

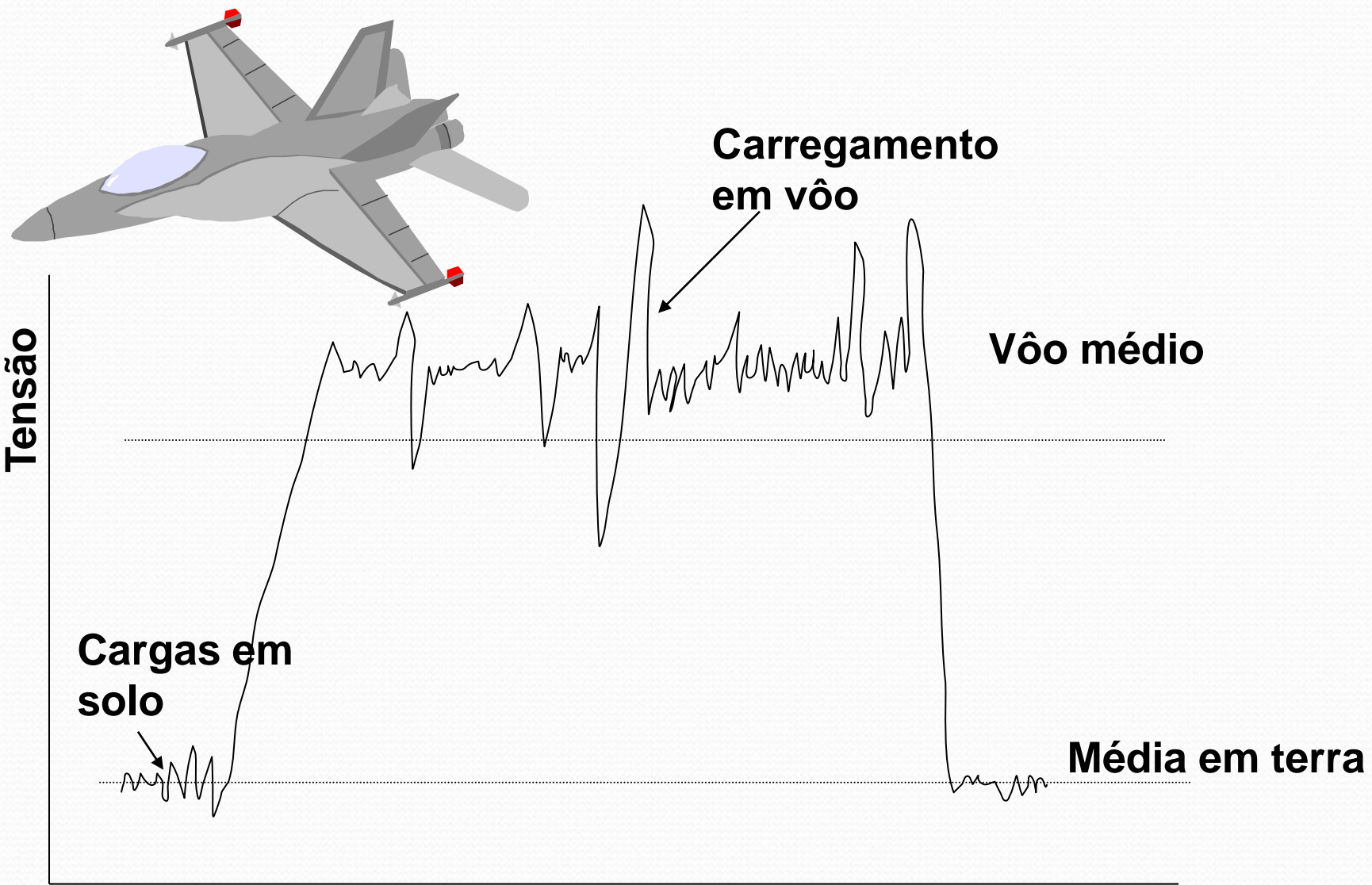


FADIGA

FADIGA

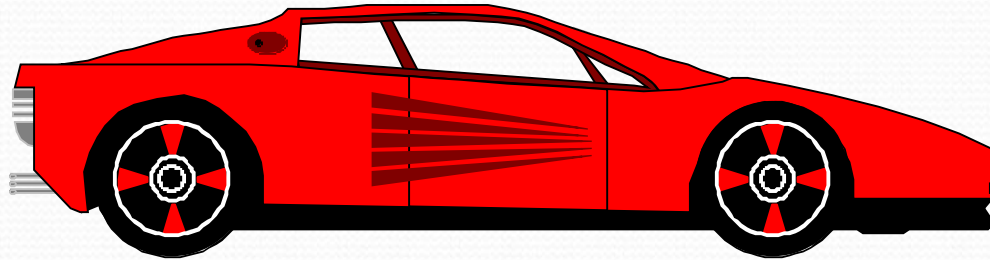
- **Definição:** Fadiga mecânica é a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico;
- **95%** das falhas envolve fadiga;
- **Exemplos:** automóveis nas ruas, aviões (principalmente nas asas) no ar, navios em alto mar, constantemente em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

VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



Carregamento variável e assimétrico

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

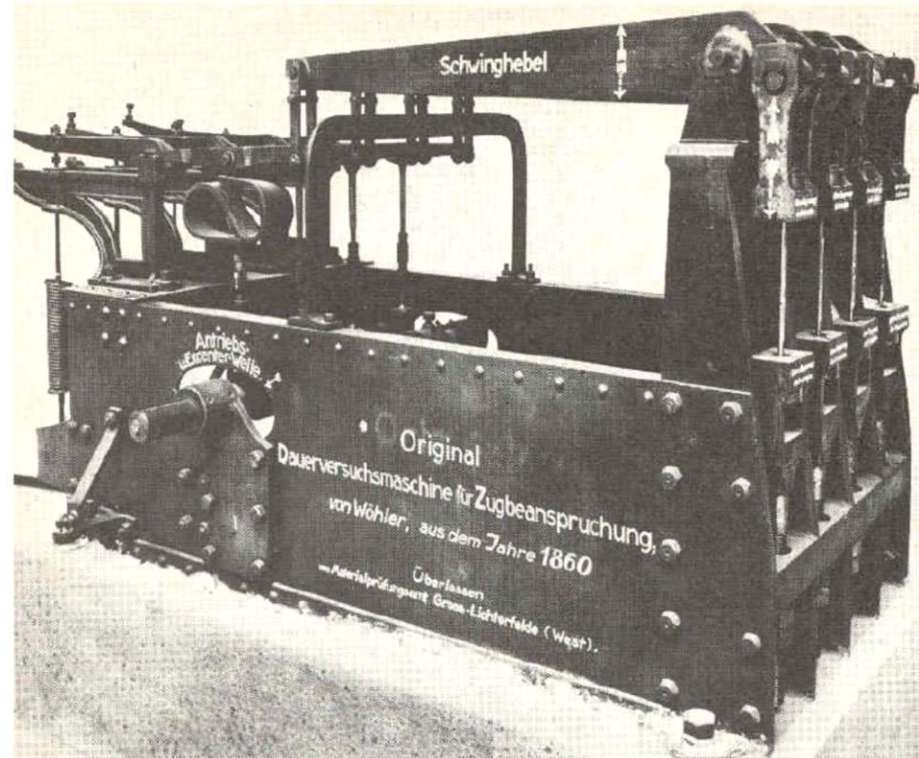
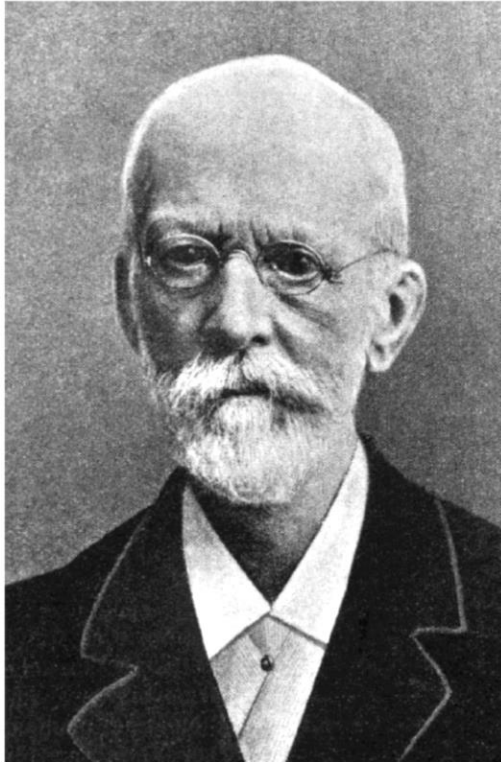
- **Fadiga de alto ciclo (controlado por tensão);**
- **Fadiga de baixo ciclo (controlada por deformação);**
- **Propagação** de trinca por fadiga;
- Avaliação da **sensibilidade ao entalhe;**
- **Fadiga por fretting;**
- **Fadiga multiaxial;**
- **Fadiga térmica: isotérmica e termomecânica;**
- **Fadiga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

