

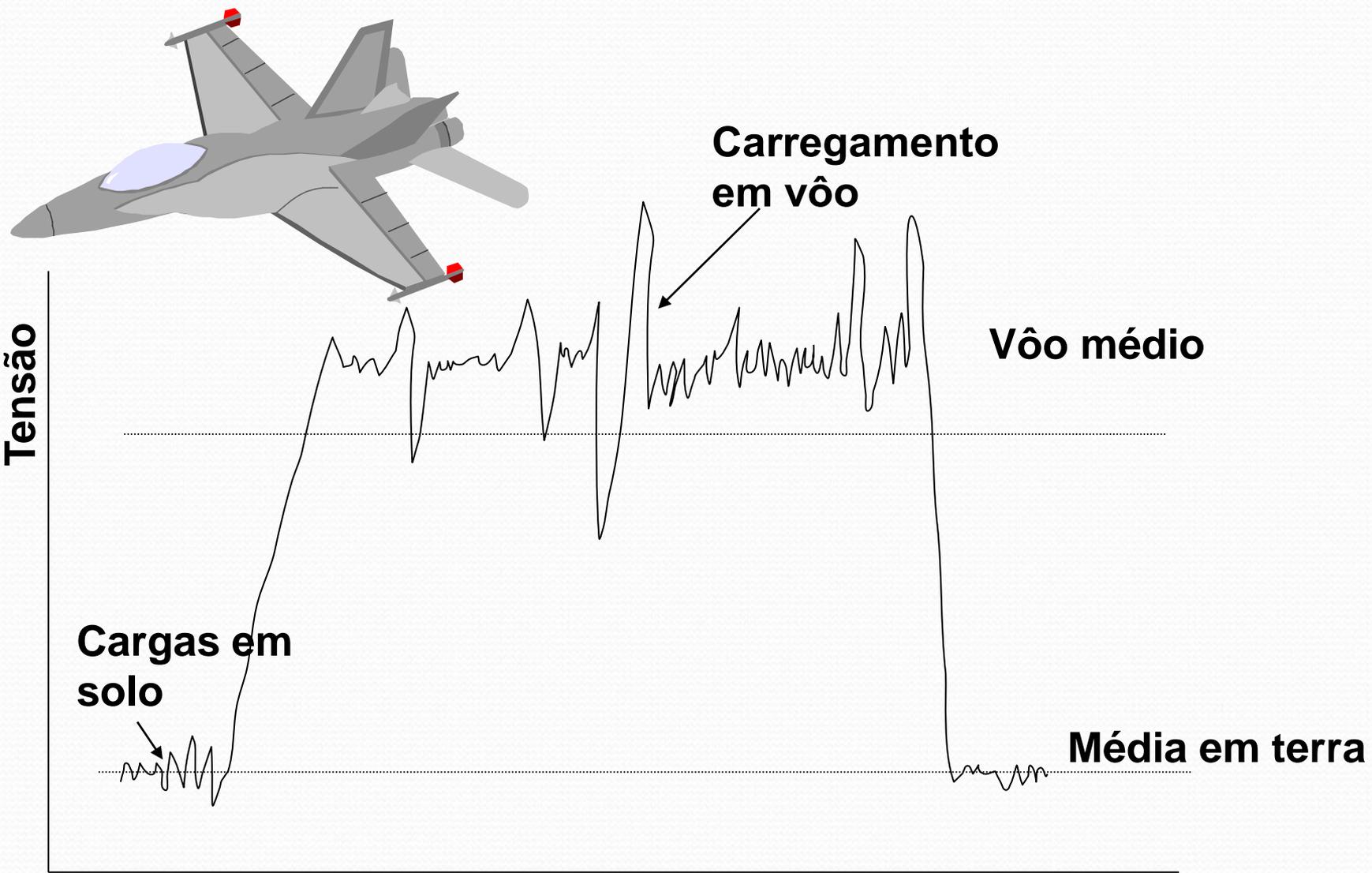


**FADIGA**

# FADIGA

- **Definição:** Fadiga mecânica é a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico;
- **95%** das falhas envolve fadiga;
- **Exemplos:** automóveis nas ruas, aviões (principalmente nas asas) no ar, navios em alto mar, constantemente em choque com as ondas, reatores nucleares etc...(perceba então a importância do fenômeno de fadiga).

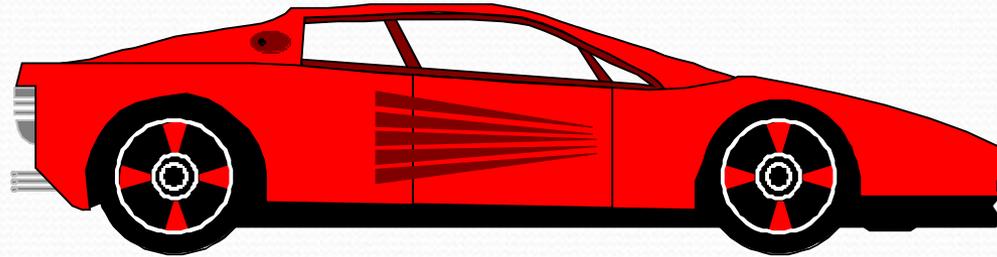
# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



**Carregamento variável e assimétrico**

Tempo

# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



Carga

Típica história de tempo x carga para o eixo da roda



Tempo

Carregamento variável e assimétrico

Mais de 90% das falhas: fadiga ou combinada à fadiga

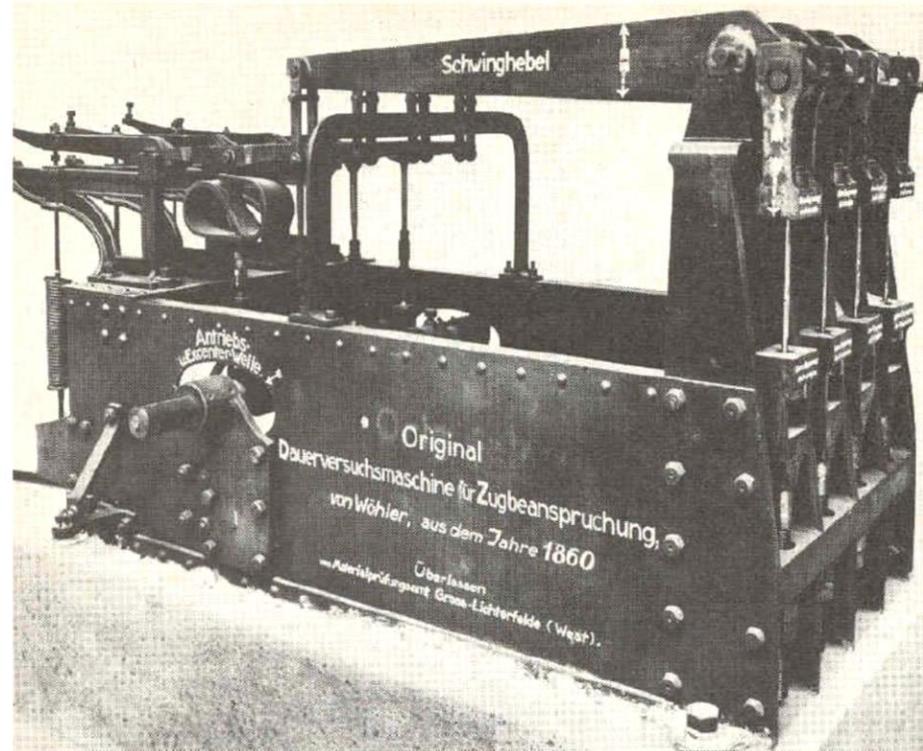
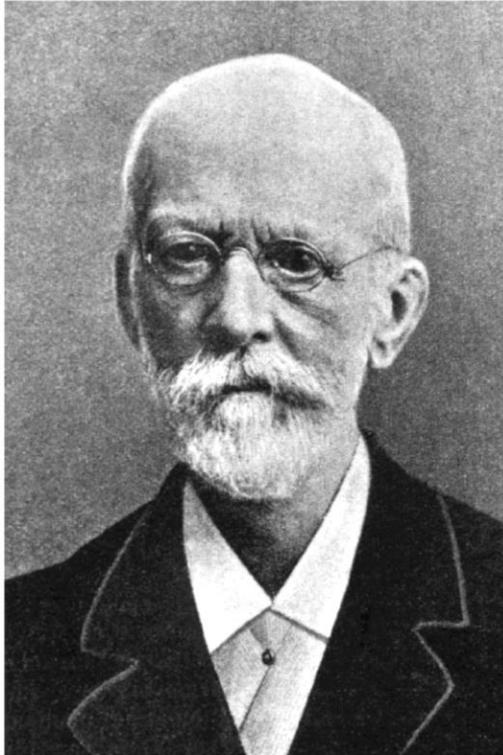
- **Fadiga de alto ciclo (controlado por tensão);**
- **Fadiga de baixo ciclo (controlada por deformação);**
- **Propagação** de trinca por fadiga;
- Avaliação da **sensibilidade ao entalhe;**
- **Fadiga por fretting;**
- **Fadiga multiaxial;**
- **Fadiga térmica: isotérmica e termomecânica;**
- **Fadiga em meios agressivos: iniciação e propagação;**
- **Fadiga-fluência.**

# HISTÓRICO DA FADIGA

**ACIDENTE DE TREM ENTRE VERSAILLES E PARIS-1842**  
A origem deste acidente foi a fratura por fadiga do eixo frontal da locomotiva.



○ August Wöhler 1819 – 1914



Sistema de ensaios de fadiga axial para quatro corpos de prova (Wöhler, 1860)

**August Wöhler desenvolveu estudos em fadiga entre 1852 a 1869**

# CASOS HISTÓRICOS

## Jatos Comet



(Prof.Dr. Claudio Ruggieri)

# **Jatos Comet**



**Falha Iniciada a Partir de Furo de Rebite  
Próximo à Janela**

(Prof.Dr. Claudio Ruggieri)

# COMET-TRINCAS QUE LEVARAM À FRATURA.

A análise de falhas :

A fratura ocorreu devido à compressão e descompressão, no pouso e decolagem, causando a nucleação de trincas de fadiga em pontos de concentração de tensão, próximo às extremidades das escotilhas retangulares. A cabine era pressurizada com pressões duas vezes maiores que a dos outros aviões (56,9kPa)

