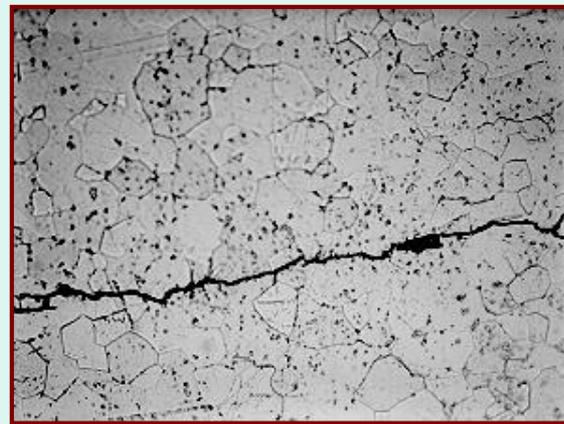
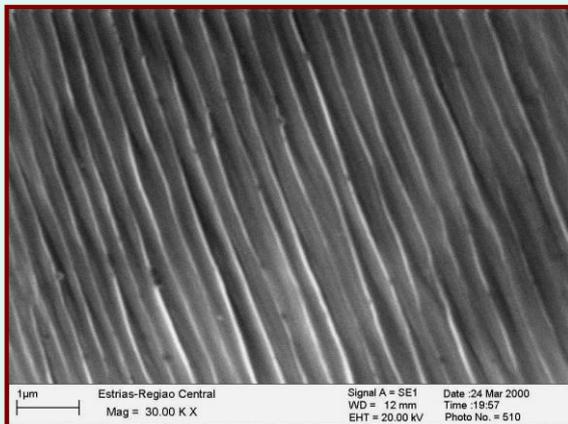
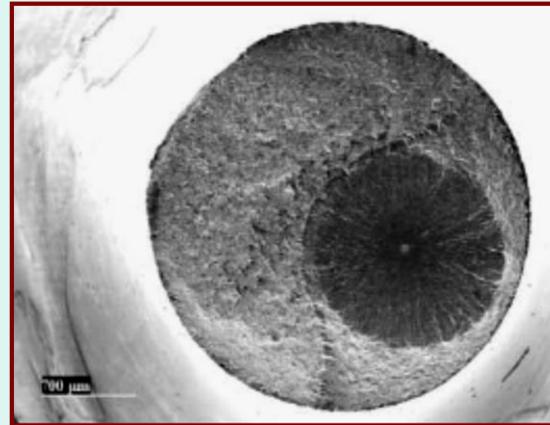
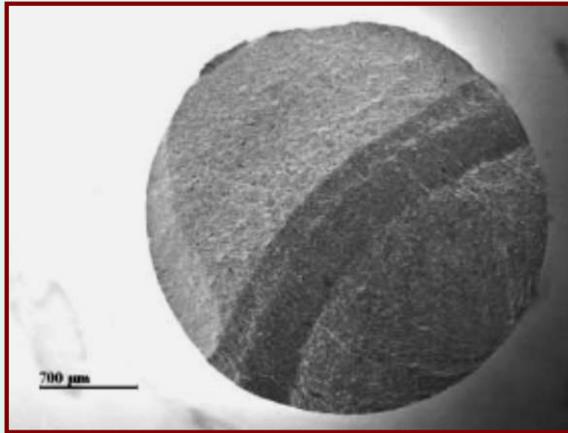


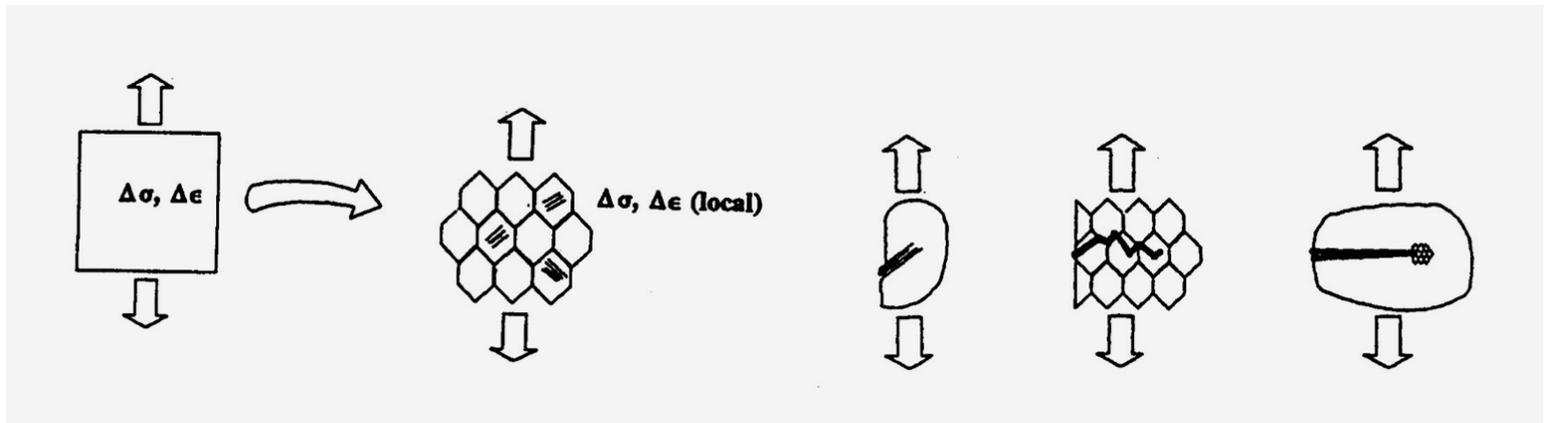
## 8 – ENSAIOS DE FADIGA



# 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.*





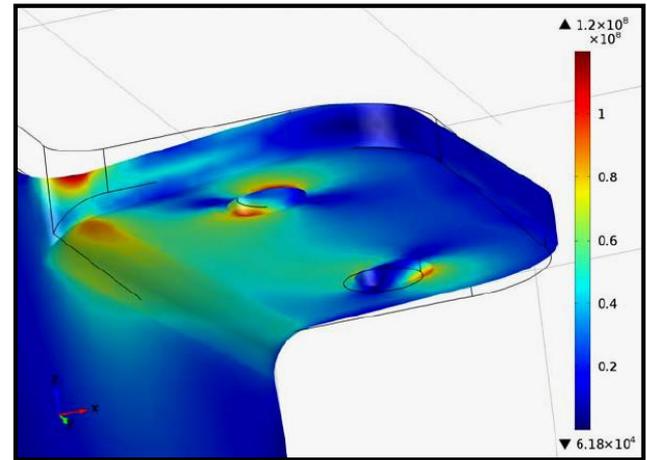
# MÉTODOS DE PROJETO EM FADIGA

## Modelos de vida em fadiga

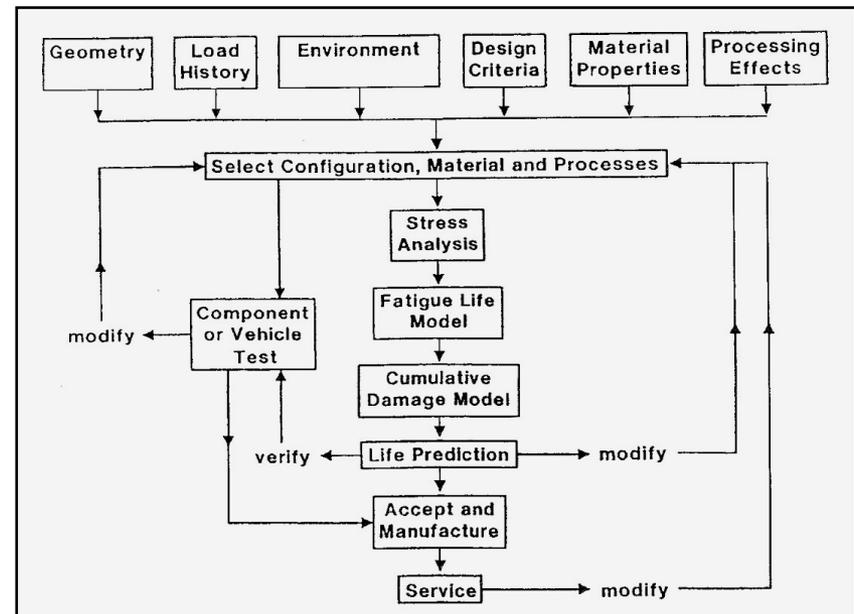
- Tensão-vida (S/N), formulado no séc. XIX
- Deformação local-vida ( $\epsilon/N$ ), anos 1960s
- Propagação de trincas por fadiga, anos 1960s
- Modelo de dois estágios (iniciação-propagação)

## Critérios de projeto em fadiga

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



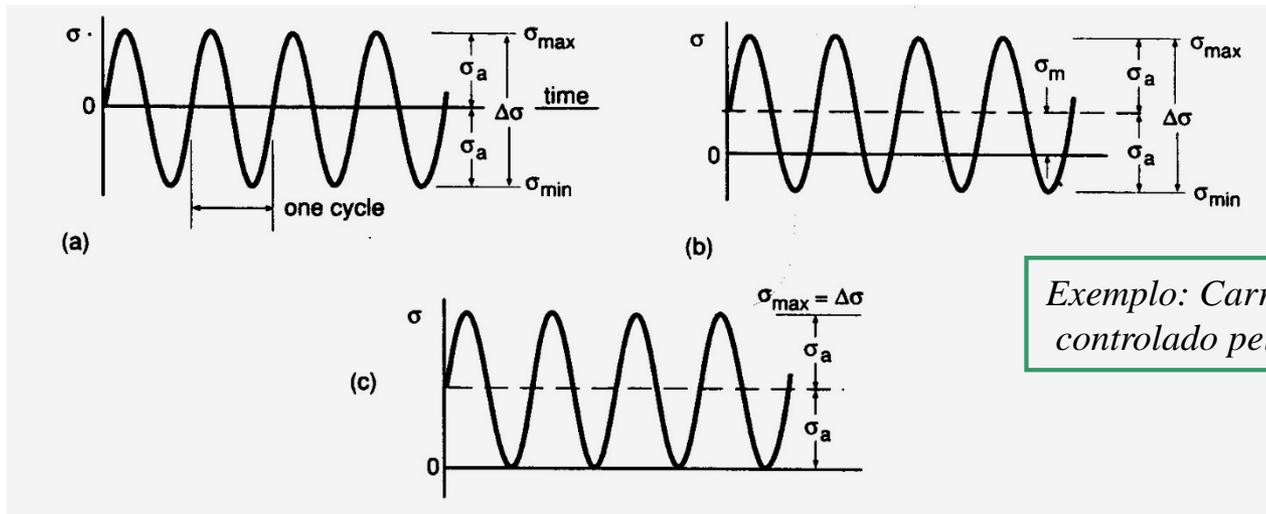
Exemplo: diagrama de blocos de projeto em fadiga (SAE)



# 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

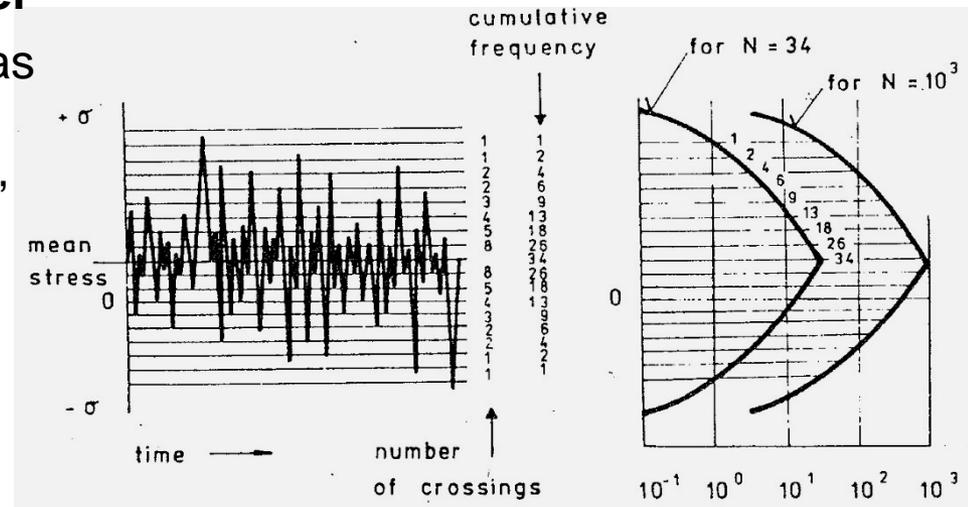
## Dano em fadiga

-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”



# ENSAIOS DE FADIGA

## Objetivos

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

## Principais Normas ASTM (para materiais metálicos)

- E466 : Ensaio axiais sob controle de força.
- E606 : Ensaio controlados pela deformação.
- E739 : Análise estatística de dados de fadiga.
- E647 : Medida da taxa de propagação da trinca.
- E1049 : Contagem de ciclos em fadiga.
- E2789 : Ensaio de fadiga por fretting (ano: 2010).

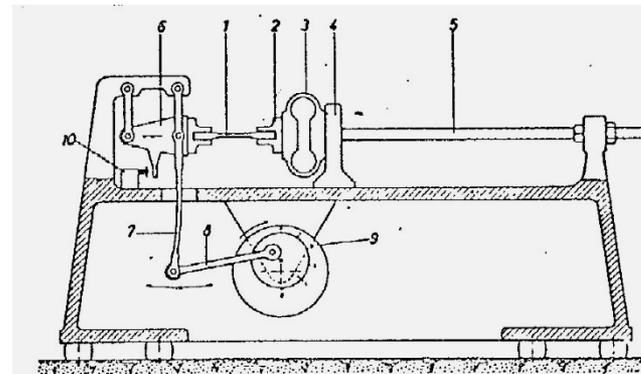
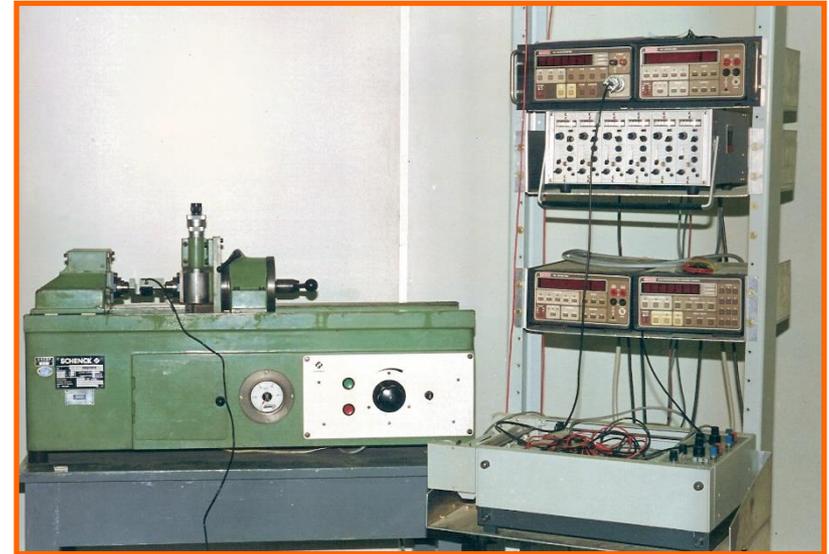


# MÁQUINAS PARA ENSAIOS DE FADIGA

## Máquinas Convencionais

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

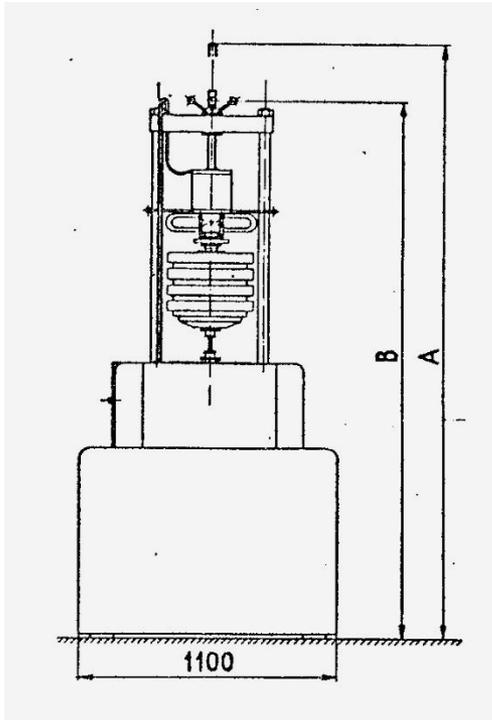
*Exemplo: Máquina uniaxial eletromecânica*



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

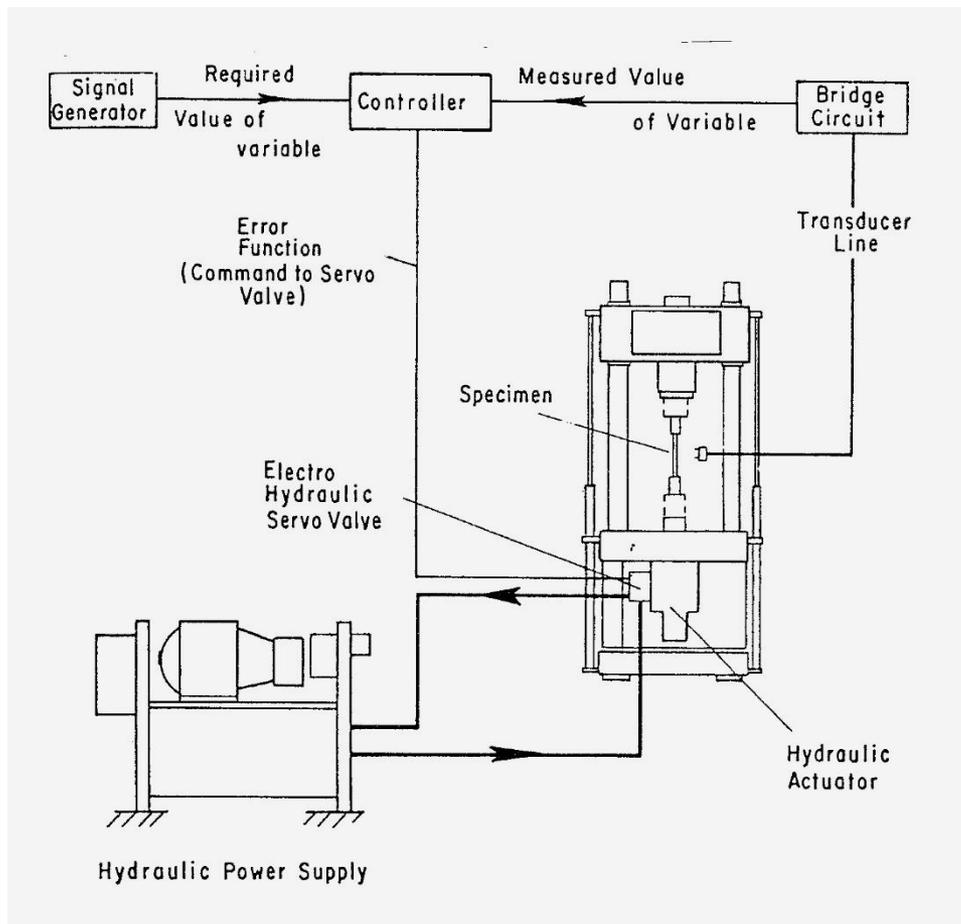
## • Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

