



**SMM0342-INTRODUÇÃO AO ENSAIO MECÂNICO
DOS MATERIAIS**

**MECÂNICA DA FRATURA E
FADIGA DOS MATERIAIS**

Prof. Dr. José Benedito Marcomini

APÓS TITANIC (1912)

- **Desenvolvimento da Mecânica de Fratura;**
- **Desenvolvimento do ecobatímetro/sonar;**
- **Desenvolvimento do ensaio de ultrassom**

Navios Liberty – 1941-1945

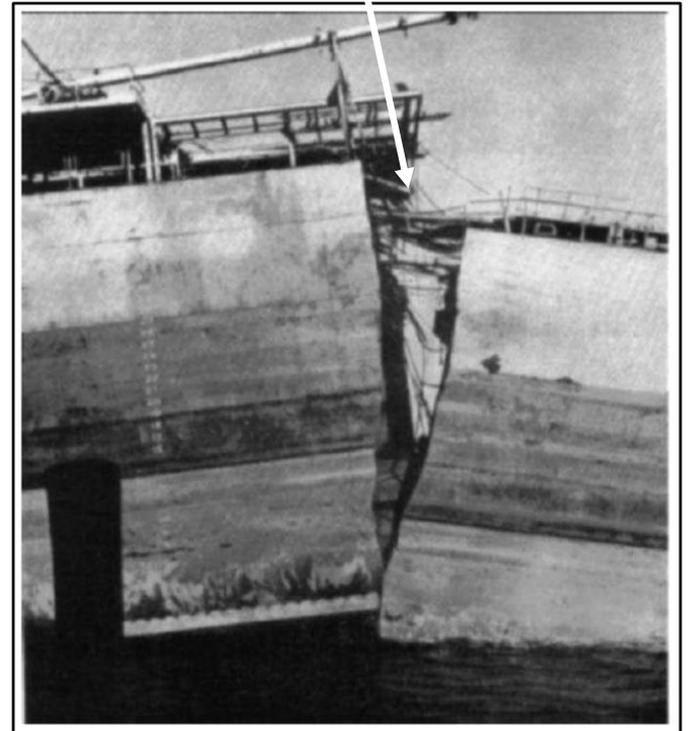
4694 foram **construídos**

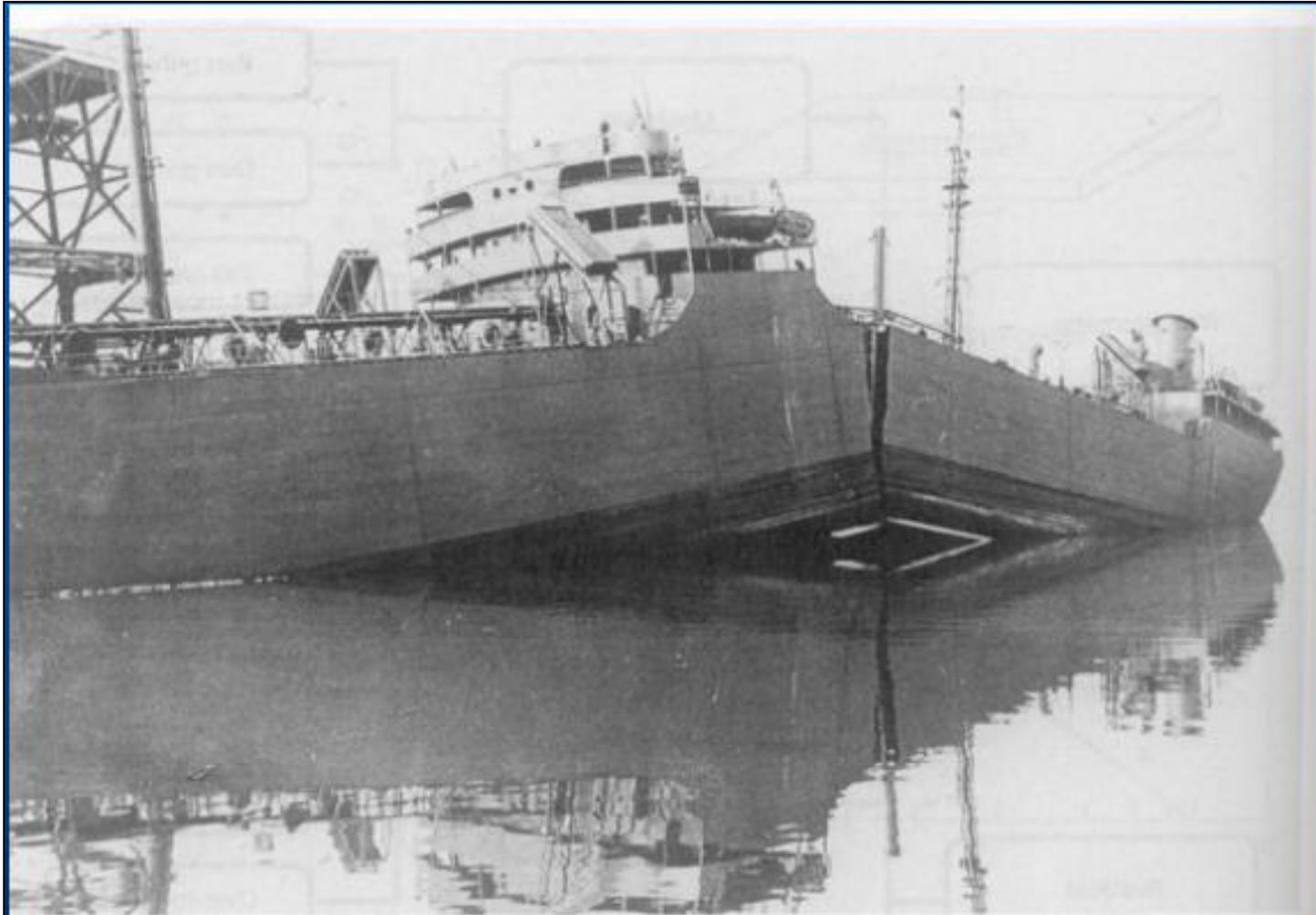
1289 sofreram **fratura frágil**

233 fraturas **catastróficas**

19 navios **partiram ao meio.**

Fabricação em **módulos**
e com **máquina de solda**
para repor os navios
afundados no Atlântico
norte pela Alemanha:
“**revórvi na mão de
macaco**”





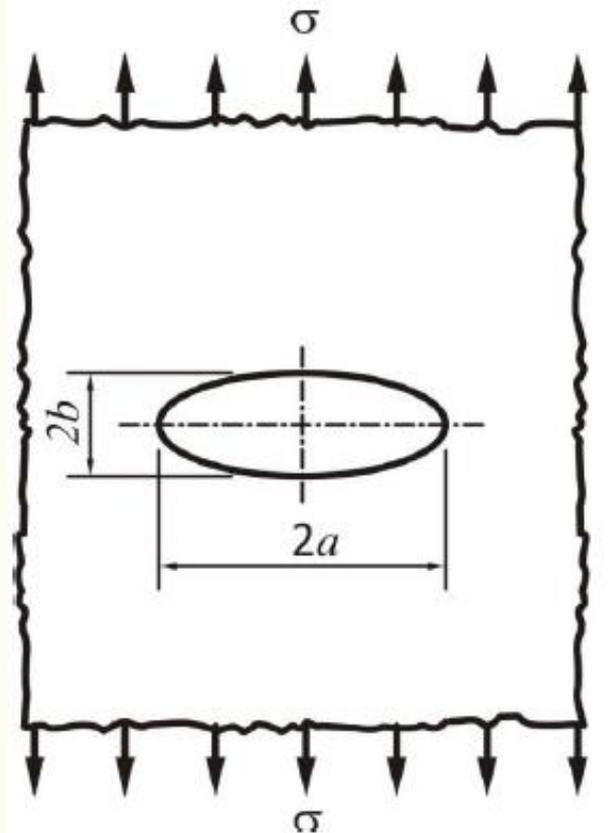
Navio tanque S.S. Schenectady (série Liberty) sofreu fratura catastrófica no porto

A *Mecânica da Fratura Linear Elástica* surgiu devido para prever o comportamento dos materiais sem considerar a presença de descontinuidades internas ou superficiais, como as trincas, introduzindo assim o conceito dos fatores de intensidade de tensão K , K_c e K_{IC} .