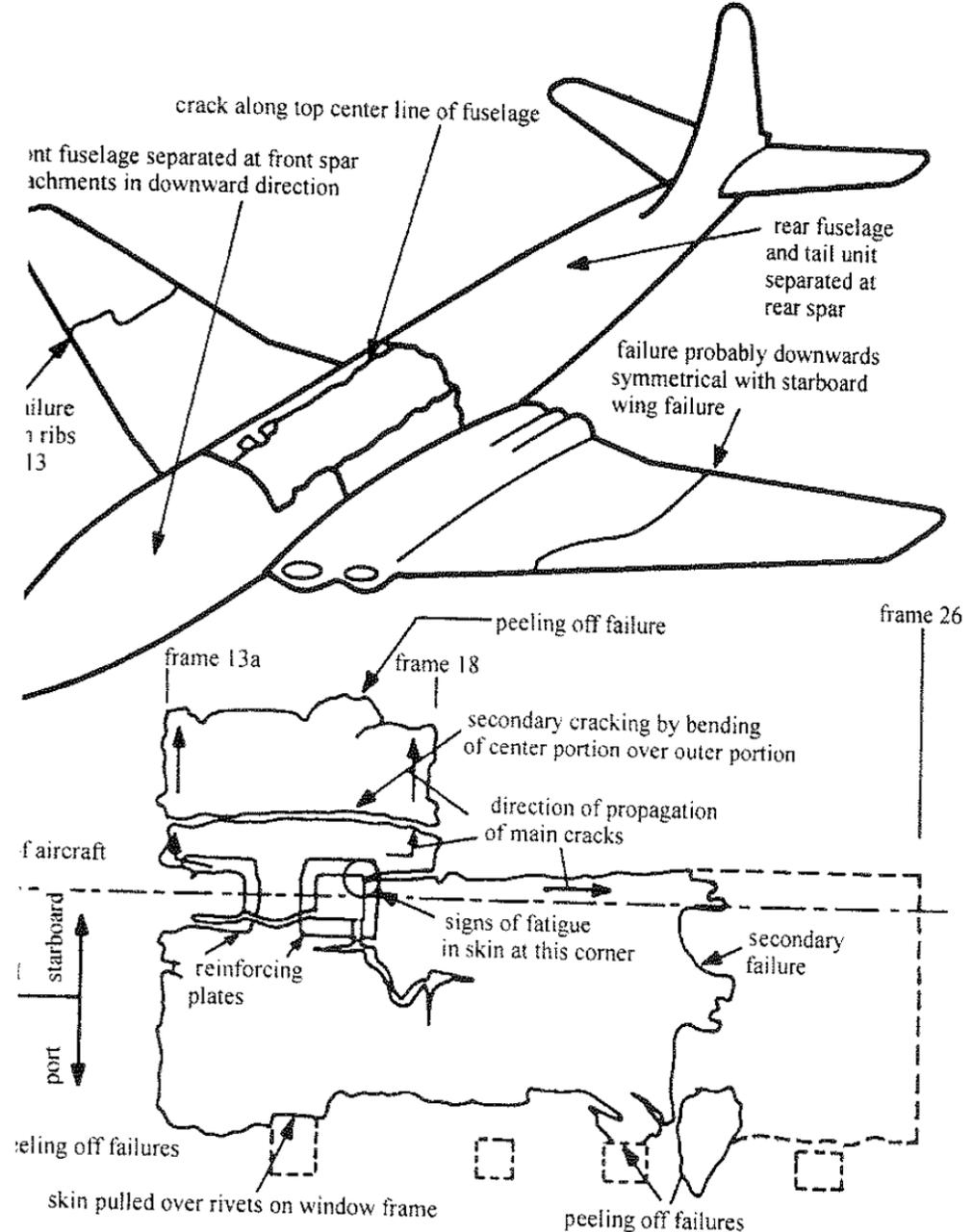
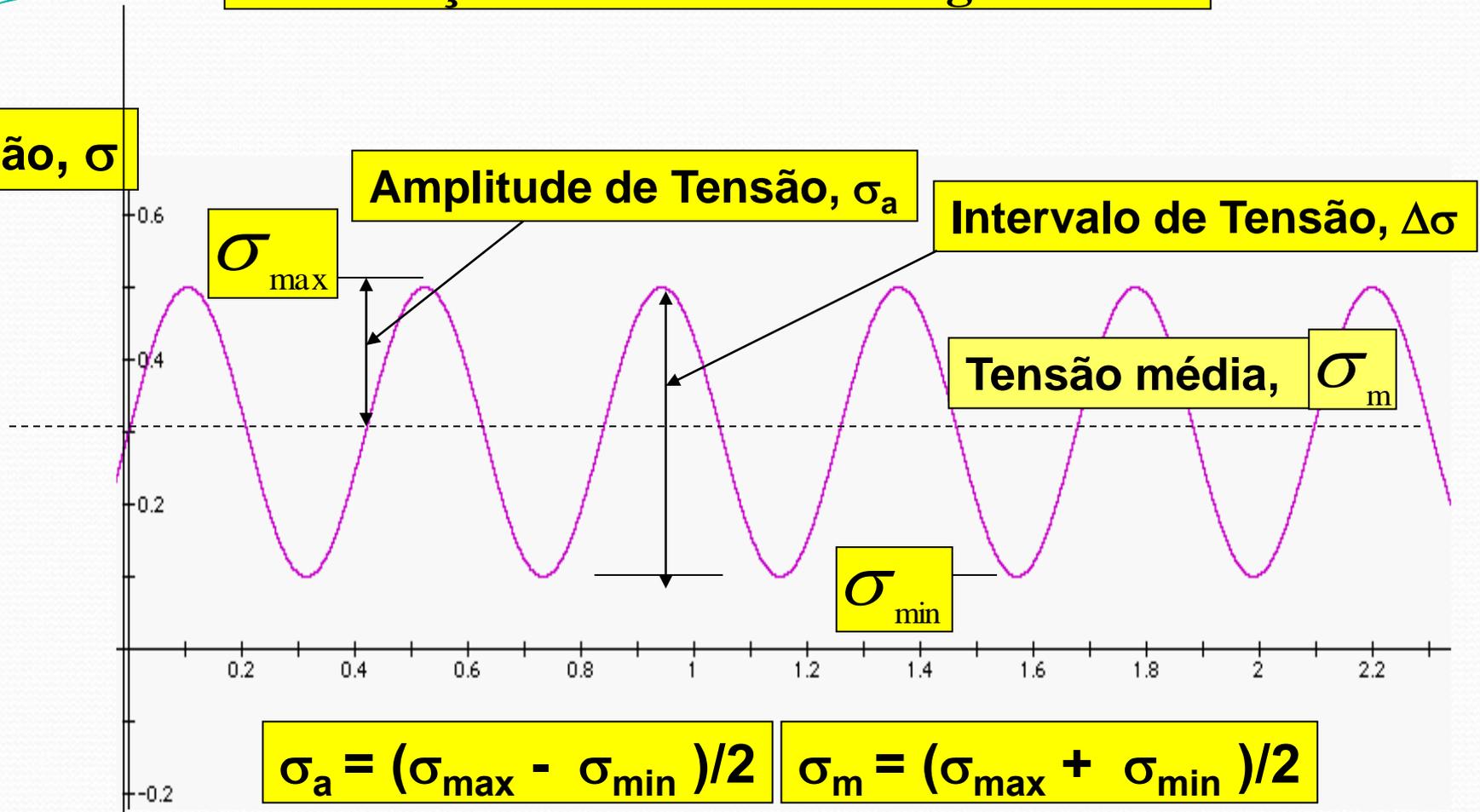


Fig. 1.1. Schematic diagram illustrating the location of fatigue cracks in a failed Comet airplane. (After Petroski, 1996.)

# DEFINIÇÕES E CONCEITOS

## Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão,  $\sigma$



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

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

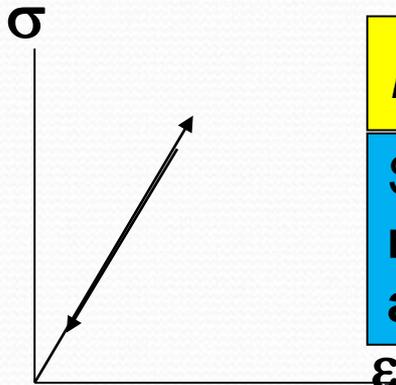
RAZÃO DE AMPLITUDE

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$

**Análise Clássica  
da Fadiga**

***Metodologia Tensão-Vida***

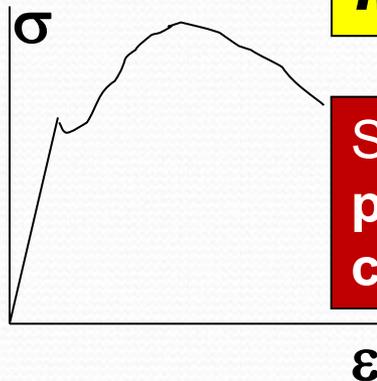
***Metodologia Def. - Vida***



***Metodologia Tensão-Vida***

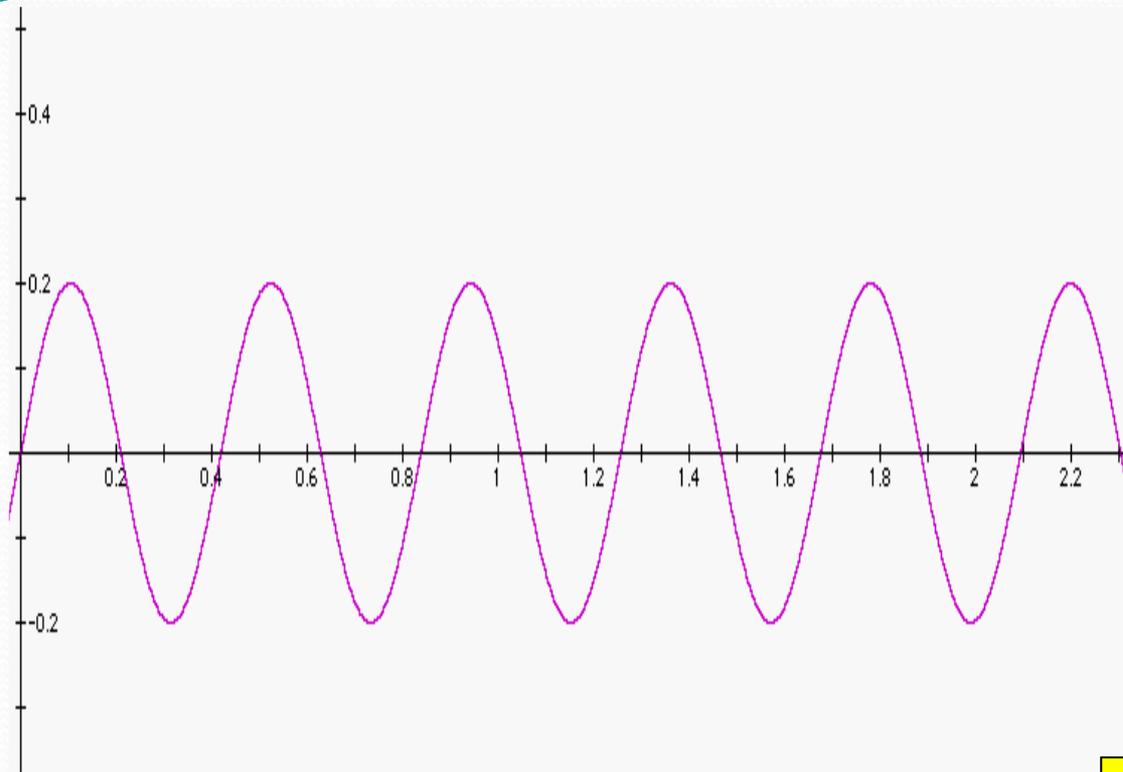
Se as tensões forem sempre dentro do regime elástico (abaixo do LE): fadiga de alto ciclo ou controlada pela tensão

***Metodologia Def. - Vida***



Se as tensões levarem a deformações plásticas (acima do LE): fadiga de baixo ciclo ou controlada pela deformação.

# Carregamentos completamente reversos



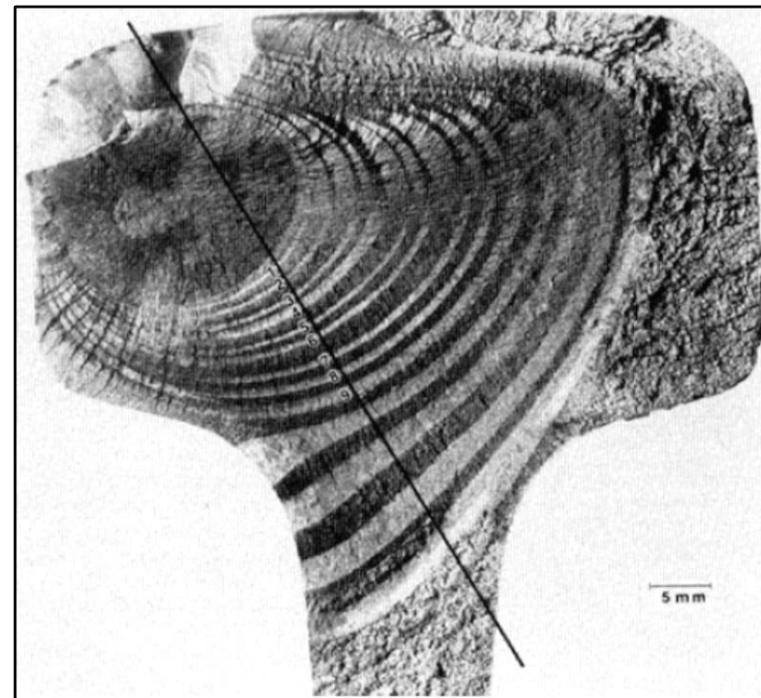
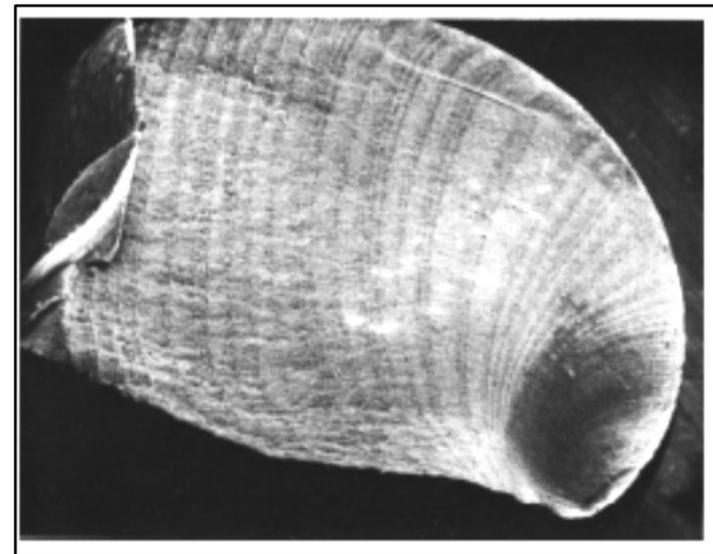
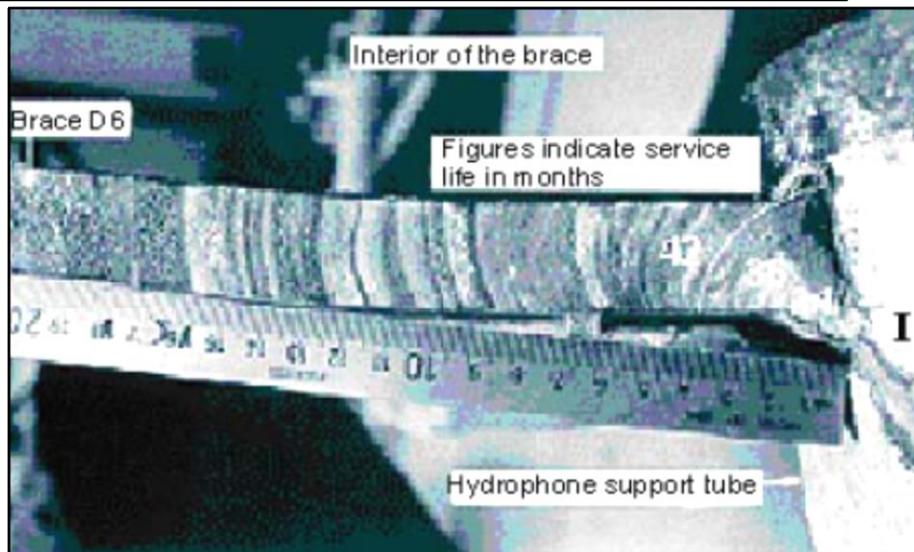
Tensão Média,  $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2 = 0$