*Exemplo: Vibróforo de Amsler*



## • Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

*Exemplo: Máquinas Servo-Hidráulicas*

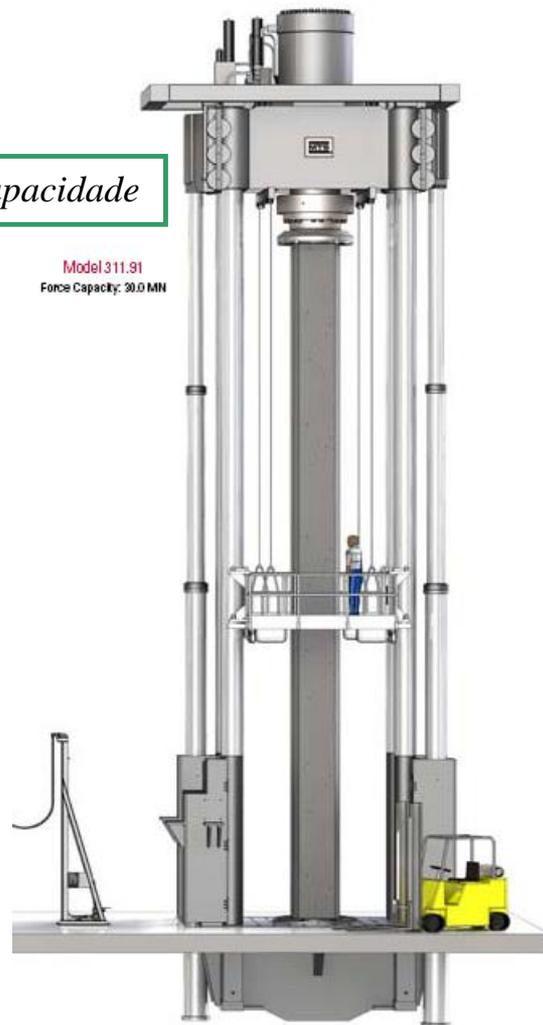


## • Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

*Exemplo: Máquina Eletrodinâmica (polímeros, compósitos)*

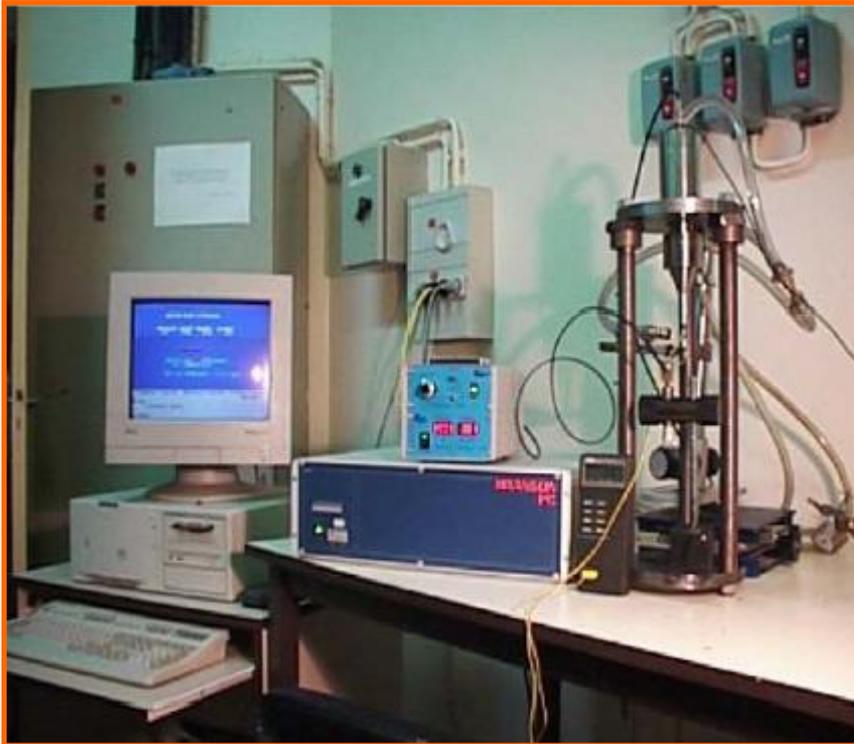


*Exemplo: Máquinas de Alta Capacidade*



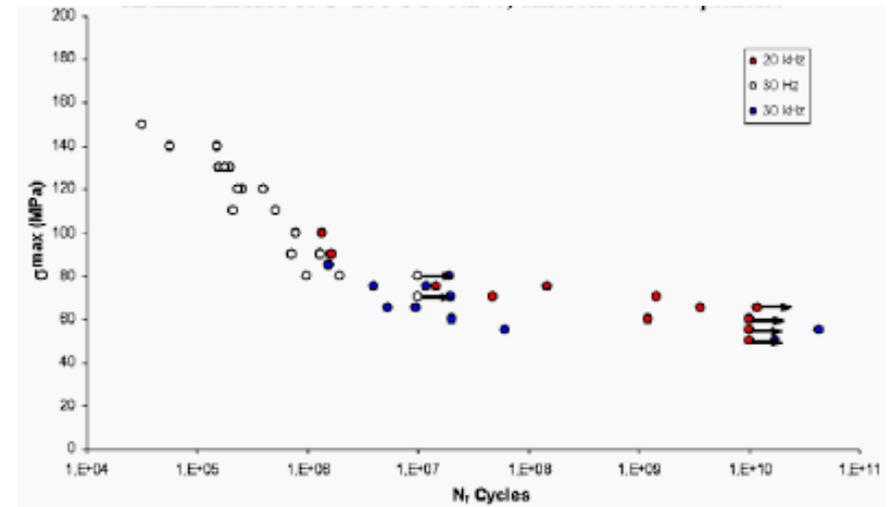
## • Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

*Exemplo: Máquina Piezoelétrica para Ensaio de VHCF (Very High Cycle Fatigue)*



### Concepção do sistema de ensaios:

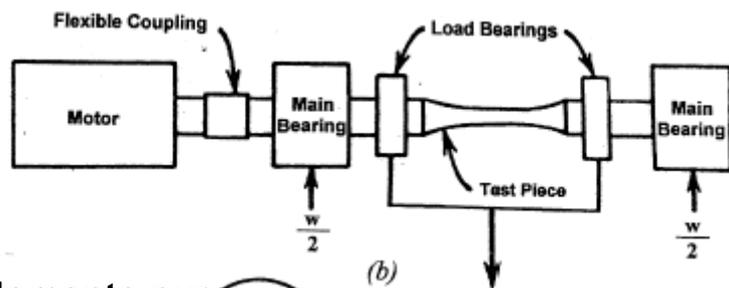
- Gerador de alta frequência
- Transdutor piezoelétrico
- Unidade de controle



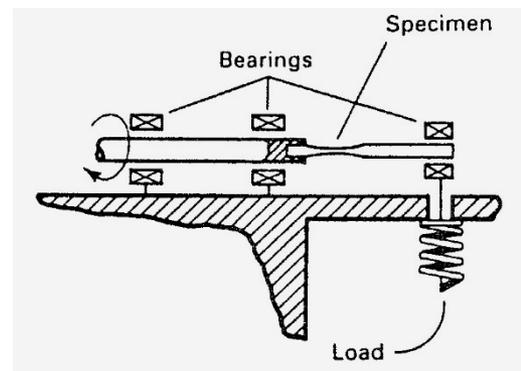
*Dispositivo desenvolvido por Claude Bathias (década de 1990)*

## • Máquinas para Ensaios de Fadiga (continuação)

*Exemplos: Máquinas de Flexão Rotativa*



Momento puro

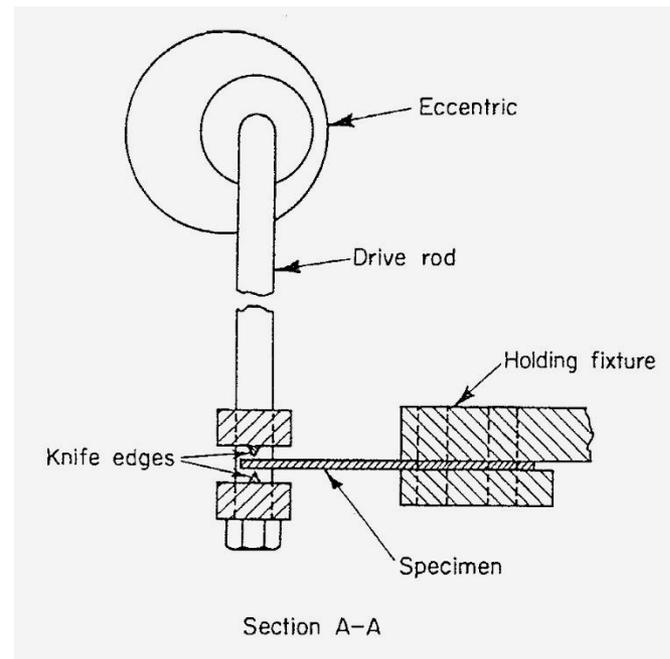
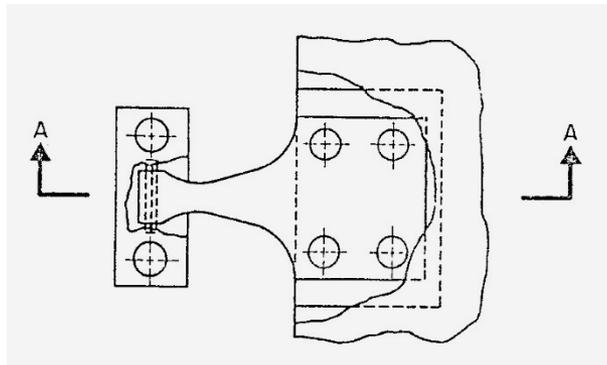


Viga em balanço



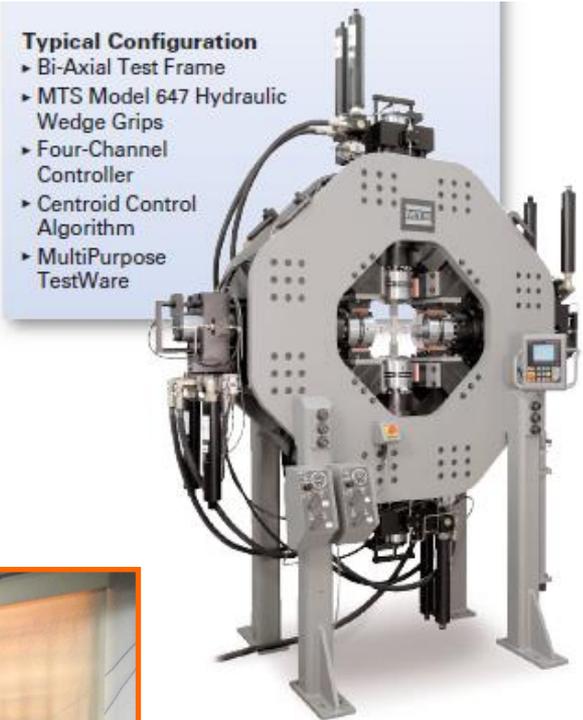
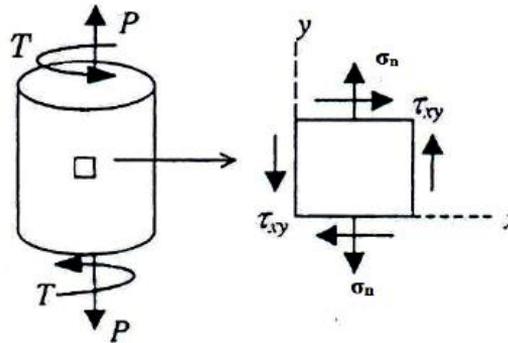
## • Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

*Exemplo: Máquinas de Flexão Alternada*

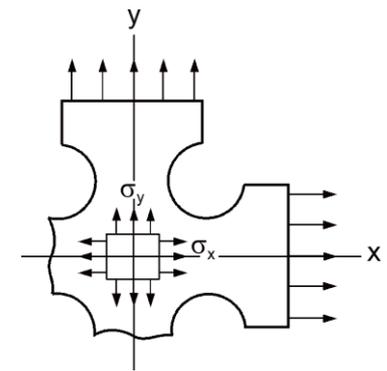


# Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

## Máquinas para Ensaio Multiaxiais

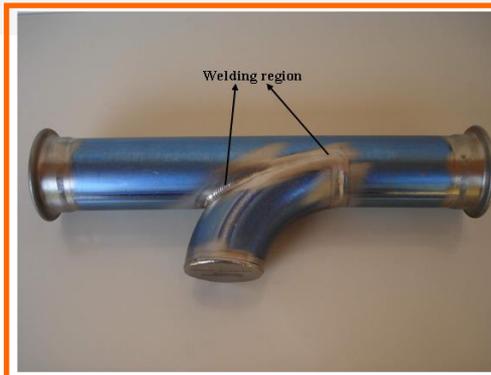
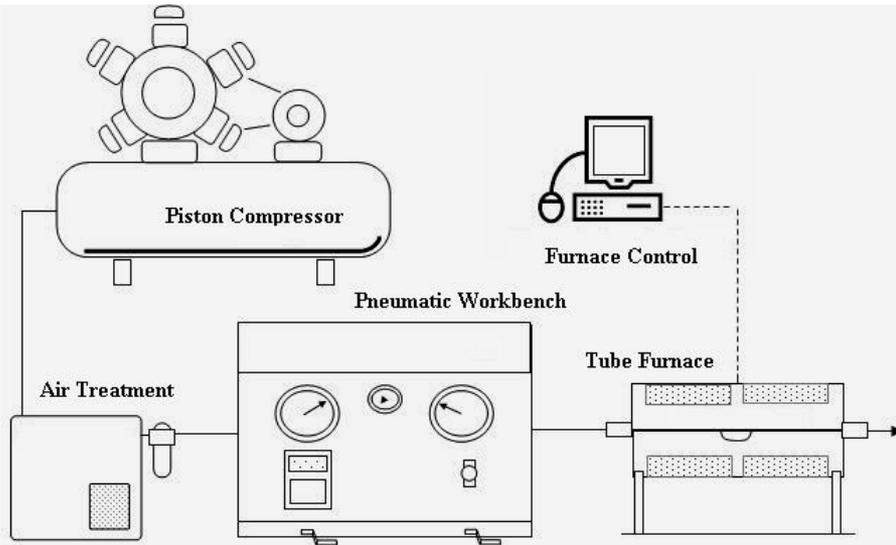


- Typical Configuration
- ▶ Bi-Axial Test Frame
- ▶ MTS Model 647 Hydraulic Wedge Grips
- ▶ Four-Channel Controller
- ▶ Centroid Control Algorithm
- ▶ MultiPurpose TestWare



## • Máquinas para Ensaio de Fadiga (continuação)

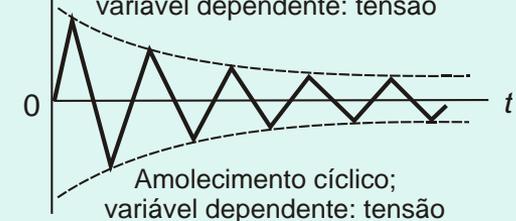
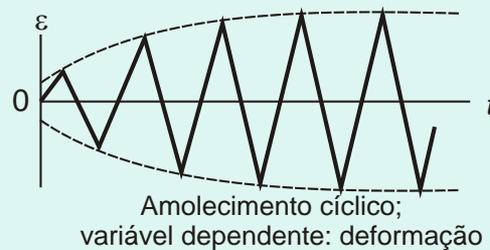
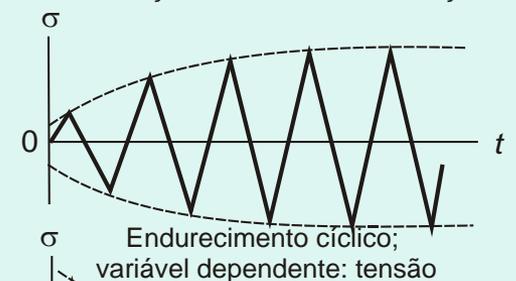
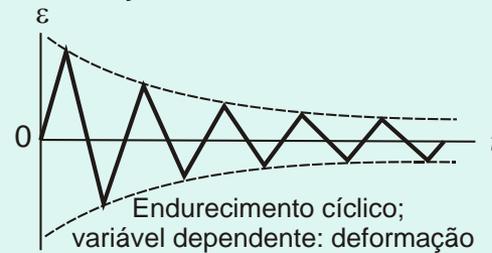
*Exemplo: Bancada Pneumática para Ensaio de Pressurização em altas Temperaturas*



# CARREGAMENTO CÍCLICO E COMPORTAMENTO MECÂNICO

## Estágio Inicial da Fadiga

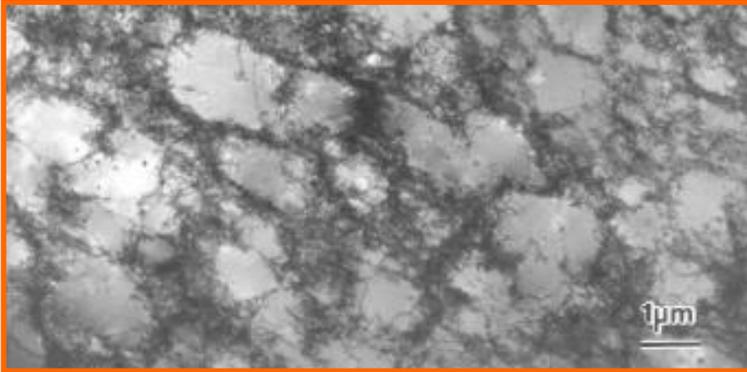
- Mudanças nas propriedades dos materiais
- Endurecimento e/ou amolecimento cíclico
- Evolução da estrutura de defeitos



( a )

( b )

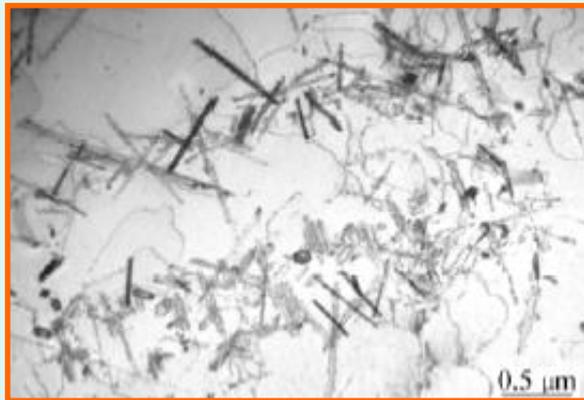
# CARREGAMENTO CÍCLICO E COMPORTAMENTO MECÂNICO



*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*

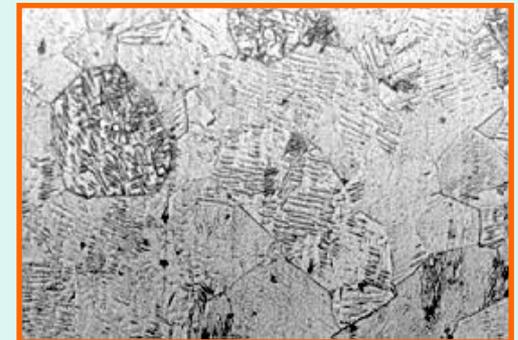


*Interação entre precipitados  $Mg_2Si$  e discordâncias em fadiga em liga Al-Si-Mg sob amplitude de tensão de 115 MPa.*

# 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-existentes



*Formação de bandas de deslizamento em titânio após carregamento cíclico*

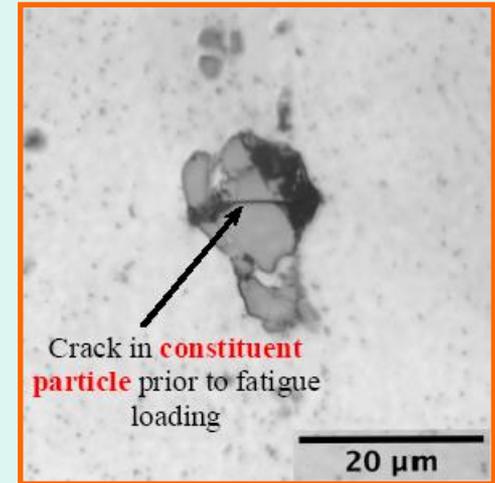
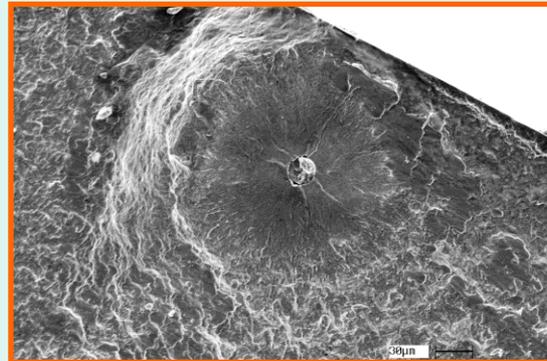
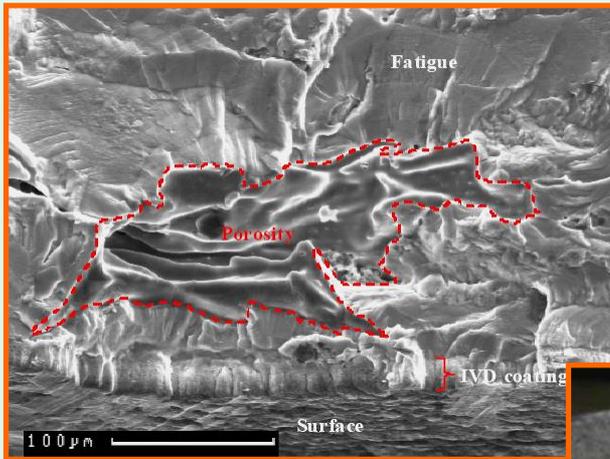
# INICIAÇÃO DA TRINCA