A *Mecânica da Fratura Elasto-Plástica* surgiu em função das limitações na aplicação do critério de K_{IC} da Mecânica da Fratura Linear Elástica em materiais dúcteis: zona plástica de tamanho significativo em relação à espessura invalida as considerações de tensões elásticas na ponta da trinca controlando o processo de fratura. Aparece o CTOD e Integral J.

CONTRIBUIÇÃO DE INGLIS (1913)

- Após o afundamento do **Titanic (1912)**;
- **Marco inaugural da Mecânica da Fratura**;
- **Furo elíptico de eixos $2a$ e $2b$** em uma placa sujeita à tensão uniforme σ ;



CONTRIBUIÇÃO DE INGLIS (1913)

- Encontrou uma **expressão simples** para a **tensão máxima** nas extremidades do eixo maior desse furo:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) = \sigma \left(1 + 2 \left(\frac{a}{\rho} \right)^{1/2} \right)$$

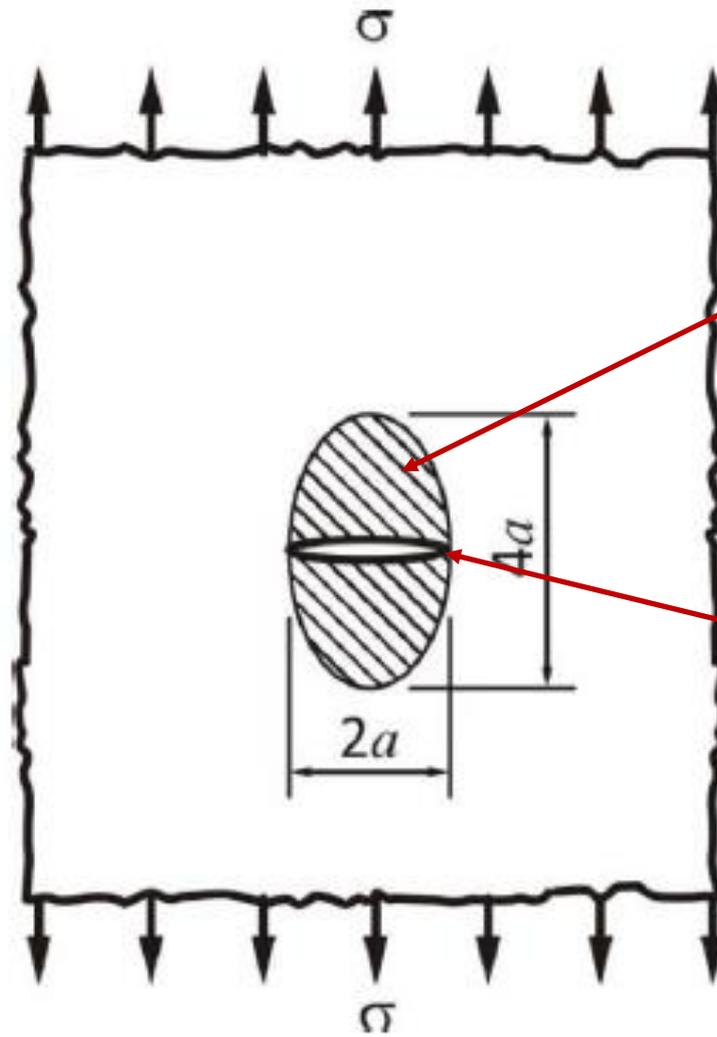
- onde ρ é o raio de curvatura, $\rho = b^2/a$;
- Para $a = b$, furo redondo, $\sigma_{\max} = 3\sigma$, sendo **3** o **fator de concentração** de tensão convencional para um furo redondo;
- **Trinca perfeitamente afiada** ($\rho \rightarrow 0$), a **tensão na ponta** da trinca tende ao **infinito**, resultado que, além de ser **fisicamente impossível**, levaria à **previsão errônea** de que os **materiais teriam resistência nula**.

GRIFFITH(1920)

- **The phenomena of rupture and flow in solids**, The Philosophical Transactions of the Royal Society A, v.221, p.163-198, **1920**;
- Trabalhou com **vidro**, fornecidos na forma de tubos de ensaio:
 - **SiO₂ - 69,2%**;
 - **K₂O - 12,0 %**;
 - **Na₂O - 0,9%**;
 - **Al₂O₃ 11,8 %**;
 - **CaO – 4,5 %** ;
 - **MnO – 0,9 %**.

Placa de largura infinita e espessura unitária

Material linear elástico



Campo de tensão elástica (área hachurada). Nulo nas extremidades da trinca.

Trinca com comprimento $2a$

BALANÇO ENERGÉTICO DE GRIFFITH

- Existe um **trabalho** realizado, um **aumento de energia superficial** (W_s), com a **introdução de uma superfície de fratura**, que é **proporcional à energia superficial por unidade de área** (γ_s) e **proporcional ao comprimento da trinca** a :