Razão de Tensões,  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$

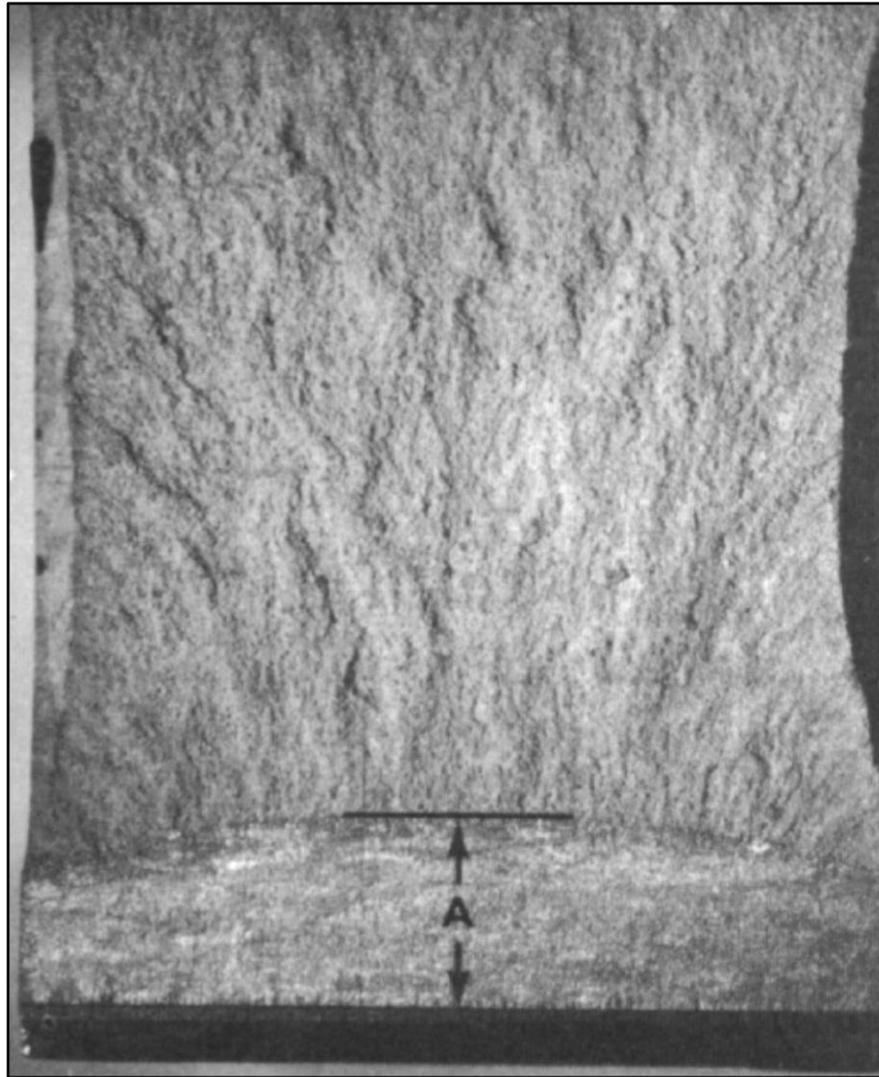
Razão de Amplitudes,  $A = \sigma_a / \sigma_m = \infty$

**UTILIZADO NAS  
HOMOLOGAÇÕES  
DE PEÇAS  
AUTOMOTIVAS**

# FADIGA- MARCAS DE PRAIA



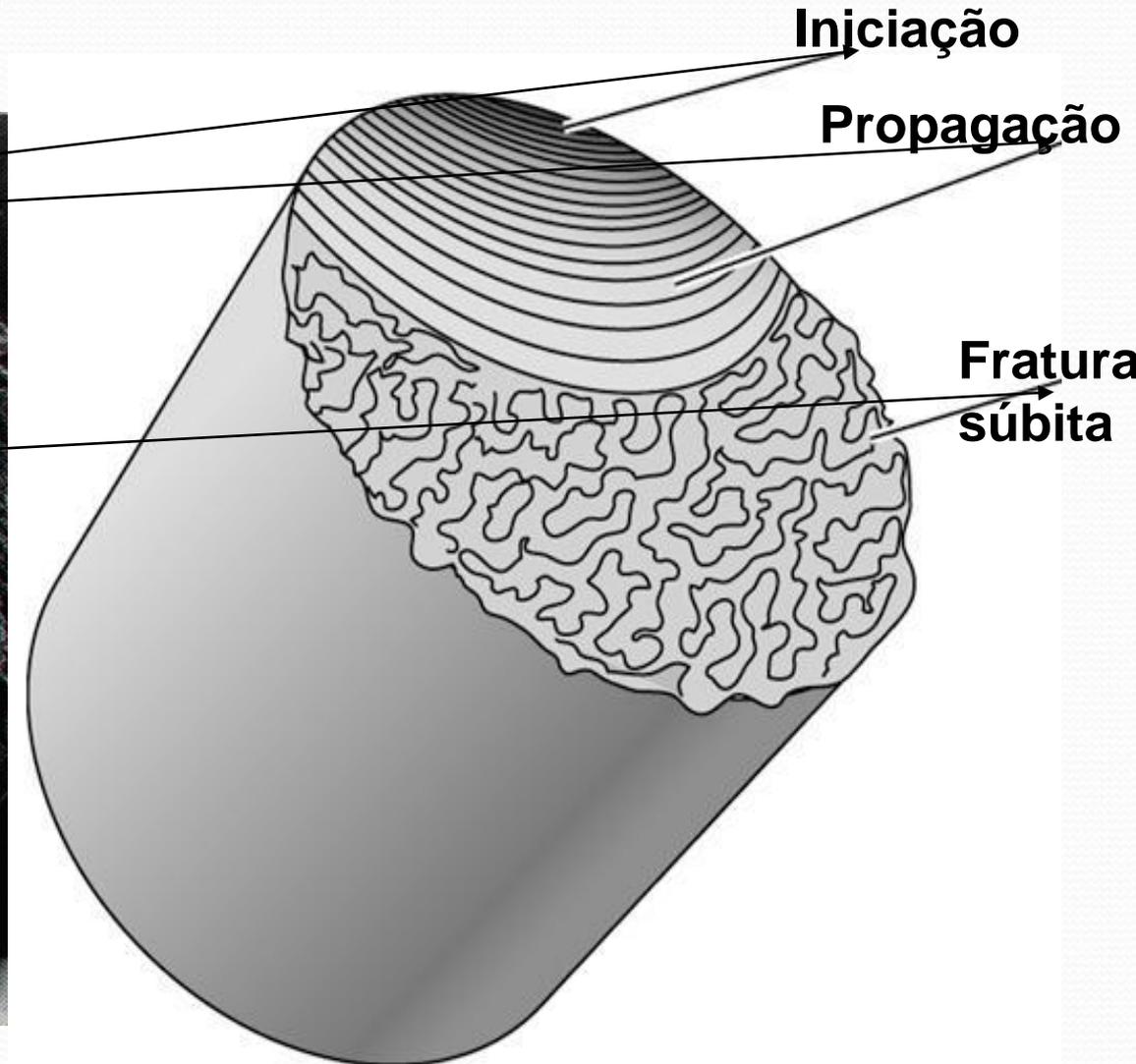
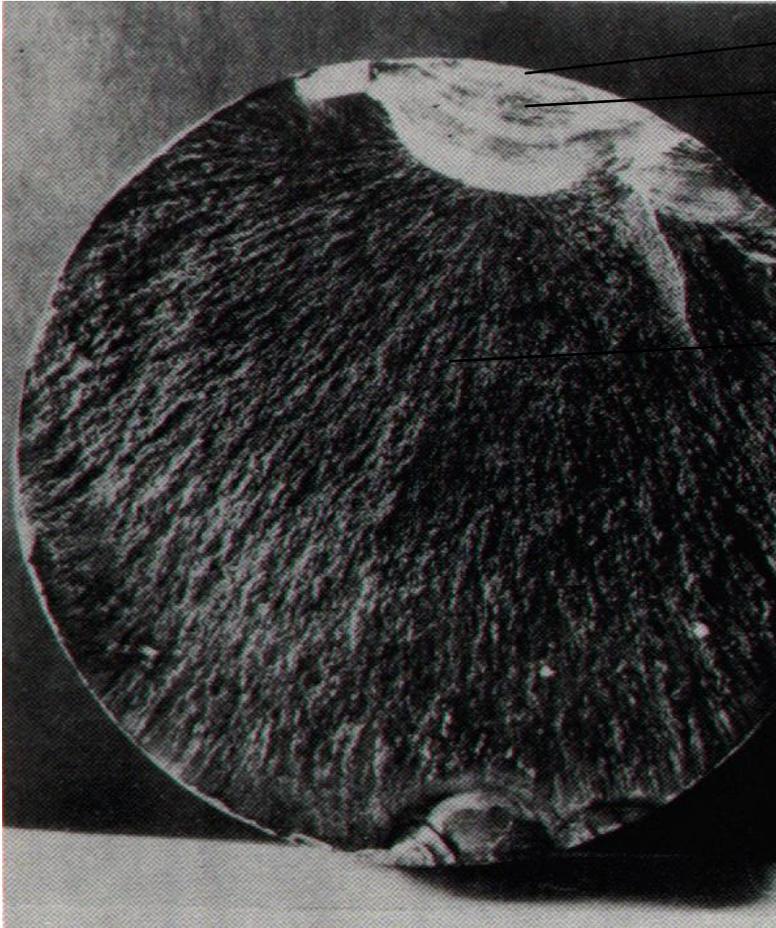
# FADIGA- MARCAS DE PRAIA