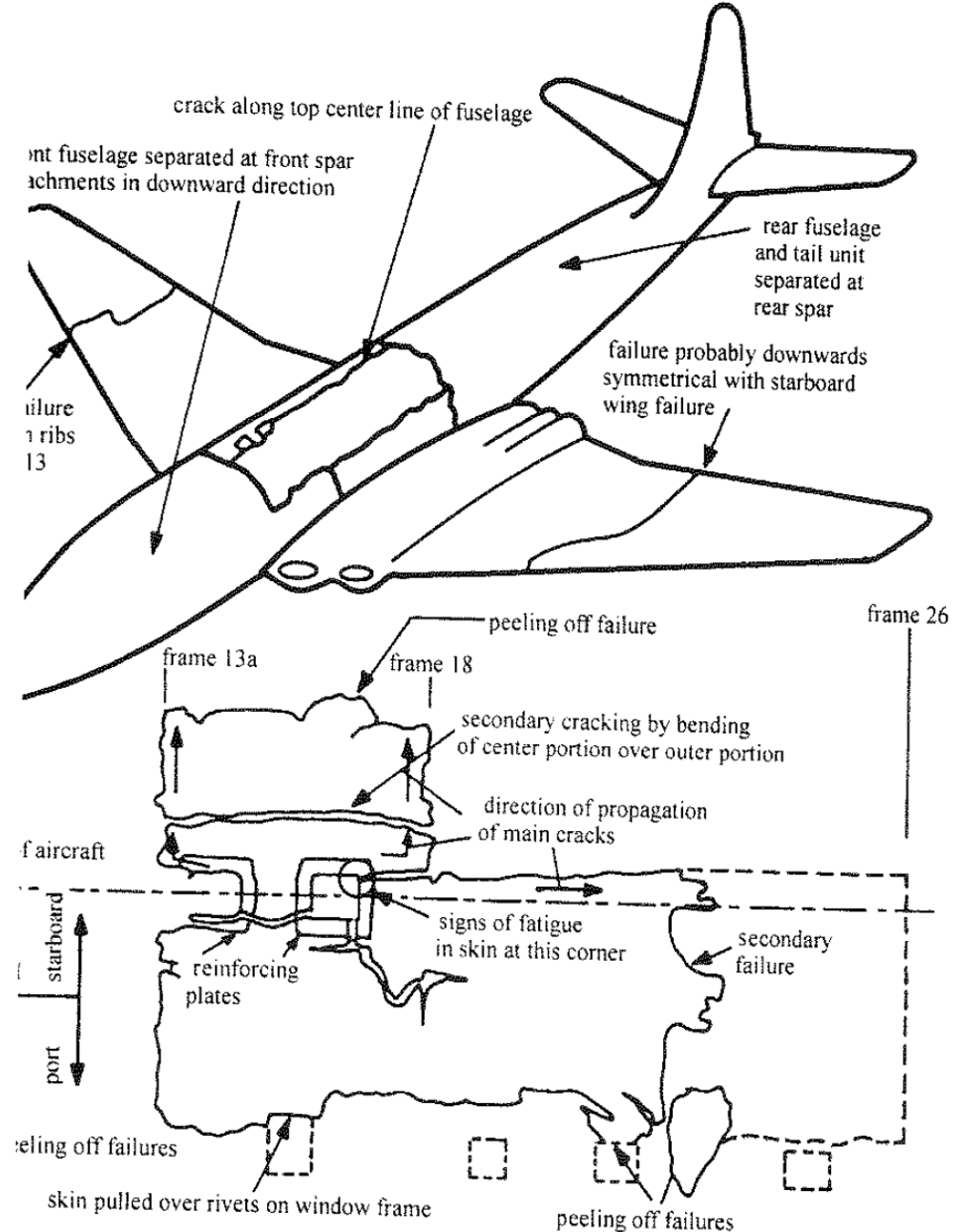
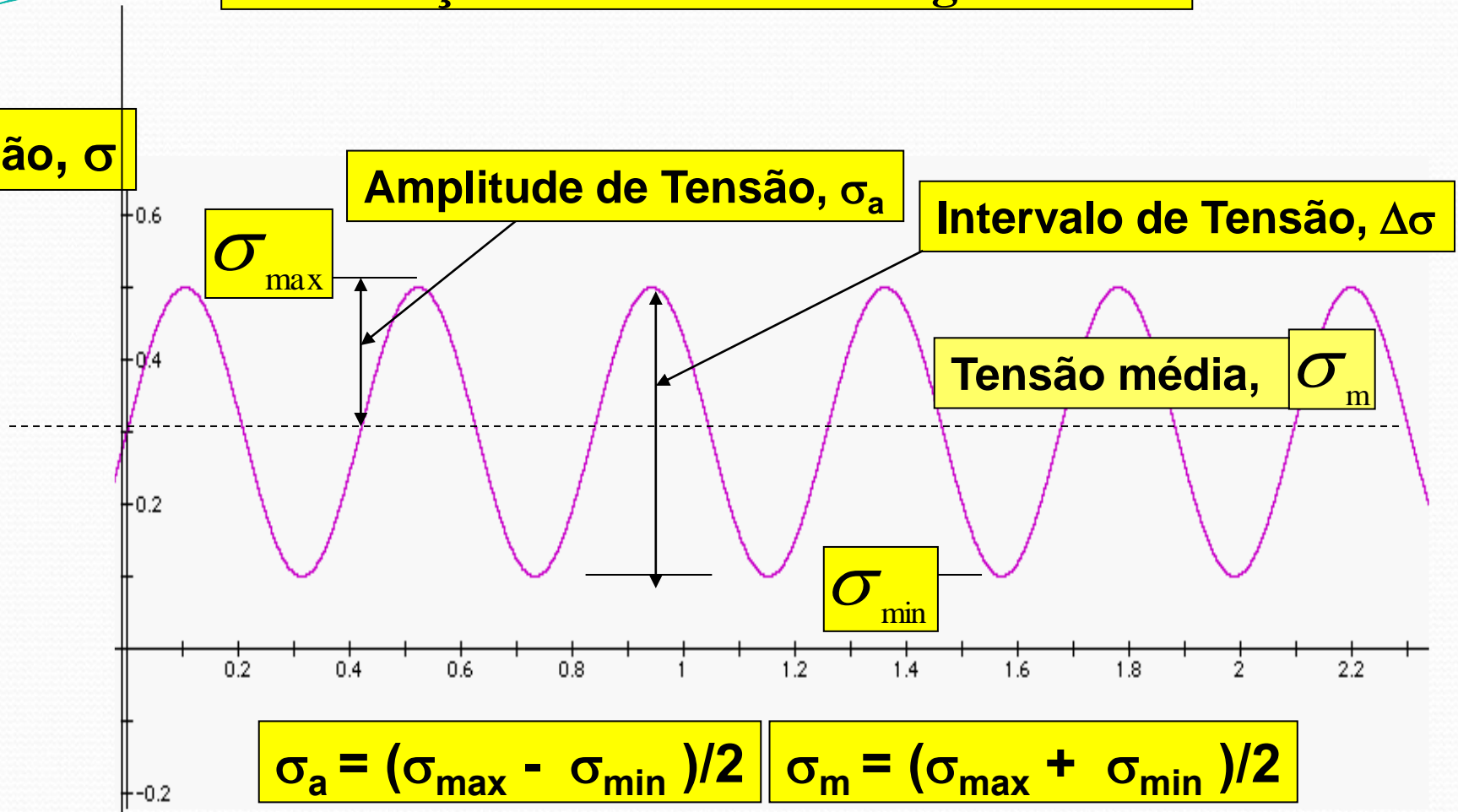


Fig. 1.1. Schematic diagram illustrating the location of fatigue cracks in a failed Comet airplane. (After Petroski, 1996.)

DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão, σ



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

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

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

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

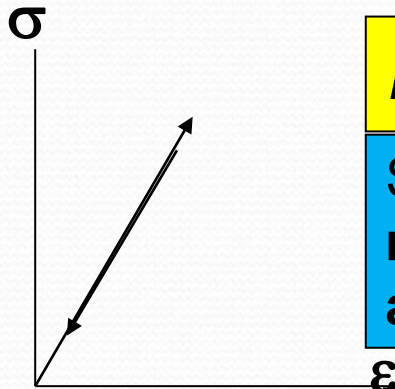
RAZÃO DE AMPLITUDE

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$

Análise Clássica da Fadiga

Metodologia Tensão-Vida

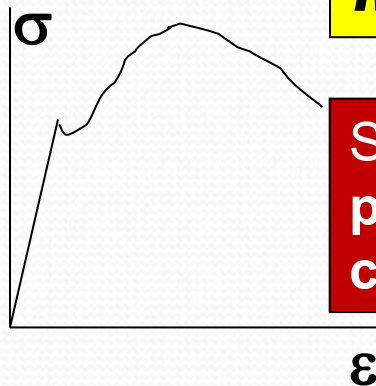
Metodologia Def. - Vida



Metodologia Tensão-Vida

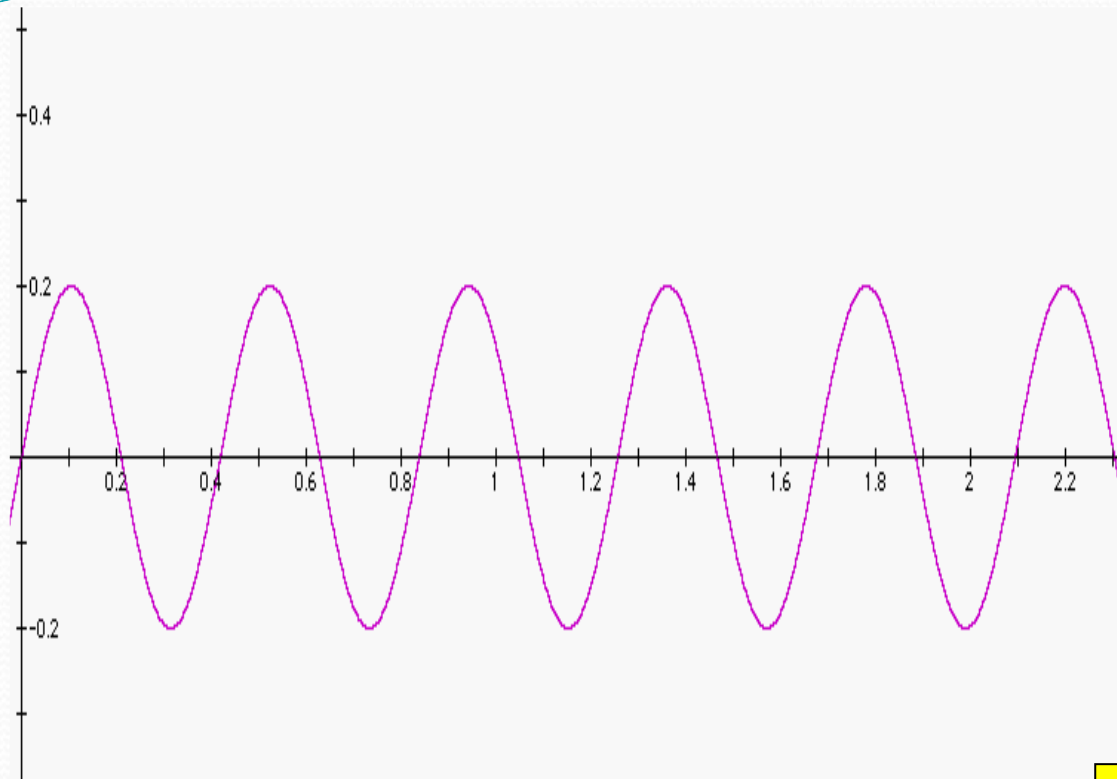
Se as tensões forem sempre dentro do regime elástico (abaixo do LE): fadiga de alto ciclo ou controlada pela tensão

Metodologia Def. - Vida



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

Carregamentos completamente reversos



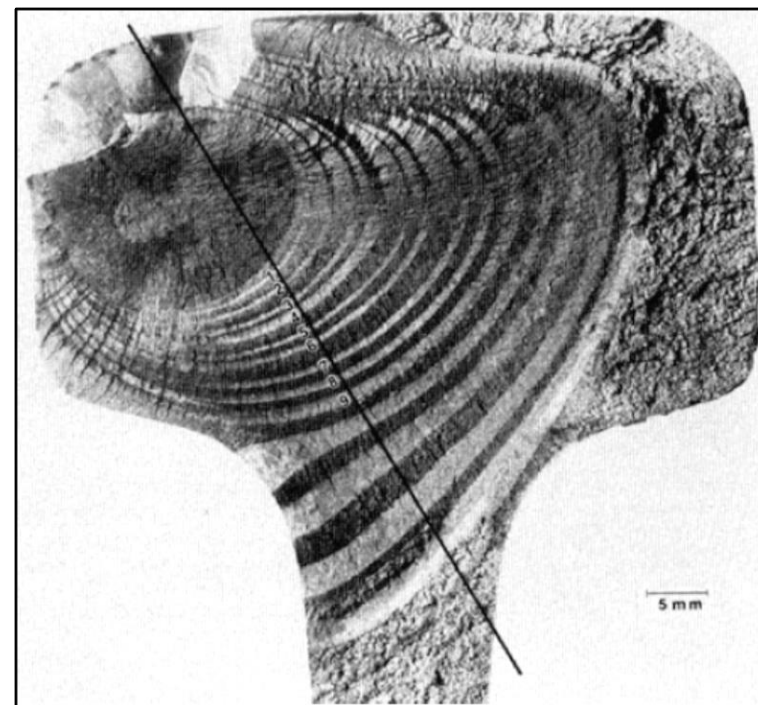
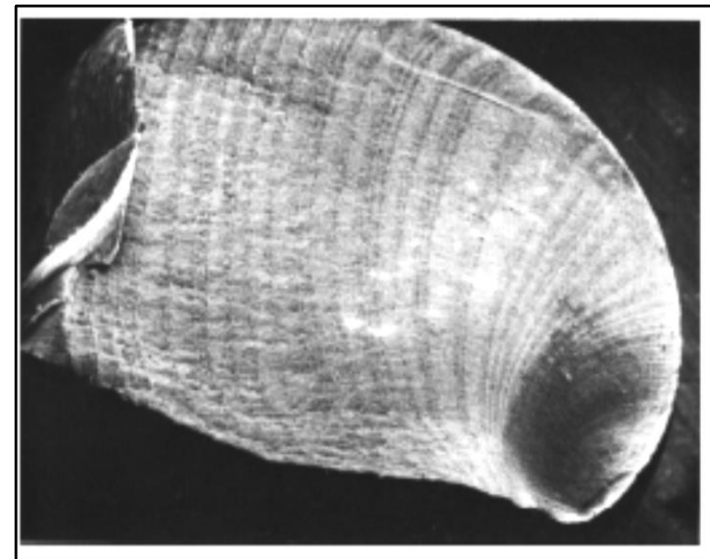
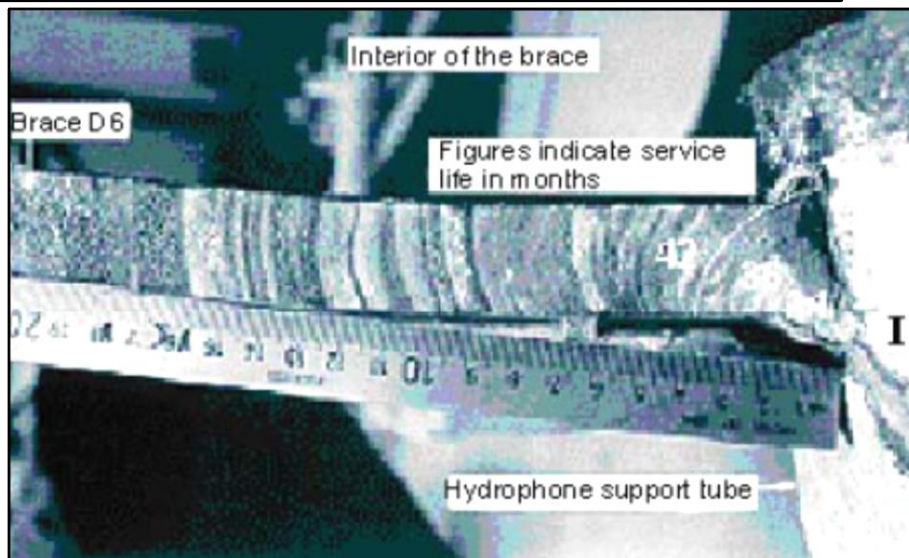
Tensão Média, $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2 = 0$