## Trincas iniciando a partir de descontinuidades

- Diferença entre componentes e testes de laboratório

*Inclusão sub-superficial*

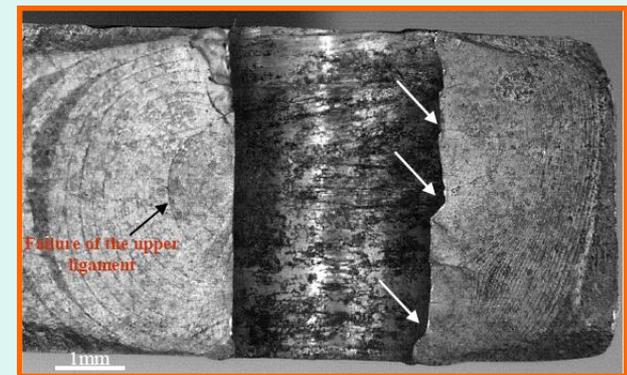
*Trinca iniciando em poro*



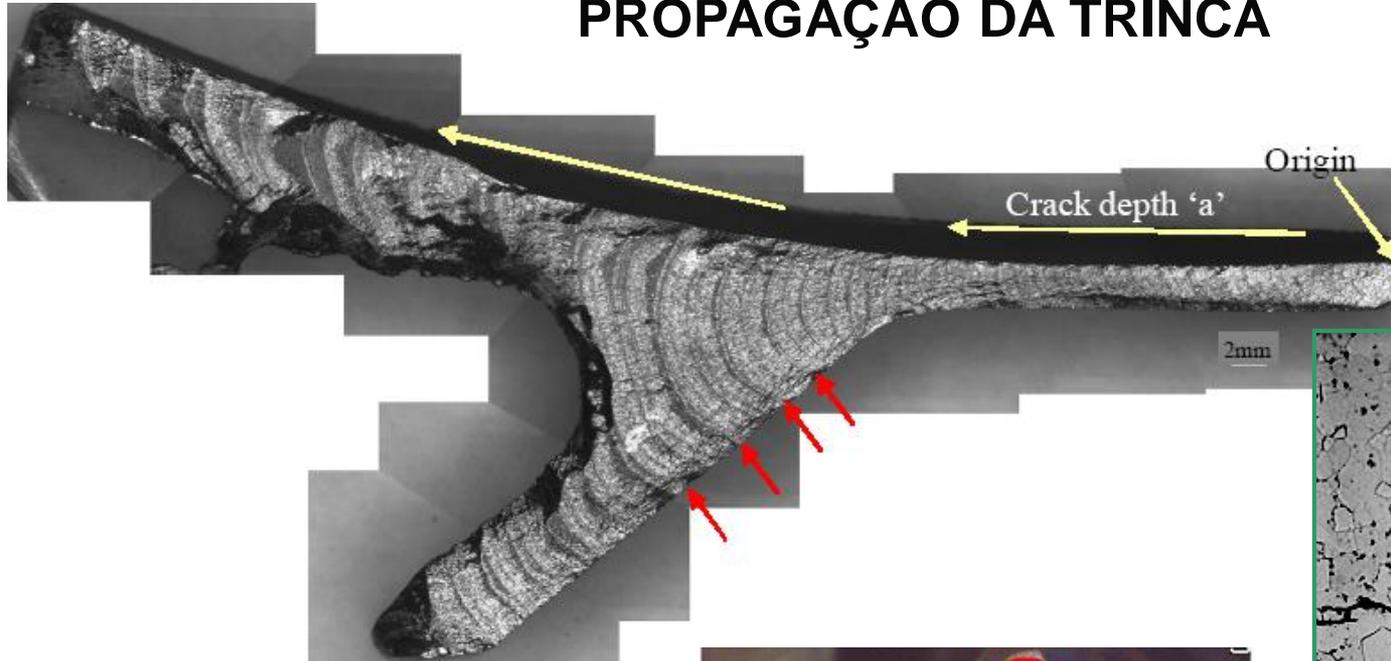
*Partícula fraturada*

*Furo mal-executado*

*Defeitos em cordão de solda*



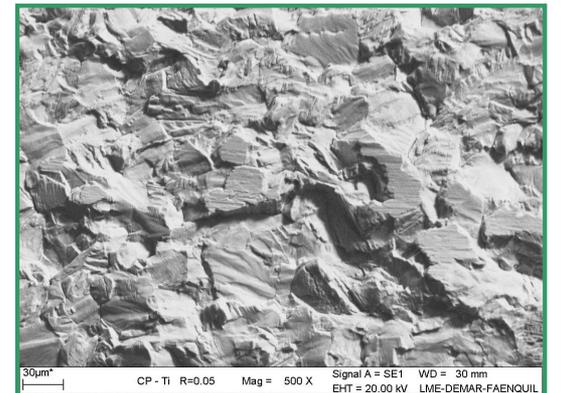
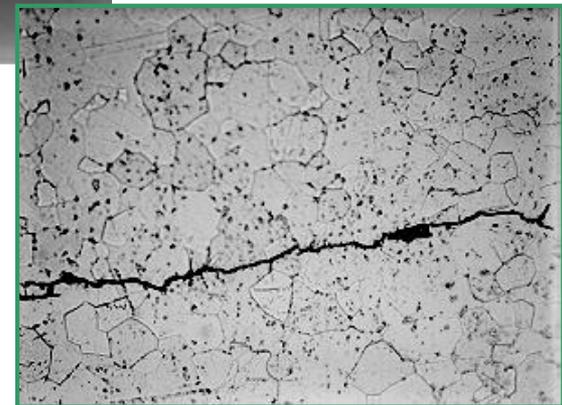
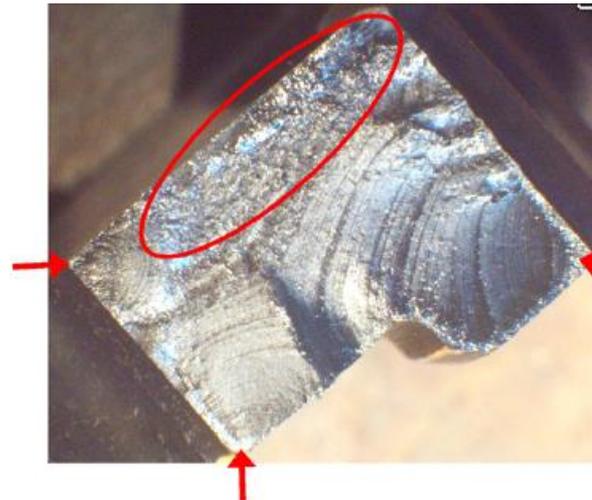
# PROPAGAÇÃO DA TRINCA



*Caminho da trinca em uma peça de titânio grau 2.*

*Trinca de fadiga numa peça de AA7050-T7461 de um F/A-18 sob carregamento de espectro de vôo (fonte: DSTO).*

*Marcas de praia em fratura por fadiga.*

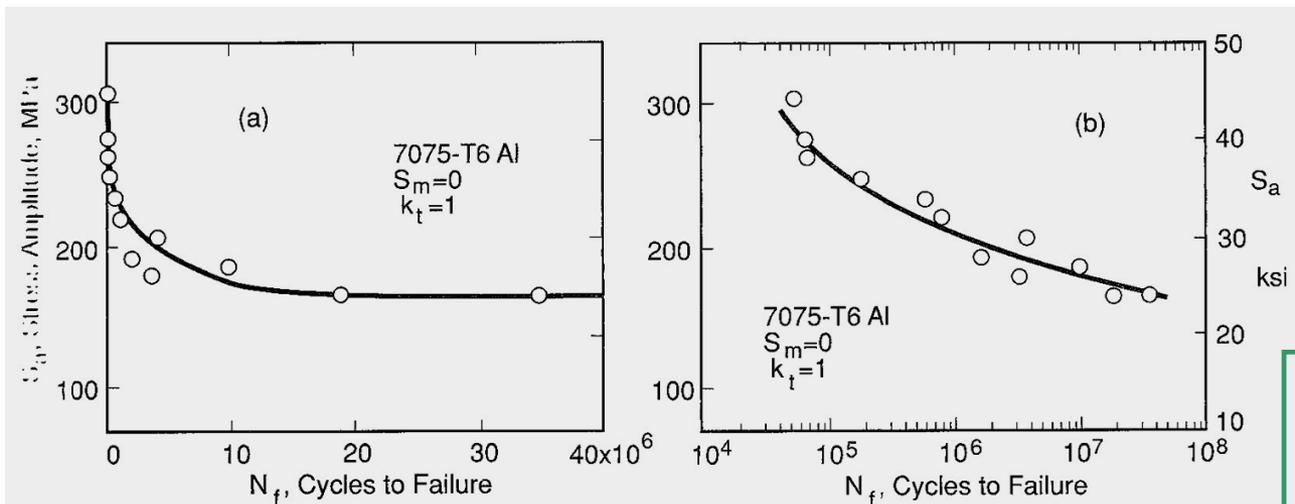


# ENSAIO DE FADIGA DE ALTO CICLO: A CURVA S/N

## Características

- 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  $\{\sigma_a \text{ ou } \sigma_{m\acute{a}x}\}$  com a vida em fadiga  $\{N_f \text{ ou } 2N_f\}$
- Na representação gráfica usa-se escala log-linear ou log-log.

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

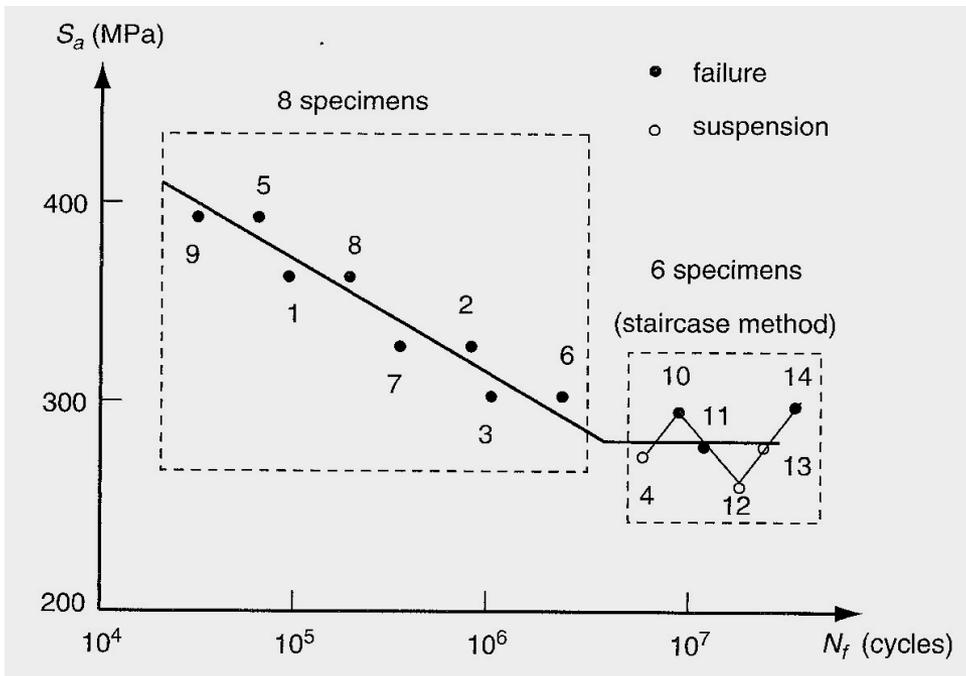


Note que, na escala linear, os valores de  $N_f$  não são lidos com precisão.

# ENSAIO DE FADIGA DE ALTO CICLO: A CURVA S/N

## Ensaio para Obtenção da Curva S-N

- Os engenheiros dispõem de quantidades limitadas de tempo e amostras
- Os dados de fadiga exibem grande dispersão
- A quantidade recomendada de ensaios depende do propósito da curva S/N :



- 6 a 12 : ensaios preliminares e de pesquisa
- 12 a 24 : dados para projeto

$$PR = 100(1 - L/n)$$

## Percentual de Replicância:

- 17 a 33 : ensaios preliminares/exploratórios
- 33 a 50 : pesquisa e desenvolvimento
- 50 a 75 : dados para projeto
- 75 a 88 : análises de confiabilidade

*Exemplo: Ensaio com tamanho de amostra pequeno  
(Japan Society of Mechanical Engineers)*

# ANÁLISE DOS DADOS DE FADIGA – CURVAS S/N

## Modelos Matemáticos mais Empregados

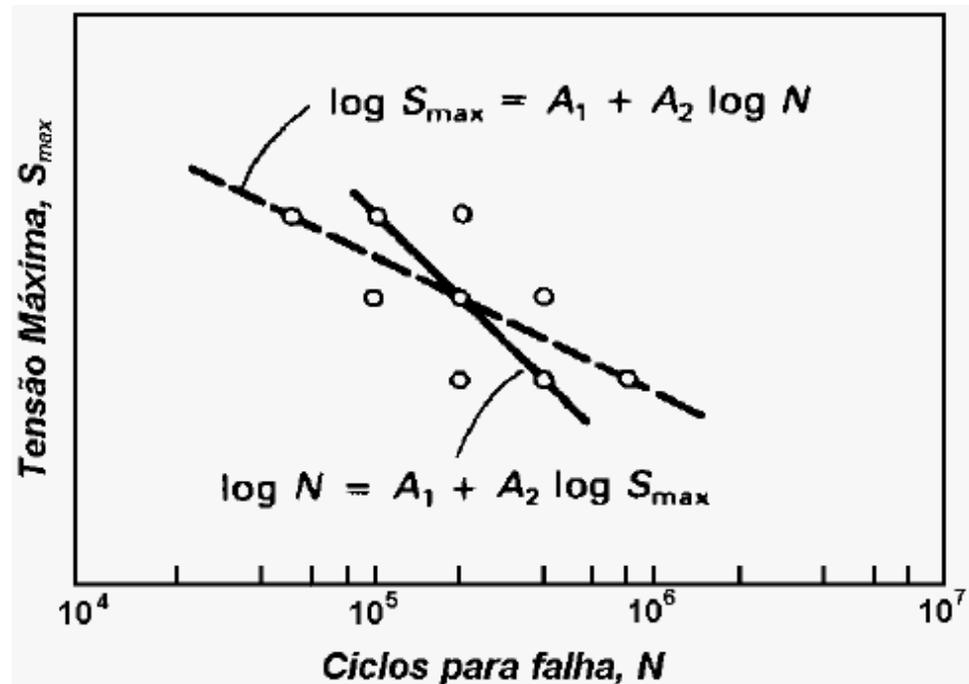
- Lei de Basquin:  $\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b$
- ASTM E739: modelos lineares da forma  $Y = A + B \cdot X$
- Nos modelos mais empregados, adota-se:

$$\begin{cases} Y = \log(N_f) \\ X = S \quad \text{ou} \quad X = \log(S) \end{cases}$$

onde:  $S = \sigma_{m\acute{a}x} \quad \text{ou} \quad S = \sigma_a$

## Escolha correta dos parâmetros

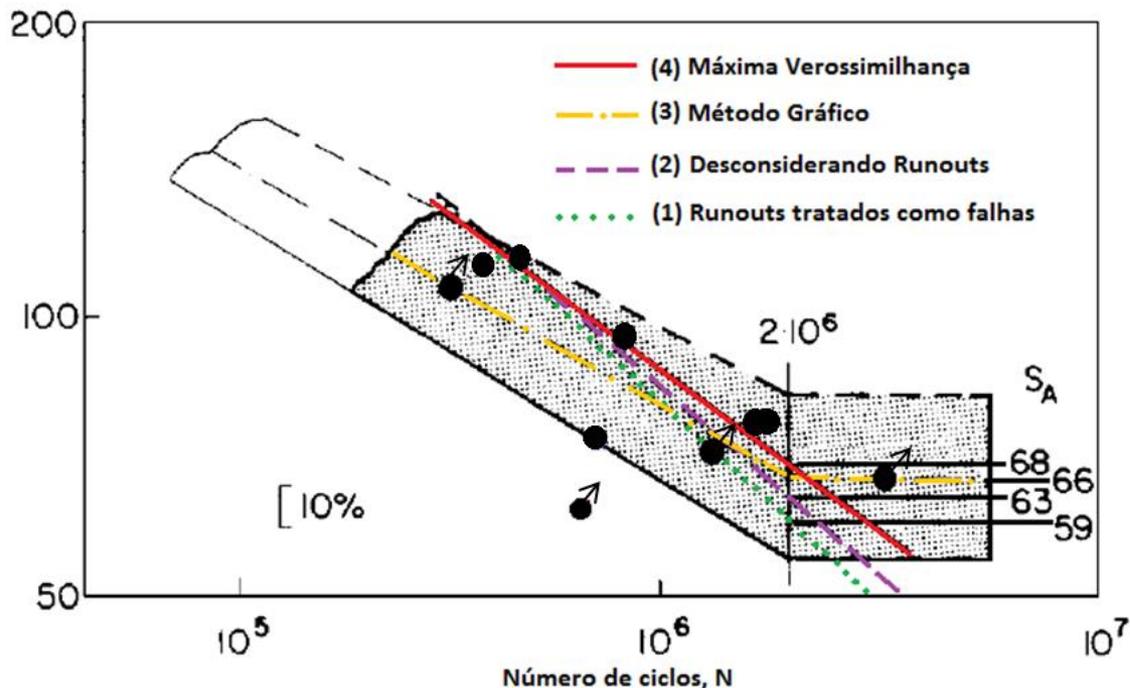
- Tensão: variável independente
- Vida: variável dependente



# ANÁLISE DOS DADOS DE FADIGA – CURVAS S/N

## Estimação dos Parâmetros do Modelo

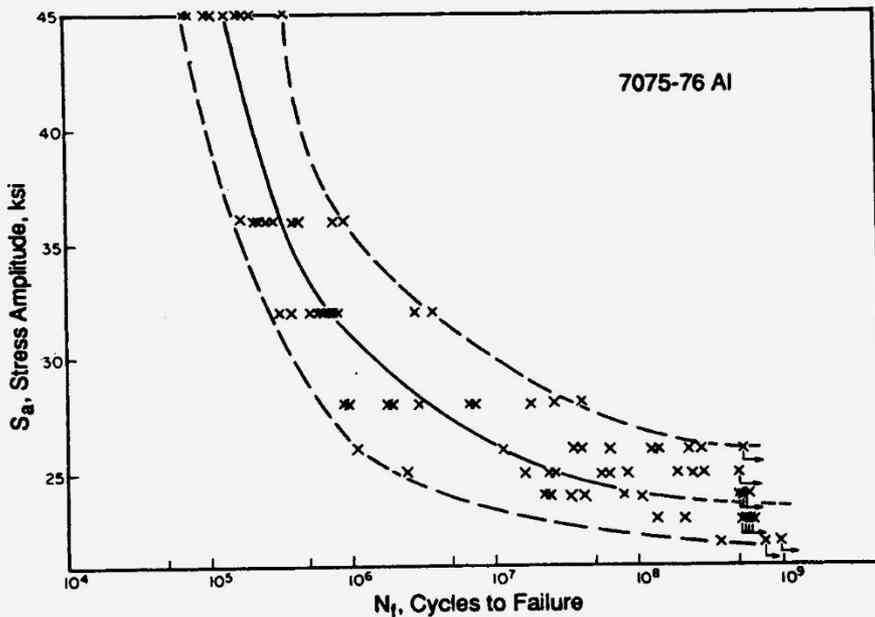
- Método dos Mínimos Quadrados (*exemplo: Origin®*)
- Método da Máxima Verossimilhança (*exemplo: Minitab®*)  
*vantagem:* permite o tratamento dos “runouts”



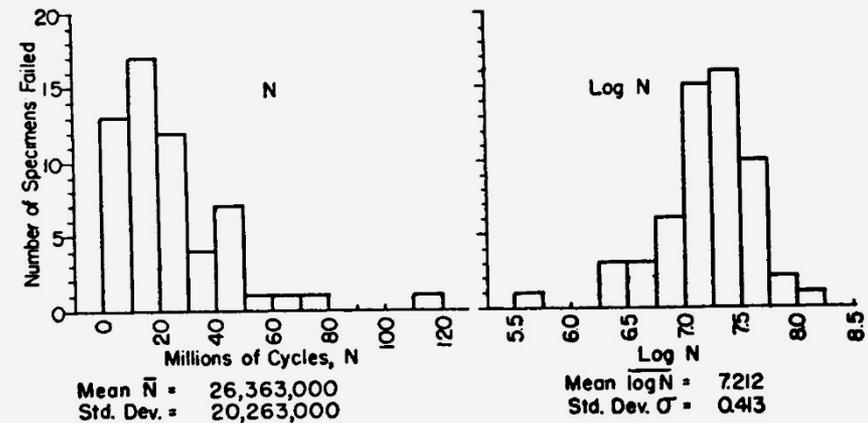
# ANÁLISE DOS DADOS DE FADIGA – CURVAS S/N

## Dispersão dos Resultados de Fadiga

- Dados obtidos em ensaios repetidos apresentam variações.
- Uma quantidade como a vida em fadiga, que apresenta uma dispersão, é chamada “Variável Estocástica”,  $x$ .
- Análise Estatística permite prever o desempenho em serviço para uma dada margem de segurança e avaliar quantitativamente a confiabilidade do produto.