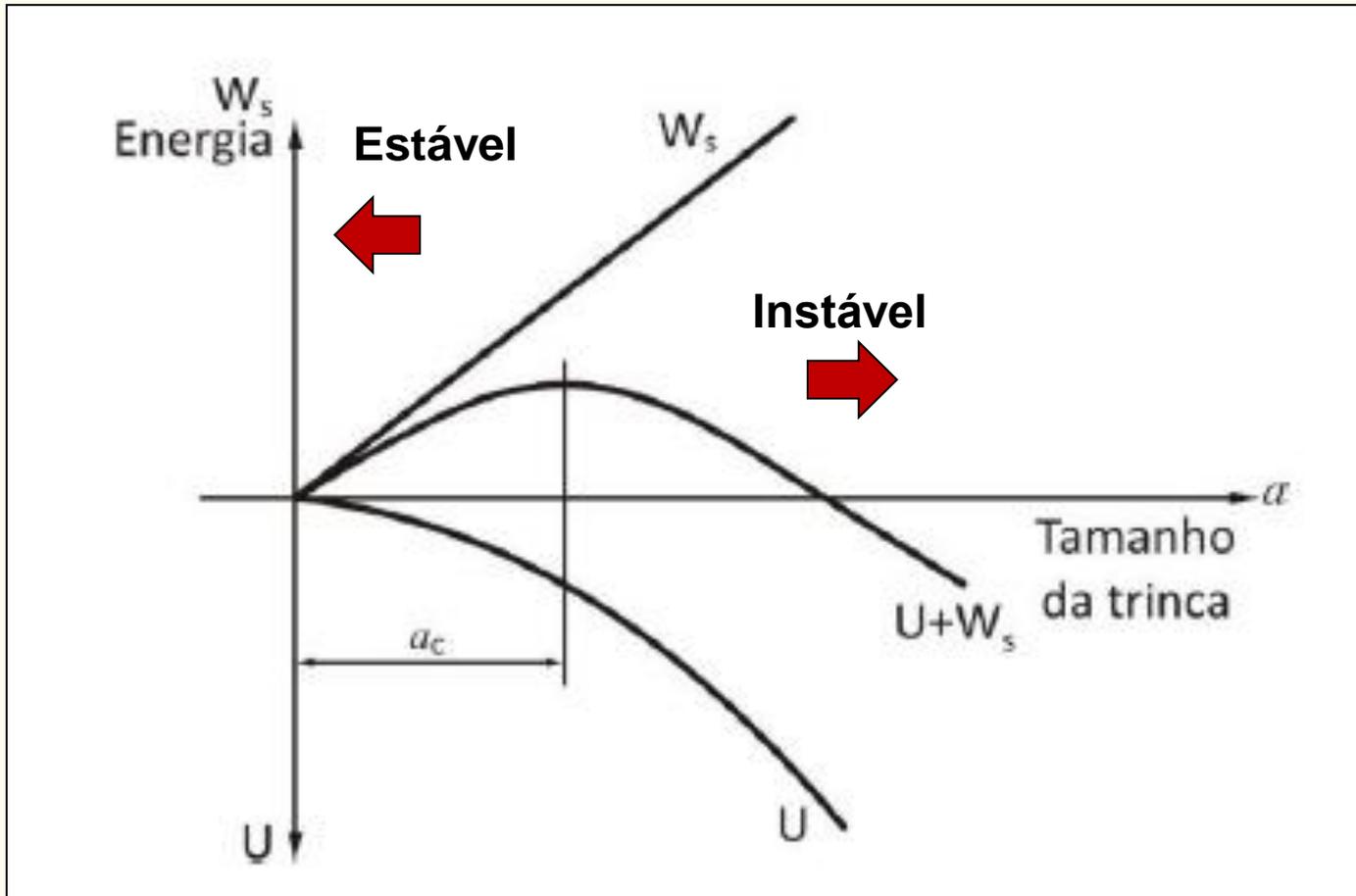
$$W_s = 4a\gamma_s$$

- Quando a **trinca se propaga**, isto é quando **aumenta a área das superfícies de fratura**, ocorre o **aumento desse W_s** mas também ocorre a **liberação da energia elástica armazenada** (U):

$$U = \pi \left(\frac{\sigma^2}{E} \right) a^2$$

Balanço energético: Se com a abertura das superfícies de fratura ocorrer maior liberação de energia elástica (negativa) que aumento do trabalho/energia superficial (positiva), então a trinca se propaga instavelmente.

BALANÇO ENERGÉTICO DE GRIFFITH



$$\frac{dW_s}{da} + \frac{dU}{da} < 0$$

$$\frac{dW_s}{da} + \frac{dU}{da} < 0$$

Se a **propagação** da trinca (**abertura de superfície de fratura**) proporcionar **menor energia** ao sistema, então esta ocorrerá. O **balanço** é entre **deformação elástica** e **propagação da fratura**, isto é, **fratura sem deformação plástica: frágil**.

Griffith **testou** essa teoria em **vidros**, **fornecidos na forma de tubos de ensaio**, conforme seu trabalho publicado em 1920. A composição química do vidro utilizado era: **SiO₂ - 69,2%**; **K₂O - 12,0 %**, **Na₂O - 0,9%**; **Al₂O₃ - 11,8 %**; **CaO - 4,5 %** ; **MnO - 0,9 %**.

Derivando as equações e substituindo:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}}$$

Felbeck e Orowan, entre **1945 e 1955**, aperfeiçoaram a teoria de **Griffith** introduzindo uma **componente plástica** (γ_p):

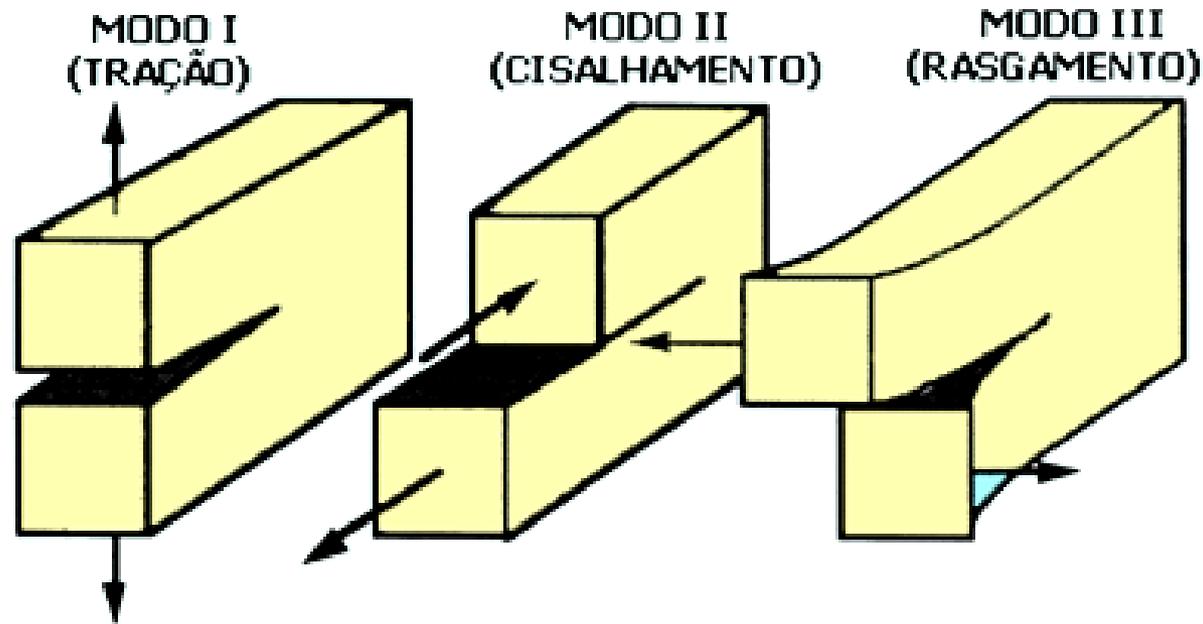
$$\sigma_f = \left| \frac{E \cdot \gamma_p}{\pi \cdot a} \right|^{1/2}$$

Irwin, entre **1948 e 1957** propôs que deveria existir uma quantidade crítica de energia para ocorrer a fratura (**G_c**) e chegou à equação que é utilizada hoje, em função de um **fator de intensidade de tensões** (**K**):

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Conceitos da Mecânica da Fratura

Um corpo trincado pode ser carregado em um ou combinação dos seguintes modos de carregamentos:



Muitos problemas de trincas em componentes de engenharia envolvem o **modo I de carregamento**,

Para analisar a tensão na ponta de uma trinca, utiliza-se um parâmetro denominado K, que é o fator de intensidade de tensão na ponta da trinca (energia), e é calculado por:

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a}$$

a é o tamanho da trinca;