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

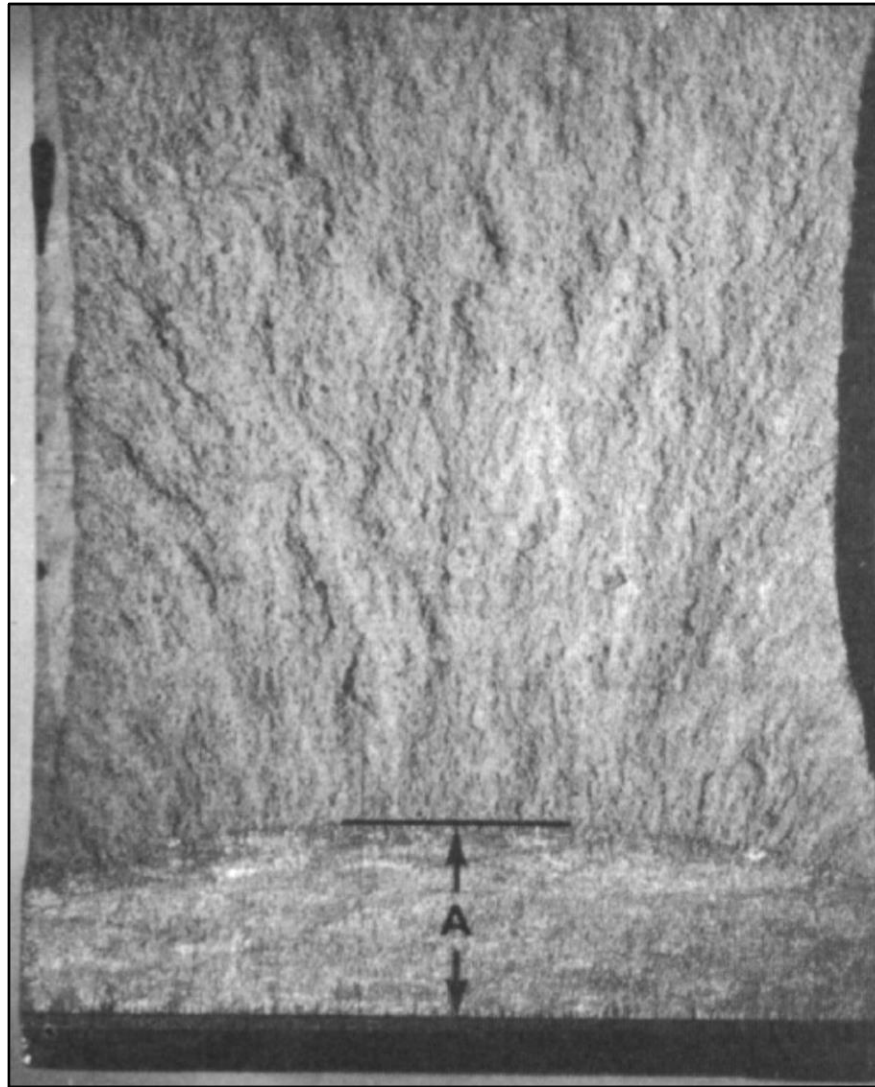
Razão de Amplitudes, $A = \sigma_a / \sigma_m = \infty$

**UTILIZADO NAS
HOMOLOGAÇÕES
DE PEÇAS
AUTOMOTIVAS**

FADIGA- MARCAS DE PRAIA



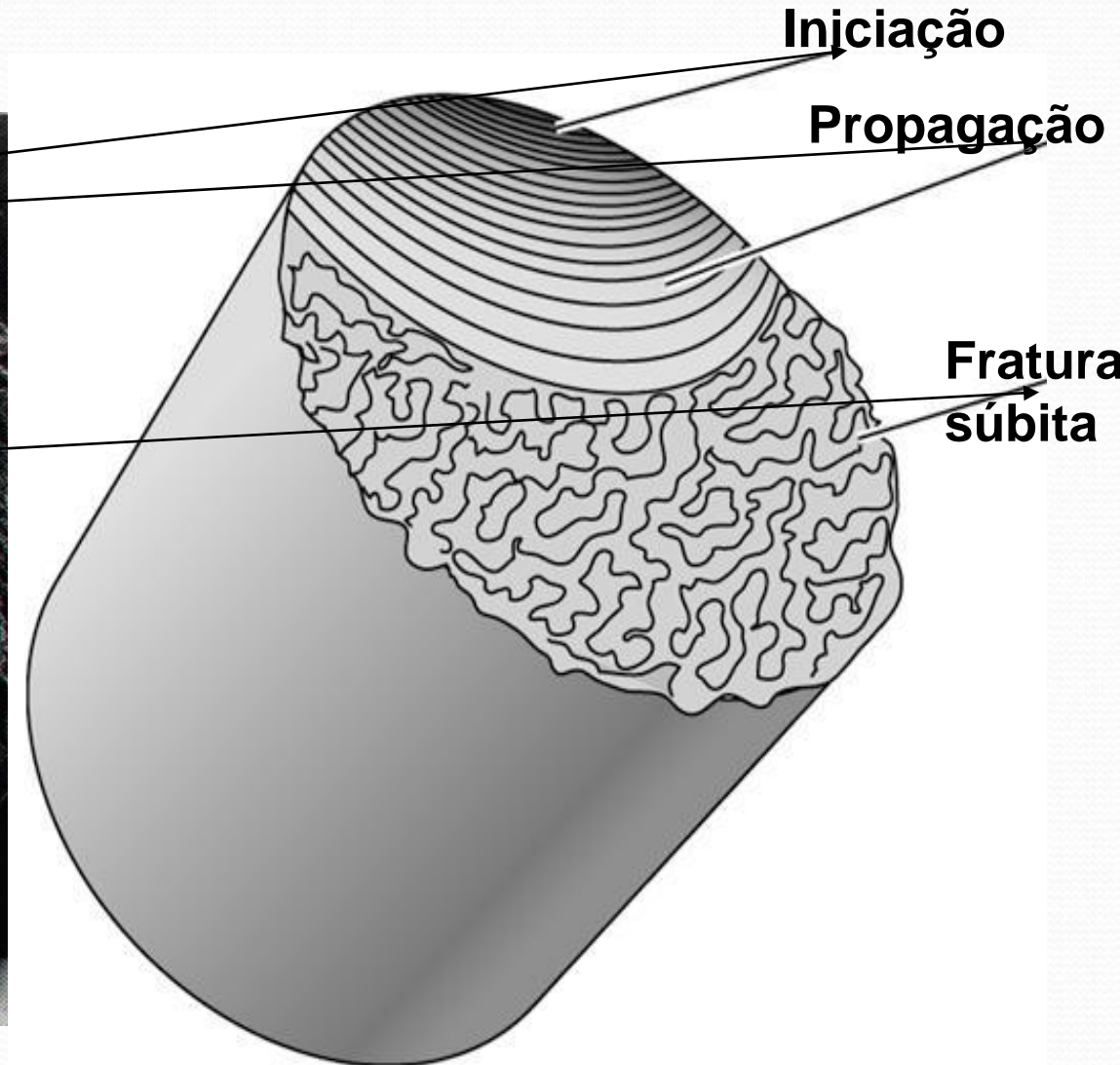
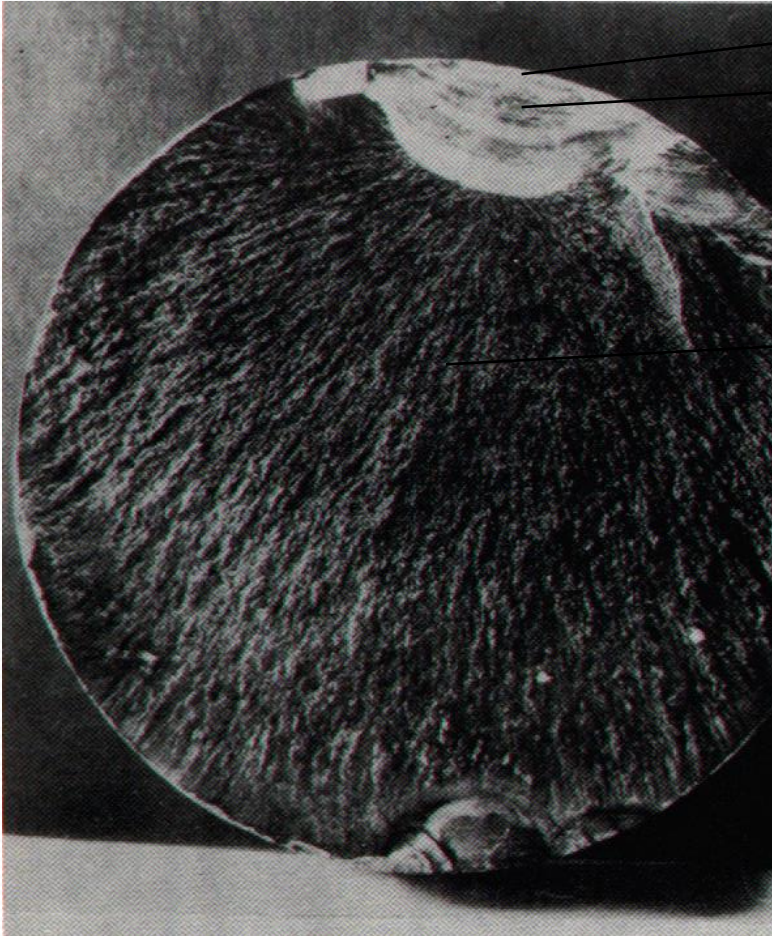
FADIGA- MARCAS DE PRAIA