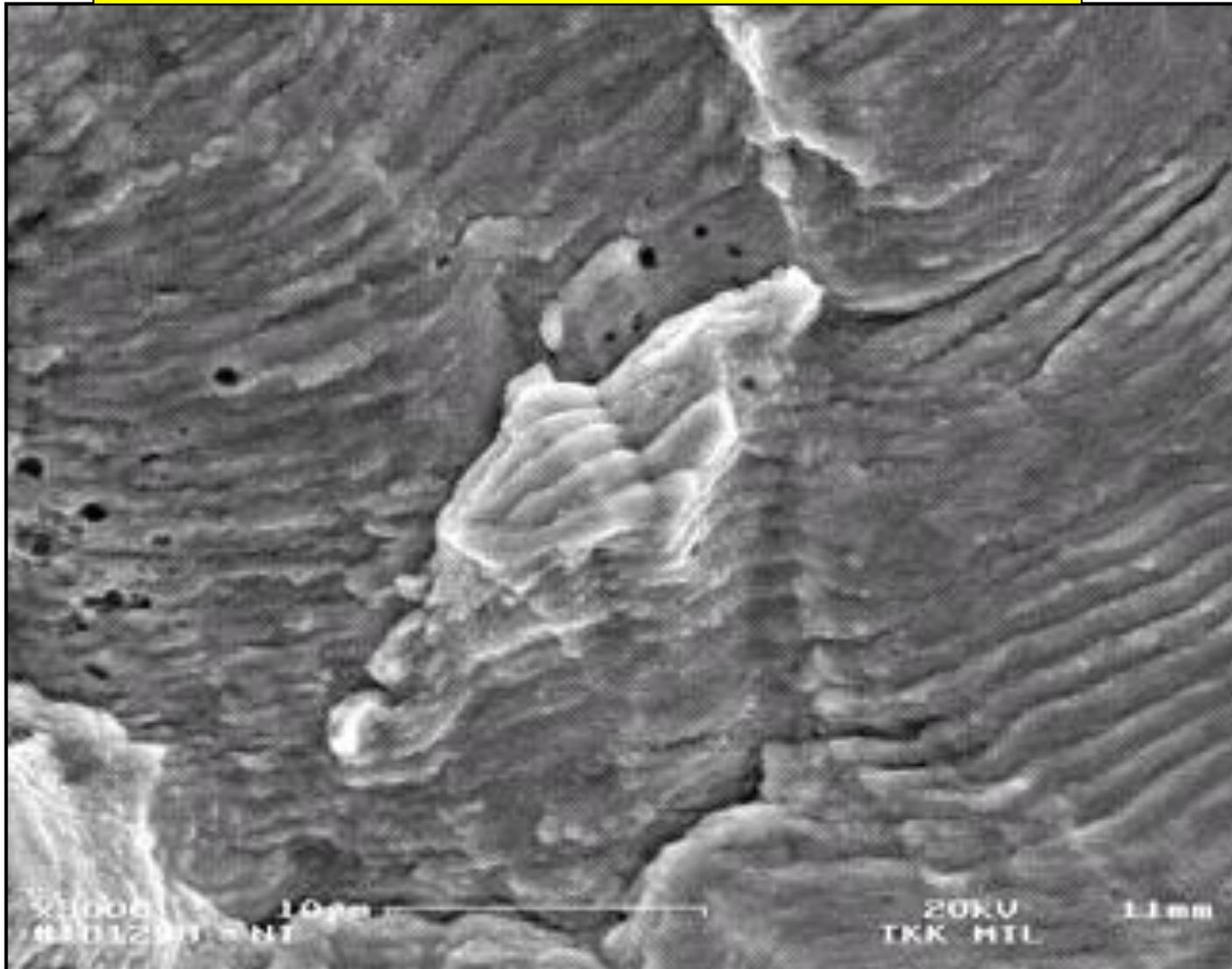
**SEM  
MARCAS  
DE PRAIA**

8. Trinca produzida por fadiga em  
c.p. de Mecânica da Fratura

# Fraturas de Fadiga e Características Macroscópicas



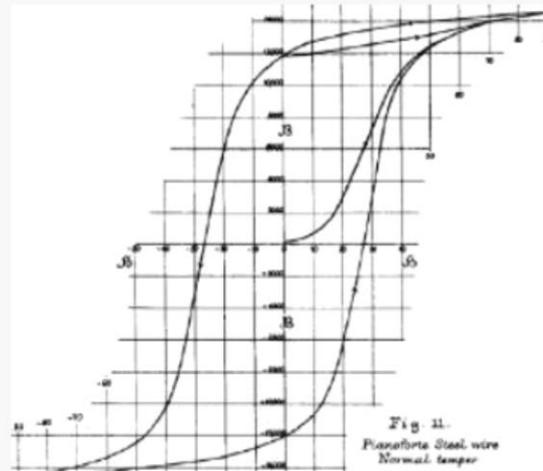
# ESTRIAS-MICROSCÓPICAS



**ESTRIAS – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE  
VARREDURA**

# OS PIONEIROS

## James Alfred Ewing (1855-1935)



*J. A. Ewing and J. C. W. Hoopfer*

*Phil. Trans., A, vol. 200, Plate 5.*



Fig. 9. Specimen after 1000 revolutions of a stress of 17.4 tons per sq. inch.  $\times 1000$ .



Fig. 10. Same after 1000 revolutions.  $\times 1000$ .

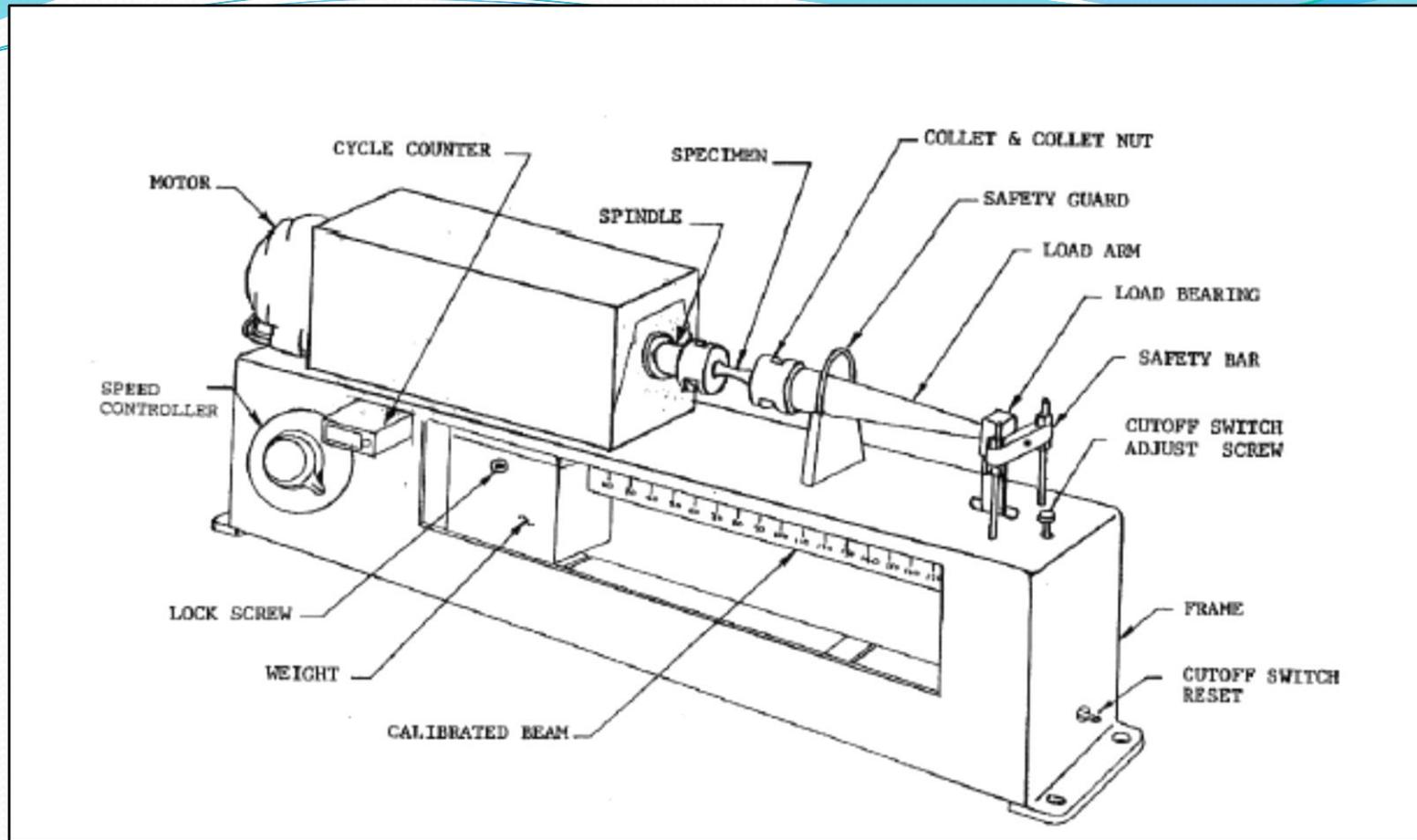


Fig. 11. Same after 10,000 revolutions.  $\times 1000$ .



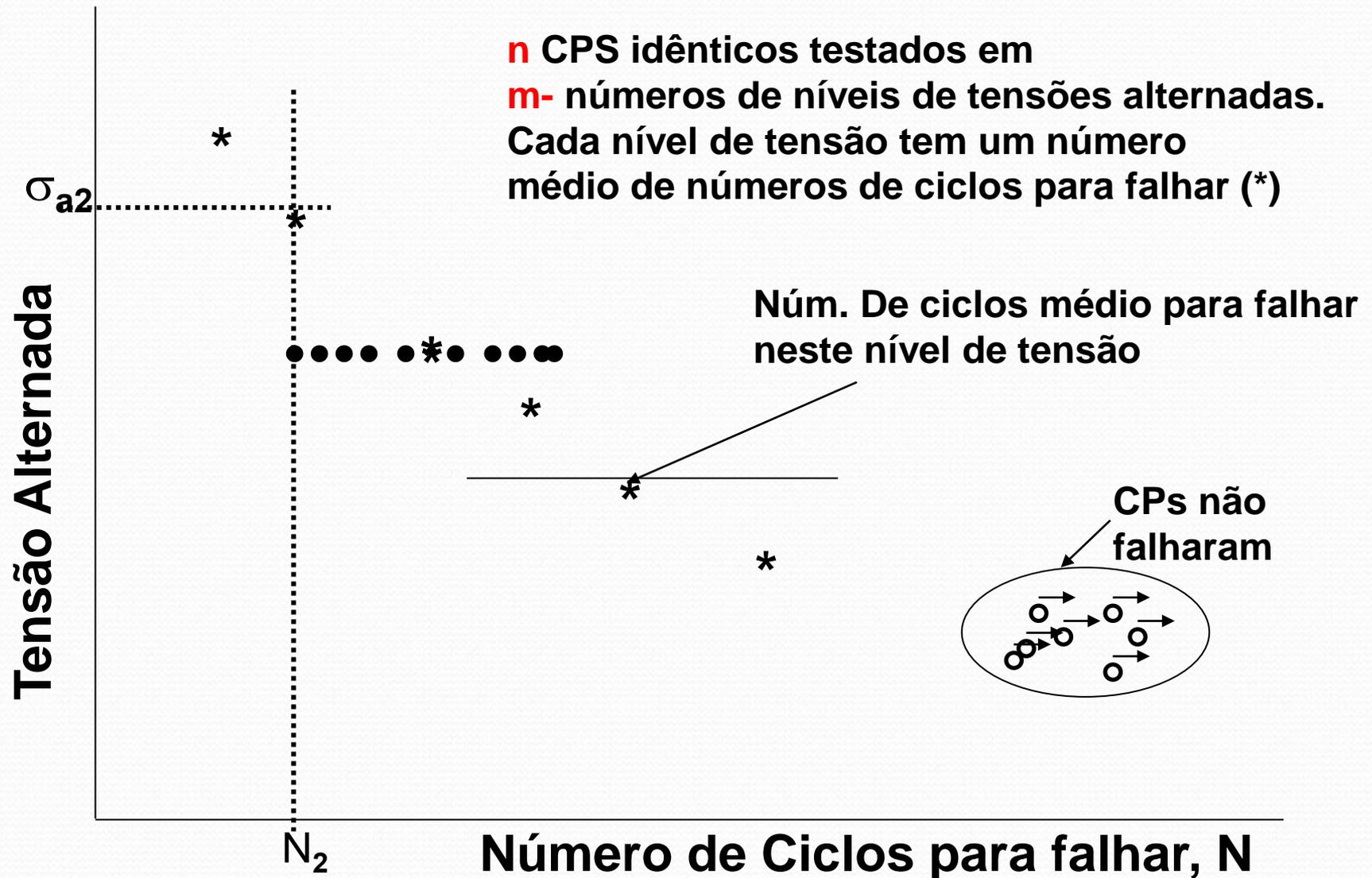
Fig. 12. Same after 40,000 revolutions.  $\times 1000$ .