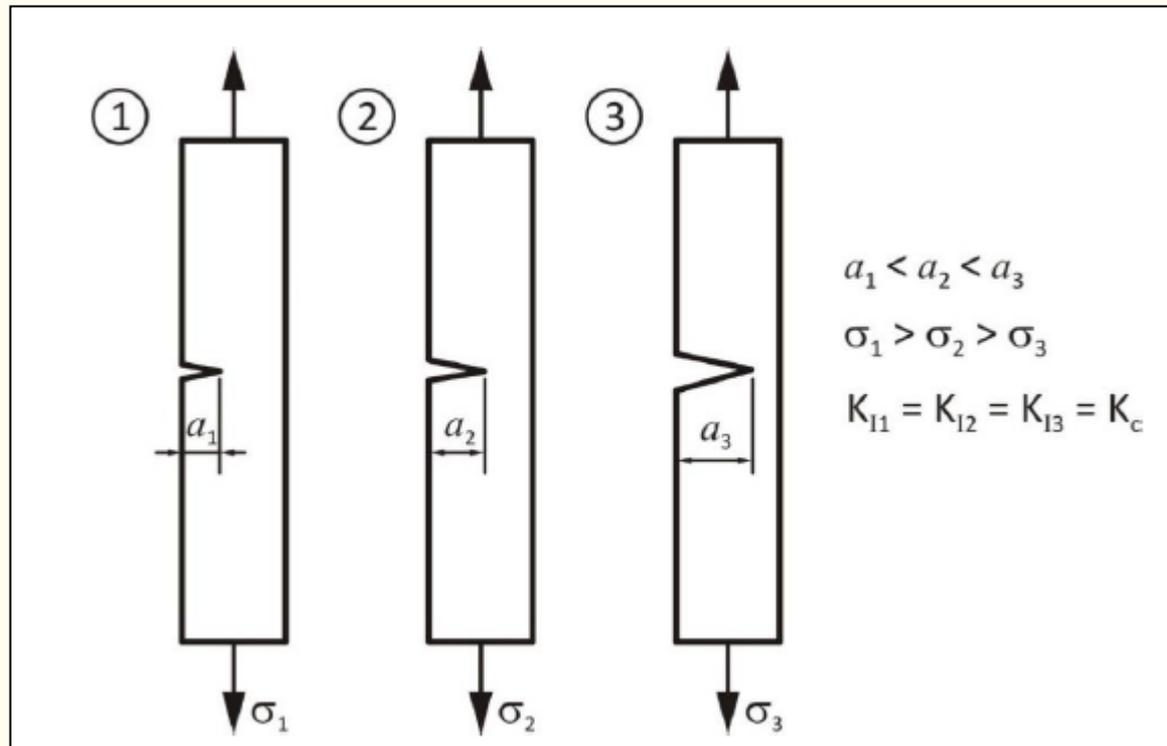
σ é a tensão aplicada.

A unidade de K é em $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Onde F representa uma função que depende tanto do tamanho, quanto da geometria da trinca e do corpo de prova, bem como da maneira que é aplicada a carga.

FATOR DE INTENSIDADE CRÍTICO

- 3 barras **linearmente elásticas do mesmo material**;
- Cada uma com **trinca de comprimento diferente**;
- Quanto **maior a trinca menor a tensão necessária**;
- Porém **todas** fraturam instavelmente com um **mesmo K , K_C** .



Tenacidade à Fratura

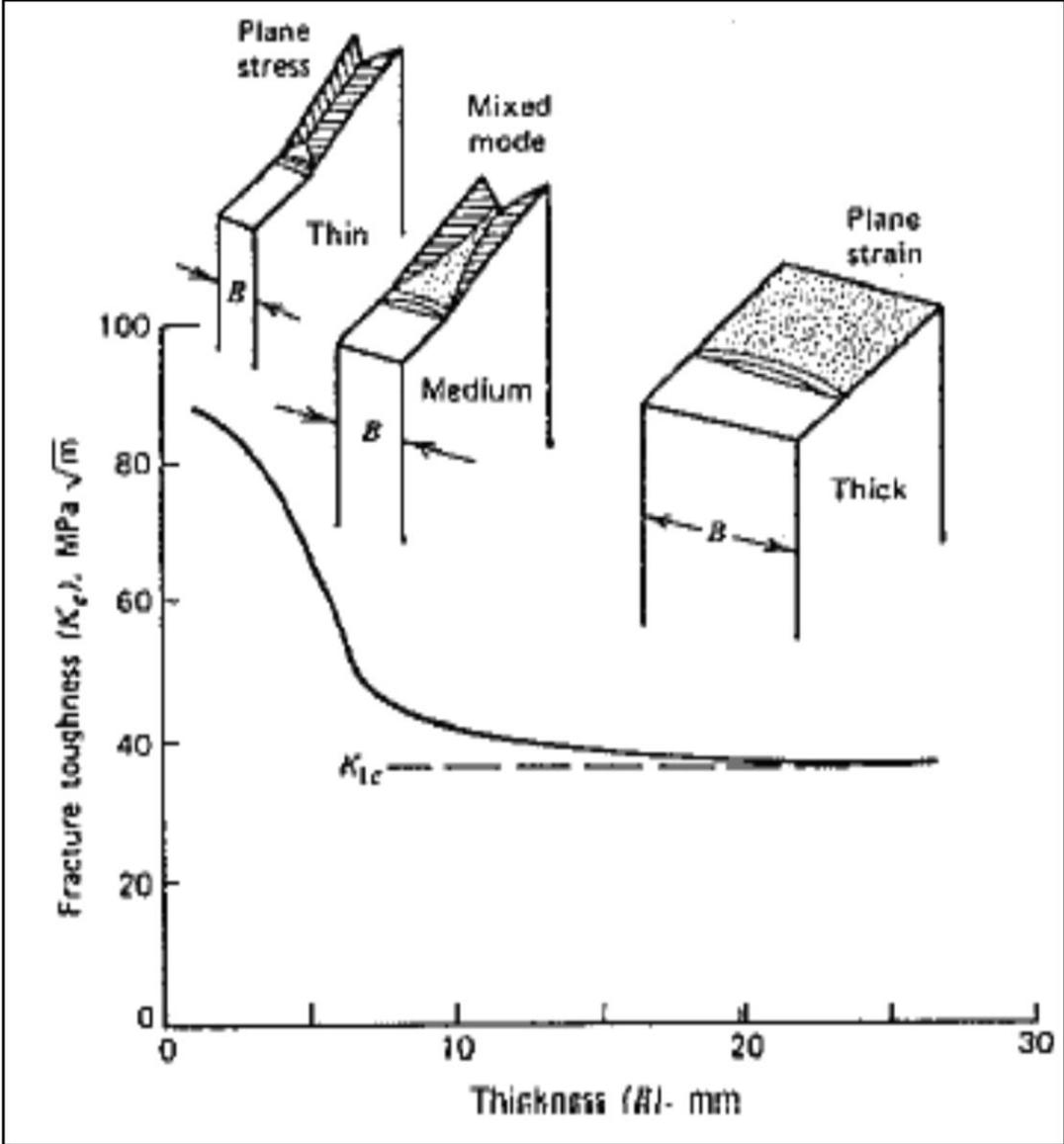
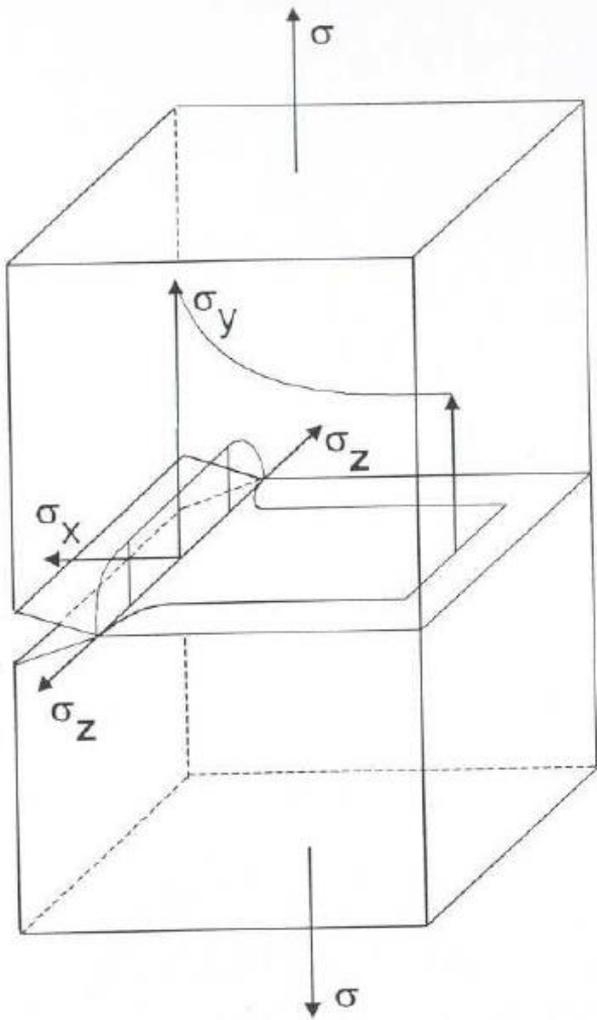
Uma vez que esteja definido o valor de σ_c para materiais frágeis como foi proposto por Griffith, de maneira análoga, também existe um valor crítico de intensidade de tensão, K_c , para o qual o material apresenta fratura frágil.

$$K_c = F\sigma\sqrt{\pi a_c}$$

F é uma relação de (a/W: a é trinca e W largura do corpo de prova) e para dimensões finitas, existe uma expressão para determiná-lo.