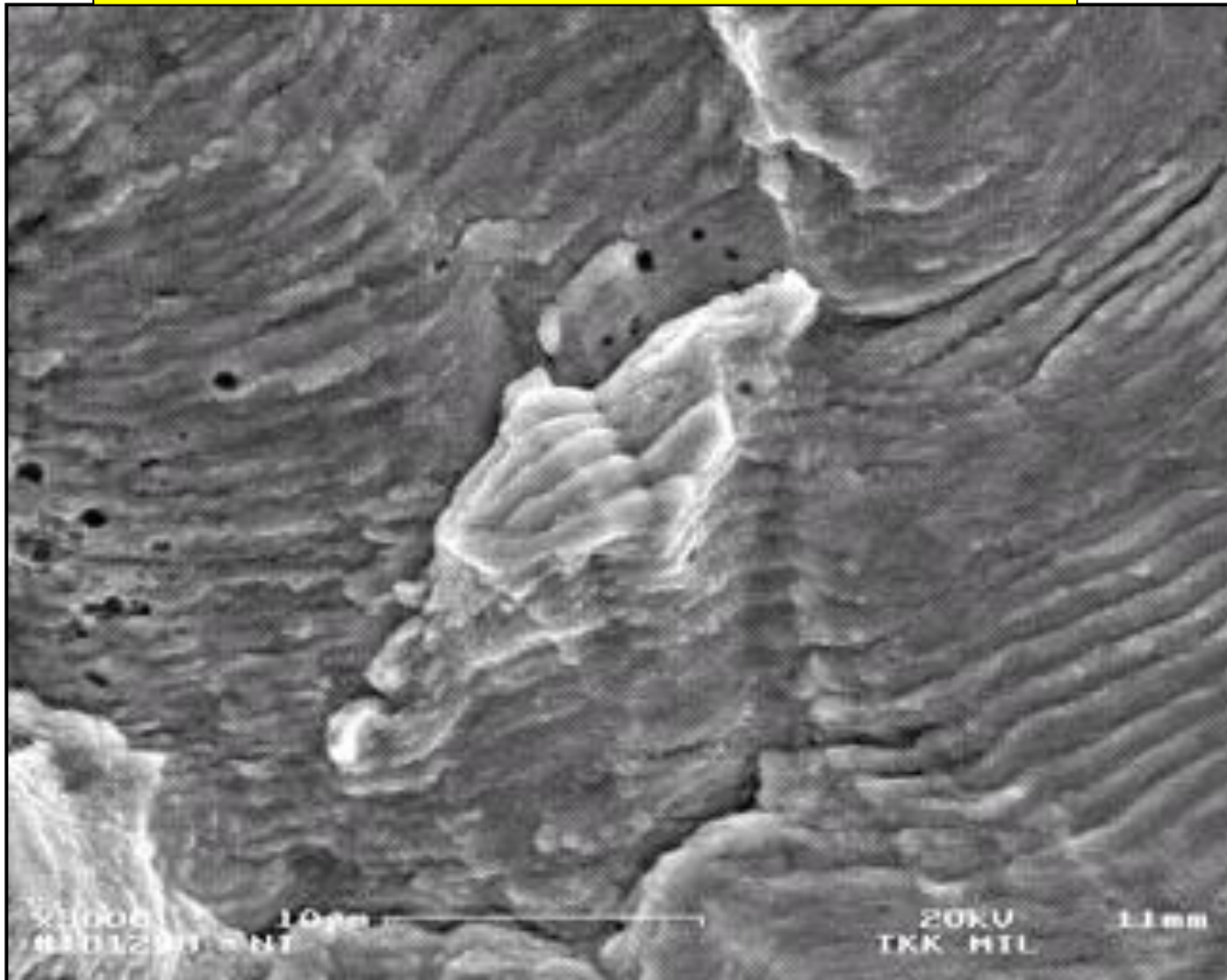
**SEM
MARCAS
DE PRAIA**

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

Fraturas de Fadiga e Características Macroscópicas



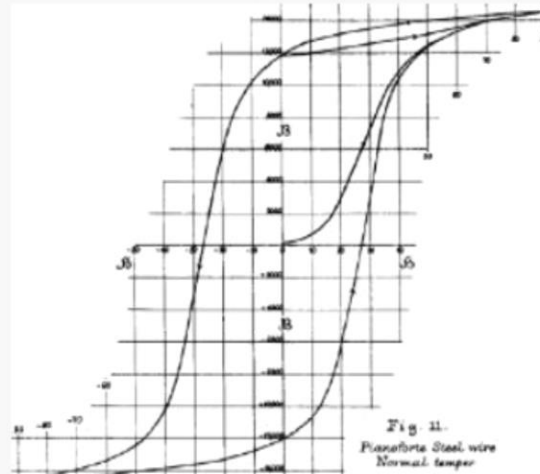
ESTRIAS-MICROSCÓPICAS



**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. $\times 1000$.

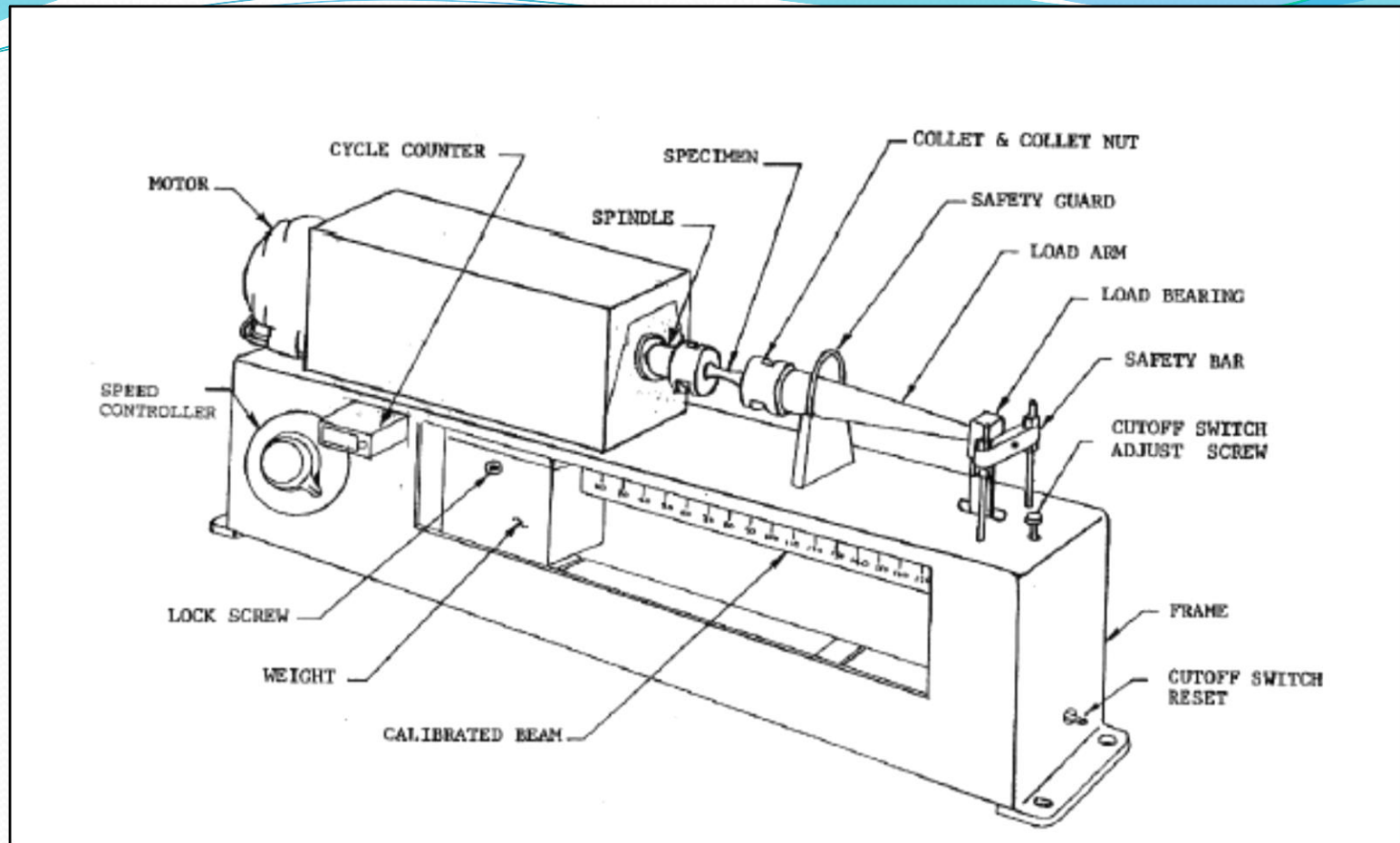


Fig. 11. Same after 10,000 revolutions. $\times 1000$.



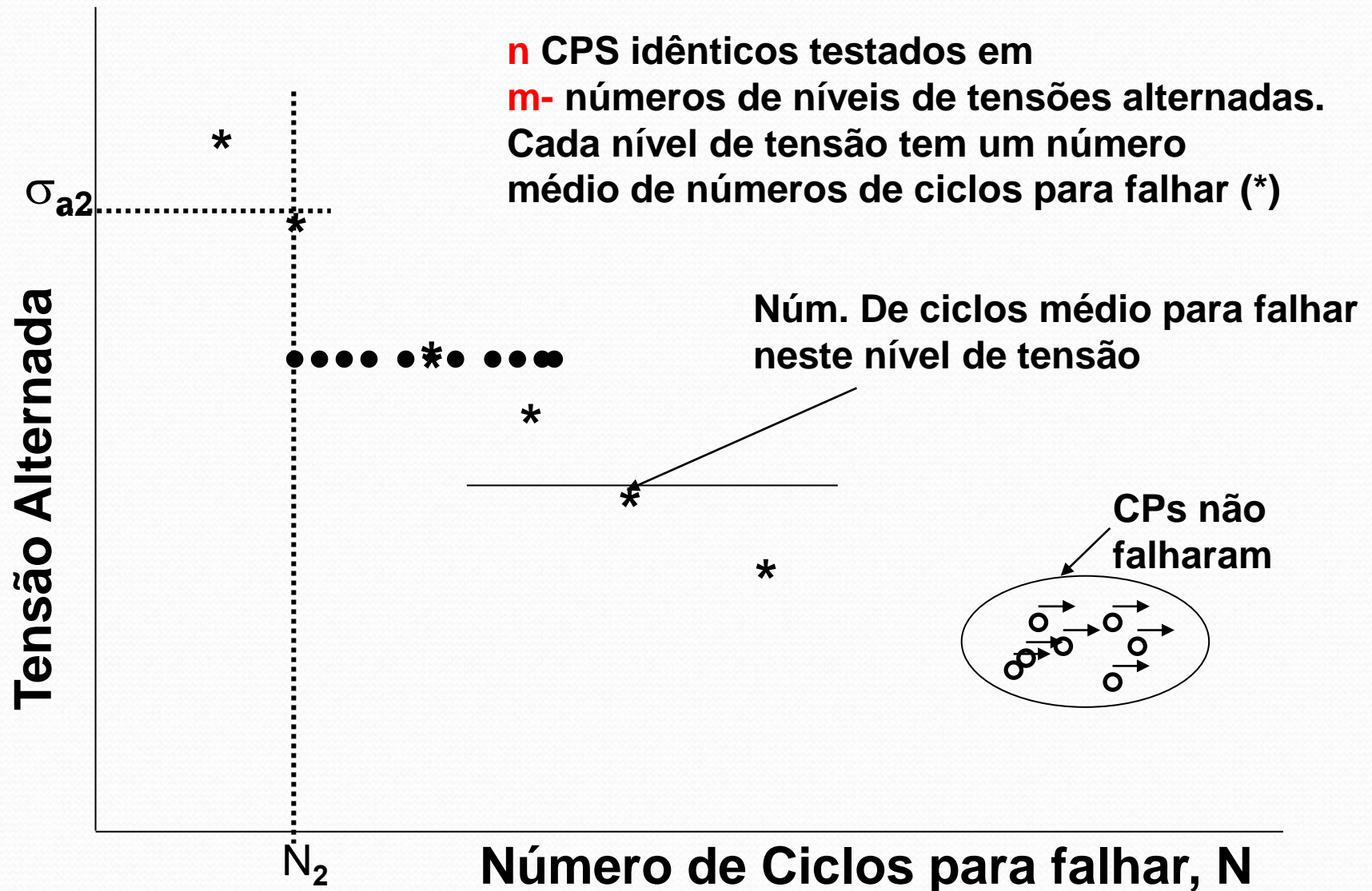
Fig. 12. Same after 40,000 revolutions. $\times 1000$.