# ENSAIO DE FADIGA

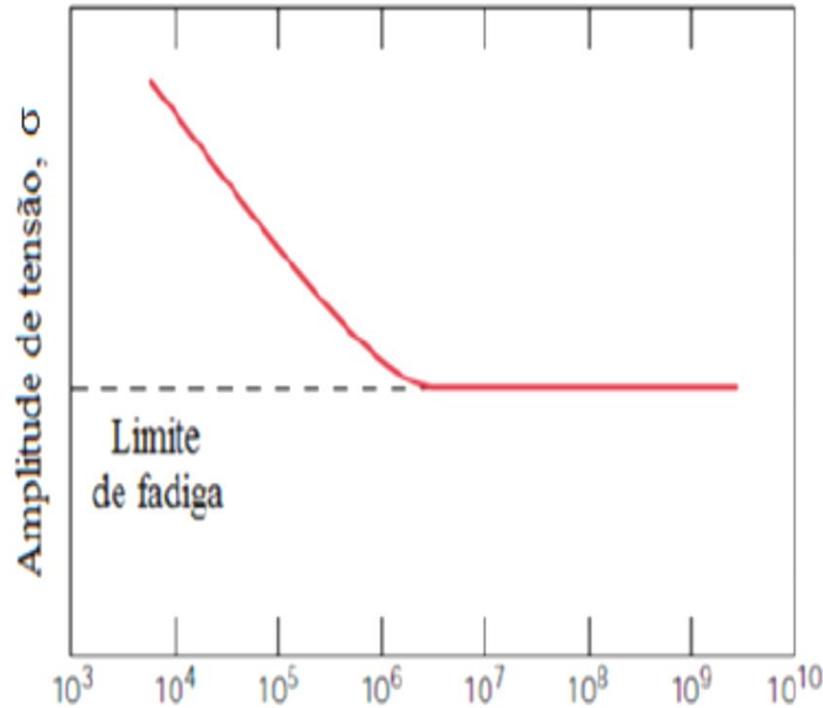


•Wöhler (1852) – Conclui, entre outras que o fenômeno da fadiga de alto ciclo é dependente de condições macroscópicas e microscópicas o que leva a uma dispersão estatística, aleatória.

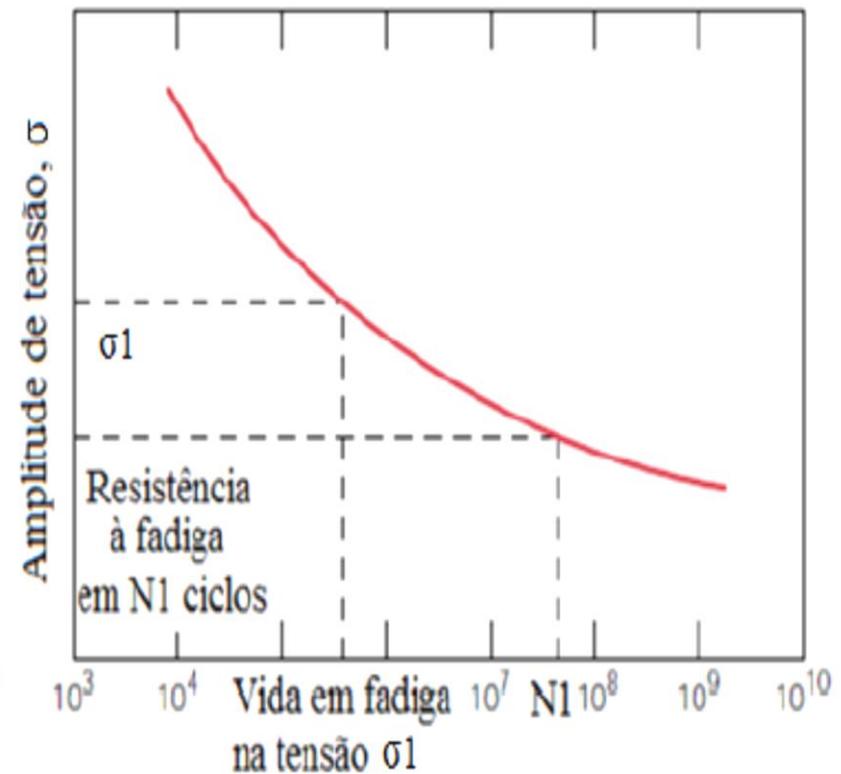
# Dados S-N - Espalhamento nos Resultados experimentais



# CURVA S-N APÓS TRATAMENTO ESTATÍSTICO



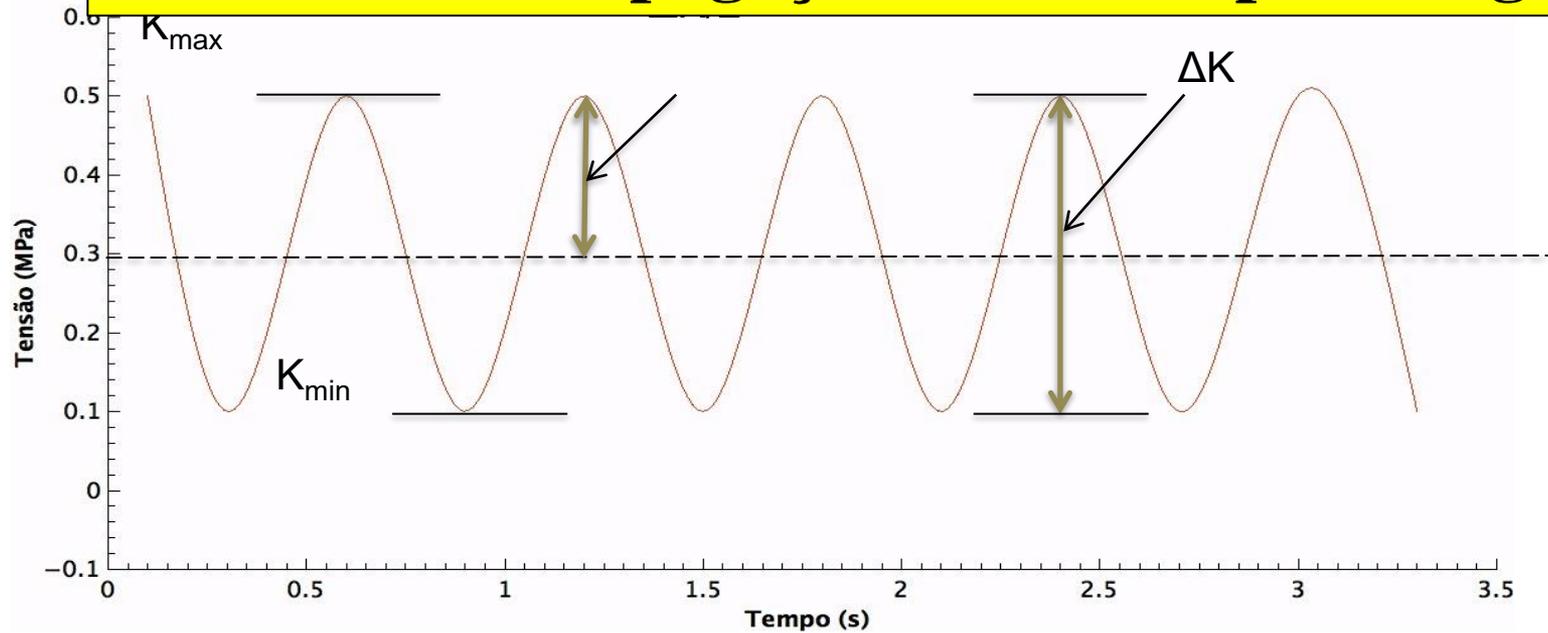
(a) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)



(b) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)

No caso de materiais policristalinos, a ocorrência deste patamar foi relacionada à parada (*arrest*) de trincas logo após a nucleação, ao encontrarem obstáculos microestruturais como contornos de grãos [Klesnil, 1992].

# Ensaio de Propagação de trinca por fadiga

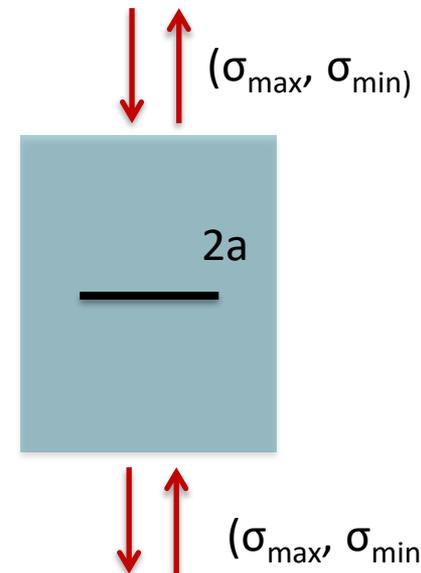


$$K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi * a}$$

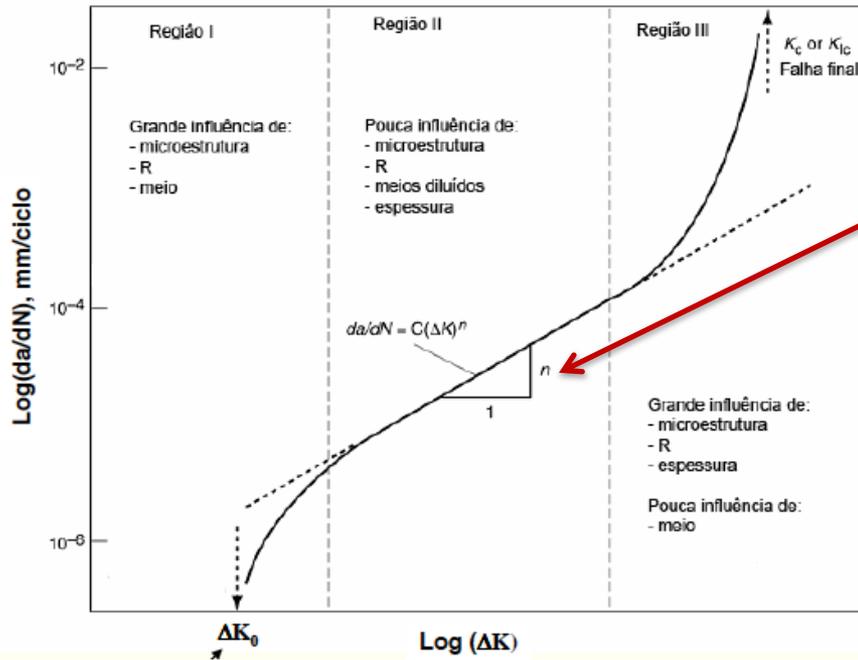
$$K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi * a}$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi * a}$$

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



A taxa de propagação de trinca foi equacionada pela primeira vez por Paul Paris, em 1960, que deu origem a Equação de Paris.



$$\frac{da}{dN} = C * (DK)^m$$

Onde **C** e **m** são constantes do material.