Assim, por definição, *a tenacidade à fratura é uma propriedade que representa a resistência de um material à fratura frágil quando uma trinca está presente. Resistência à propagação de uma trinca pré-existente.*

ESTADO TRIAXIAL DE TENSÕES



Para amostras finas, K_C varia com a espessura. Para uma **determinada espessura**, K_C se torna **independente da espessura** e para estas condições, uma nova propriedade é utilizada, K_{IC} .

K_{IC} é o fator de intensidade de tensão crítico em deformação plana (corpos espessos) no modo de carregamento I. Existe uma espessura mínima.

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

Para materiais frágeis, temos baixos valores de K_{IC} enquanto que para materiais dúcteis, temos altos valores de K_{IC} .

K_{IC} é a **tenacidade à fratura em deformação plana, no modo I**.

Dessa forma, **para um projeto** , deve-se levar em consideração:

- A tenacidade à fratura **K_{Ic}** (se for em **tensão plana**) ou **K_{IC}** (se for em **deformação plana**);
- A **tensão imposta ao material**, **σ**
- O **tamanho da descontinuidade (trinca)**, **a**

Podemos concluir que:

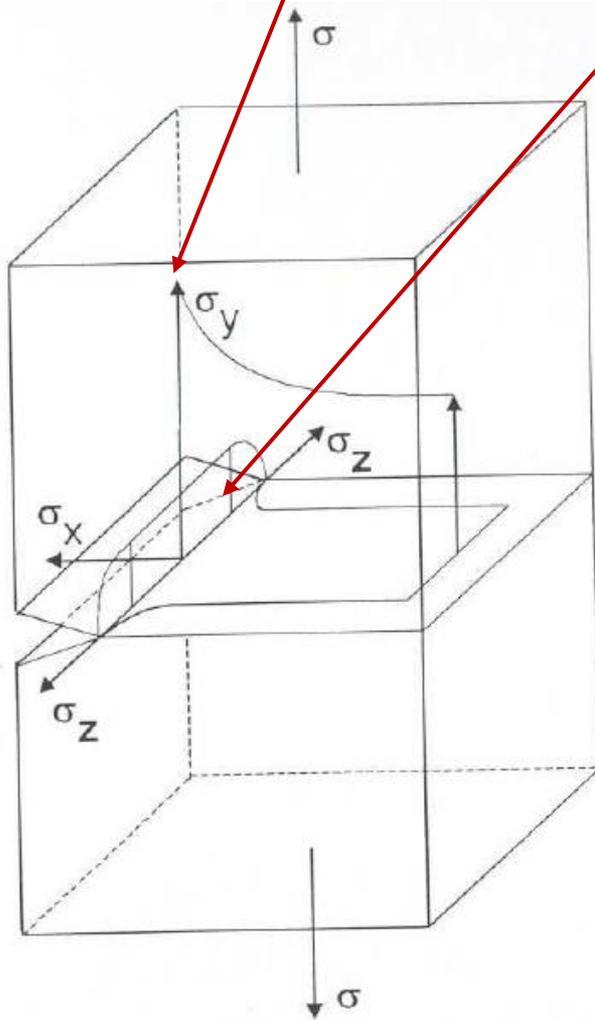
- se no projeto **K_{IC}** e o tamanho da descontinuidade **a** forem especificados, então sabemos que a tensão crítica deve ser:

$$\sigma_c \leq \frac{K_{IC}}{F \sqrt{\pi a}}$$

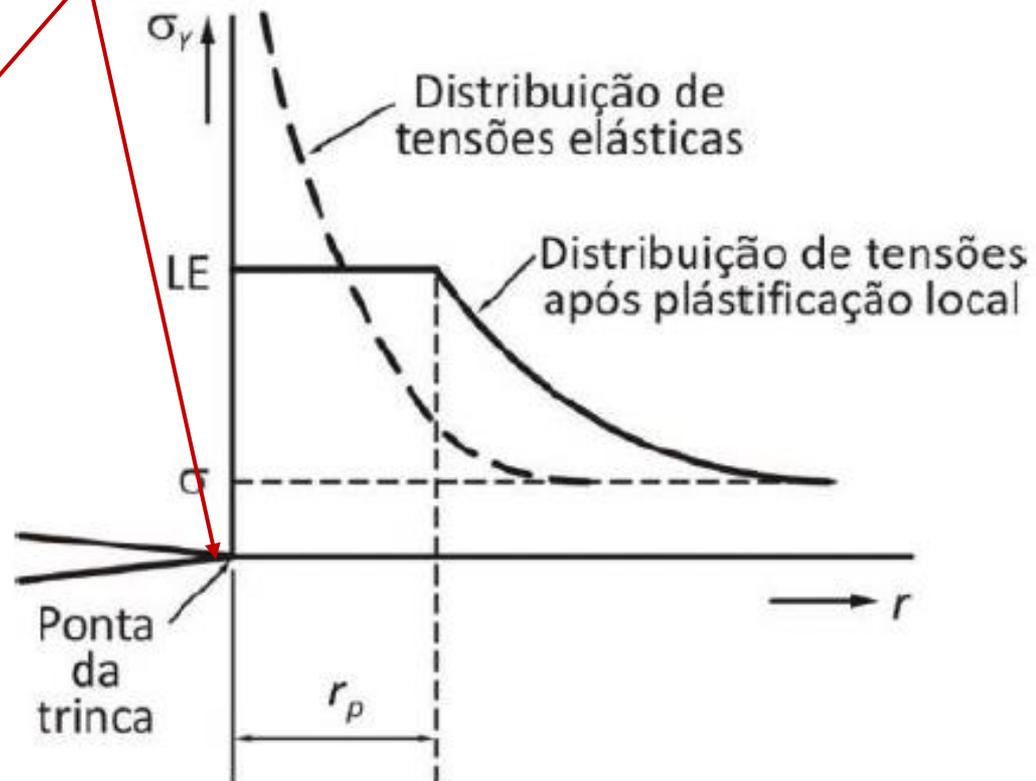
Pode-se então, determinar o **tamanho crítico (a_c)** da descontinuidade, nessas condições

$$a_c \equiv \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma F} \right)^2$$

TENSÃO EM Y, LIMITADA PELO LIMITE DE ESCOAMENTO (σ_y)