*Exemplo: Histogramas representando a distribuição da vida em fadiga para corpos-de-prova da liga AA7075-T6.*



# ANÁLISE DOS DADOS DE FADIGA

## Distribuição Normal ou Log-Normal:

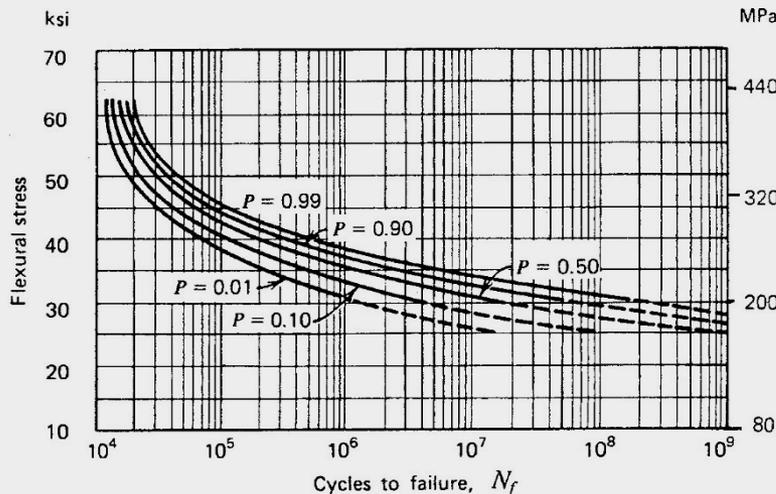
- A f.d.p. é definida como:

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{S}\right)^2\right]$$

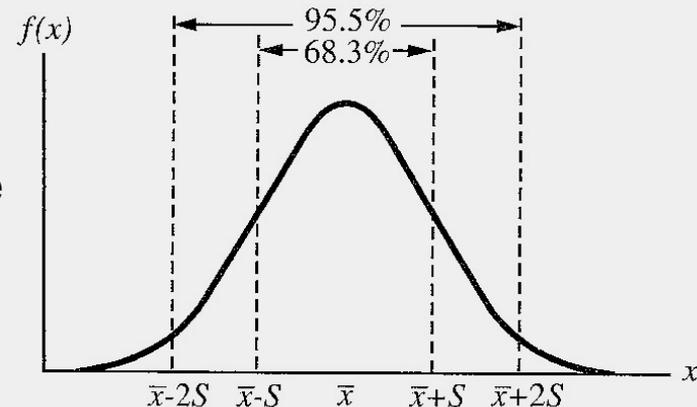
onde os parâmetros podem ser interpretados como:

- $\bar{X}$  = vida média
- $S$  = desvio-padrão

- Probabilidade acumulada  $P(x)$  é a probabilidade de uma amostra falhar em uma vida  $N_f \leq x$



$$P(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$



Forma da f.d.p. da Distribuição Normal

# ANÁLISE DOS DADOS DE FADIGA

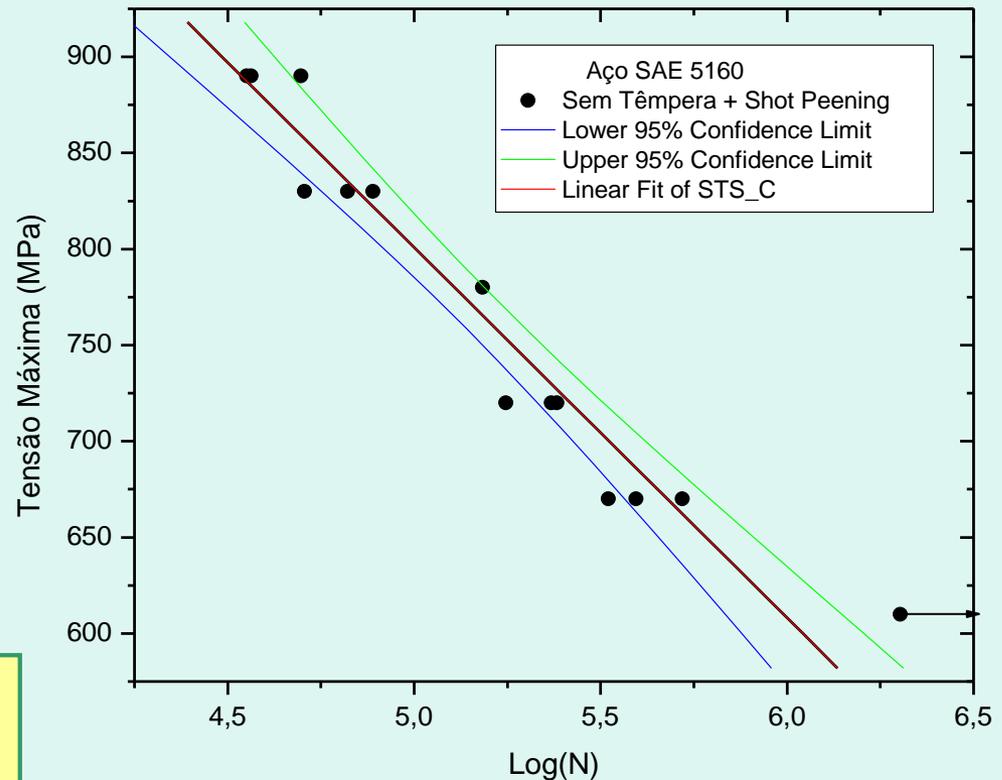
Exemplo de curva S/N obtida no Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP

## Condições do Ensaio:

- Corpos-de-prova cilíndricos
- Fadiga Axial
- Controle de Força
- $R = 0,1$
- Frequencia = 20 Hz

## Significado do Intervalo de Confiança:

Temos um nível de confiança de 95% de que a curva média de fadiga deste material esteja dentro do intervalo.



# CURVA S/N DE PROJETO NA REGIÃO DE VIDA FINITA

Tradicionalmente emprega-se em engenharia as curvas de projeto 2-sigma e 3-sigma inferiores, nos quais a curva média de vida em fadiga é deslocada para a esquerda de um valor igual a duas ou três vezes o desvio-padrão.

## Análise Estatística:

Considera-se que a vida em fadiga segue a distribuição log-normal, e que a variância do logaritmo da vida é constante para os níveis de tensão dados.

Modelo de Regressão:  $\hat{Y} = \hat{A} + \hat{B}X$  (valores estimados pelos mínimos quadrados)

Tomando os logaritmos e rearranjando a lei de Basquin:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad \longrightarrow \quad \log(2N_f) = \frac{-1}{b} \log(\sigma'_f) + \frac{1}{b} \log(\sigma_a) \quad \text{onde: } X = \log(\sigma_a)$$

O erro padrão, assumido constante dentro da região de interesse, é dado por:

$$\text{e de onde tiramos: } \begin{cases} b = \frac{1}{B} \\ \sigma'_f = 10^{-Ab} \end{cases}$$

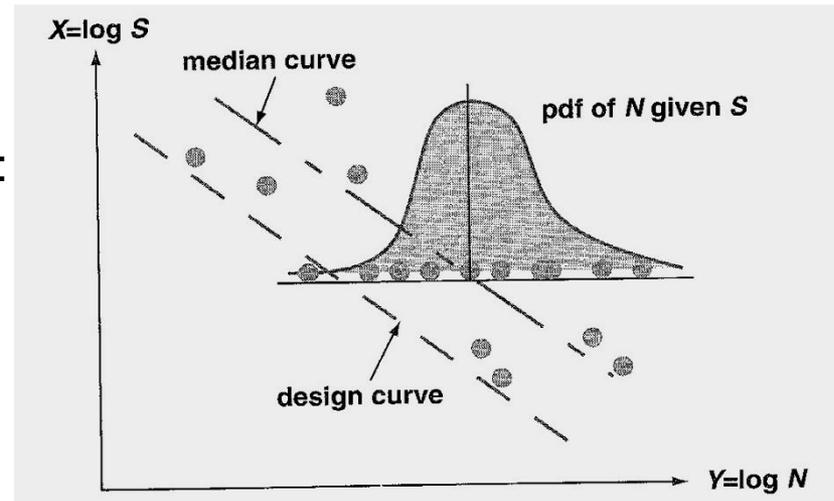
$$S^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [Y_i - (\hat{A} + \hat{B}X_i)]^2$$

# CURVA S/N DE PROJETO NA REGIÃO DE VIDA FINITA

Existem métodos práticos para se obter uma “*Design S/N Curve*” que caracteriza a vida mínima em fadiga para uma dada tensão, de modo que a maioria dos dados de fadiga fiquem acima deste valor mínimo, também chamado de “*Lower Bound*”.

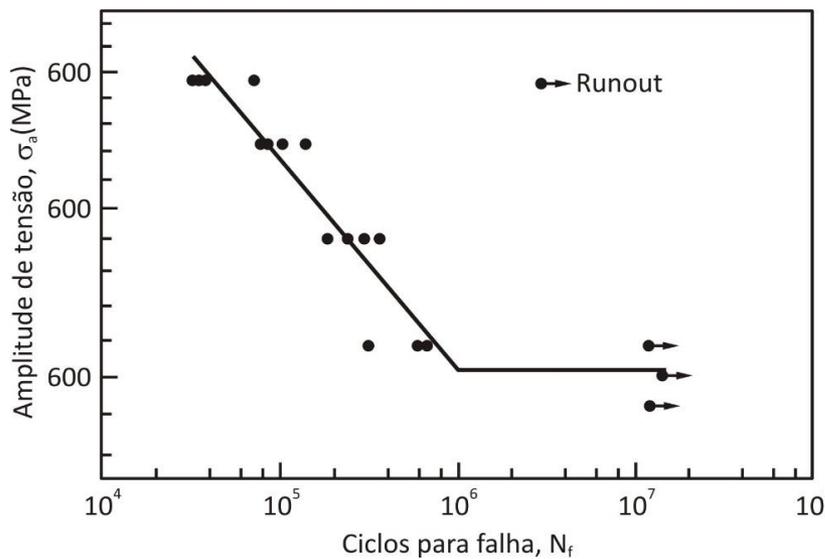
A escolha da *Lower Bound* depende de:

- Custo de material
- Política de segurança
- Norma industrial

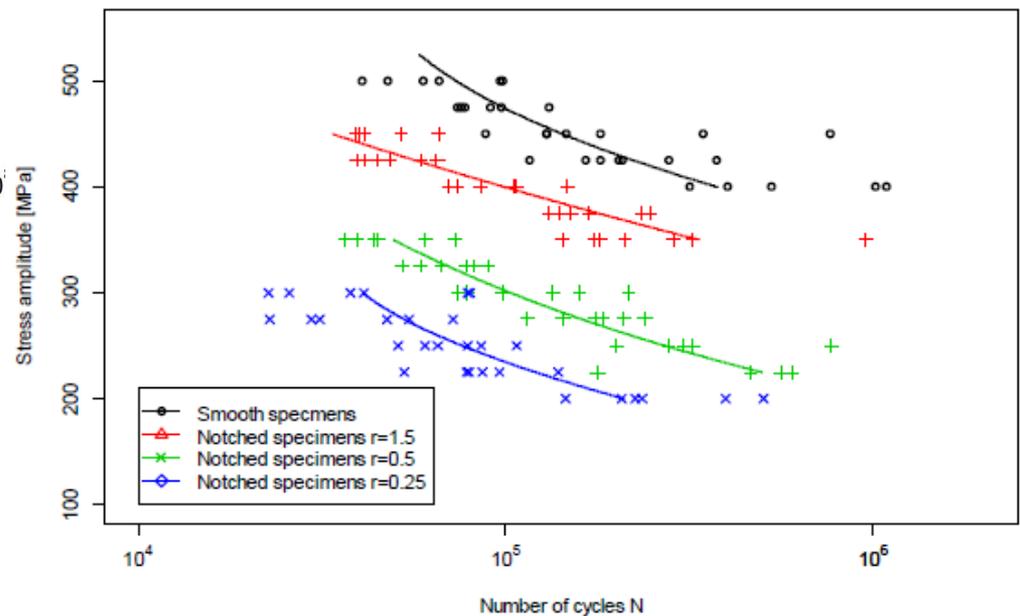


Exemplo: Um valor que pode ser usado em projeto de componentes é dado pelo **R95C90**, que significa que há 95% de probabilidade de sobrevivência, com nível de confiança de 90% para a solicitação em uma dada tensão.

# CURVA S/N DE PROJETO NA REGIÃO DE VIDA FINITA



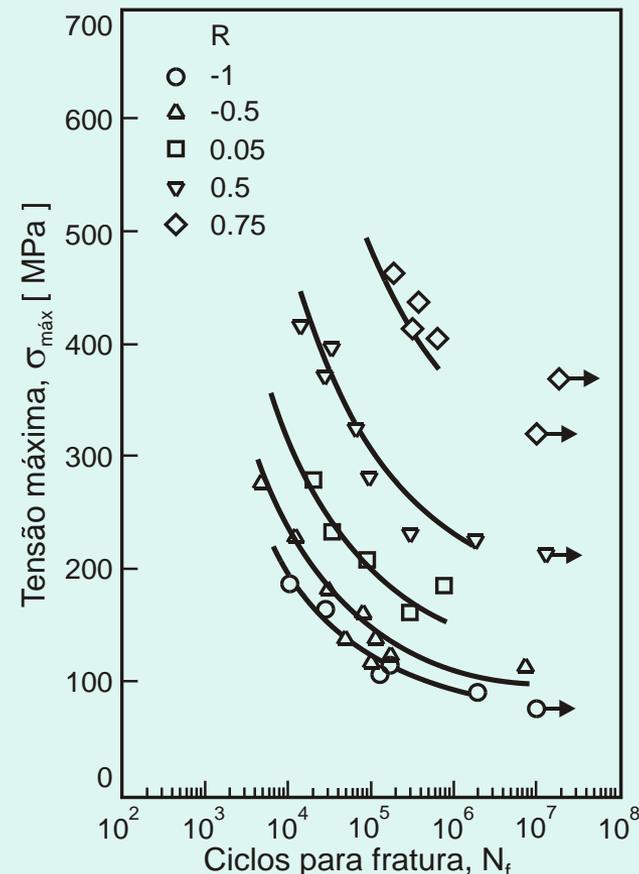
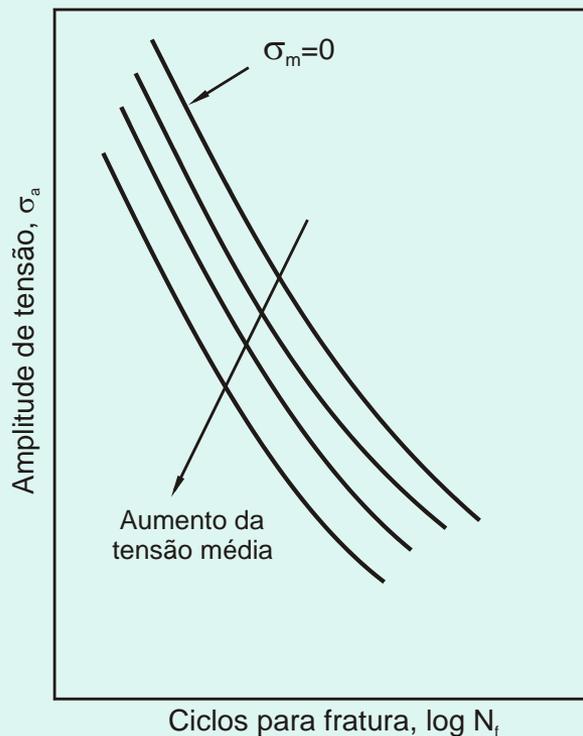
Exemplo: Resultados de ensaios de fadiga por flexão rotativa em aço microligado (trabalho de graduação: C.P. Carvalho, Eng. Materiais EEL-USP).



Exemplo: Curvas S/N para aço inoxidável AISI 304.

# CARREGAMENTOS ASSIMÉTRICOS

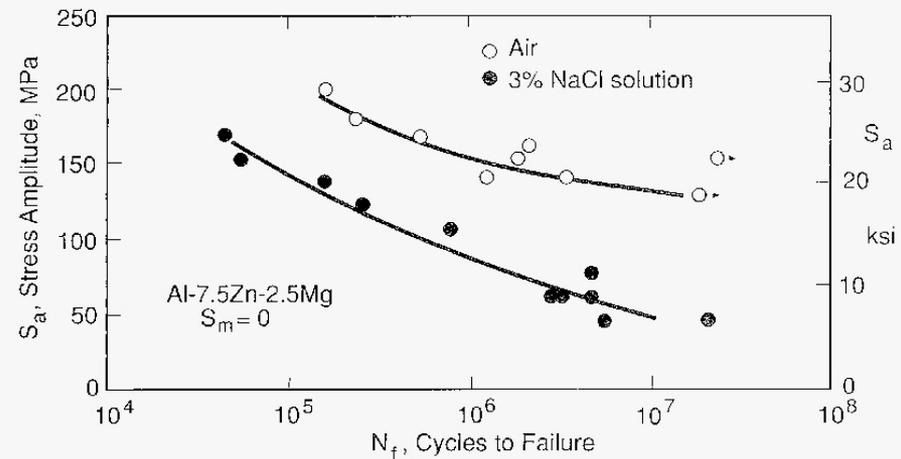
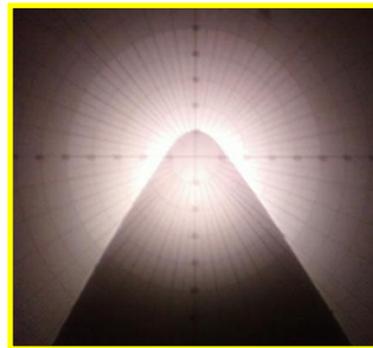
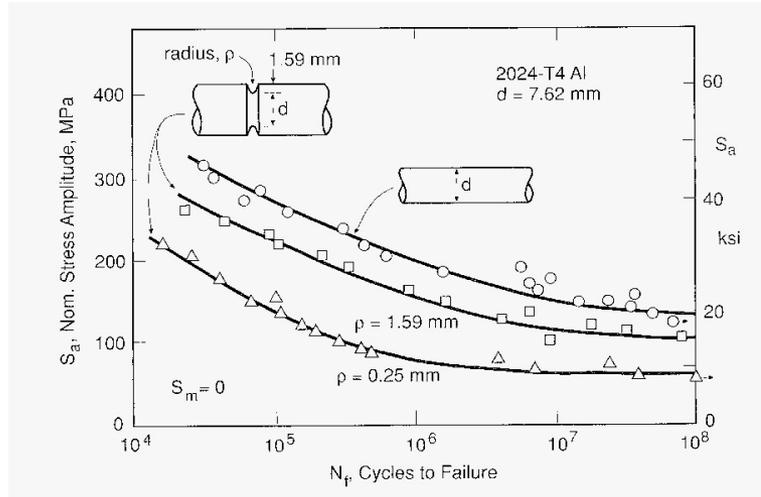
- Diagramas S/N: Conjunto de curvas S/N para diferentes ciclos assimétricos.
- A avaliação do efeito da assimetria do ciclo pode ser feita considerando-se:
  - Diferentes valores de R.
  - Diferentes valores da tensão média.



# FATORES QUE AFETAM AS CURVAS S/N

Exemplos: - Geometria (entalhes)

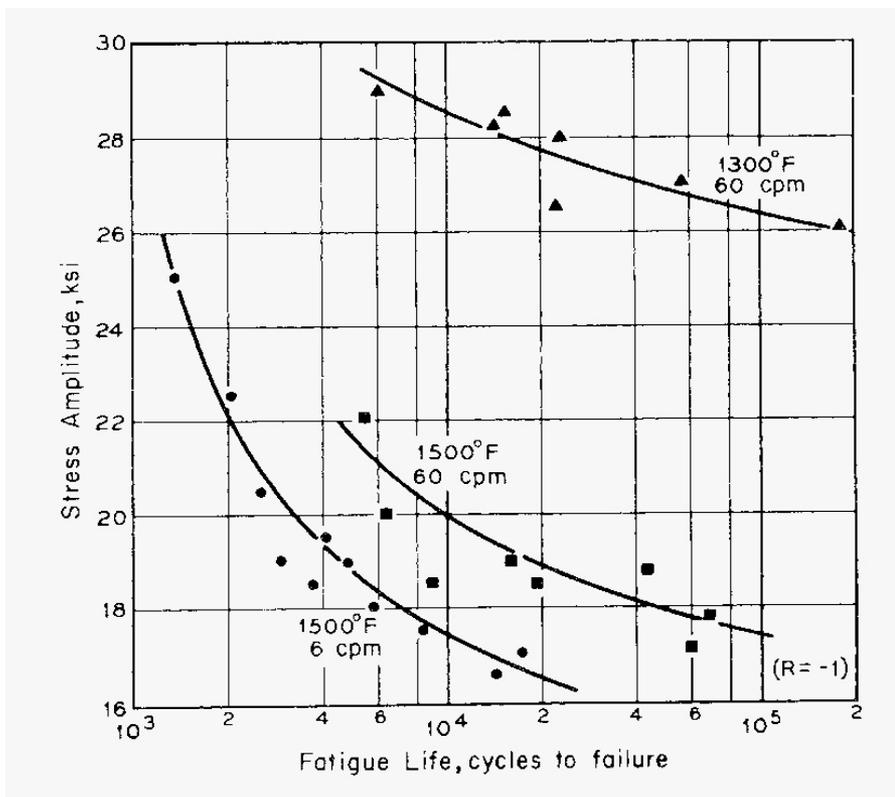
- Meio agressivo



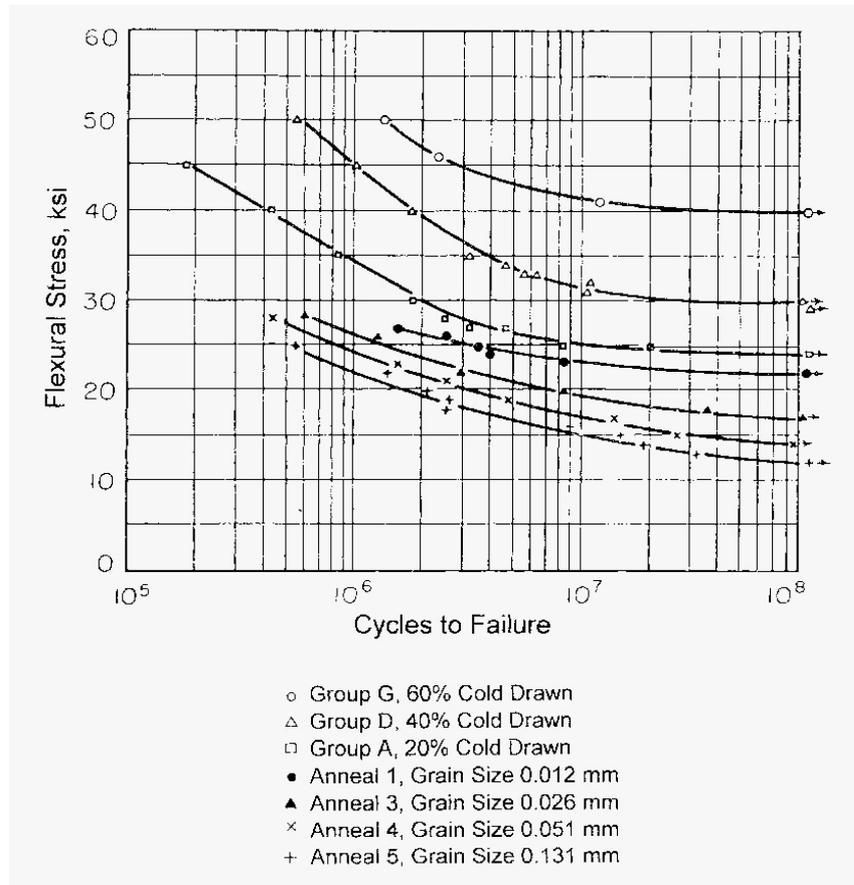
# FATORES QUE AFETAM AS CURVAS S/N

## Exemplos:

### - Temperatura e frequencia



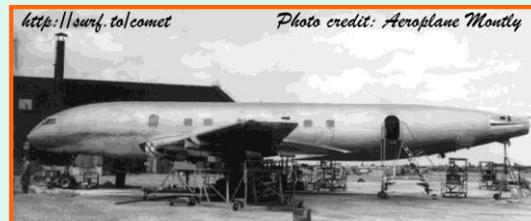
### - Microestrutura



# OS ACIDENTES COM O COMET

## Uma Nova Era na História da Aviação

- O de Havilland Comet foi o primeiro avião a jato para vôos comerciais.
- Motor a jato: taxa de consumo de combustível é duas vezes maior que num motor a pistão. Para compensar, o avião precisa voar o mais rápido e alto possível.
- Aviões a jato: velocidade tipicamente Mach 0,9 e altitude 10.000 a 12.000 m.
- Necessário controlar a pressão e temperatura no interior da cabine. Ciclos de pressão na cabine a cada vôo podem induzir tensões de fadiga. Os engenheiros da época não consideraram que isso pudesse causar algum problema.