ENSAIO DE FADIGA

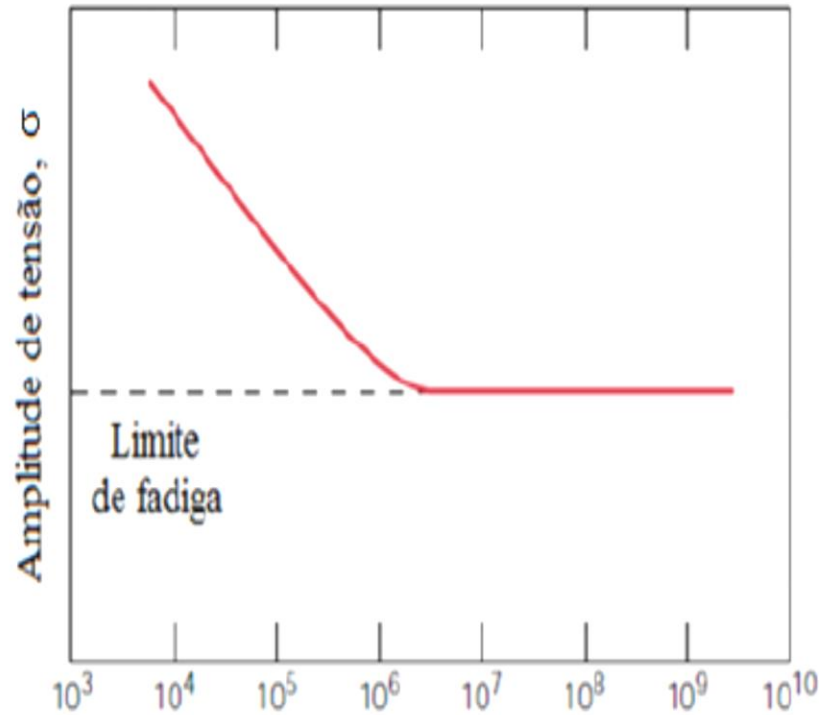


•Wöhler (1852) – Conclui, entre outras que o fenômeno da fadiga de alto ciclo é dependente de condições macroscópicas e microscópicas o que leva a uma dispersão estatística, aleatória.

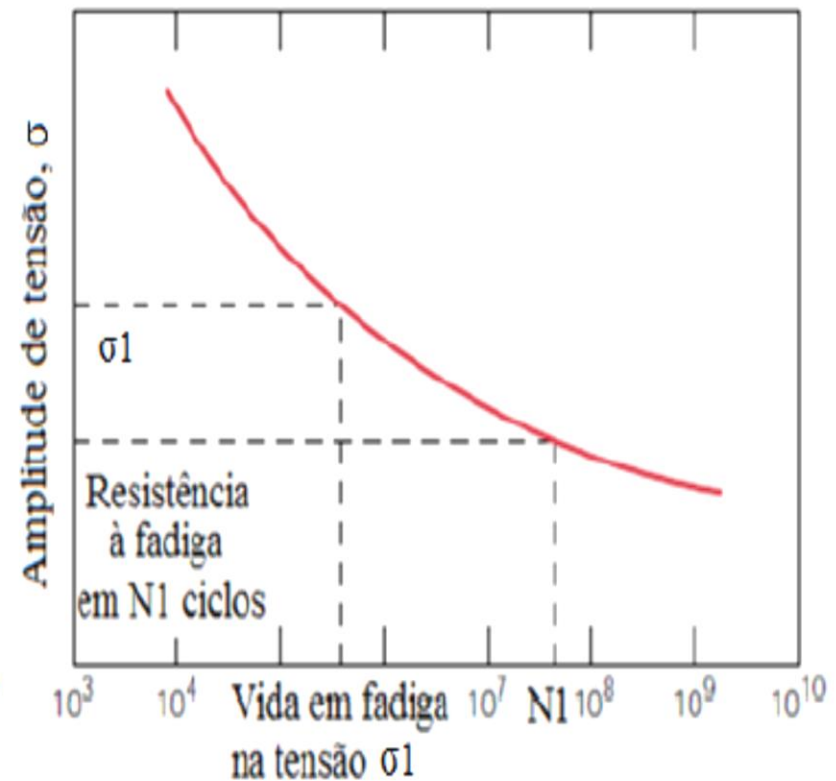
Dados S-N - Espalhamento nos Resultados experimentais



CURVA S-N APÓS TRATAMENTO ESTATÍSTICO



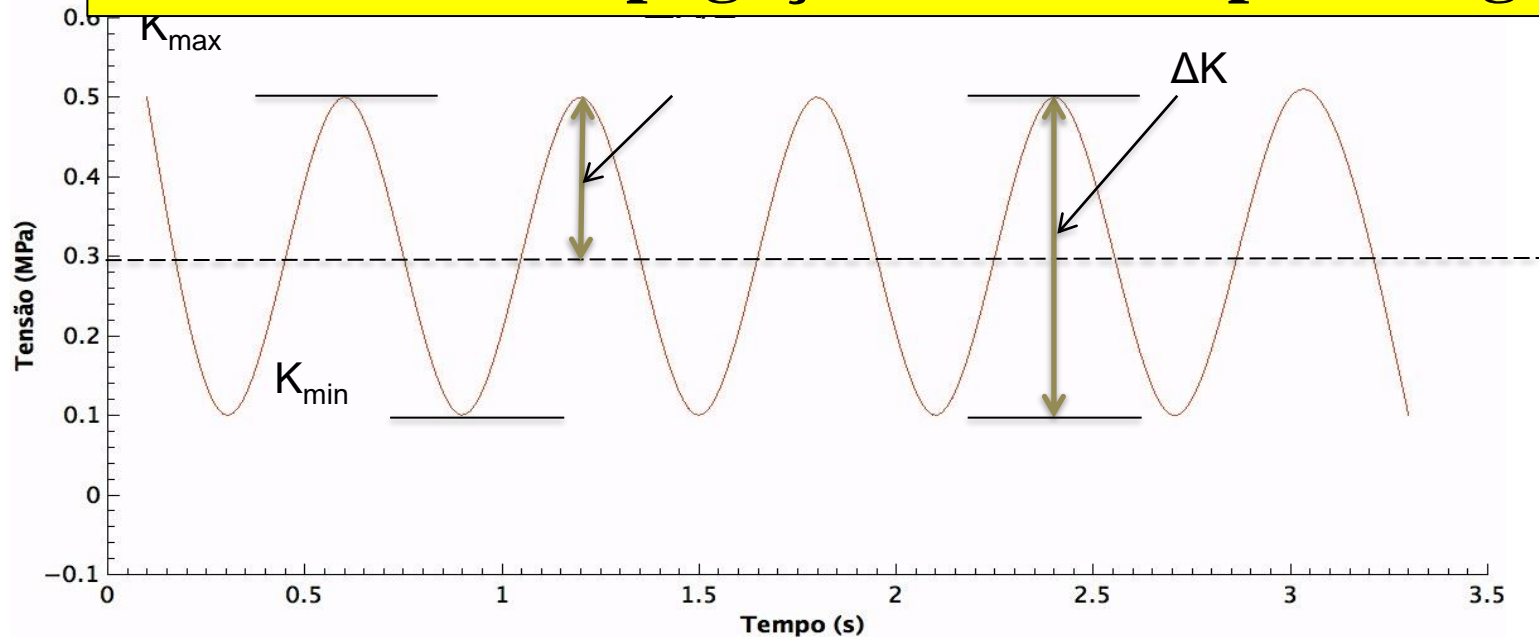
(a) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)



(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

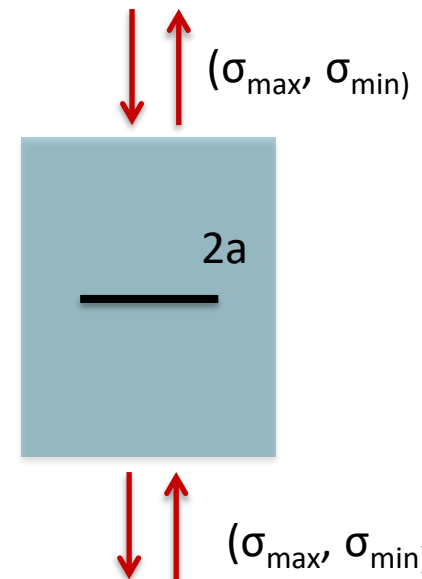


$$K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi * a}$$

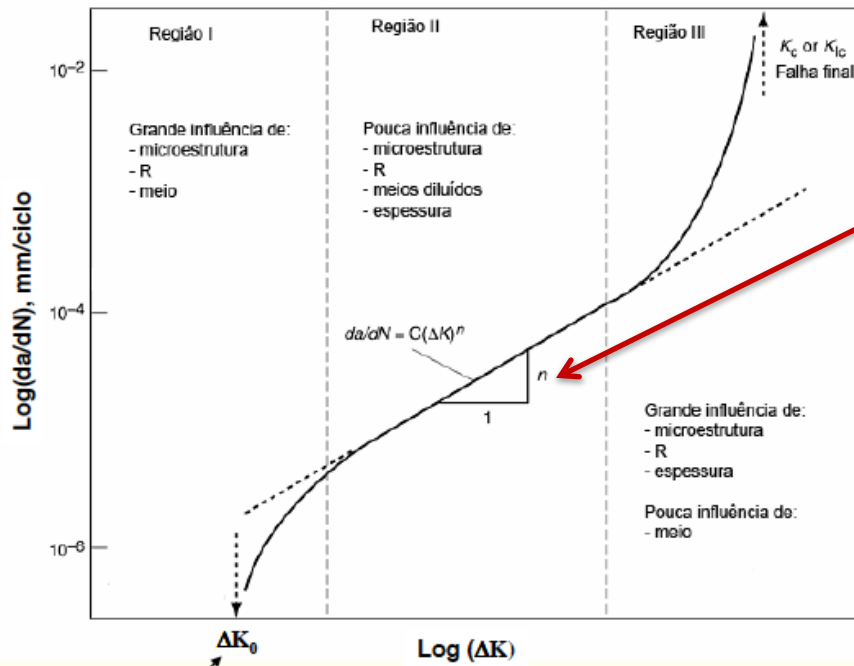
$$K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi * a}$$

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

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



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.

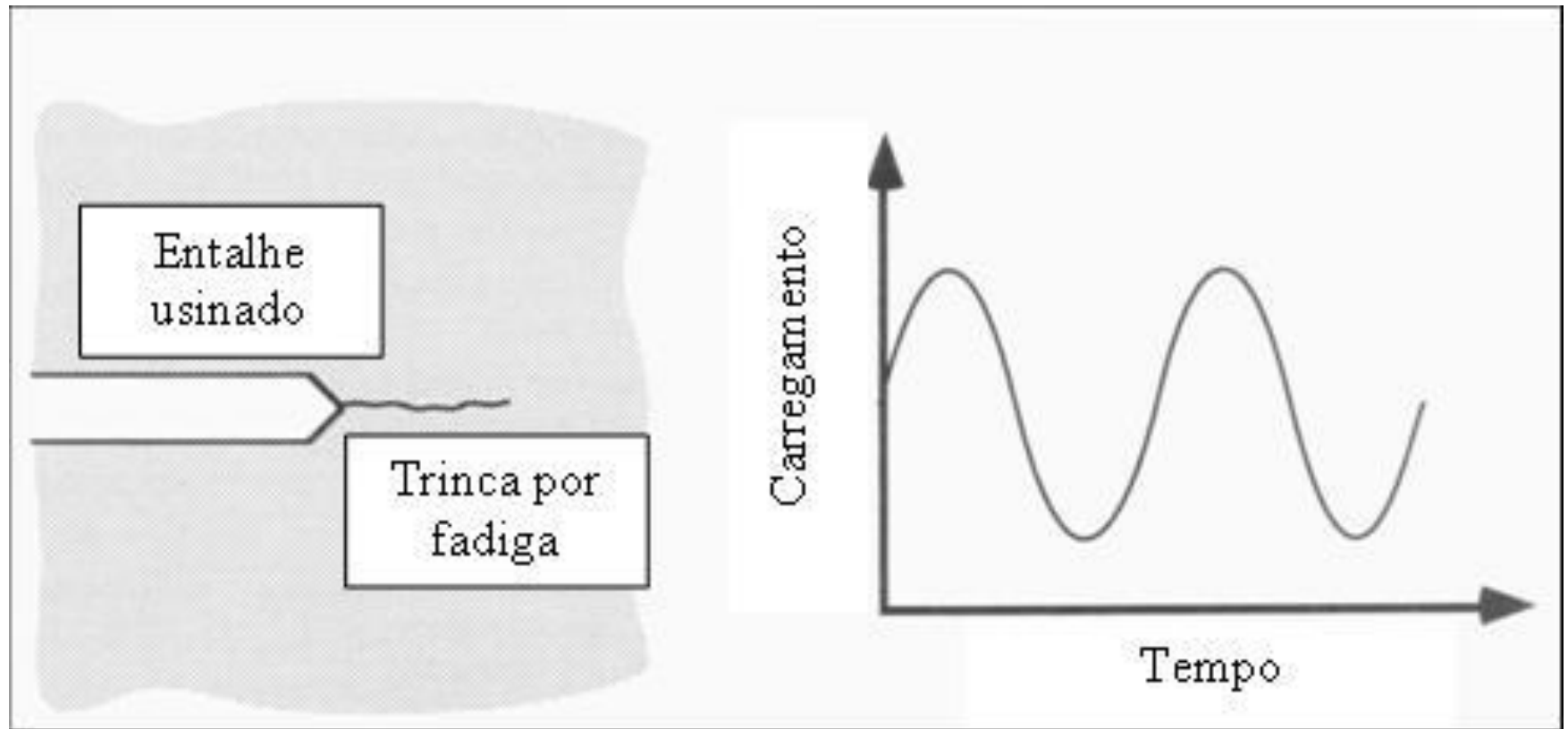
A principal **limitação** da equação de Paris é **não** levar em consideração o valor de **R**