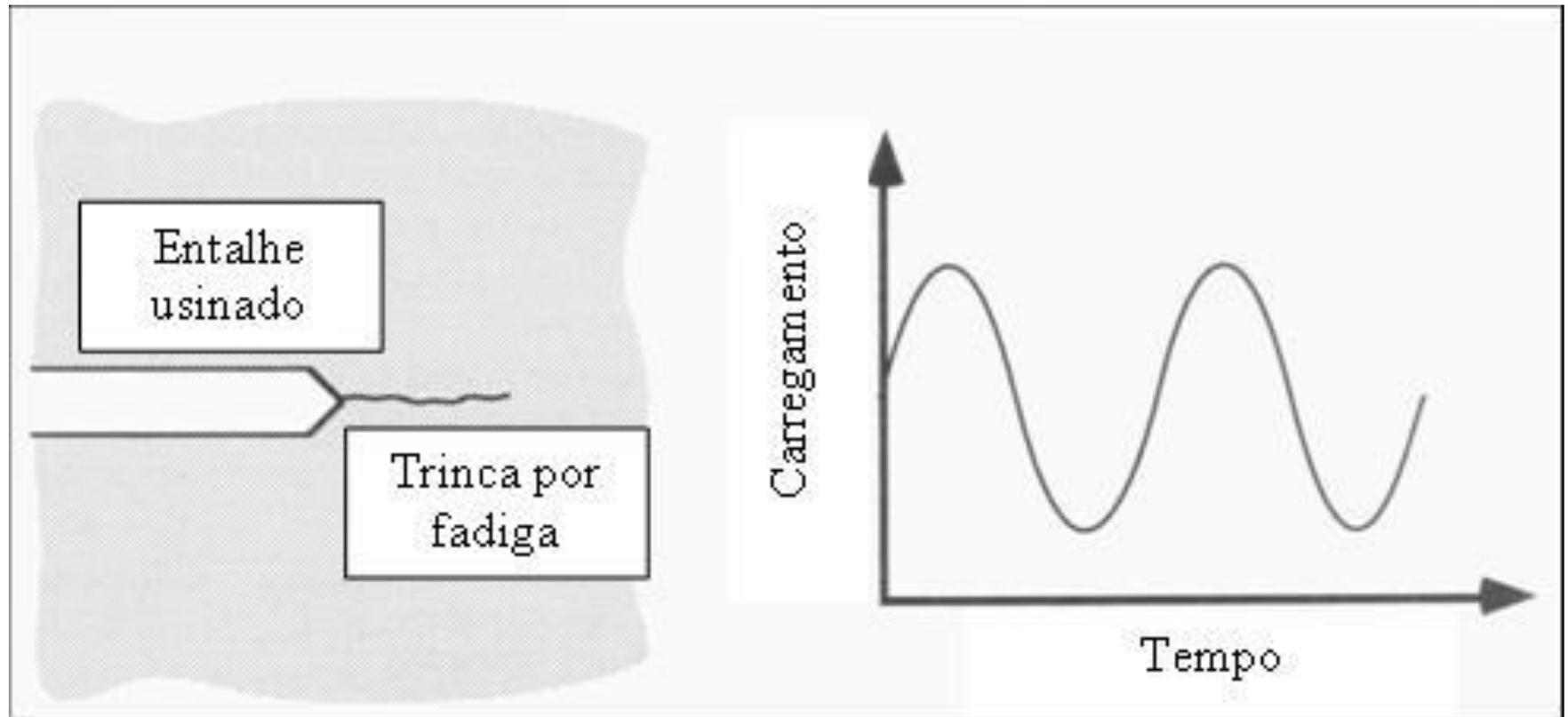
A principal **limitação** da equação de Paris é **não** levar em consideração o valor de **R**

$\Delta K$  é a **variação do fator de intensidade de tensão na ponta da trinca** e é calculada por:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

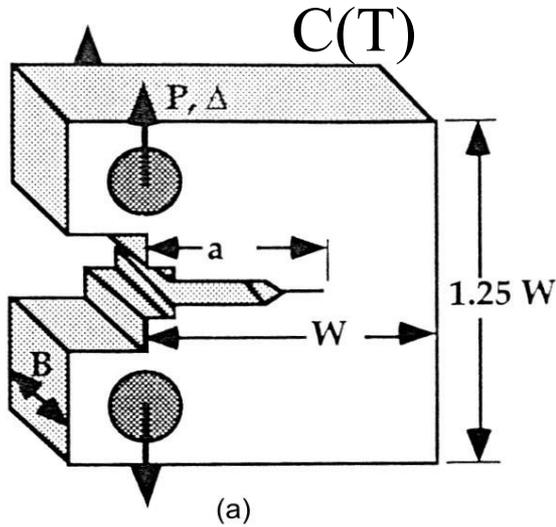
ou

$$\Delta K = F(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{\pi a}$$

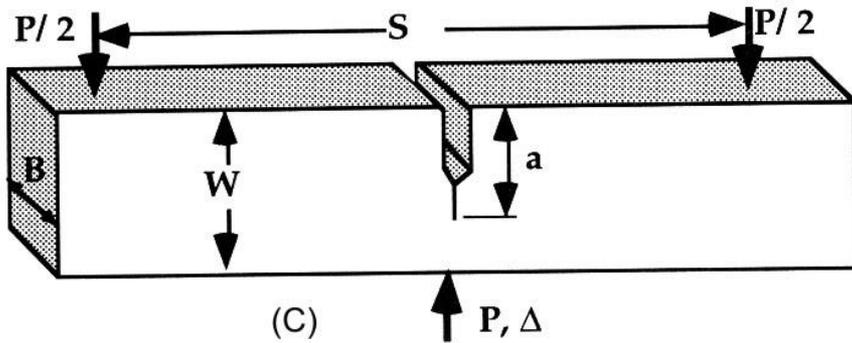


**Uma trinca por fadiga é introduzida na ponta do entalhe usinado por meios de carregamento cíclico.**

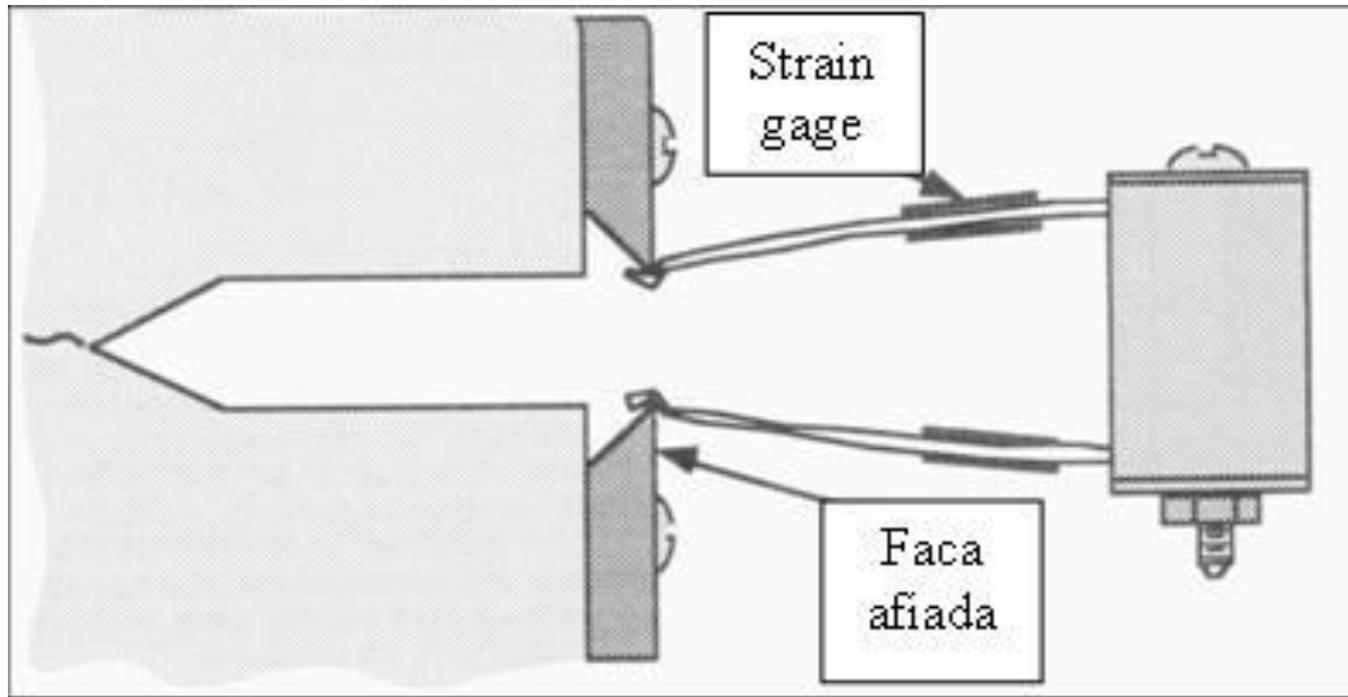
$$K_{IC} = \sigma Y \sqrt{\pi a}$$



$$Y = f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[ 0,886 + 4,64\left(\frac{a}{W}\right) - 13,32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$



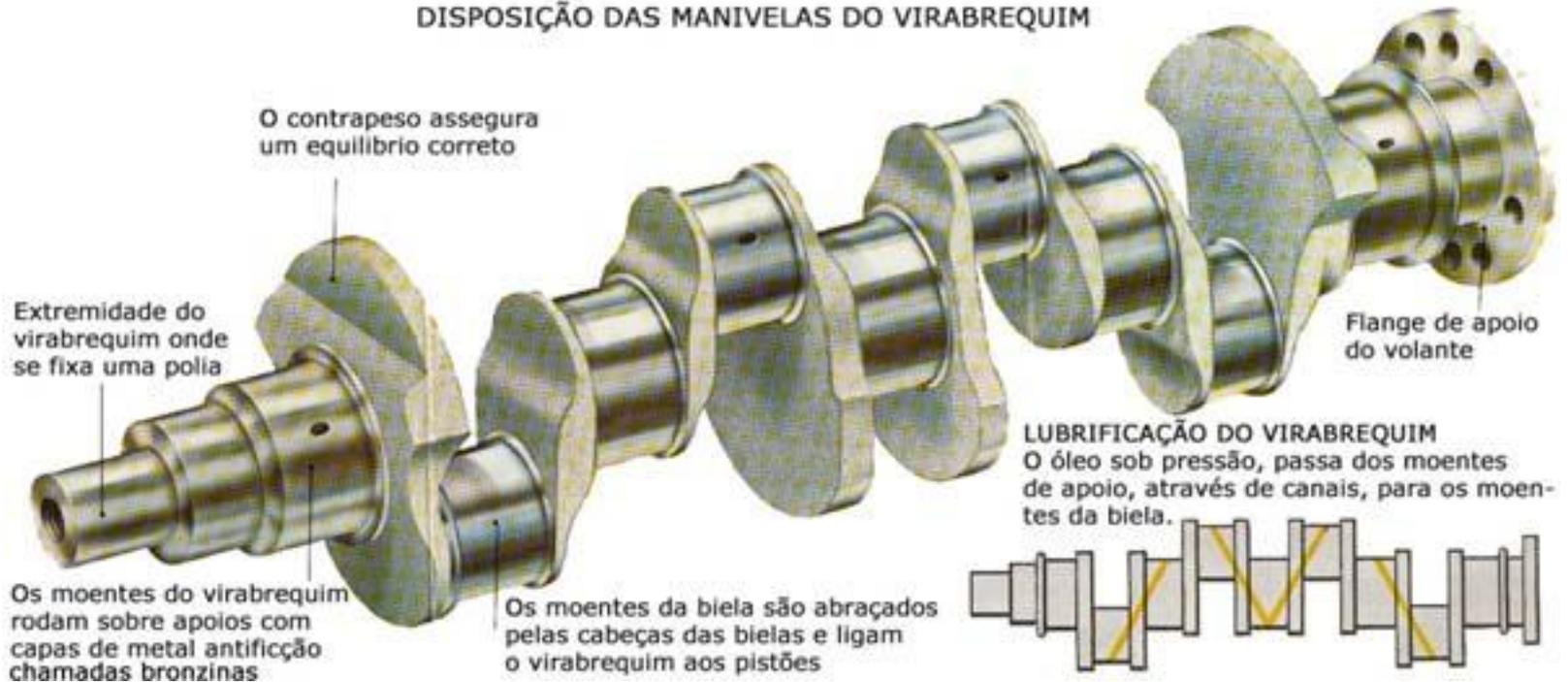
$$Y = f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[ 1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 2,15 - 3,93\left(\frac{a}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\} \right]$$