# OS ACIDENTES COM O COMET

## Falhas Catastróficas

- Em 2/5/1953 um Comet desintegrou no ar logo após decolar de Calcutá. O acidente foi atribuído ao mau tempo no momento do voo.
- Em 10/1/1954 um Comet explodiu a 8.300 m de altitude sobre o Mediterrâneo.
- Em 8/4/1954 um Comet explodiu no ar após decolar de Roma. Os destroços desse avião caíram em águas profundas e não puderam ser recuperados.
- Foram renovados os esforços para recuperar os destroços do segundo avião, nas vizinhanças da ilha de Elba. Evidências de que a seção traseira estava relativamente intacta, separando do resto da cabine antes da desintegração.

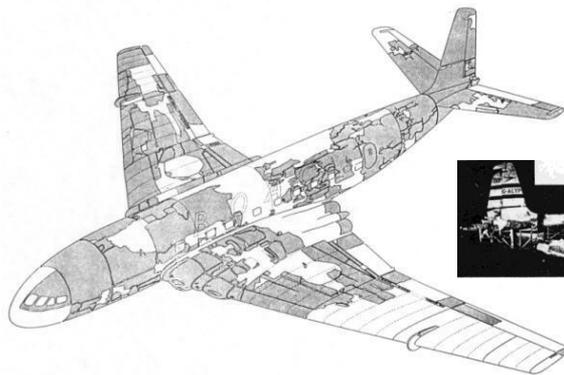


FIG. 2. DIAGRAM SHOWING AMOUNT OF WRECKAGE RECOVERED—G-ALYP.

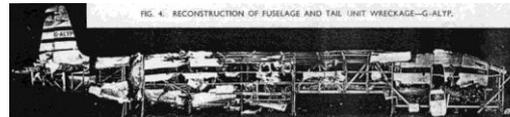


FIG. 4. RECONSTRUCTION OF FUSELAGE AND TAIL UNIT WRECKAGE—G-ALYP.

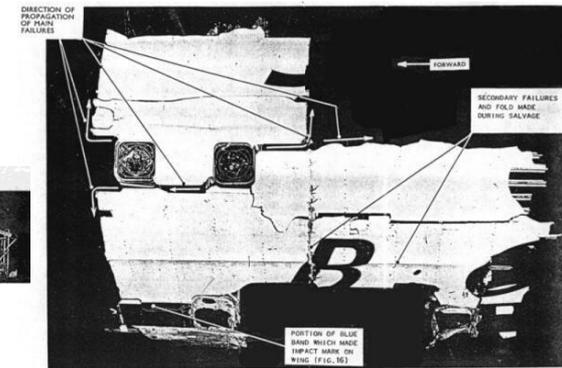
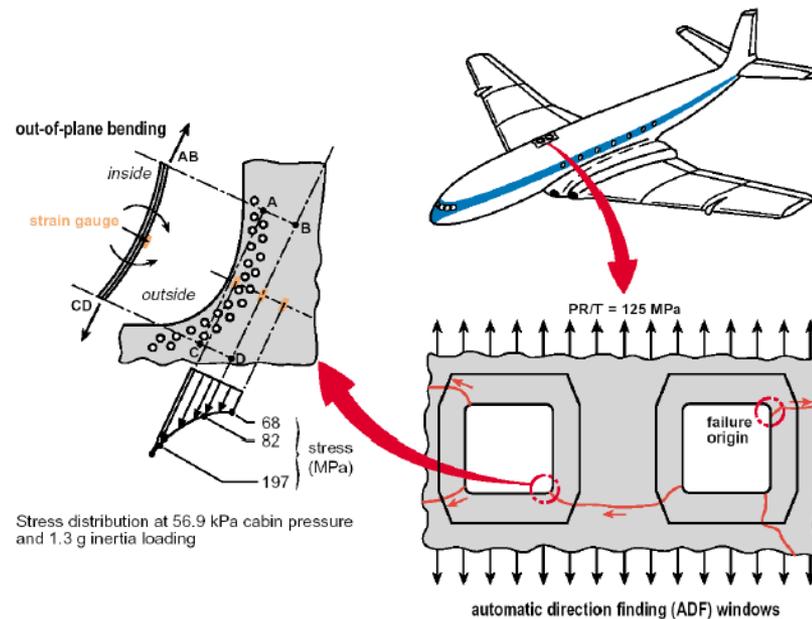
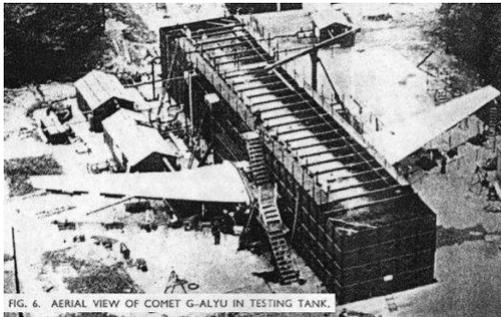


FIG. 12. PHOTOGRAPH OF WRECKAGE AROUND AFT AERIAL WINDOWS—G-ALYP.

# OS ACIDENTES COM O COMET

## Falhas Catastróficas

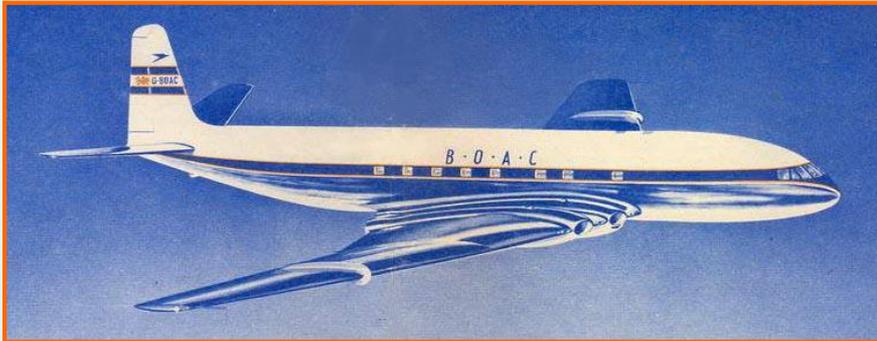
- Para investigar as causas da explosão da cabine, um Comet foi submetido a pressurização repetida, em solo, pelo bombeamento de água. Simultaneamente, as asas foram submetidas a carregamentos por atuadores, para simular as tensões durante um voo típico. Após 3.000 ciclos de pressurização, uma trinca de fadiga com origem numa janela avançou, cortando a fuselagem.



# OS ACIDENTES COM O COMET

## Falhas Catastróficas

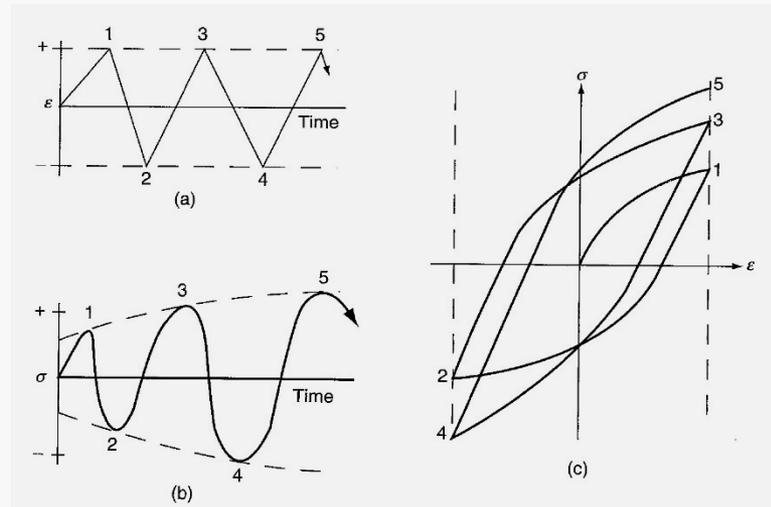
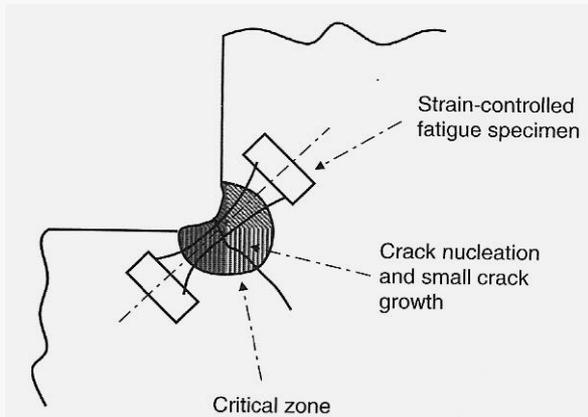
- As análises concluíram os acidentes ocorreram devido a trincas de fadiga, favorecidas pela concentração de tensão nos furos de rebites localizados próximos às janelas. As trincas podem ter iniciado em defeitos que provavelmente presentes desde a fabricação do avião, e não teriam sido um problema nos aviões anteriores, em que os requisitos de pressão da cabine eram menores.



# ENSAIO DE FADIGA DE BAIXO CICLO

## 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.



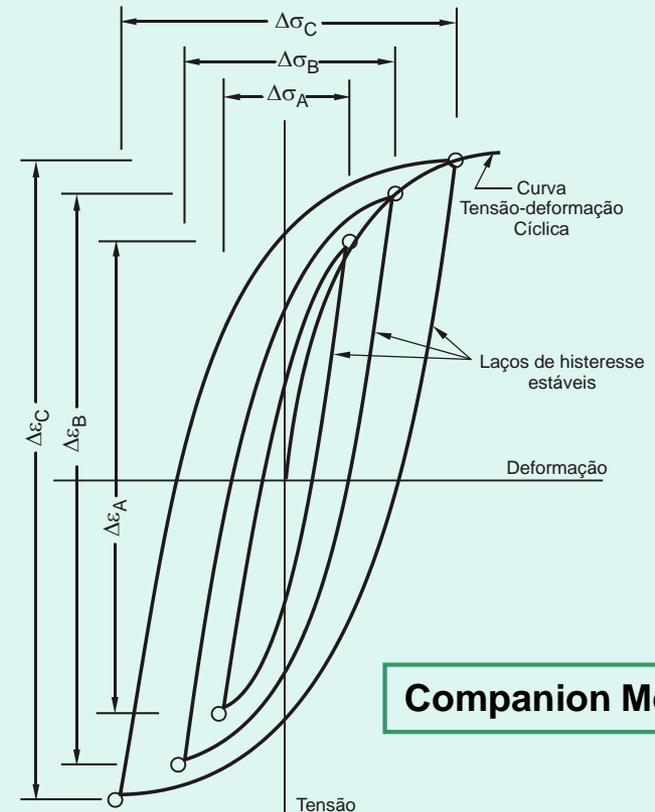
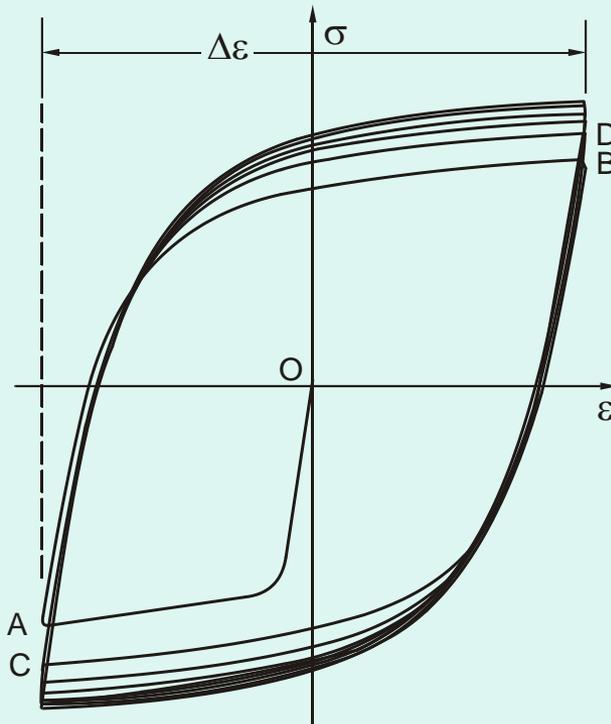
### *Tensão ou Deformação?*

- ***Fadiga de alto ciclo:*** comportamento global elástico; pequeno aumento da deformação é acompanhado por um grande aumento de tensão.
- ***Fadiga de baixo ciclo:*** tensões da ordem do limite de escoamento; pequeno aumento da tensão associado a grande aumento da deformação. Melhor “resolução” é obtida se as deformações forem usadas no modelo de fadiga.

# A CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO CÍCLICA

## Comportamento tensão-deformação cíclico

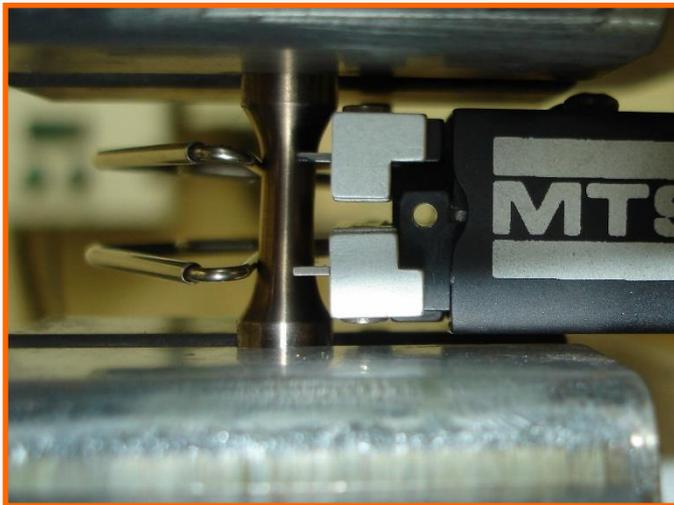
- Nos ensaios com amplitude de deformação constante, os laços de histerese tornam-se estáveis após um amolecimento / endurecimento inicial.
- A CTDC é obtida a partir dos bicos dos laços de histerese estáveis.



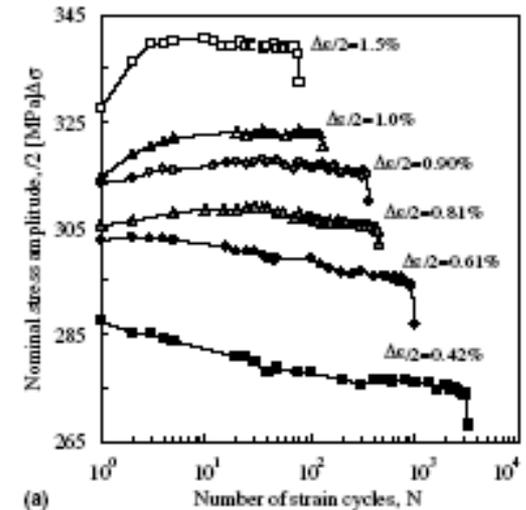
# EXECUÇÃO DO ENSAIO

## Considerações e Recomendações Práticas

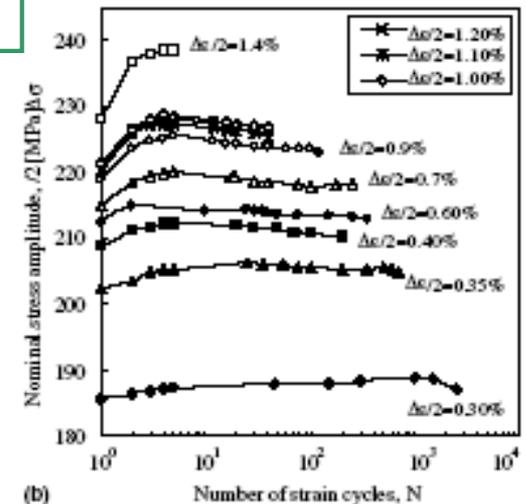
- Controle de deformação
- Forma de onda: triangular
- Manter a mesma taxa de deformação em todos os ensaios
- Coletar os laços de histerese com pelo menos 200 pontos
- Usar tensões e deformações verdadeiras
- Critério de parada: queda de 30-50% na tensão de pico
- Avaliar o laço de histerese correspondente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



AA 6082 T6



AA 6060 T6



# O ENSAIO DE FADIGA DE BAIXO CICLO

## Análise dos Laços de Histerese

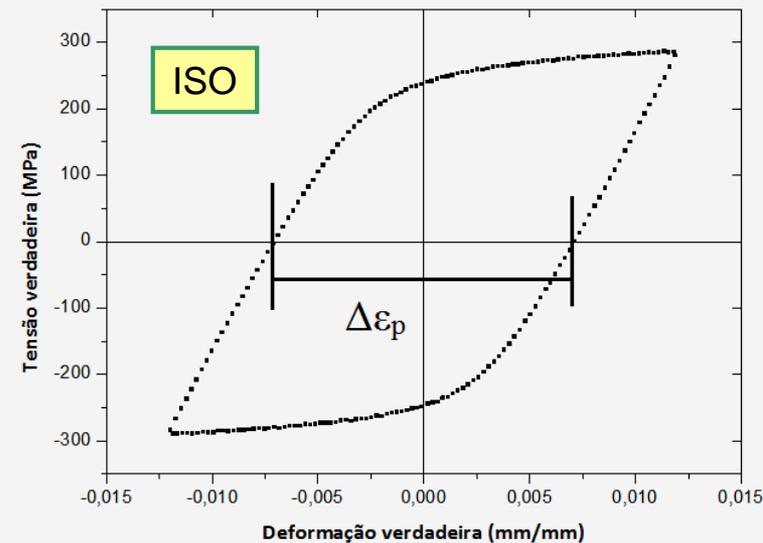
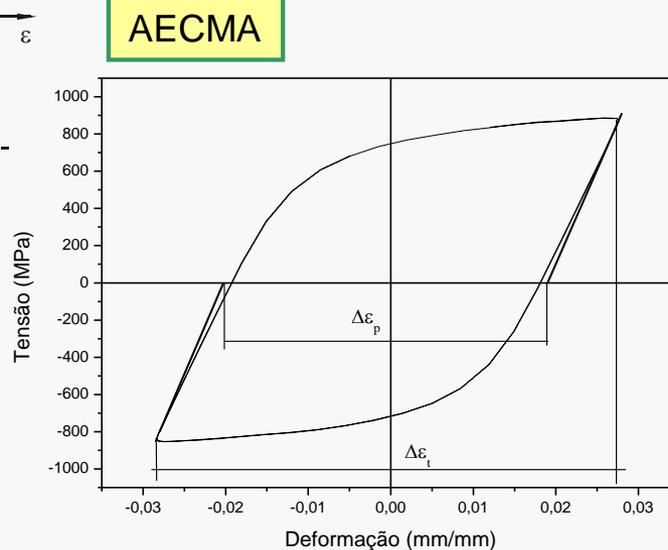
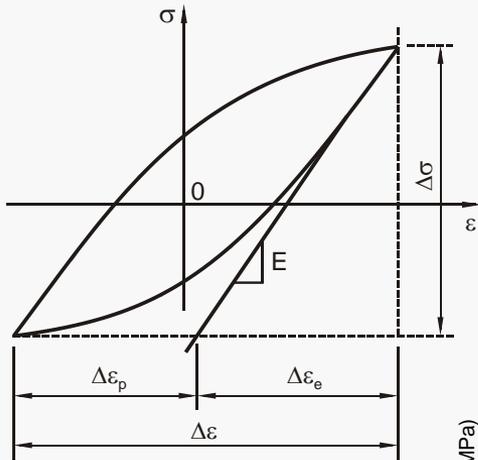
- Existem diferentes métodos para se determinar as parcelas da deformação
- Kandil (1999) observou diferenças de 30% ou mais entre os métodos
- Recomenda-se a definição usada na norma ISO/DIS 12106