ΔK é a **variação do fator de intensidade de tensão na ponta da trinca** e é calculada por:

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

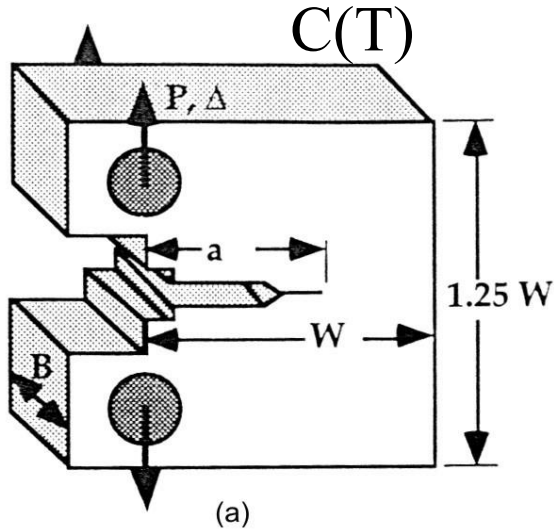
ou

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

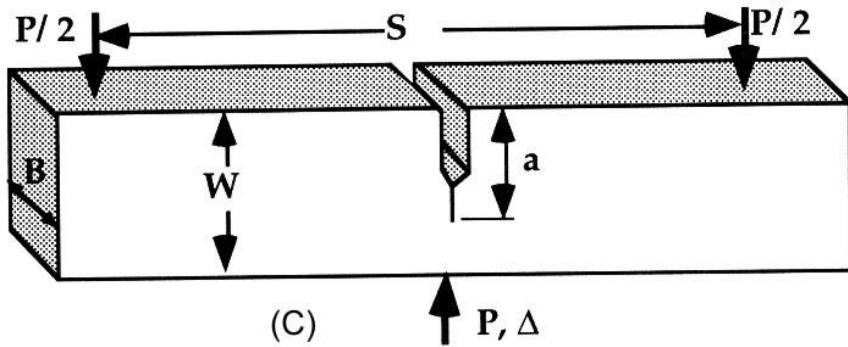


Uma trinca por fadiga é introduzida na ponta do entalhe usinado por meios de carregamento cíclico.

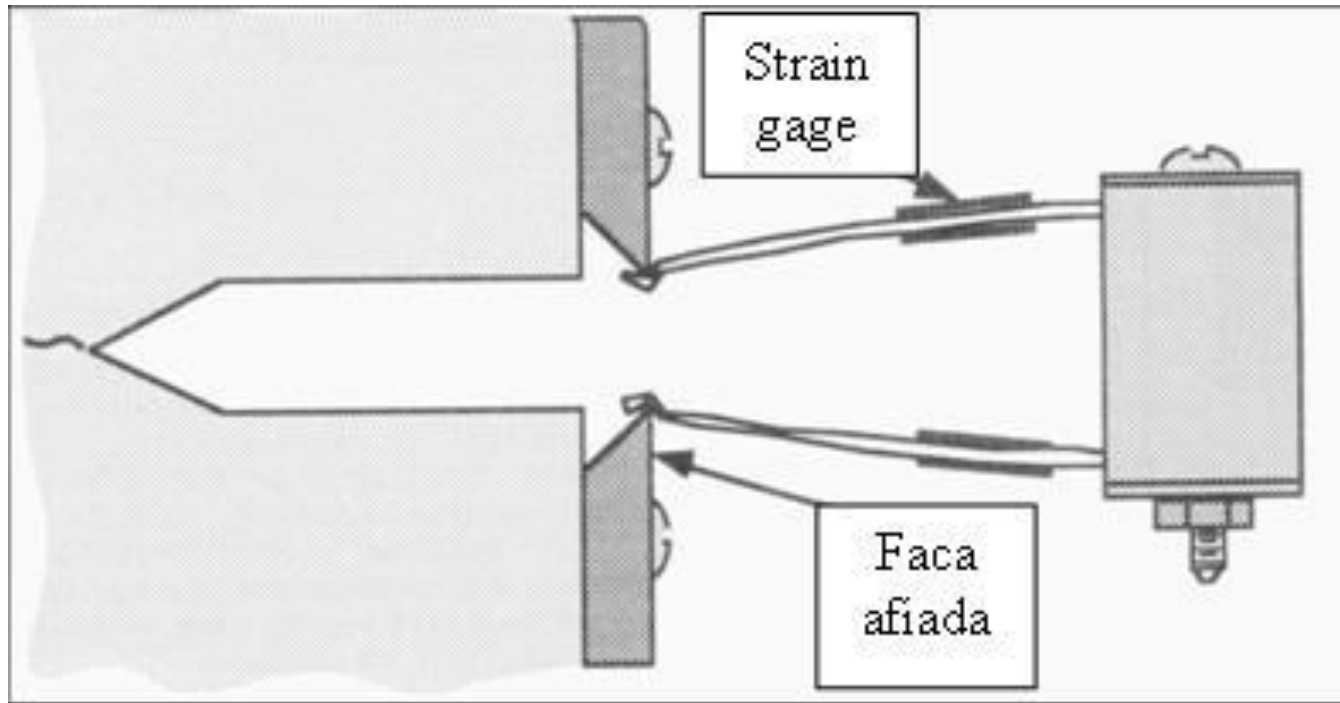
$$K_{IC} = \sigma Y \sqrt{\pi a}$$



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



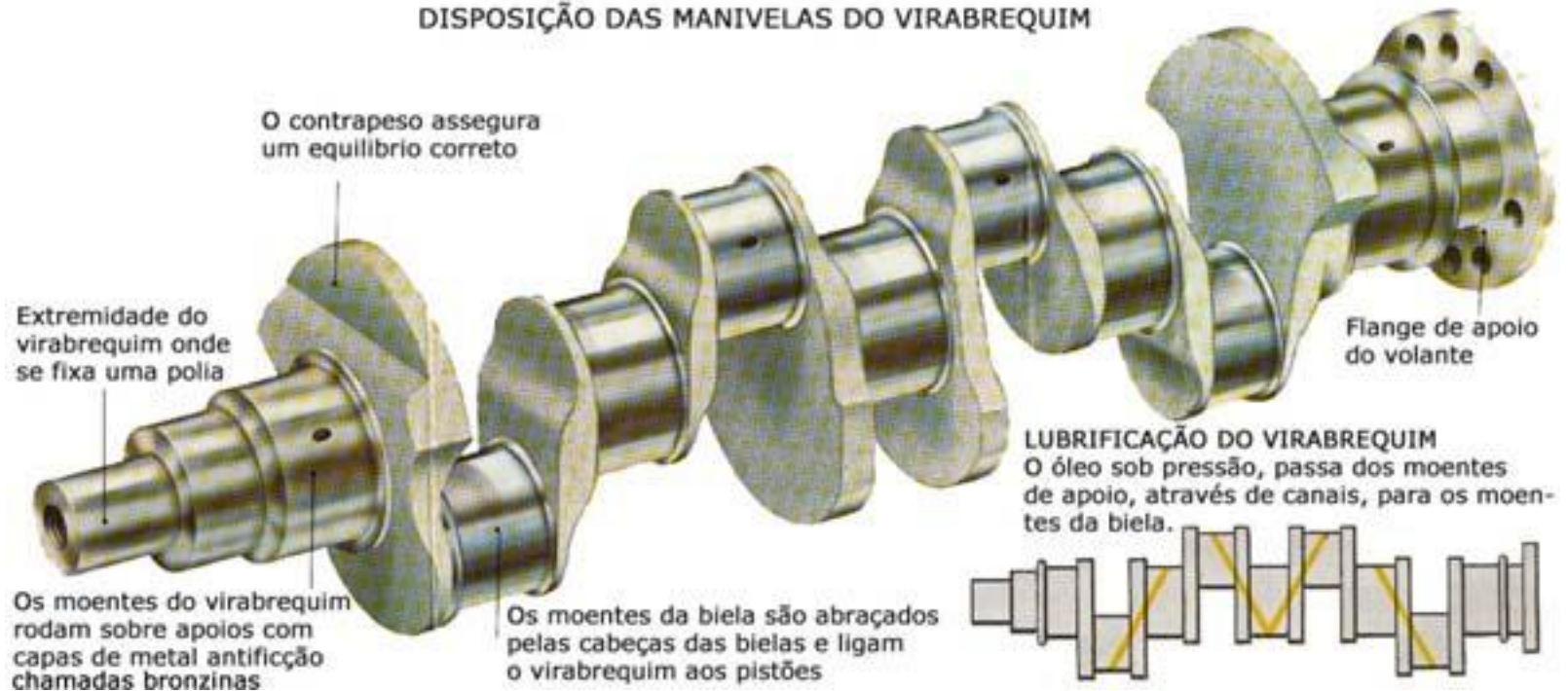
$$Y = f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 2,15 - 3,93\left(\frac{a}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\} \right]$$

