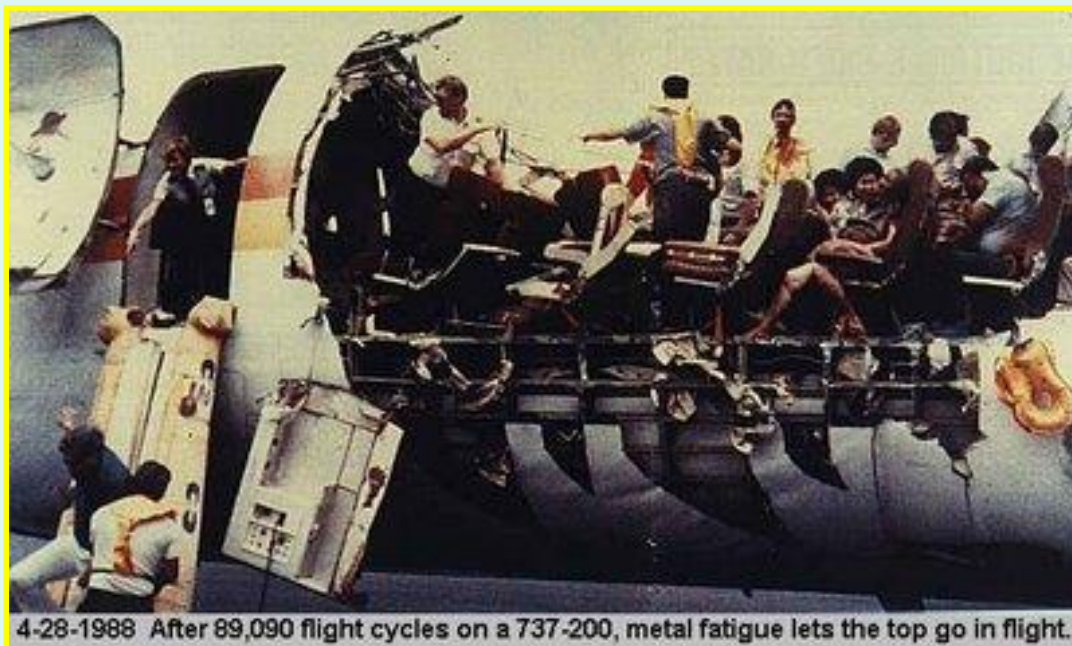
- Previsão da vida restante de peças contendo trincas.
- Inspeção não-destrutiva.
- Conhecer a velocidade de crescimento da trinca.
- Relação entre da/dN e ΔK sob amplitude constante.



(a)



(b)



4-28-1988 After 89,090 flight cycles on a 737-200, metal fatigue lets the top go in flight.