A deformação total é dividida nas parcelas elástica e plástica:

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

Equação de Coffin-Manson (1962):

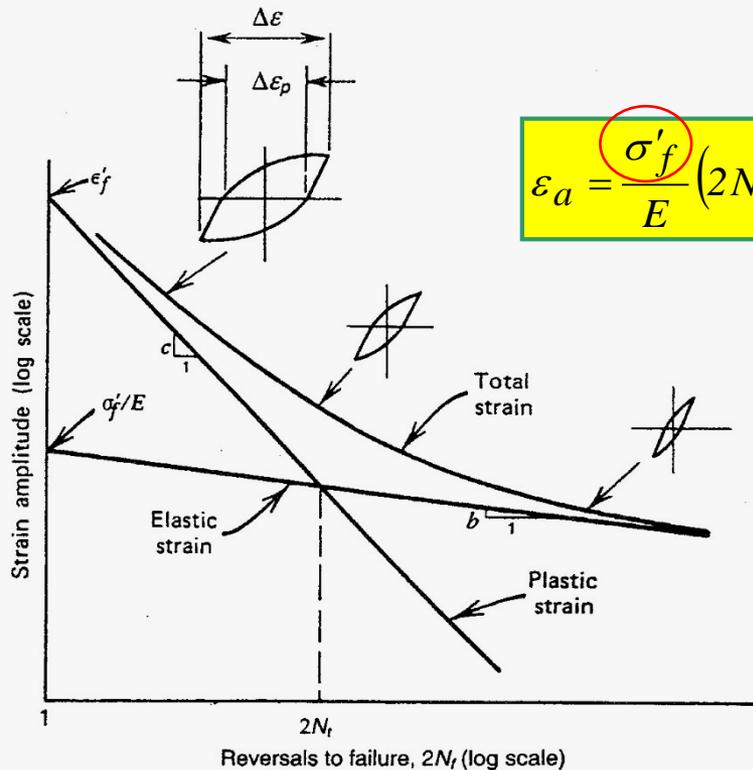
$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$$



# 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

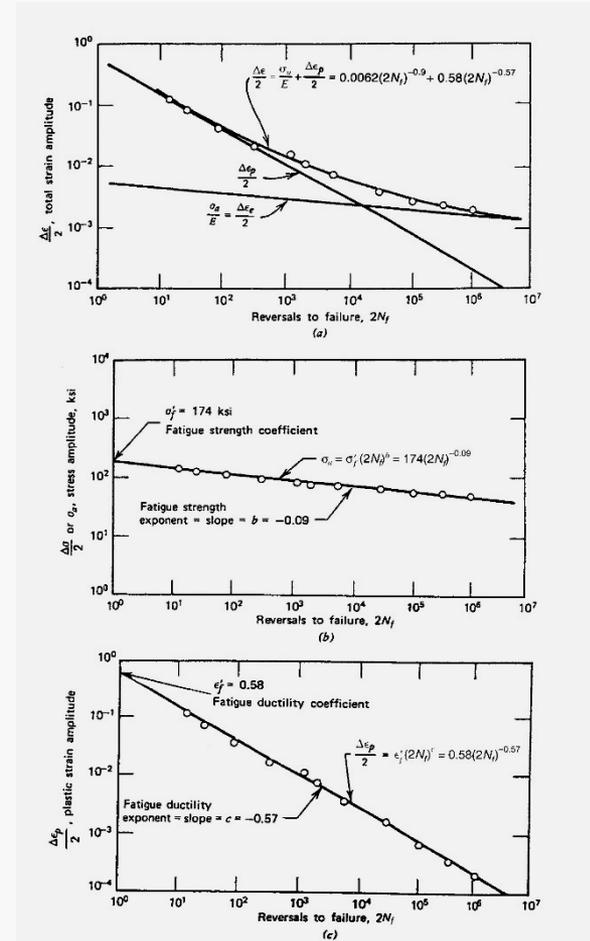


$$\varepsilon_{ae} = \frac{\sigma_a}{E}$$

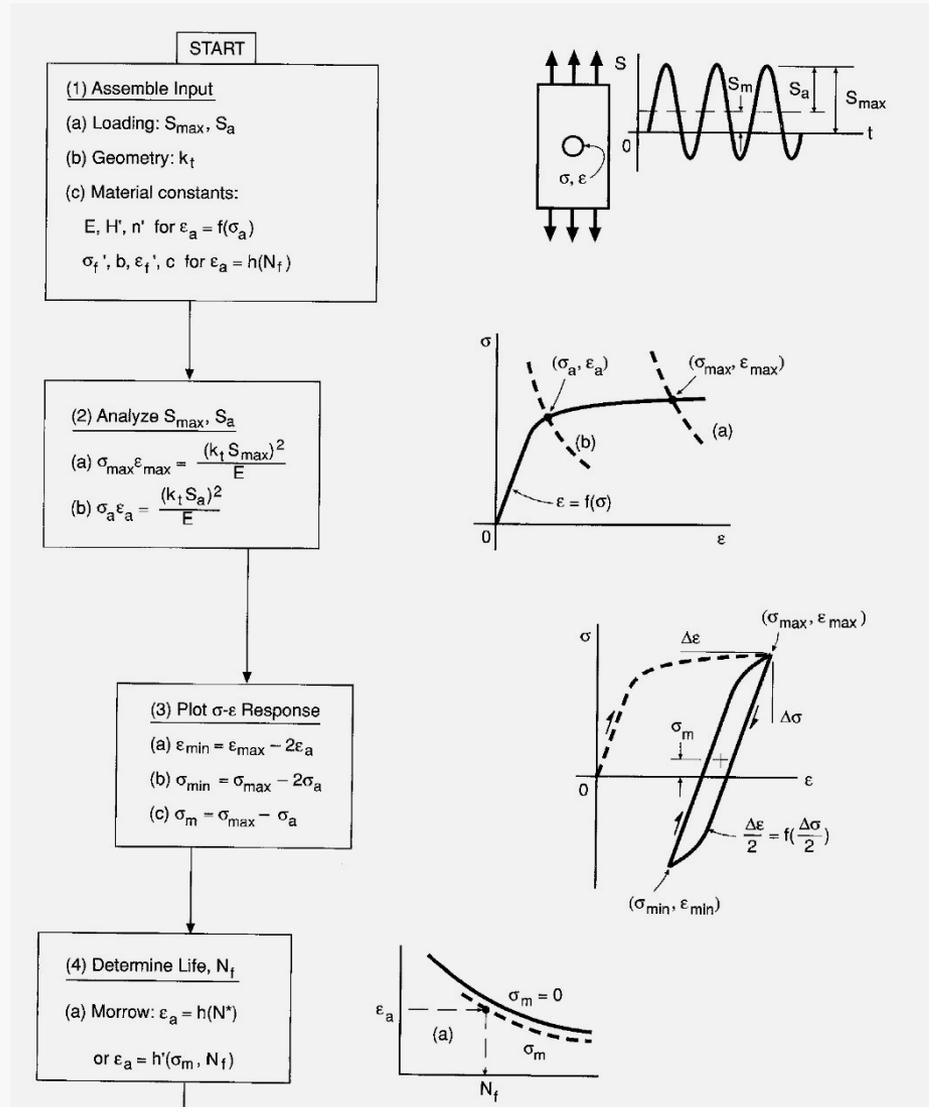
$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

Vida de transição

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



# RESUMO DO MÉTODO $\epsilon$ -N

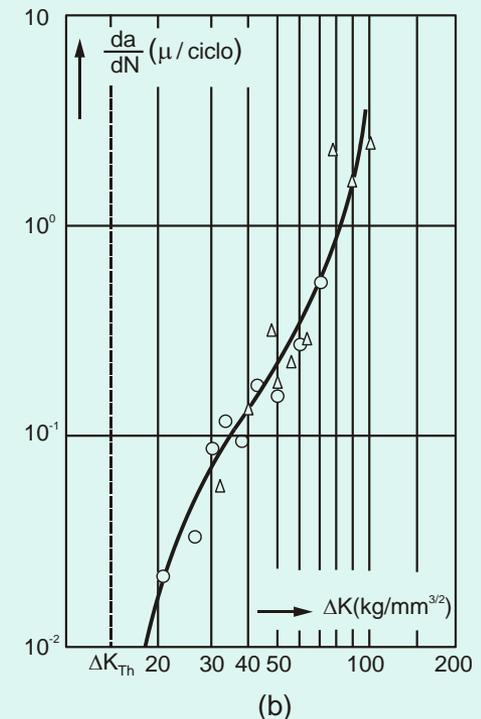
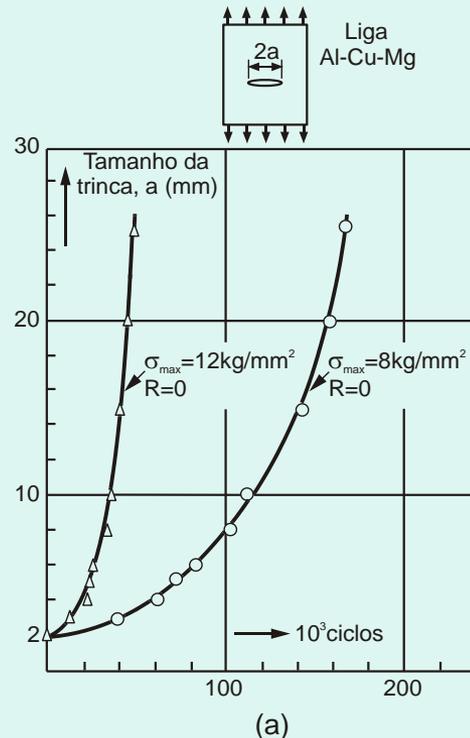
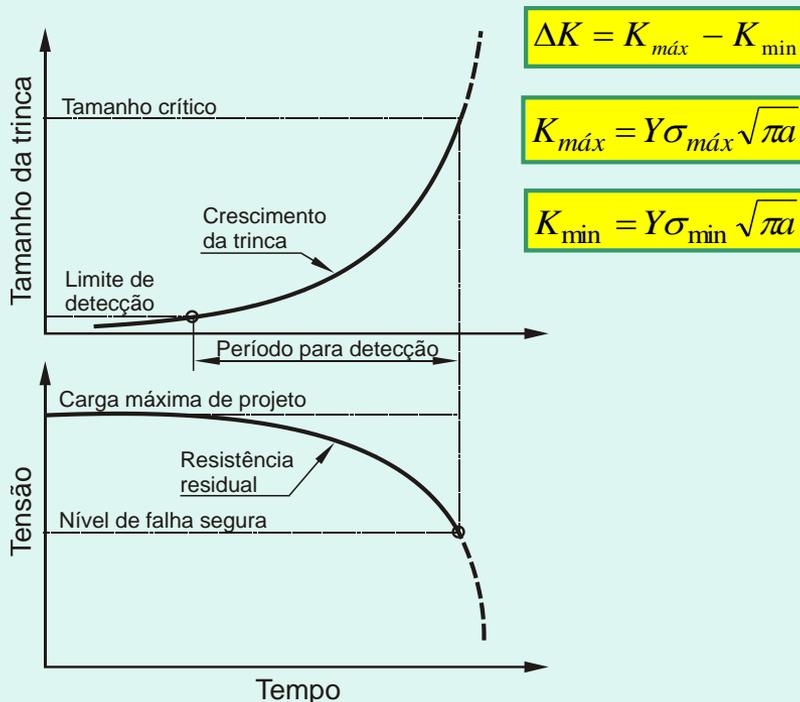


# PROPAGAÇÃO DE TRINCAS SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS

## Tolerância ao Dano

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

*Similitude: Cálculo de  $K$  para peças com diferentes geometrias*



# ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA

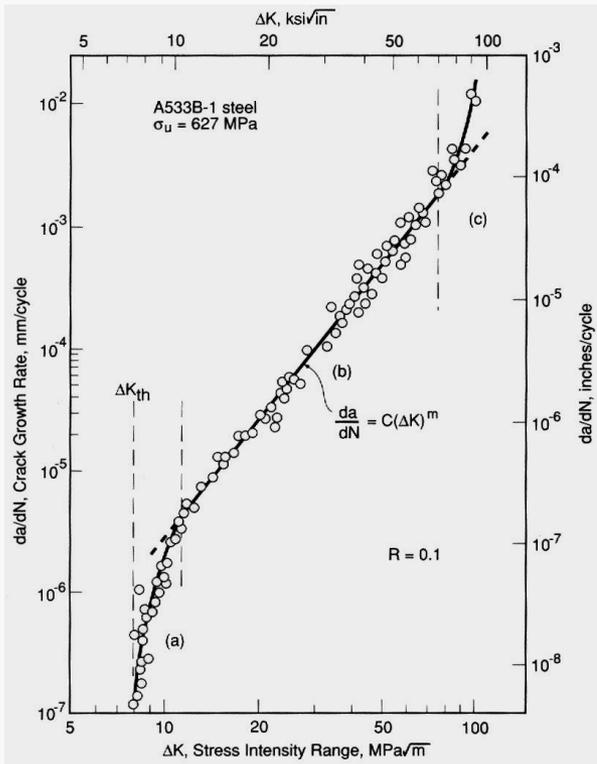
## Curva $da/dN$ versus $\Delta K$

- Divisão em três regiões.
- Modelo de Paris para Região II.
- Efeitos de Assimetria (razão R)

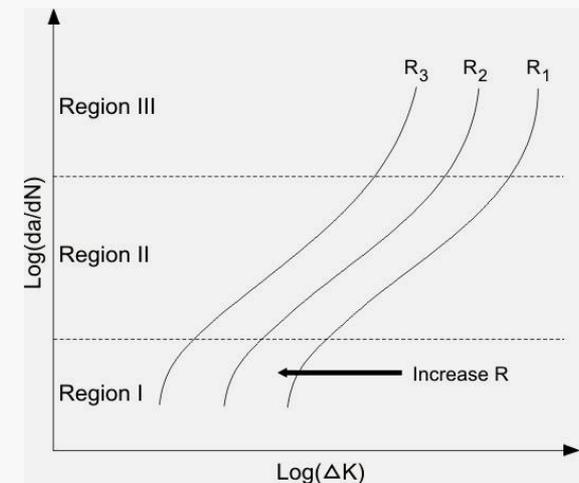
$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^n$$

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

Corpo de prova do tipo painel M(T)



*Paul C. Paris. "His concept was compared to data in 1959 but was not published until 1961 because of rejections by reviewers for ASME, AIAA and Philosophical Magazine. The reviewers did not believe that the elastic stress intensity factor could be the driving force for fatigue crack growth that involved crack tip plasticity".*

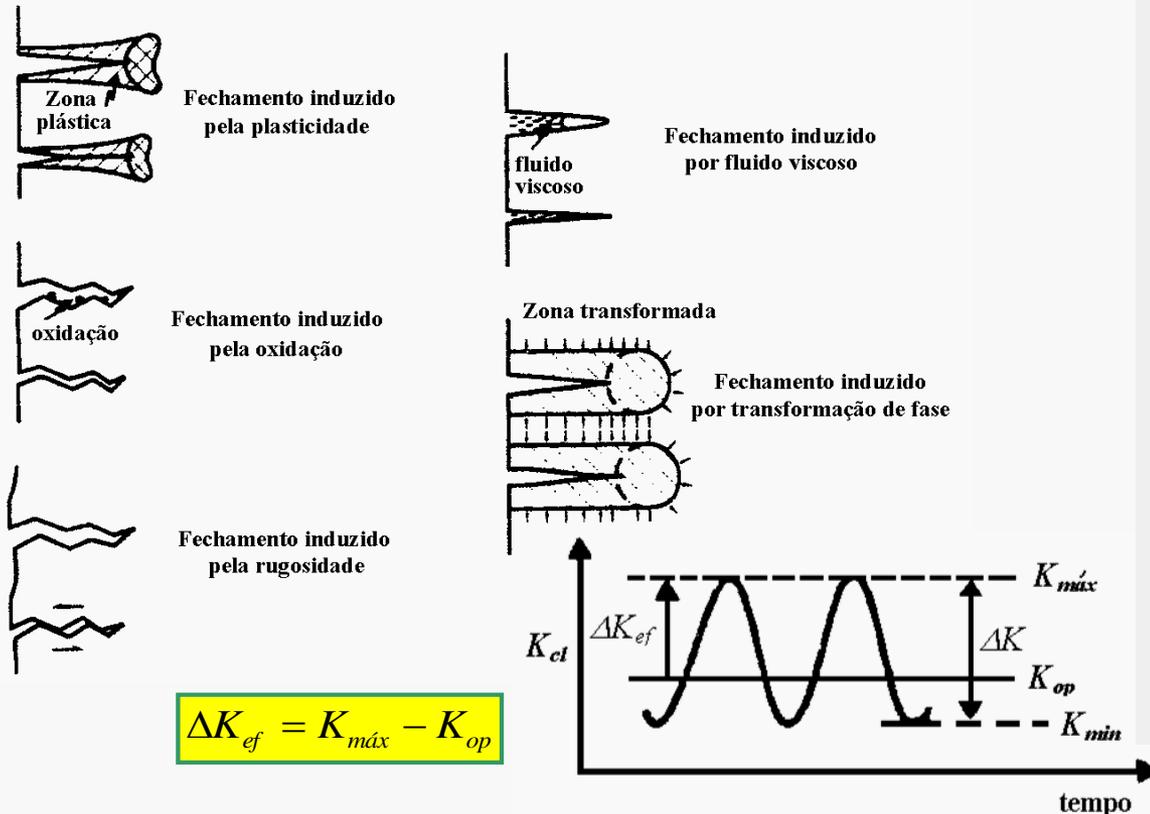


# O FECHAMENTO DA TRINCA

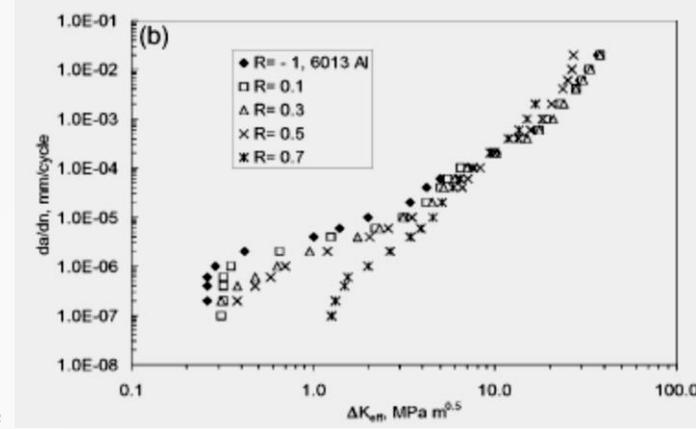
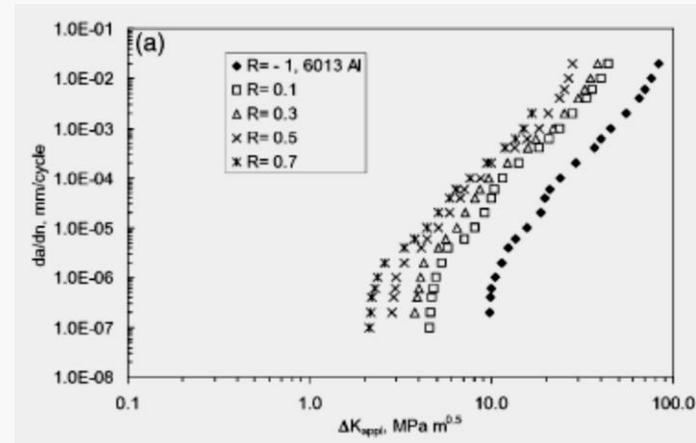
## Os Conceitos de fechamento da trinca e $\Delta K_{ef}$

- Elber: As faces permanecem em contato durante parte do ciclo.
- Fatores que contribuem para o fechamento.
- Variação efetiva do Fator Intensidade de Tensão.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^n$$



$$\Delta K_{ef} = K_{máx} - K_{op}$$



# O FECHAMENTO DA TRINCA

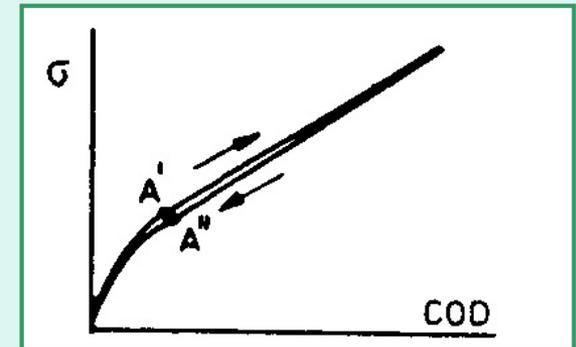
## Métodos para avaliar o fechamento

- Possibilidade de estimativa teórica: restrita à tensão residual?
- Medidas experimentais do fechamento:
  - ASTM E647: "Compliance Offset Method"
  - NASA Tech. Mem. 109032 (november 1993)
  - Alguns métodos dependem da interpretação
- A forma usual de se avaliar o fechamento baseia-se nas medidas do COD.