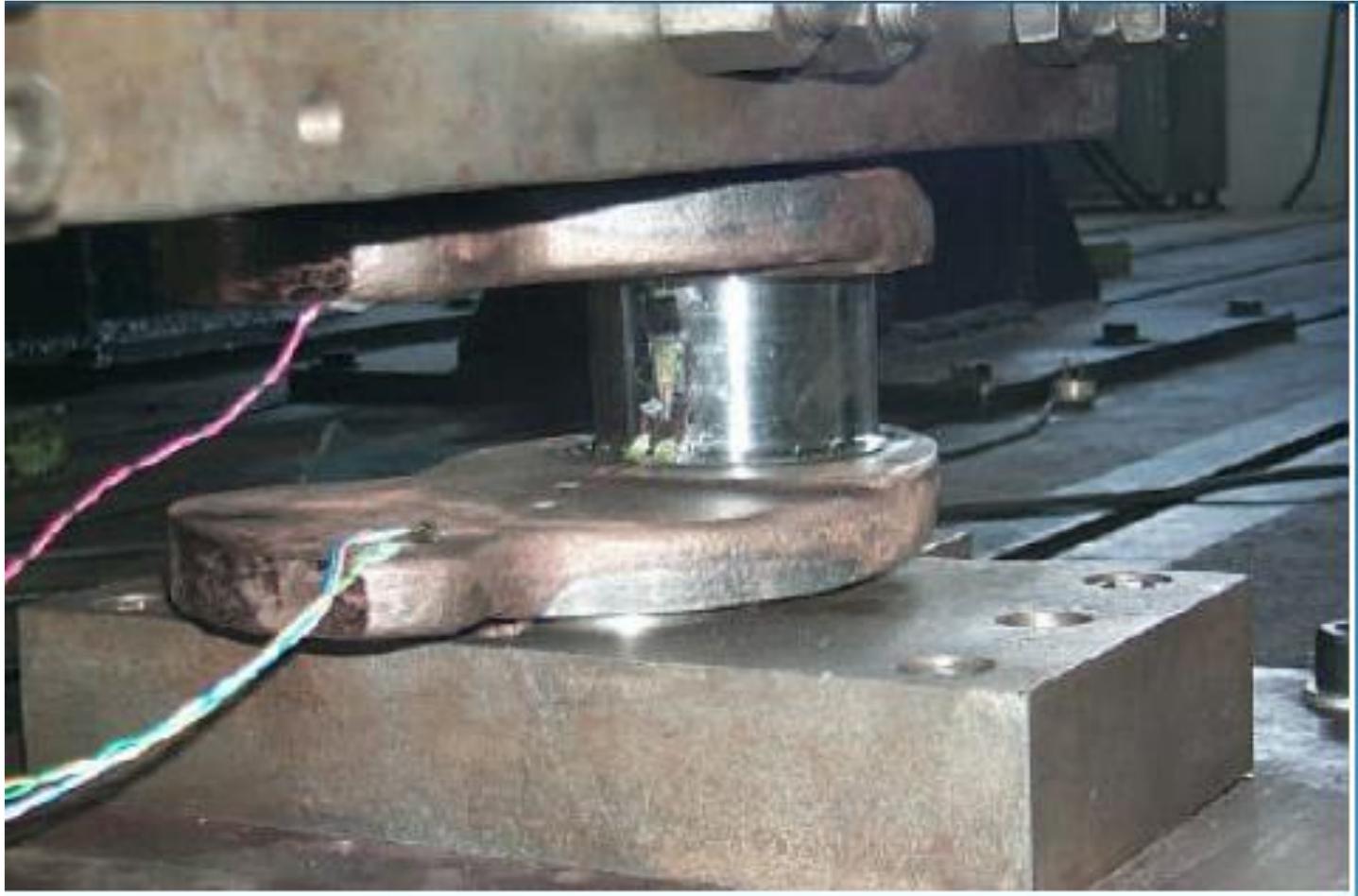


**Medida do deslocamento da abertura da trinca : “clip gage”.**  
**Medida do carregamento: células de carga da própria máquina.**

# ENSAIO DE FADIGA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

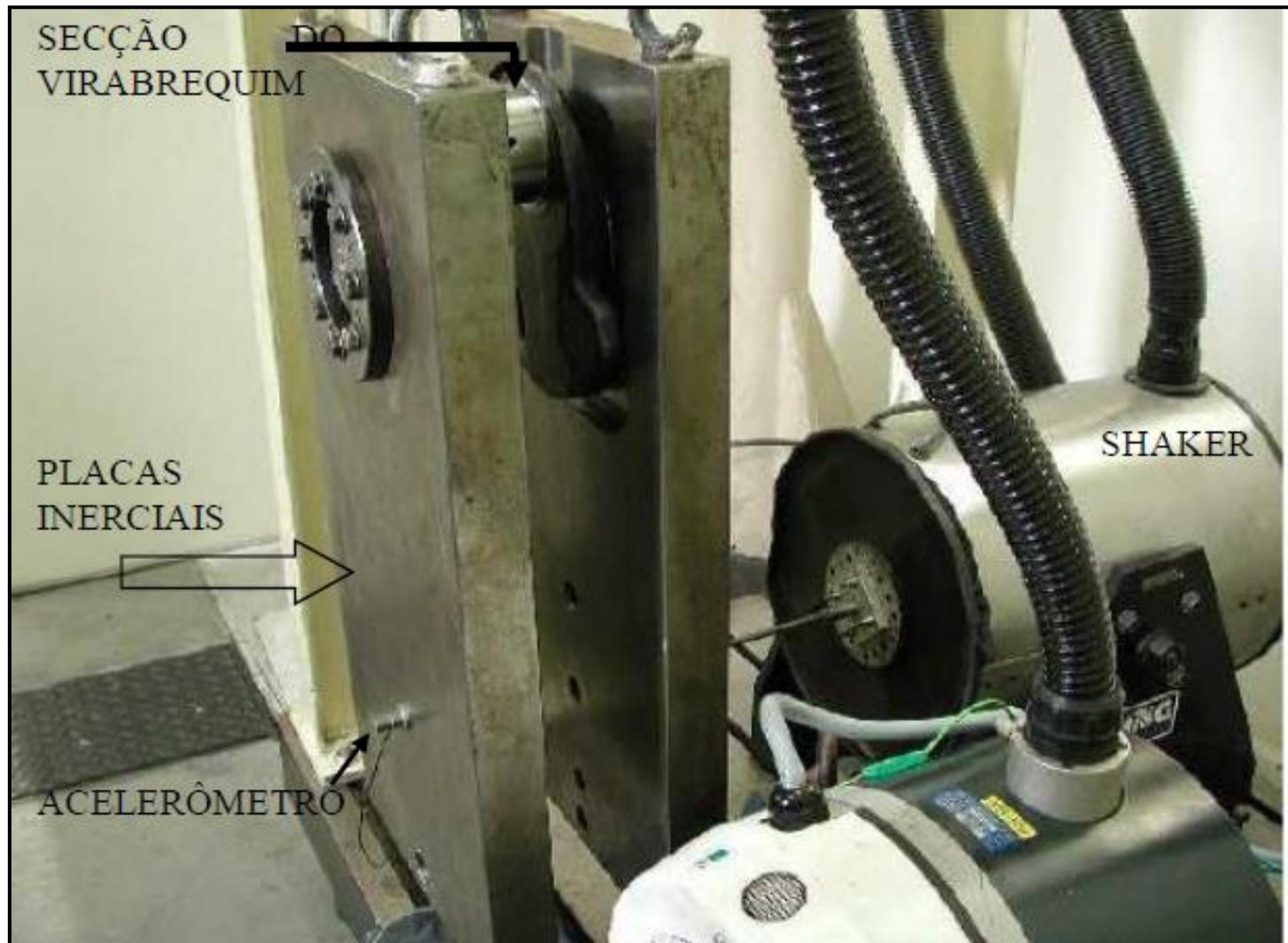
## DISPOSIÇÃO DAS MANIVELAS DO VIRABREQUIM





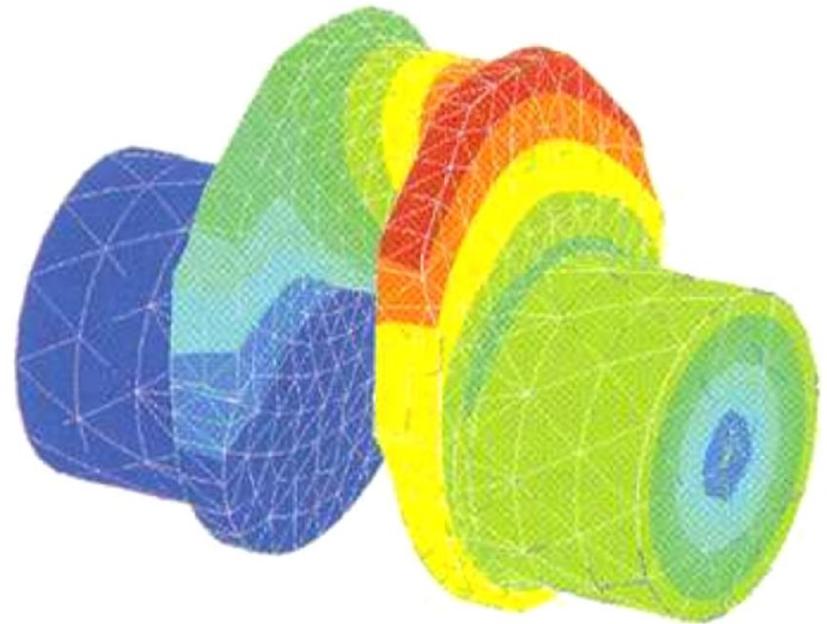
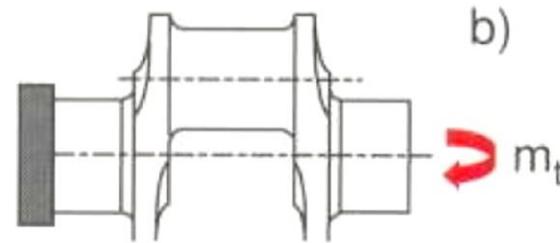
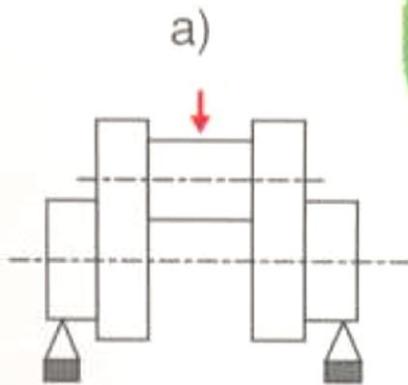
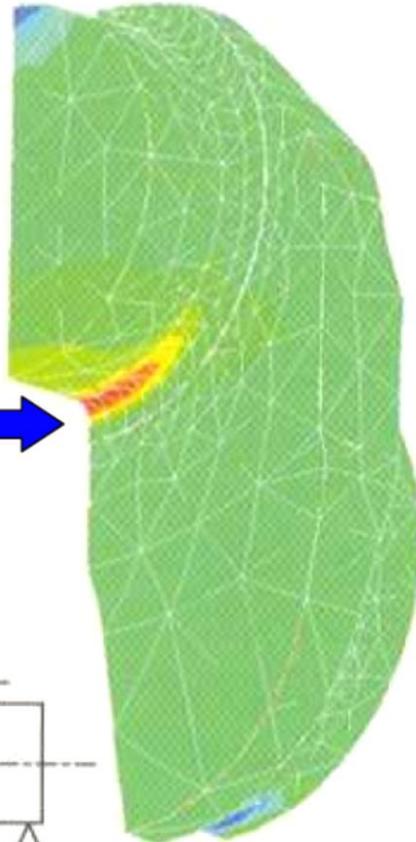
**DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS**

# ENSAIO DE FADIGA



**“SHAKER ELETROMAGNÉTICO”- RESONANT DWELL**

Maior concentração de tensão no Fillet

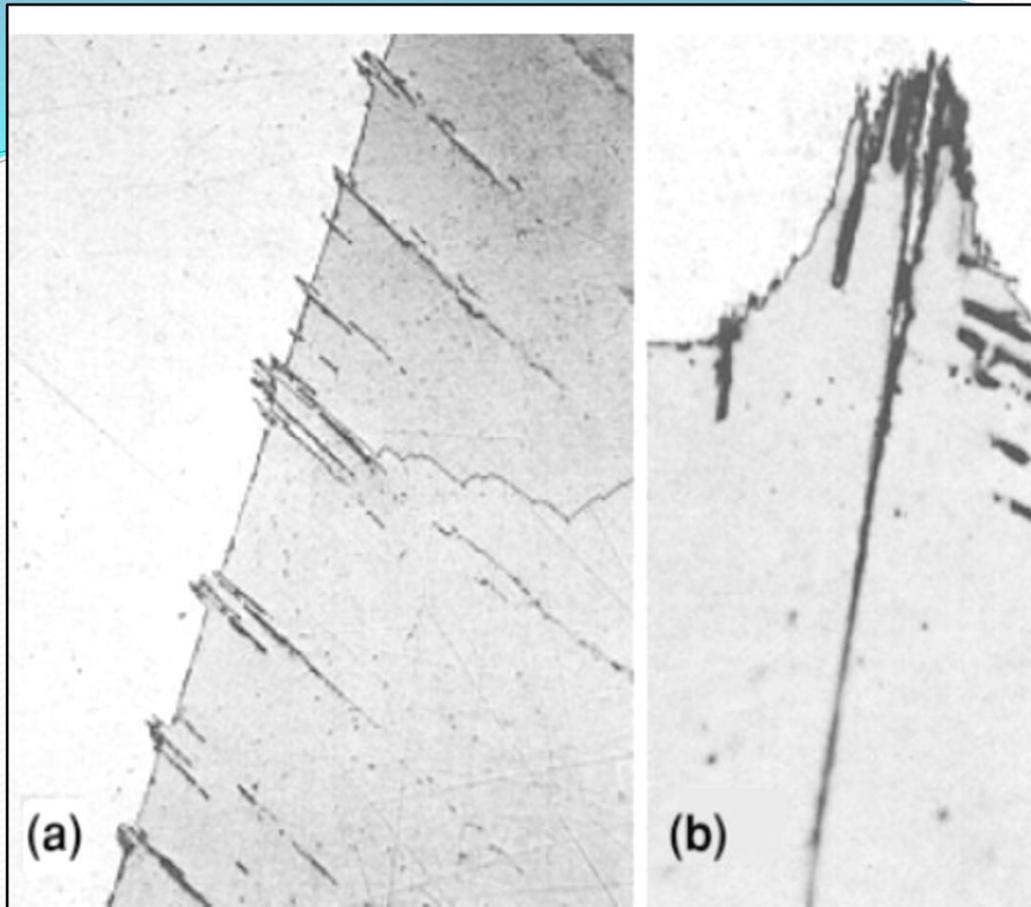


Modelo em elementos finitos apresentando maior concentração de tensão, por "bending", no raio de concordância(fillet) do pin journal.