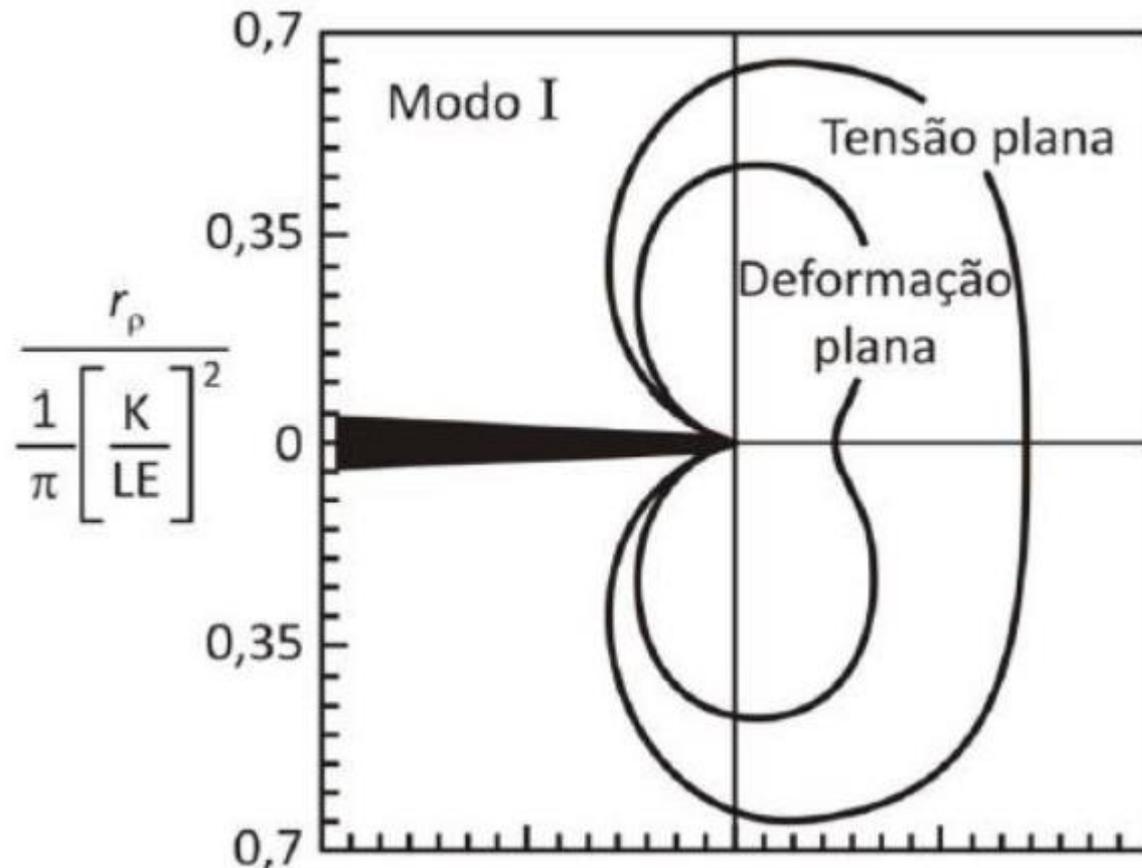
ZONA PLÁSTICA



$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K}{LE} \right)^2, \text{ para estado plano de tensão.}$$

$$r_p \approx \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{LE} \right)^2, \text{ para estado plano de deformação.}$$

A exata determinação da zona plástica na ponta da trinca não é algo fácil de ser feito. Devido à deformação plástica, é muito complexo!

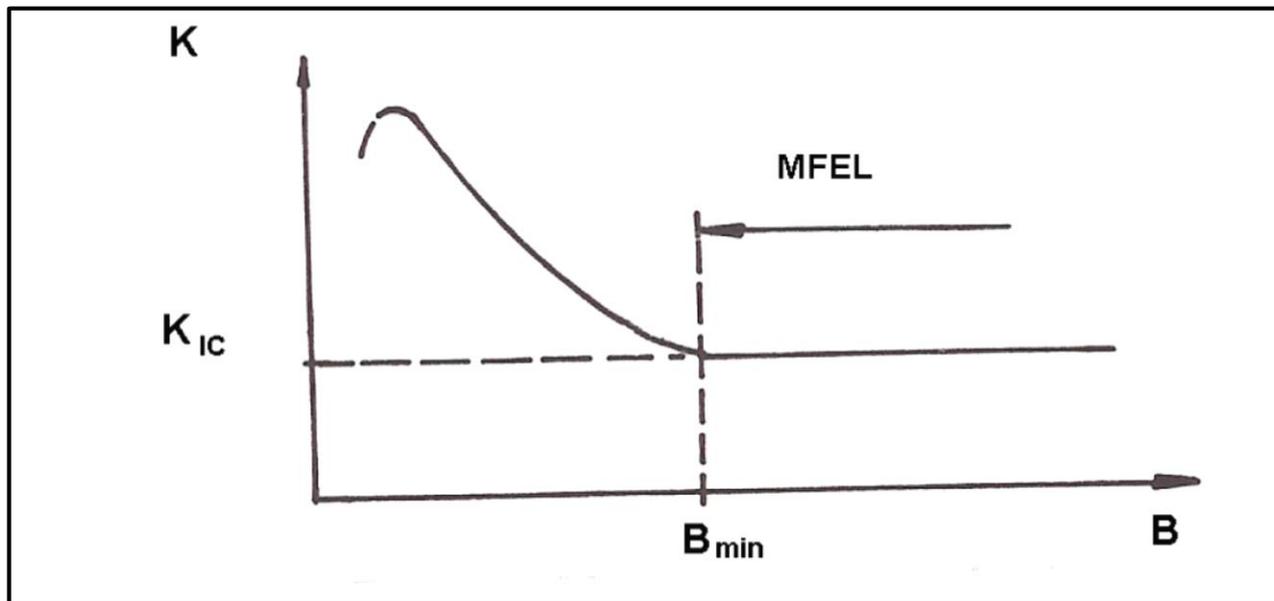


Forma da zona plástica à frente de uma trinca de modo I, estimada a partir da solução elástica empregando o critério de escoamento de von Mises

A tenacidade à fratura em deformação plana (K_{IC})

$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right)^2$$

mecânica de fratura elástica linear



**MATERIAIS MUITO
DÚTEIS E/OU MUITO
TENAZES**



B – MUITO GRANDE



ENSAIO FICA INVIÁVEL

Em **1963**, **Paris e Erdogan** demonstraram que havia uma relação entre o **crescimento** de uma descontinuidade (trinca) (da/dn) com a **variação do fator de intensidade de tensões (ΔK)**. Até **1968**, a **Mecânica de Fratura conhecida era a Linear Elástica**. Neste ano, **James Robert Rice** introduziu a **Mecânica de Fratura Elasto-Plástica**, com o conceito de **integral J**

**RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS
(MECÂNICA DOS SÓLIDOS)
X
MECÂNICA DA FRATURA**

Postulados da Resistência dos Materiais

1 – Continuidade física

A matéria apresenta uma estrutura contínua, ou seja, são desconsiderados todos os vazios e porosidades

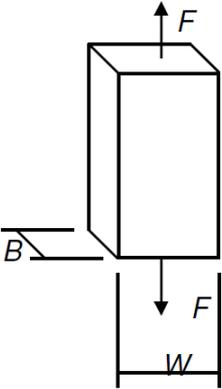
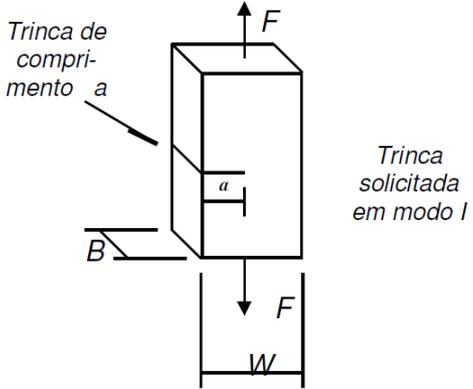
2 – Homogeneidade

O material apresenta as mesmas características mecânicas, de elasticidade e de resistência em todos os pontos

3 – Isotropia

O material apresenta as mesmas características mecânicas e elásticas em todas as direções