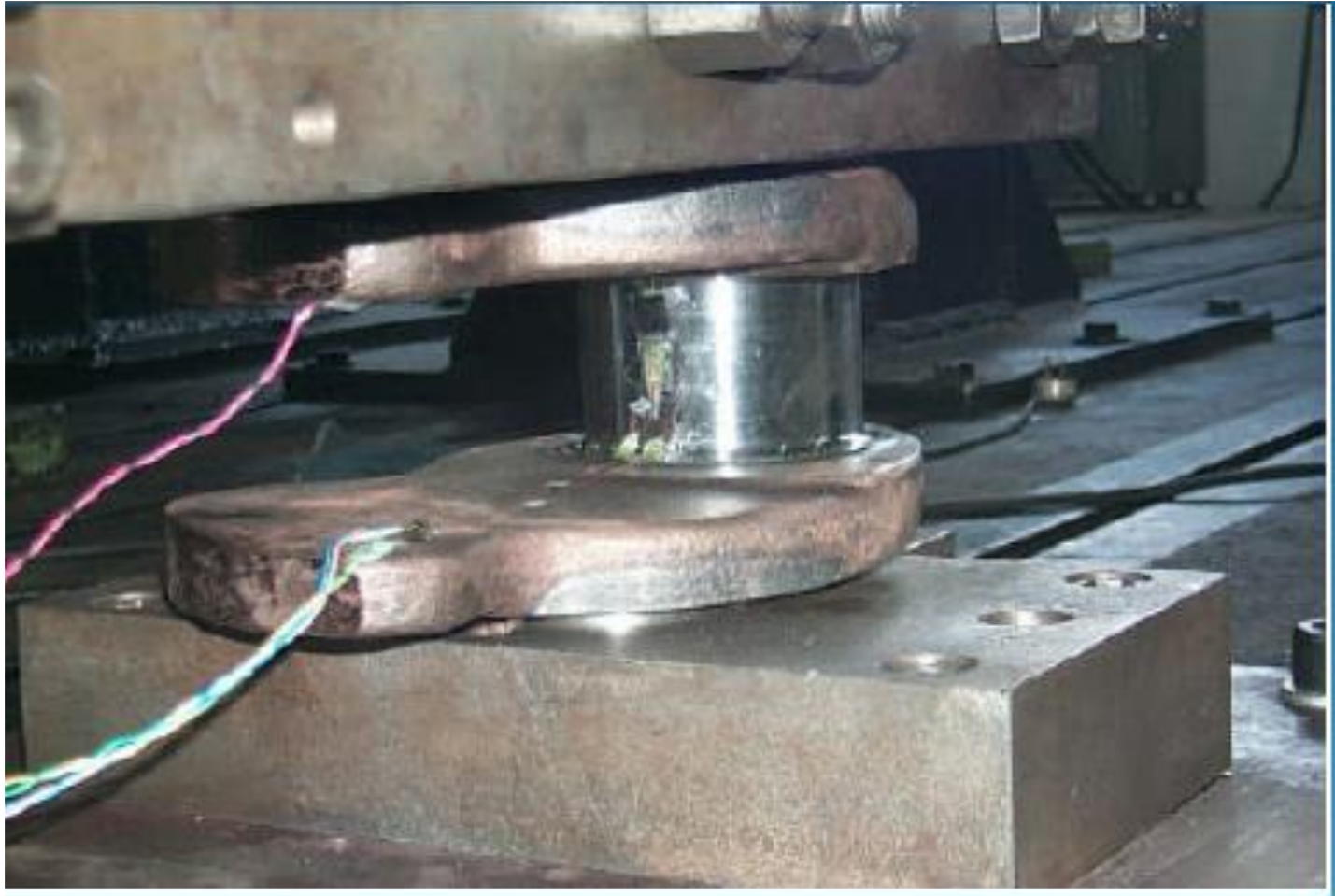


Medida do deslocamento da abertura da trinca : “clip gage”.
Medida do carregamento: células de carga da própria máquina.

ENSAIO DE FADIGA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

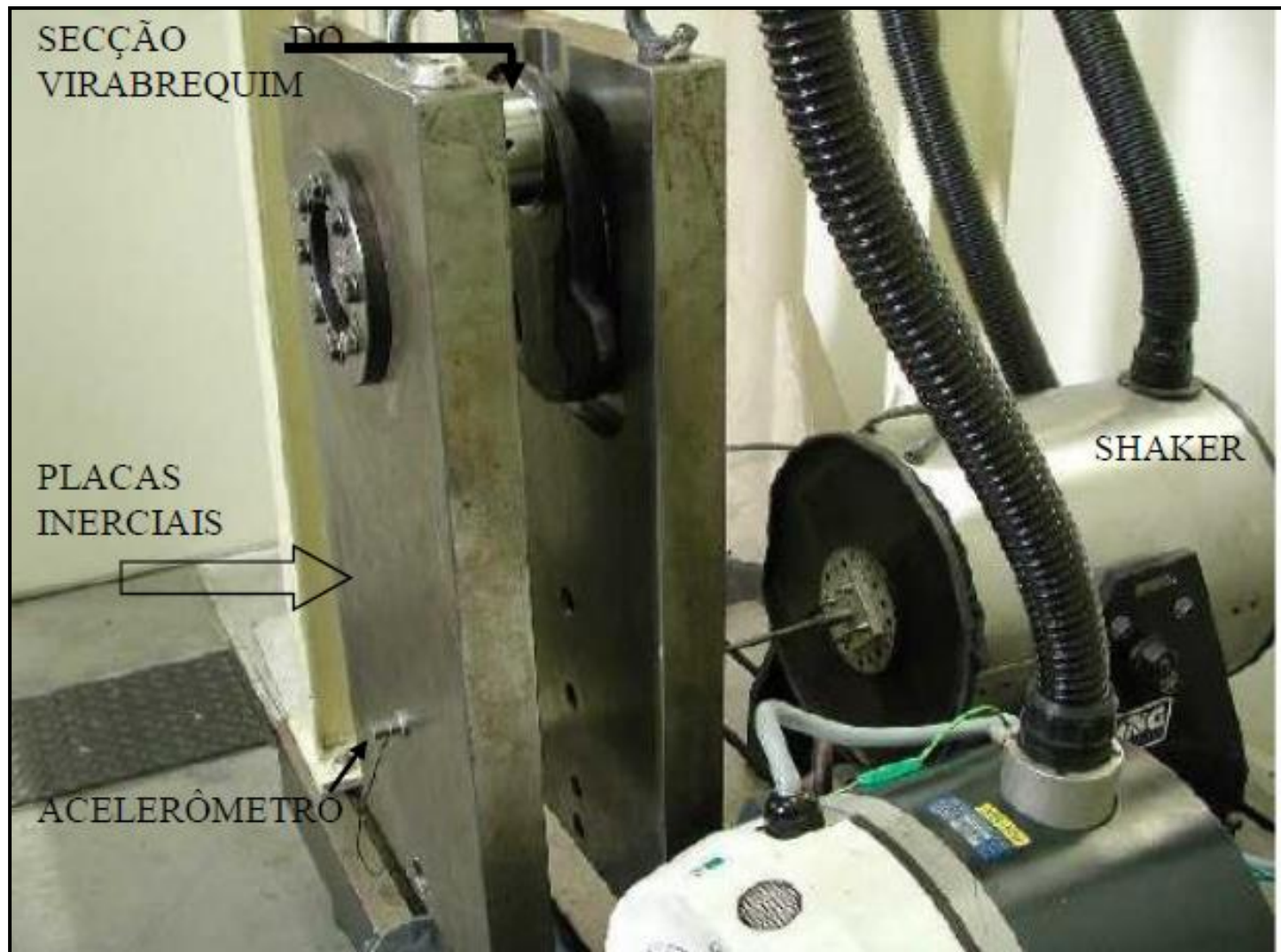
DISPOSIÇÃO DAS MANIVELAS DO VIRABREQUIM





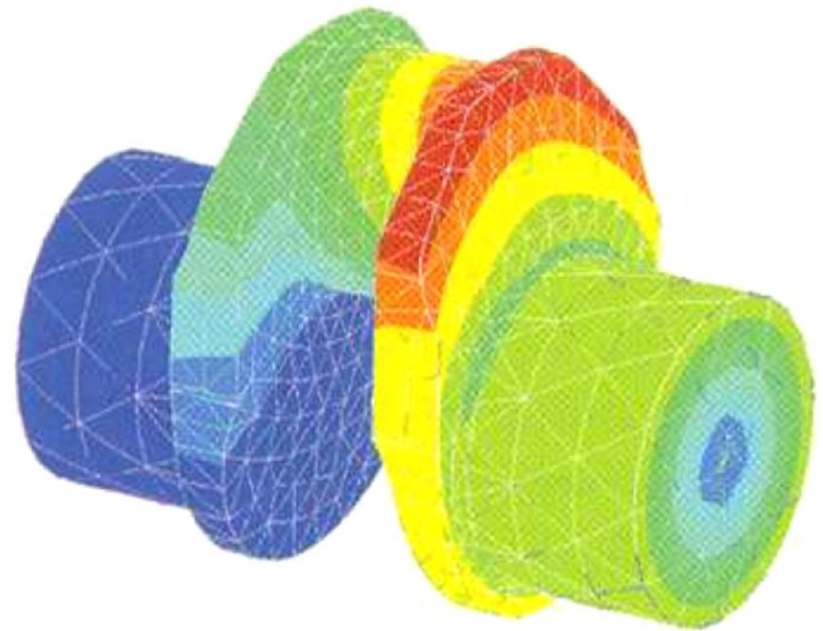
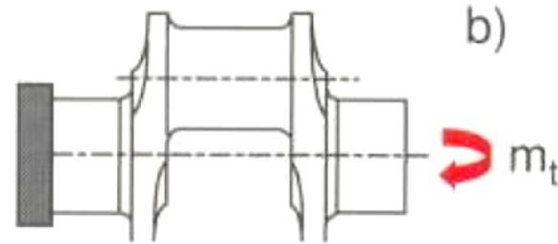
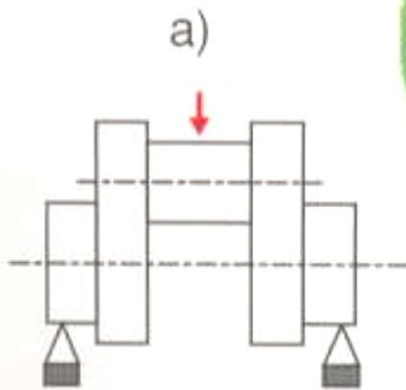
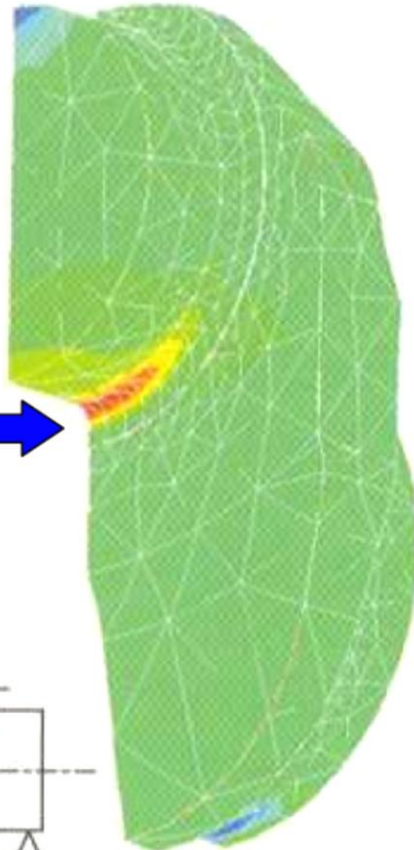
DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS

ENSAIO DE FADIGA



“SHAKER ELETROMAGNÉTICO”- RESONANT DWELL

Maior concentração de tensão no Fillet



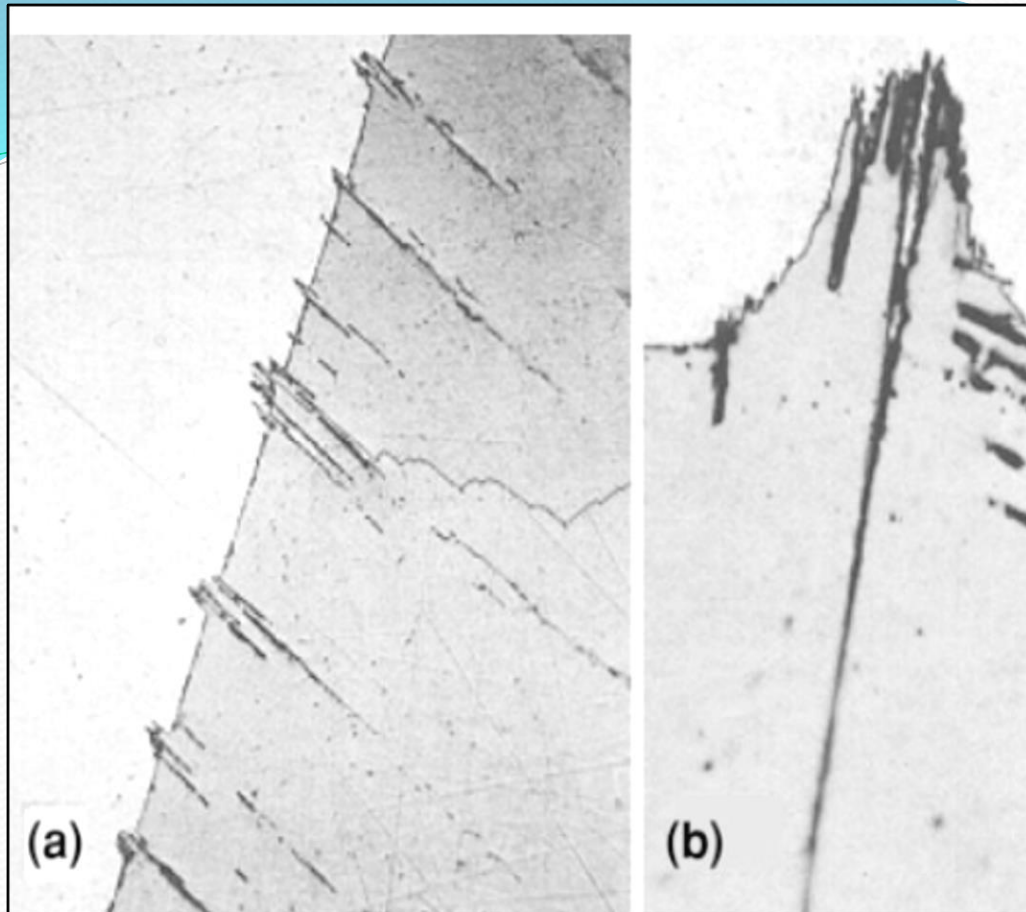
Modelo em elementos finitos apresentando maior concentração de tensão, por "bending", no raio de concordância(fillet) do pin journal.