*Corpo-de-prova com medidor de COD ("clip gage") posicionado*

*Numa trinca de fadiga real, observa-se uma parte não-linear*



# PROPAGAÇÃO DA TRINCA COMO FUNÇÃO DE 2 PARÂMETROS

## Modelagem do efeito de R na taxa de crescimento da trinca

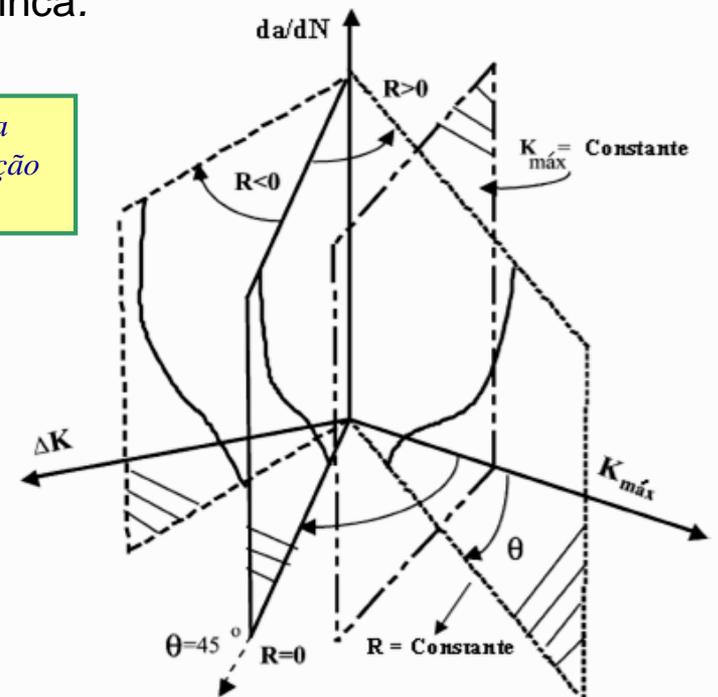
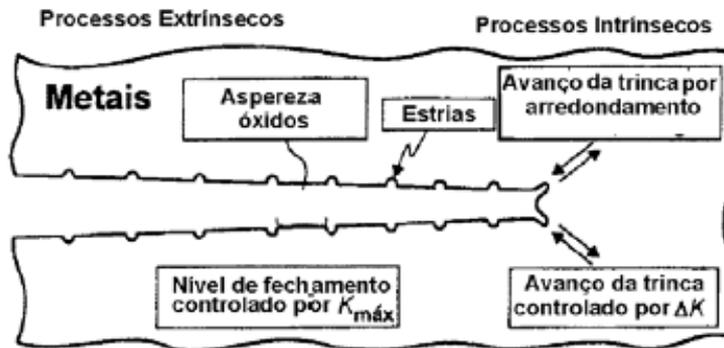
- Dois parâmetros definem um ciclo de carregamento.
- Busca por equações que modelem a propagação da trinca com um único grupo de constantes de ajuste, sem necessidade de considerar o fechamento.
- Enfoque Unificado de Sadananda e Vasudevan:  $\Delta K$  e  $K_{m\acute{a}x}$  são as **duas forças motrizes** para o crescimento da trinca.

Exemplo de modelo para a Região II

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n (1 - R)^{n(m-1)}$$

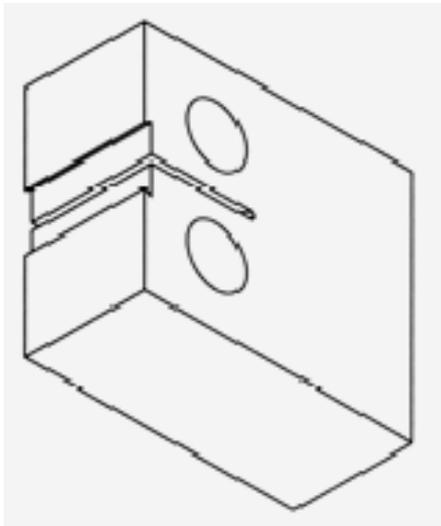
(Walker)

Representação em 3D da taxa da trinca como função de 2 forças motrizes

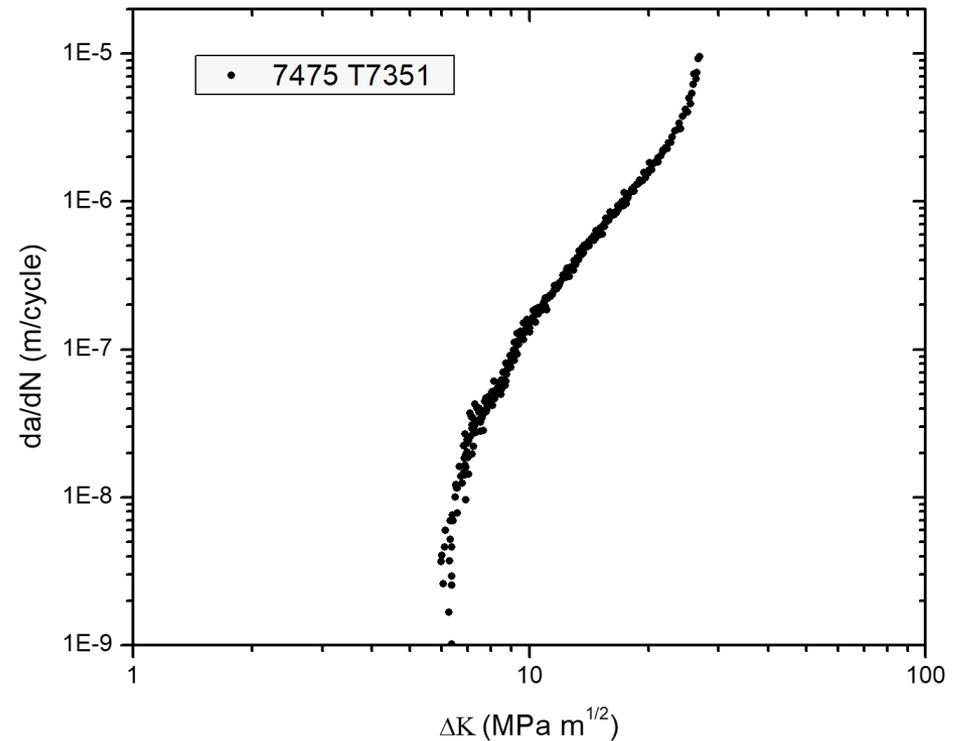


# MODELAGEM DAS TRÊS REGIÕES DA CURVA $da/dN$ vs. $\Delta K$

- Ensaios de propagação da trinca por fadiga:
  - Amplitude constante ( $\Delta K$  crescente)
  - $K$  decrescente para propagação “near-threshold”



*Pontos experimentais dos dois ensaios são superpostos em um único gráfico (ensaios realizados na EESC/USP)*



# MODELAGEM DAS TRÊS REGIÕES DA CURVA $da/dN$ vs. $\Delta K$

- Baseando-se na equação de Paris, diversos modelos têm sido propostos para descrever a curva sigmoideal completa.
- Um dos mais conhecidos e empregados na descrição do efeito de R é o modelo de Forman.
- O modelo de Forman modificado busca descrever as 3 regiões, englobando também o efeito de R.

MODELO DE FORMAN:

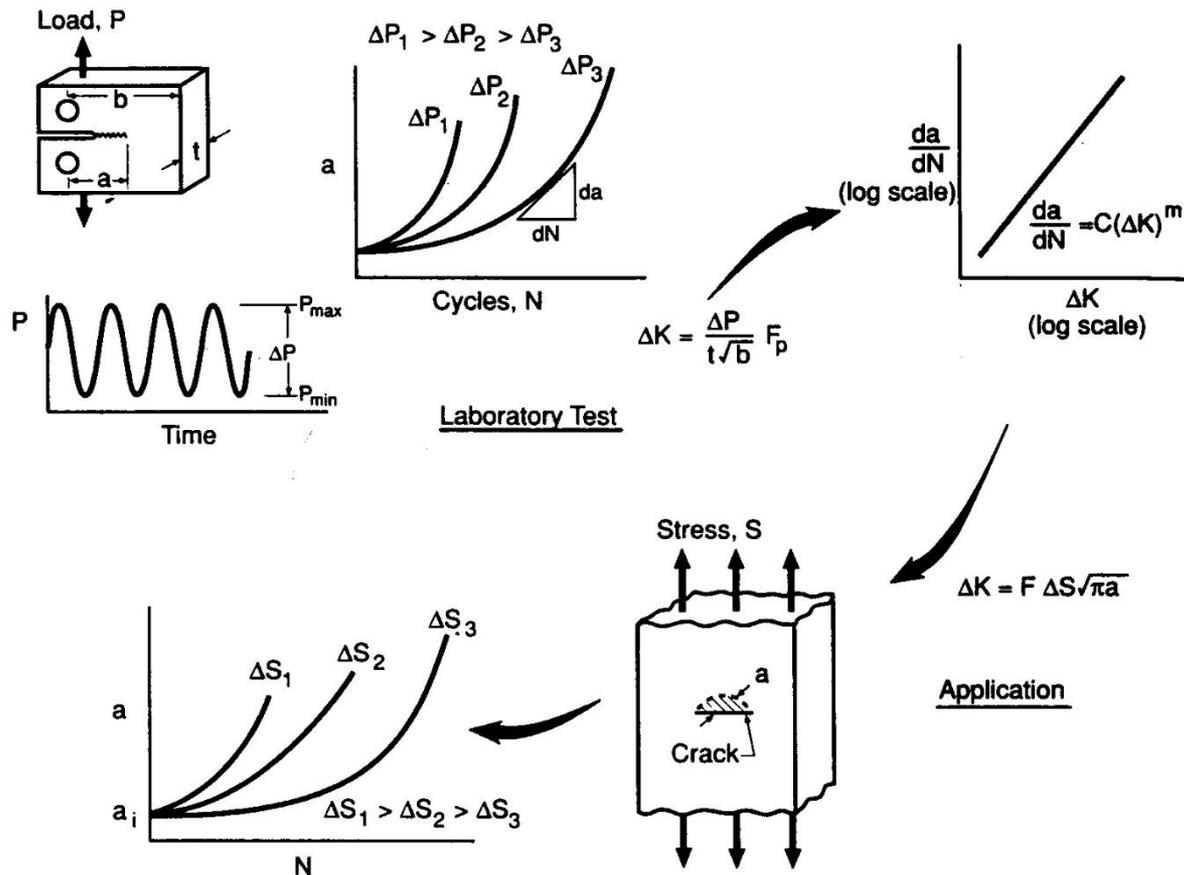
$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_c - \Delta K}$$

MODELO DE FORMAN MODIFICADO:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(1-R)^m \Delta K^n (\Delta K - \Delta K_{th})^p}{((1-R)K_c - \Delta K)^q}$$

Region I  
Region II  
Region III  
R-Effect

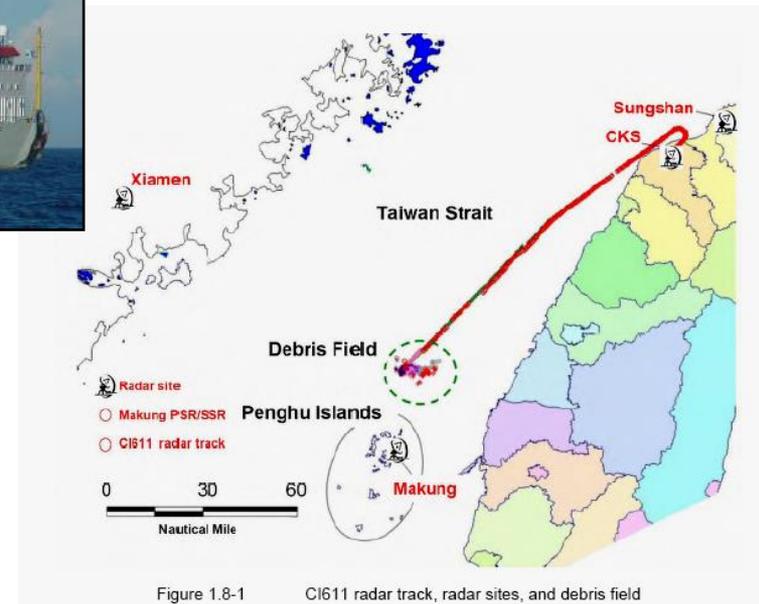
# RESUMO DO MÉTODO da/dN



# ACIDENTE – CHINA AIRLINES VÔO 611

## Descrição

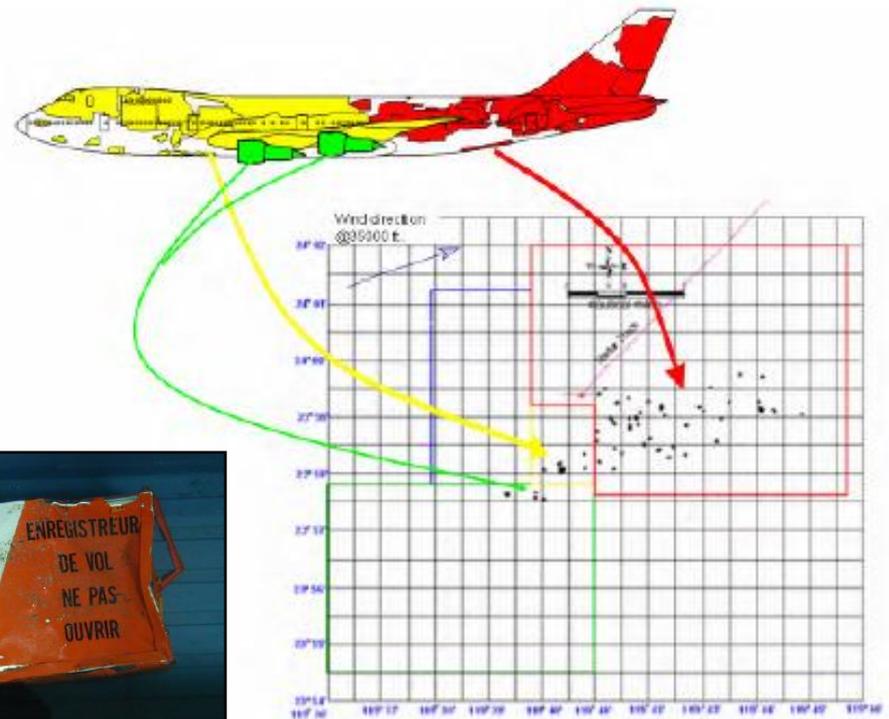
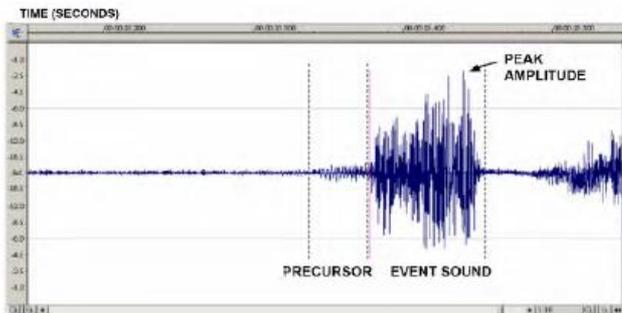
- Em 25/05/2002 um Boeing 747-200, fazendo a rota de Taipei a Hong Kong desapareceu sobre o estreito de Taiwan.
- O avião se desintegrou no ar, a 31.900 pés de altitude, matando 225 pessoas.
- Os destroços foram recuperados e permitiram determinar as causas do acidente.



# ACIDENTE – CHINA AIRLINES VÔO 611

## Análise

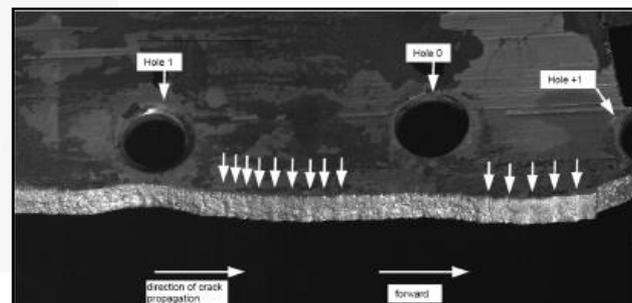
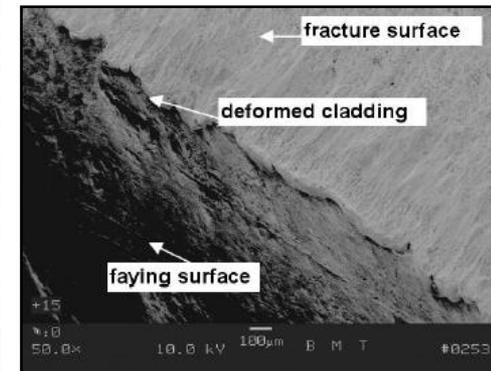
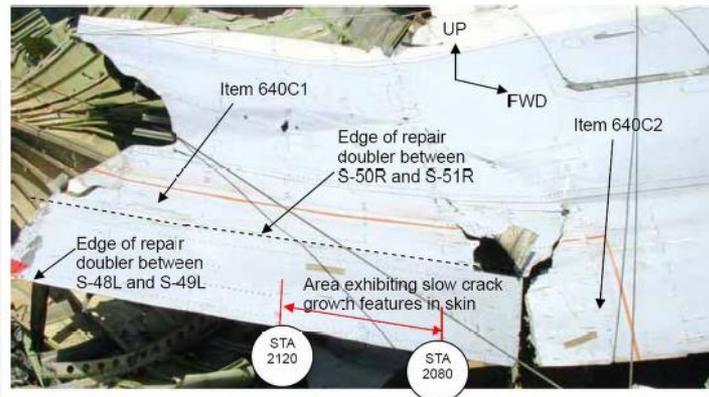
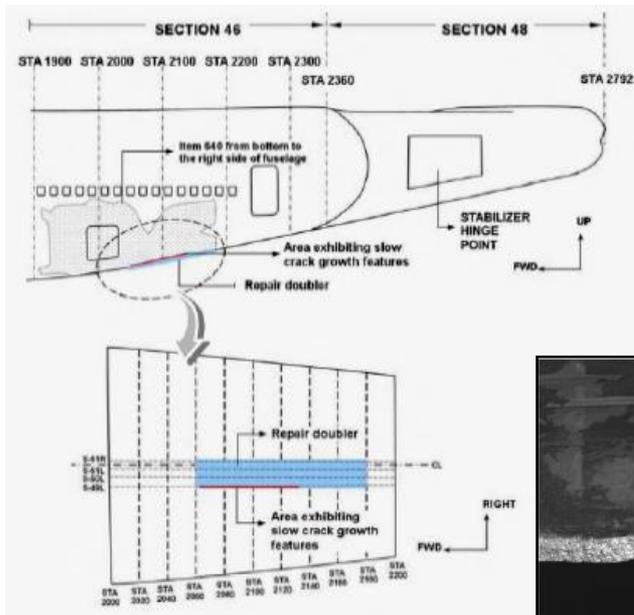
- A gravação de áudio da cabine mostrou que tudo estava normal até o instante do acidente, quando foi registrada uma assinatura de som característica de evento ocorrido longe da cabine, em área pressurizada do avião.



# ACIDENTE – CHINA AIRLINES VÔO 611

## Análise

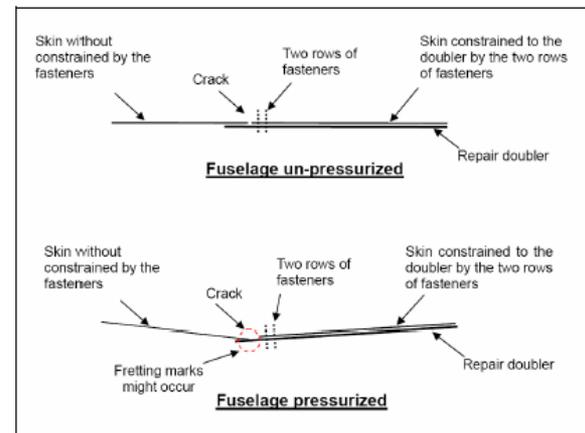
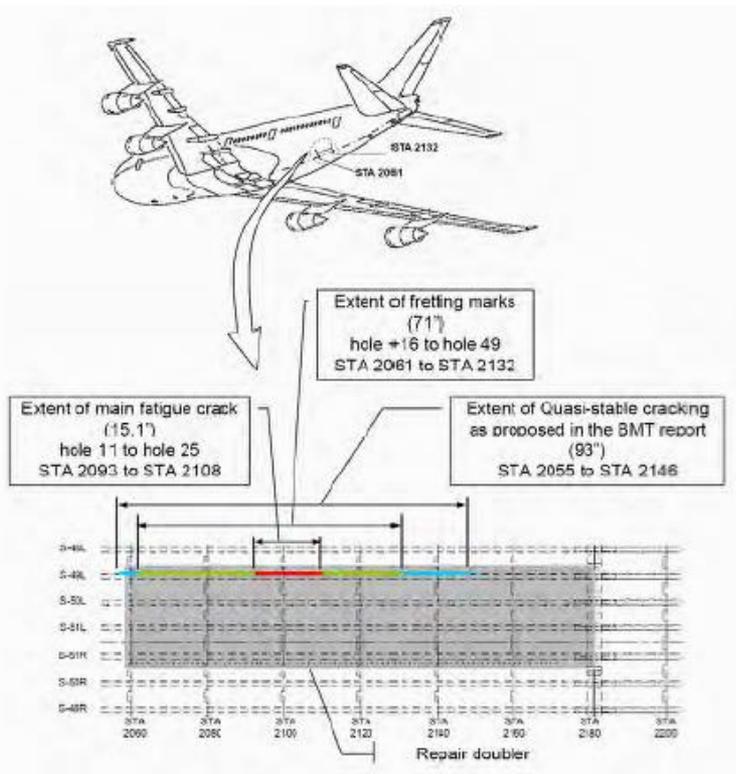
- Trincas de fadiga e marcas de *fretting* foram encontradas junto a um *doubler* (reparo) executado em maio de 1980, ou seja, 22 anos antes do acidente.
- O avião foi adquirido em 1979. No dia 7/2/1980, ao pousar em Hong Kong, ocorreu um *tail strike* (raspagem da traseira na pista), causando riscos profundos na fuselagem.