Antes da MF, utilizava-se OS resultados dos ensaios primários

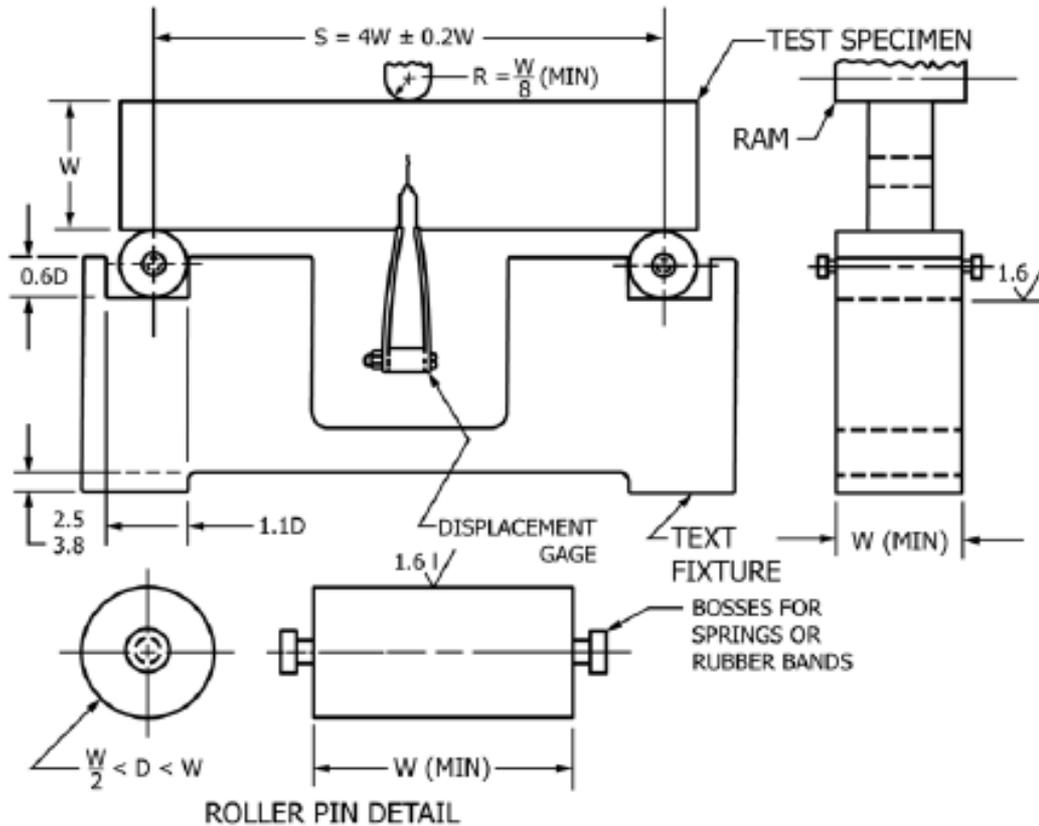
RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	MECÂNICA DA FRATURA
<p>1. Barra prismática solicitada à tração de um material de alta resistência mecânica.</p> 	<p>1. Barra com uma trinca solicitada à tração de um material de alta resistência mecânica.</p> 
<p>2. Parâmetro característico</p> $\sigma = \frac{F}{BW} \quad \text{onde:}$ <p>σ é a tensão normal de tração (MPa)</p>	<p>2. Parâmetros característicos</p> $\sigma = \frac{F}{BW}$ $K_I = y \cdot \sigma \sqrt{a} \quad \text{onde:}$ <p>y é um parâmetro adimensional que depende da geometria da trinca e do corpo [$y=f(a/W)$];</p> <p>K_I é o fator de intensidade de tensão em modo I (MPa\sqrt{m});</p> <p>a é o comprimento da trinca.</p>
<p>3. Critério de Projeto</p> $\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{CS} \quad \text{onde:}$ <p>σ_{adm} é a tensão admissível;</p> <p>σ_e é o limite de escoamento;</p> <p>CS é o coeficiente de segurança.</p>	<p>3. Critério de Projeto</p> $K_{Iadm} = \frac{K_{IC}}{CS'} \quad \text{onde:}$ <p>K_{Iadm} é o fator de intensidade de tensão admissível;</p> <p>K_{IC} é a tenacidade à fratura em deformação plana (valor crítico do fator de intensidade de tensão);</p> <p>CS' é o coeficiente de segurança.</p>



Designation: E399 - 12^{e3}

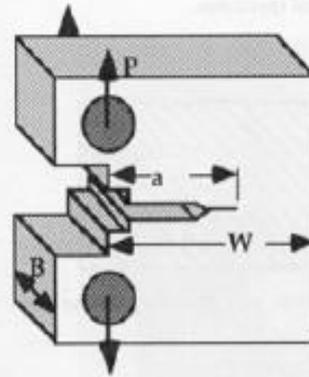
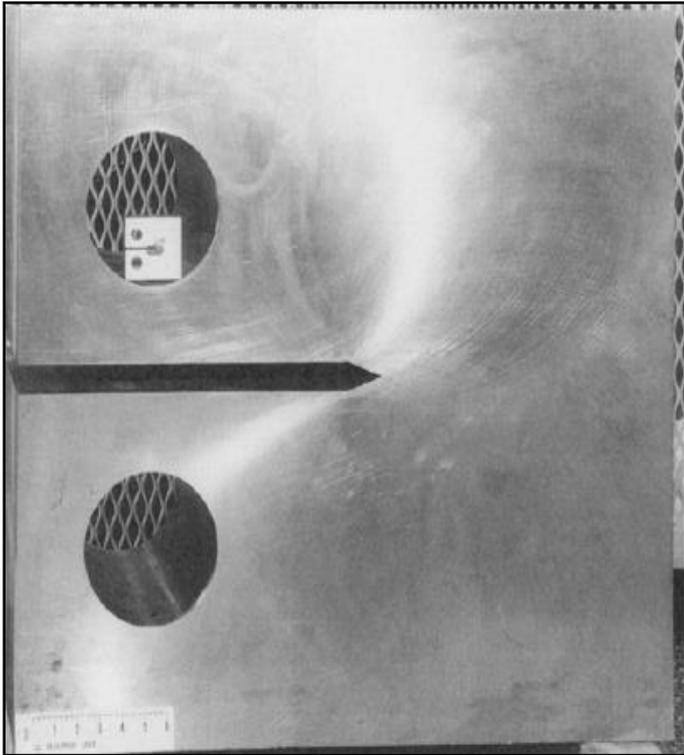
Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials¹

ASTM E399 - 12^{e3}

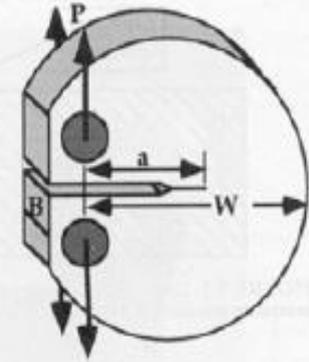


MECÂNICA DE FRATURA - ENSAIOS

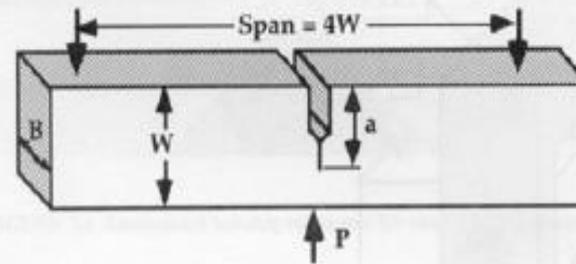
TENACIDADE À FRATURA - K_{Ic}



(a) Compact specimen.



(b) Disk shaped compact specimen.