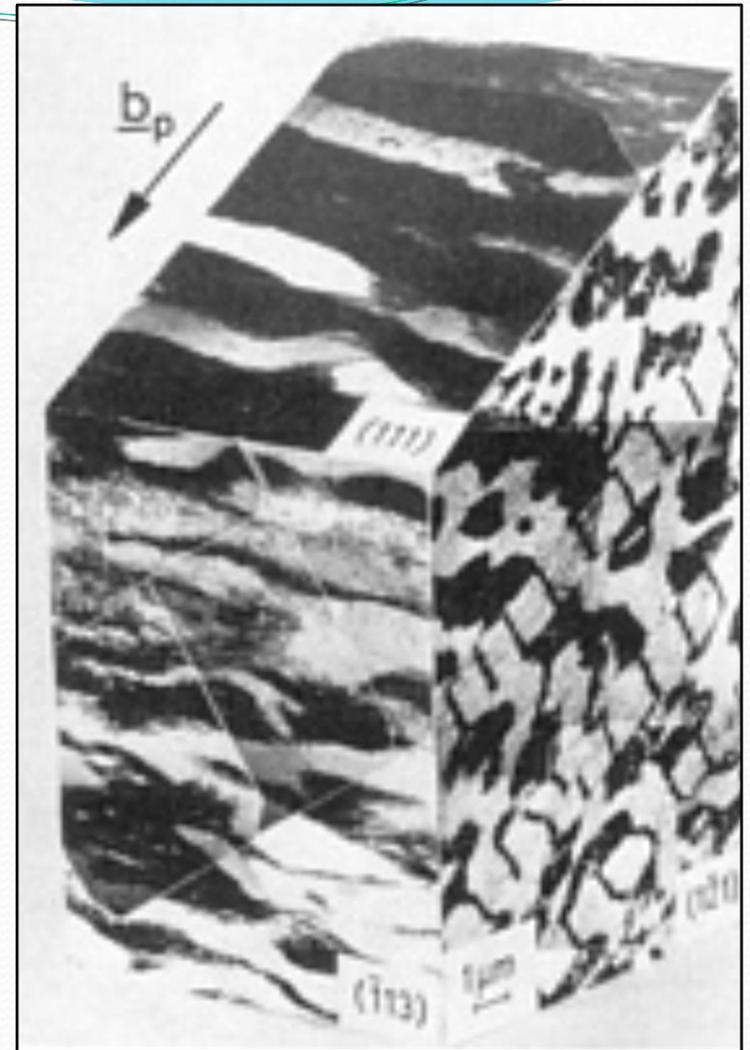
**A TRINCA POR FADIGA É NUCLEADA NA SUPERFÍCIE, A NÃO SER QUE OCORRA UMA DESCONTINUIDADE SUBSUPERFICIAL.**



**ANÁLISE DE FALHAS – EIXO – AÇO SAE4140 – T+R - 2005.**

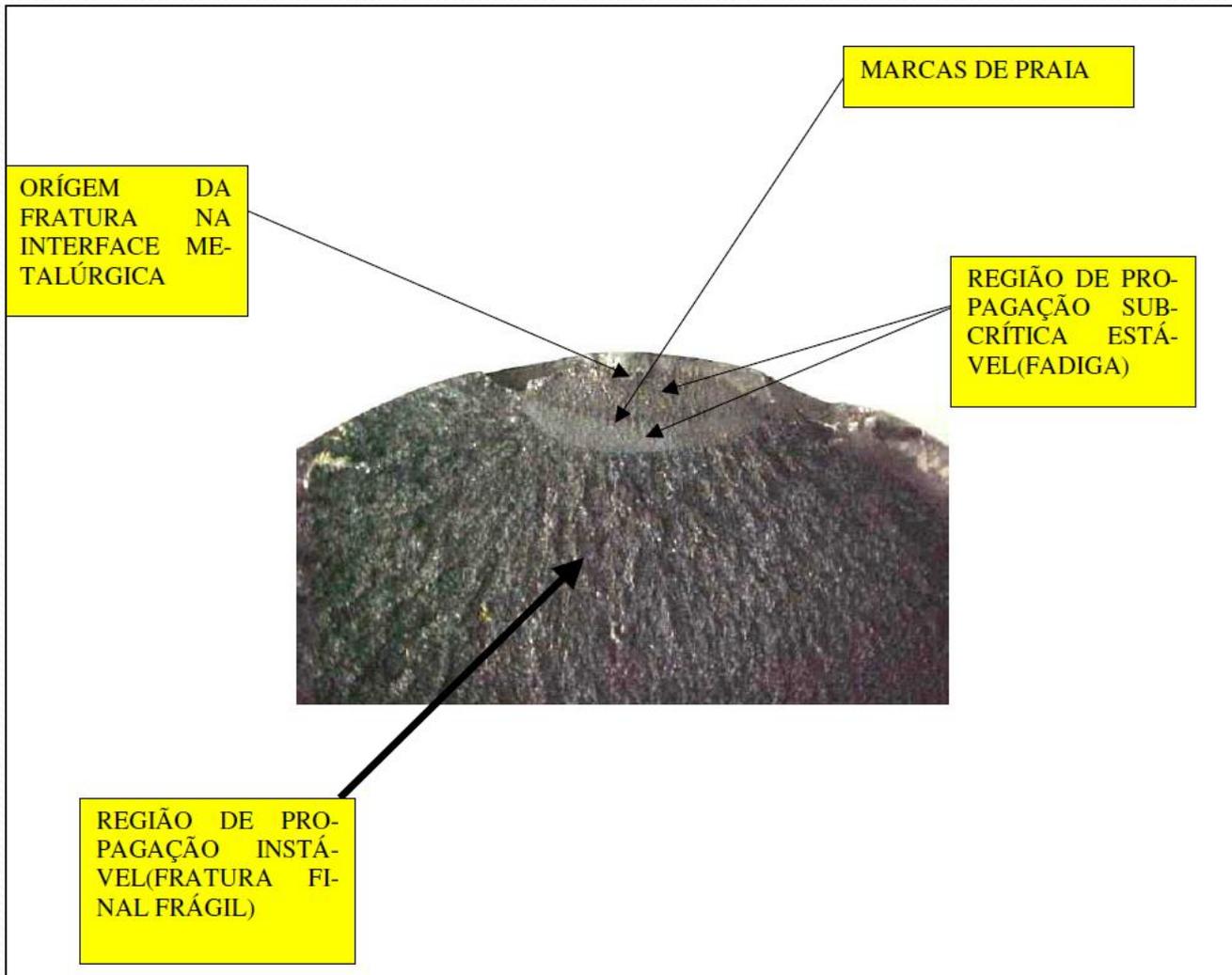


Extrusions observed in a a copper specimen and in b Fe-3 Si

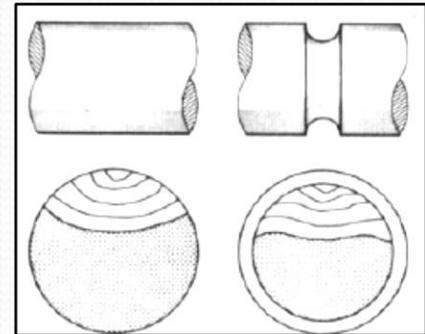


**Typical ladder-like structure of PSBs  
(Metals Handbook, vol. 19)**

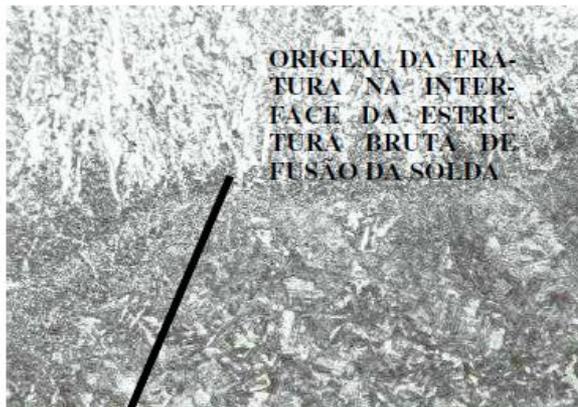
**A TRINCA POR FADIGA É NUCLEADA NA SUPERFÍCIE, A NÃO SER QUE OCORRA UMA DESCONTINUIDADE SUBSUPERFICIAL.**



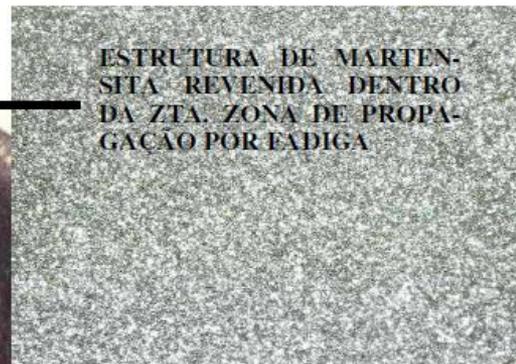
ALTAS TENSÕES



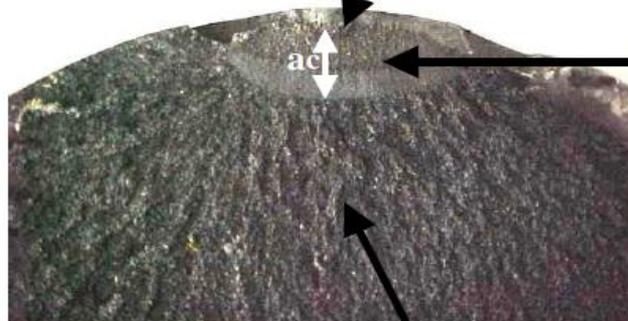
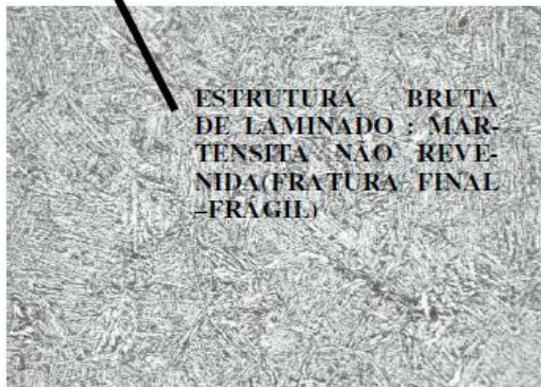
ORIGEM DA FRA-  
TURA NA INTER-  
FACE DA ESTRU-  
TURA BRUTA DE  
FUSÃO DA SOLDA



ESTRUTURA DE MARTEN-  
SITA REVENIDA DENTRO  
DA ZTA. ZONA DE PROPAGA-  
ÇÃO POR FADIGA



ESTRUTURA BRUTA  
DE LAMINADO : MAR-  
TENSITA NÃO REVE-  
NIDA (FRATURA FINAL  
-FRÁGIL)



**OBRIGADO!!**