# ACIDENTE – CHINA AIRLINES VÔO 611

## Análise

- A trinca de fadiga iniciou num risco, próximo à extremidade do *doubler*, e não apresentava características típicas. As marcas de *fretting* foram devidas ao contato compressivo repetido, com pequeno deslizamento, entre o *doubler* e a chapa original.



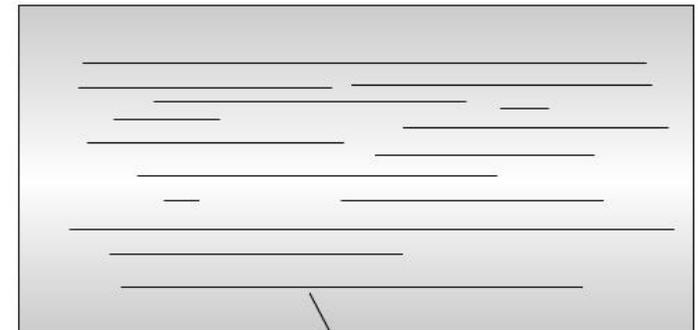
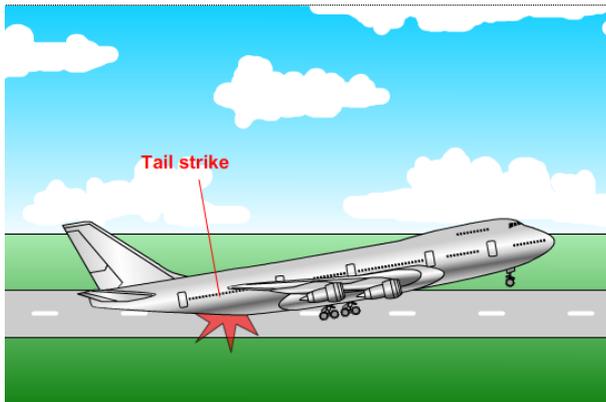
**Typical skin crack growth** →   
Grows from hole along skin (hole-to-hole)  
More rapid with increasing length until transitioning to ductile fracture

**Item 640 skin crack growth** →   
Grows from surface and progresses through thickness  
Reaches transition length prior to any forward-art typical fatigue growth

# ACIDENTE – CHINA AIRLINES VÔO 611

## Análise

- Os riscos do *tail strike* não foram totalmente removidos antes da aplicação do *doubler* e os rebites do reparo estavam dentro da área riscada.



Scratches are blended, but not completely removed

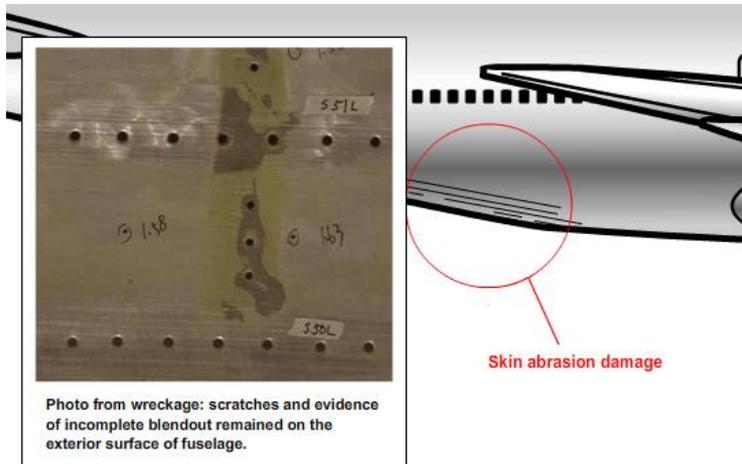
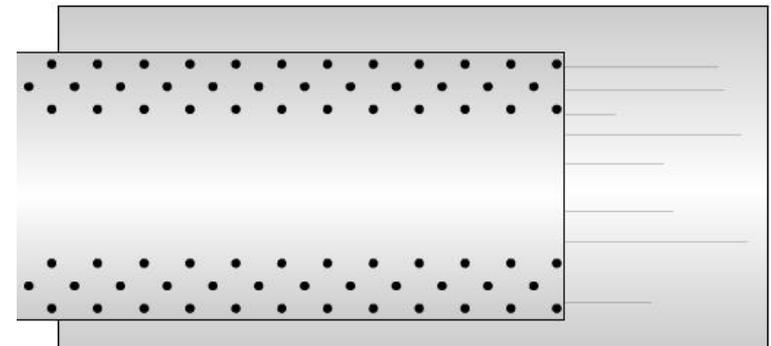


Photo from wreckage: scratches and evidence of incomplete blendout remained on the exterior surface of fuselage.

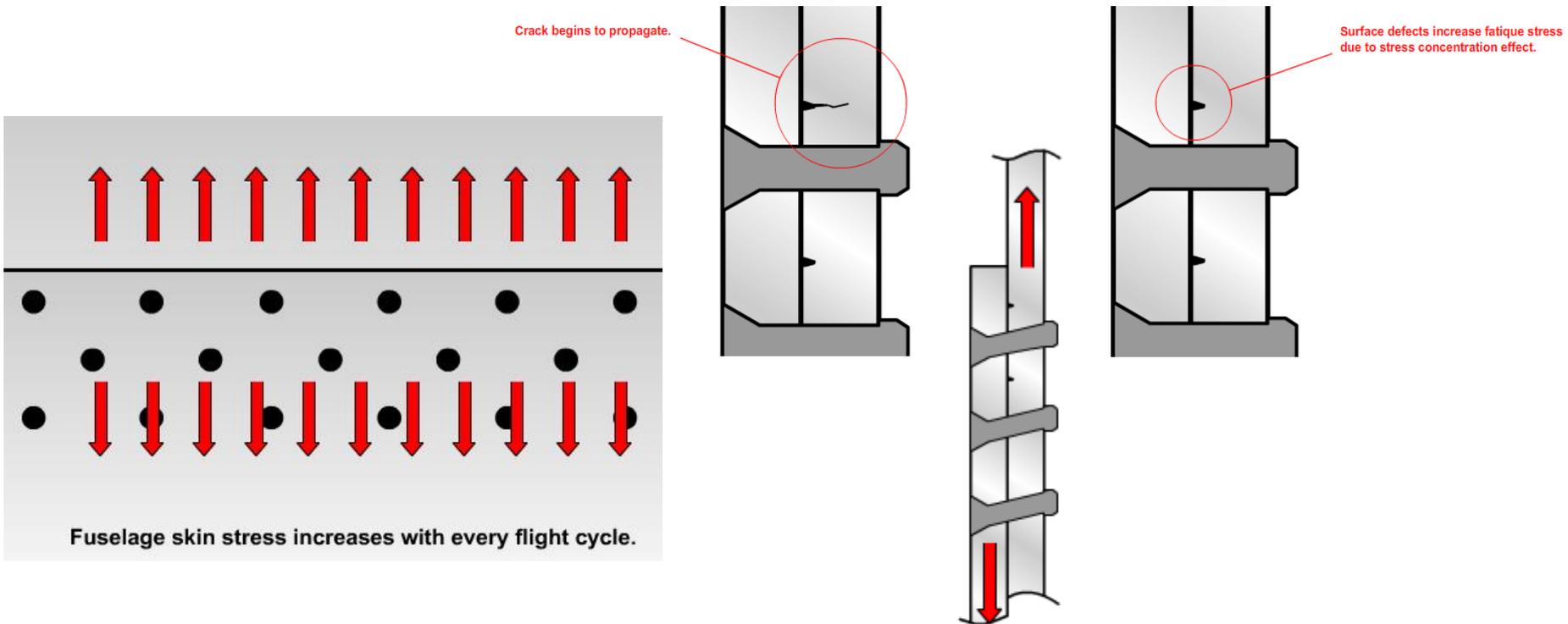


A doubler is installed over the blended scratches

# ACIDENTE – CHINA AIRLINES VÔO 611

## Conclusão

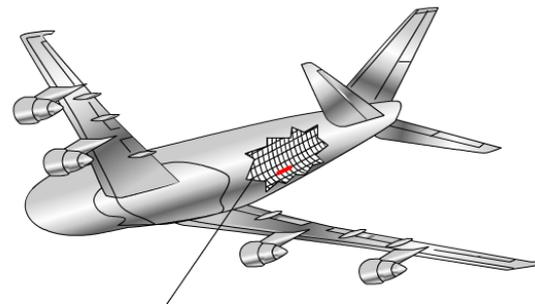
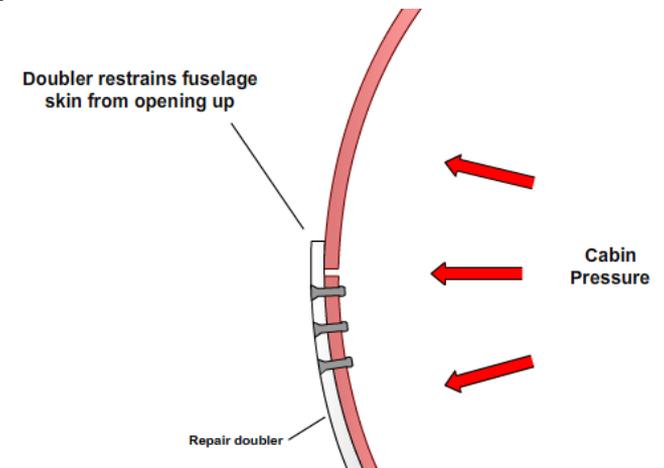
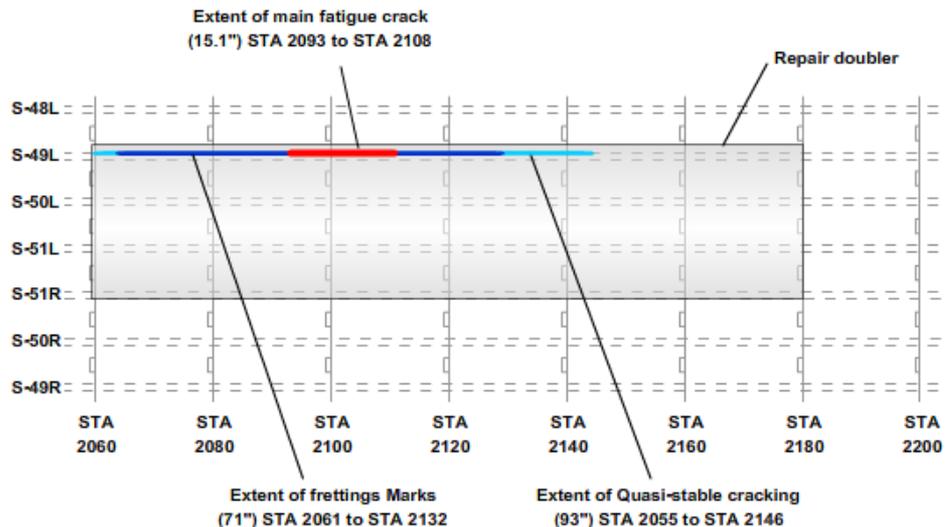
- O *doubler* não cobriu toda a região danificada no *tail strike*. As tensões devidas aos ciclos de pressão/descompressão não foram aliviadas pelo *doubler*. Os riscos remanescentes atuaram como concentradores de tensão.



# ACIDENTE – CHINA AIRLINES VÔO 611

## Conclusão

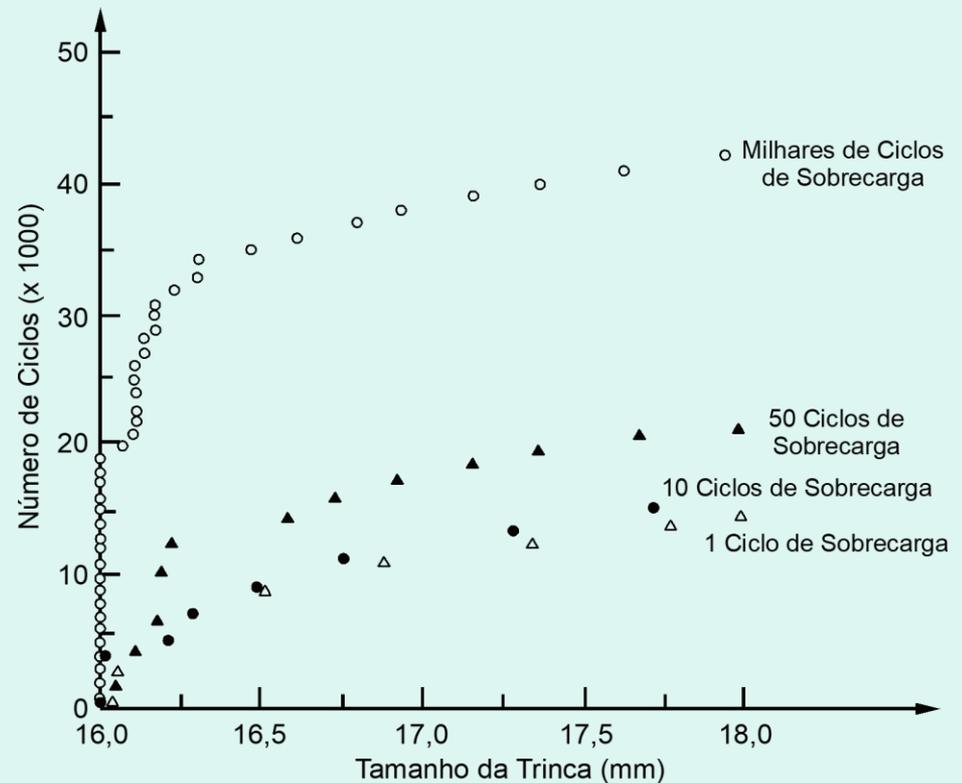
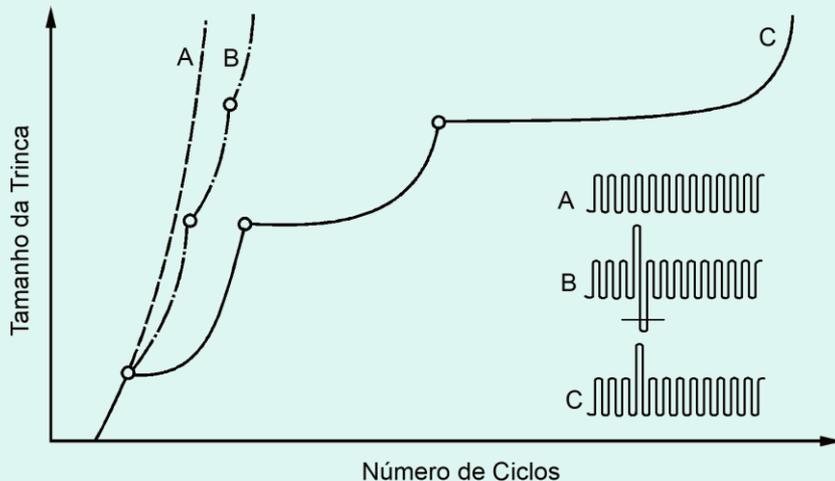
- O atrito (*fretting*) entre o *doubler* e a chapa contribuiu para impedir que a trinca de fadiga fosse exposta. Dano cresceu indetectado por anos até a falha catastrófica.



# CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE VARIÁVEL

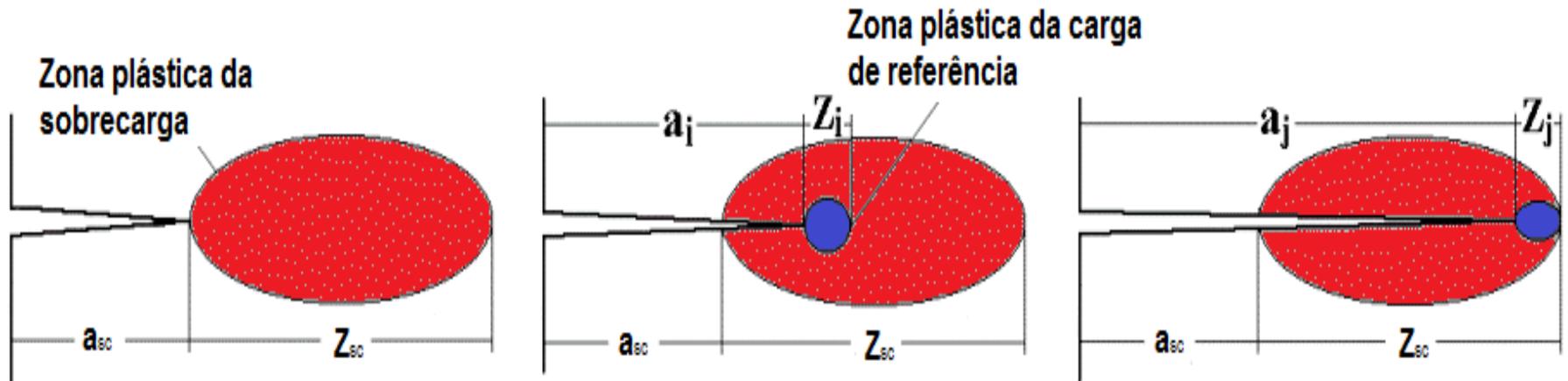
## Efeitos de Interação

- Retardo na taxa de propagação após aplicação de sobrecargas
- Aceleração após a aplicação de subcargas
- Efeitos combinados



# CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE VARIÁVEL

## Concepção do retardo baseado na zona plástica de sobrecarga

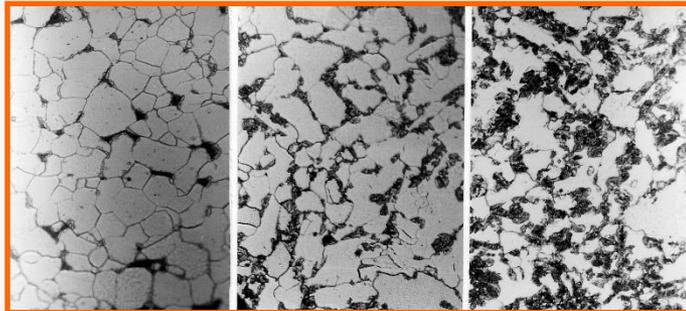


(MEGGIOLARO; CASTRO, 2002)

# CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE VARIÁVEL

## Exemplo: Retardo na propagação da trinca em aços bifásicos

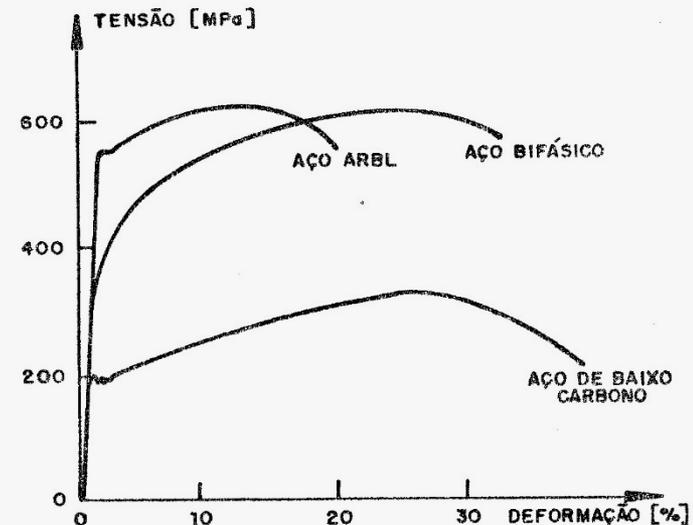
- Aços de baixo carbono; microestrutura contém basicamente ferrita e martensita.
- Ensaios de propagação da trinca em amplitude constante e variável.



NT750

NT800

NT850



Material	Martensita (% vol.)	Martensita (HV)	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	RA (%)
NT750	23	551	387	593	58
NT800	30	454	400	615	61
NT850	51	331	364	547	68

# CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE VARIÁVEL

## Exemplo: Retardo na propagação da trinca em aços bifásicos (cont.)

- Ensaios de propagação da trinca com aplicação de ciclos de sobrecarga
- Forma de estimar o retardo (extensão e duração)

$$\frac{K_{m\acute{a}x.sc}}{K_{m\acute{a}x.cr}} = 1,33$$