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

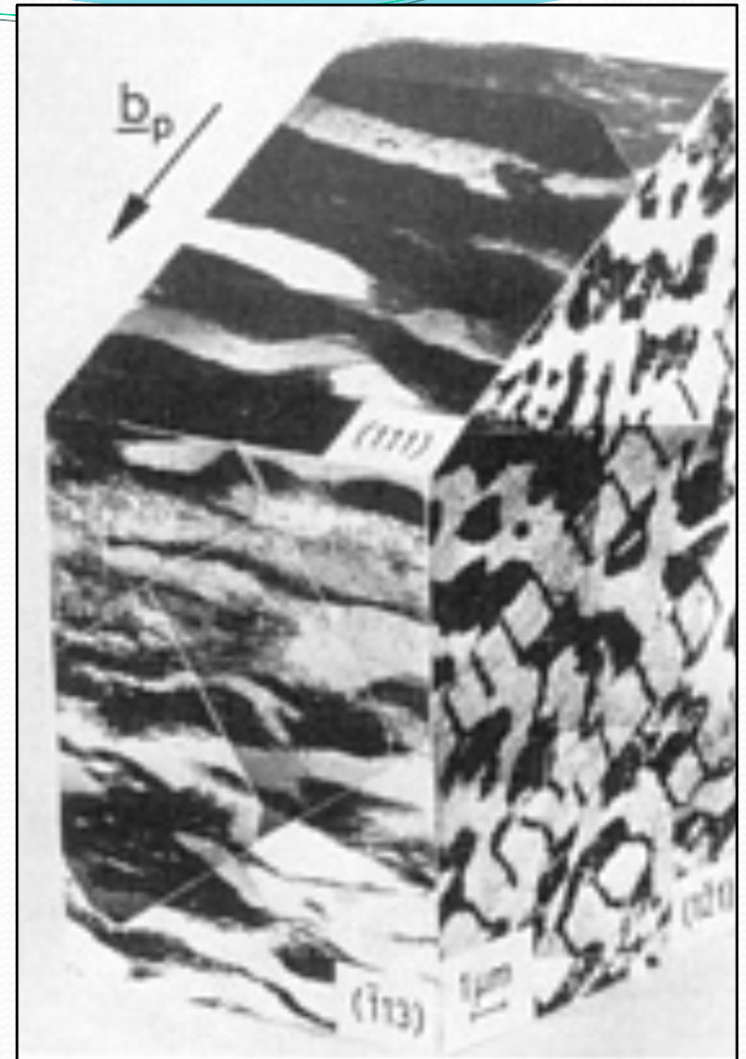
**SOLDA REVELADA POR NITAL
(MATOU A PEÇA E TENTOU
CONSERTAR COM SOLDA SEM TT)**



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

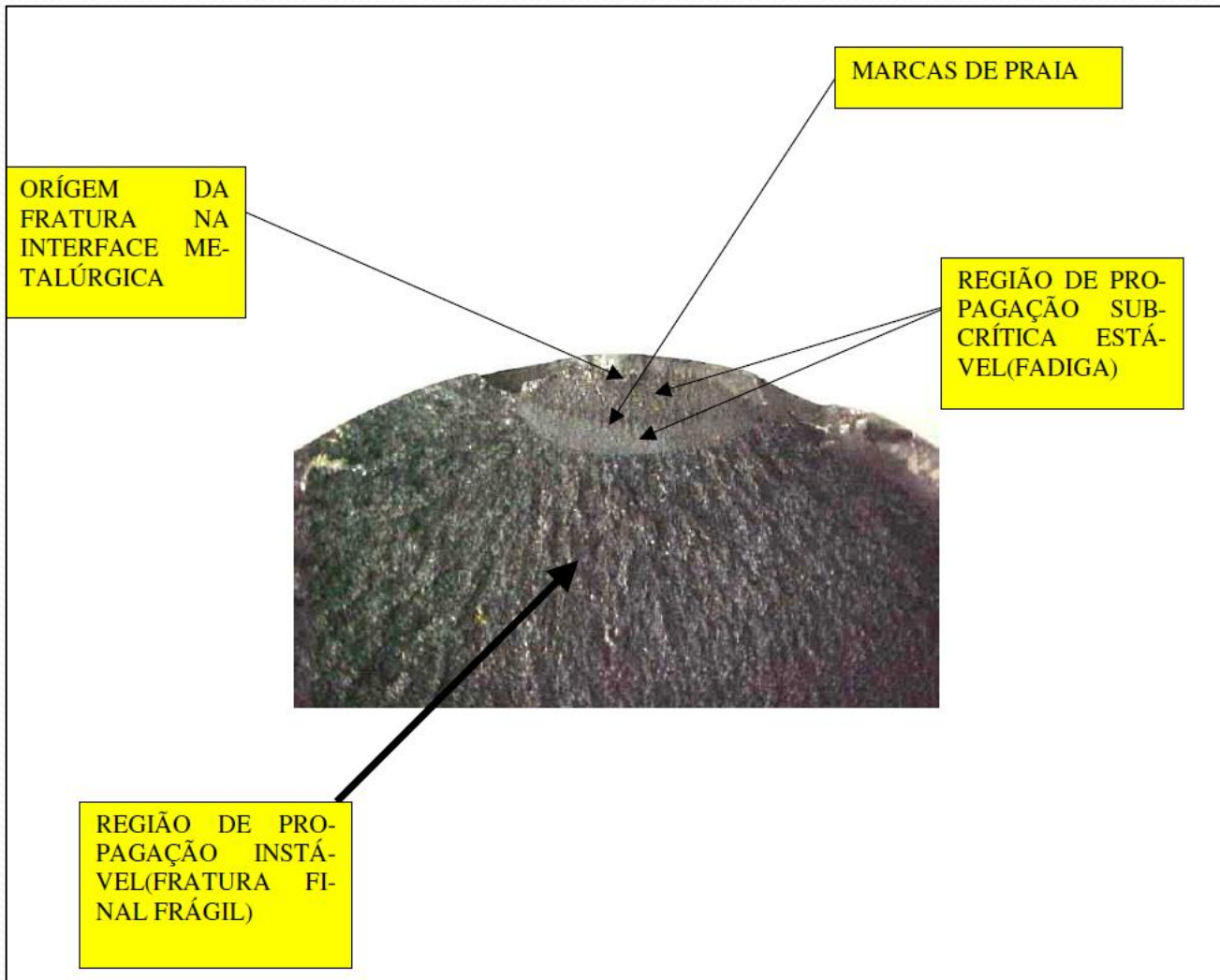


Extrusions observed in a a copper specimen and in b Fe-3 Si

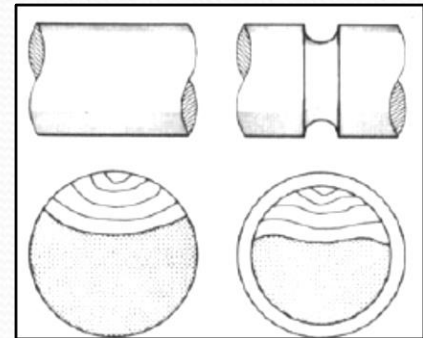


**Typical ladder-like structure of PSBs
(Metals Handbook, vol. 19)**

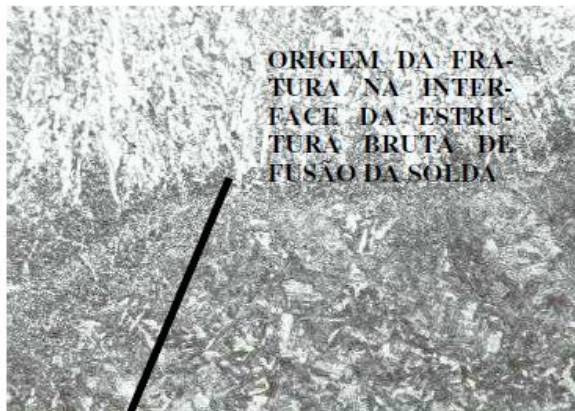
A TRINCA POR FADIGA É NUCLEADA NA SUPERFÍCIE, A NÃO SER QUE OCORRA UMA DESCONTINUIDADE SUBSUPERFICIAL.



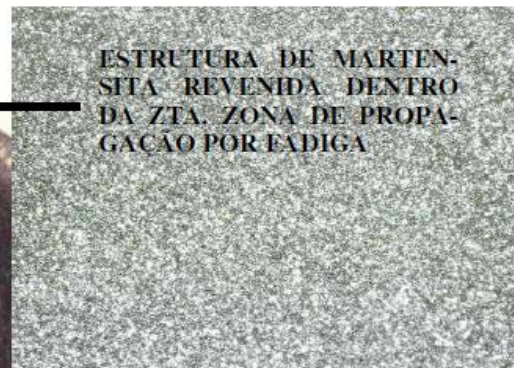
ALTAS TENSÕES



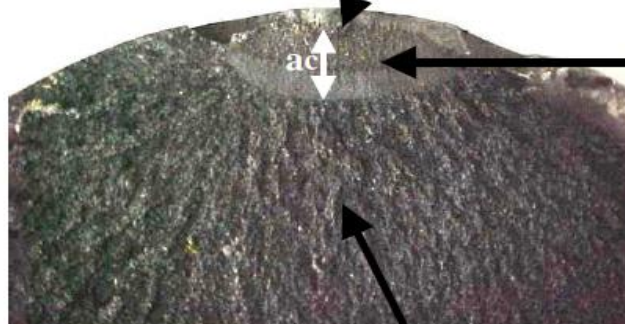
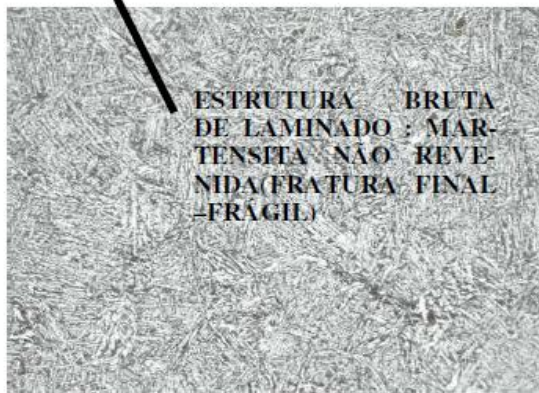
ORIGEM DA FRA-
TURA NA INTER-
FACE DA ESTRU-
TURA BRUTA DE
FUSÃO DA SOLDA



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!!