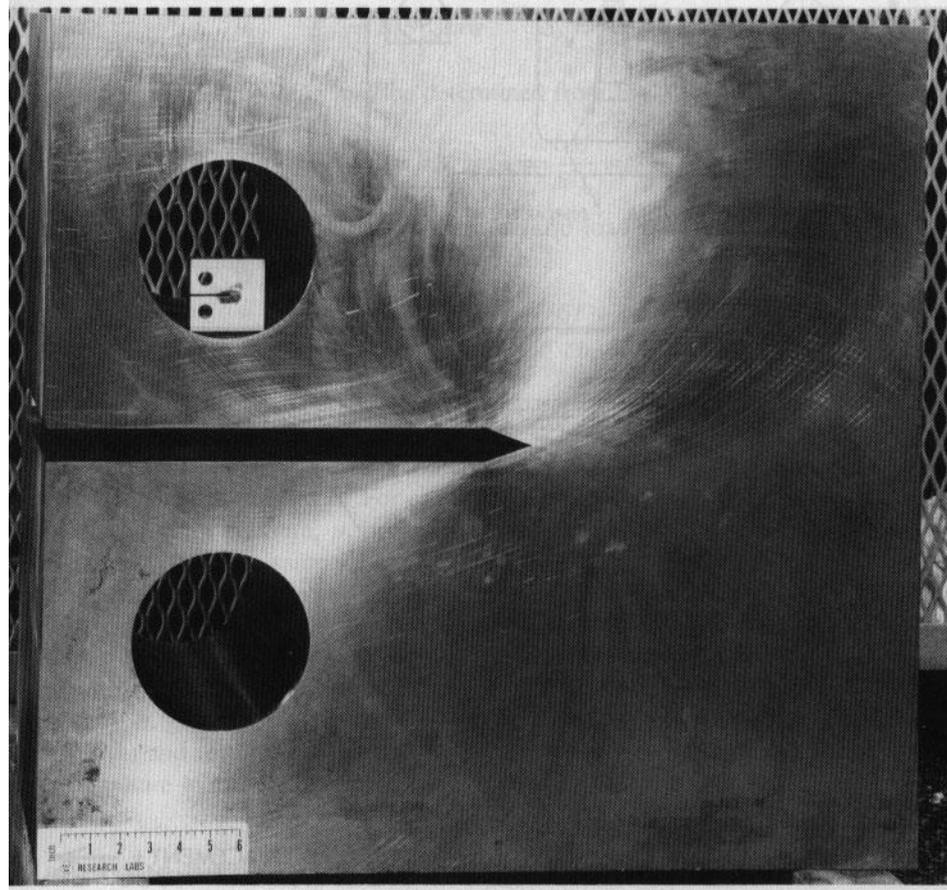


(c) Single edge notched bend (SENB) specimen.

Para satisfazer o teste:

Condição de deformação plana e o corpo de prova precisa se comportar de maneira linearmente elástica.

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{YS}} \right)^2$$



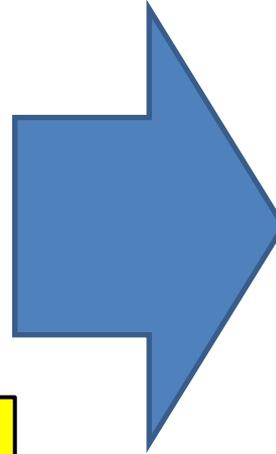
MECÂNICA DE FRATURA

LIMITAÇÕES DA MECÂNICA
DE FRATURA LINEAR
ELÁSTICA (K_{Ic})

MATERIAIS MUITO
DÚTEIS E/OU
MUITO TENAZES

B – MUITO GRANDE

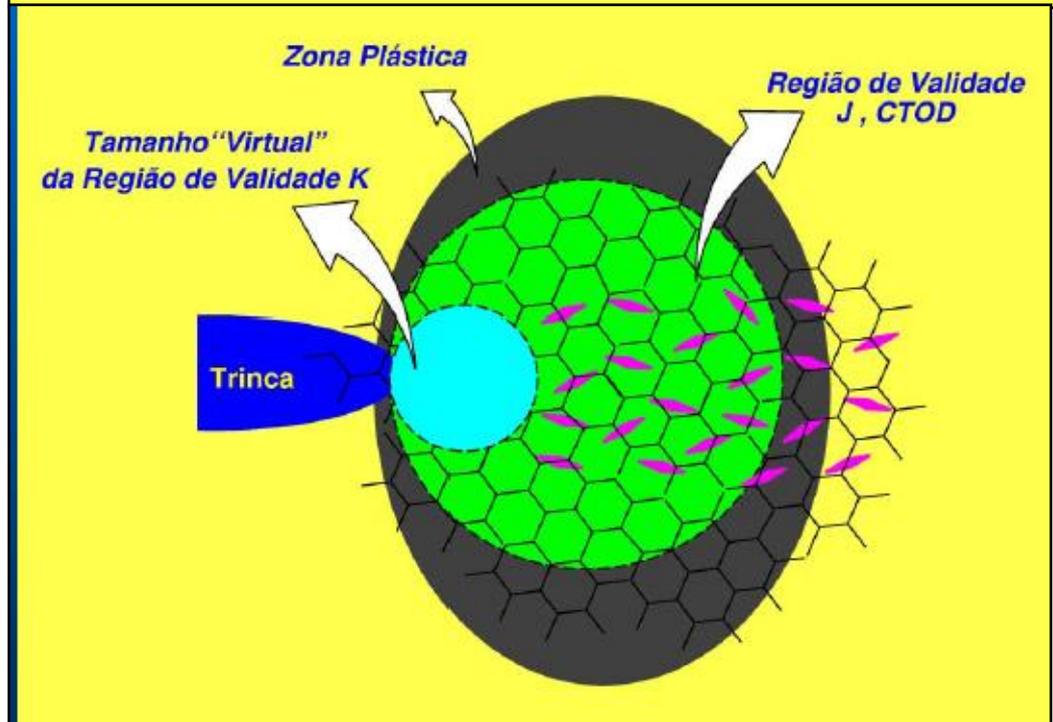
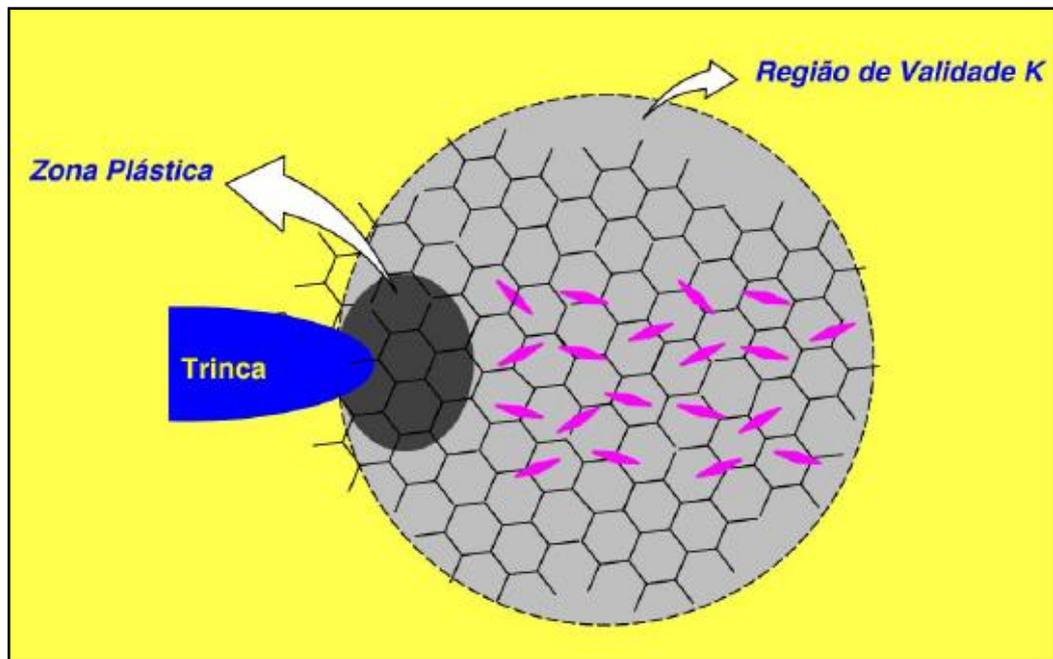
MICROESTRUTURA
COMPLEXA DO
MATERIAL



MECÂNICA DE
FRATURA
ELASTOPLÁSTICA
(INTEGRAL J)

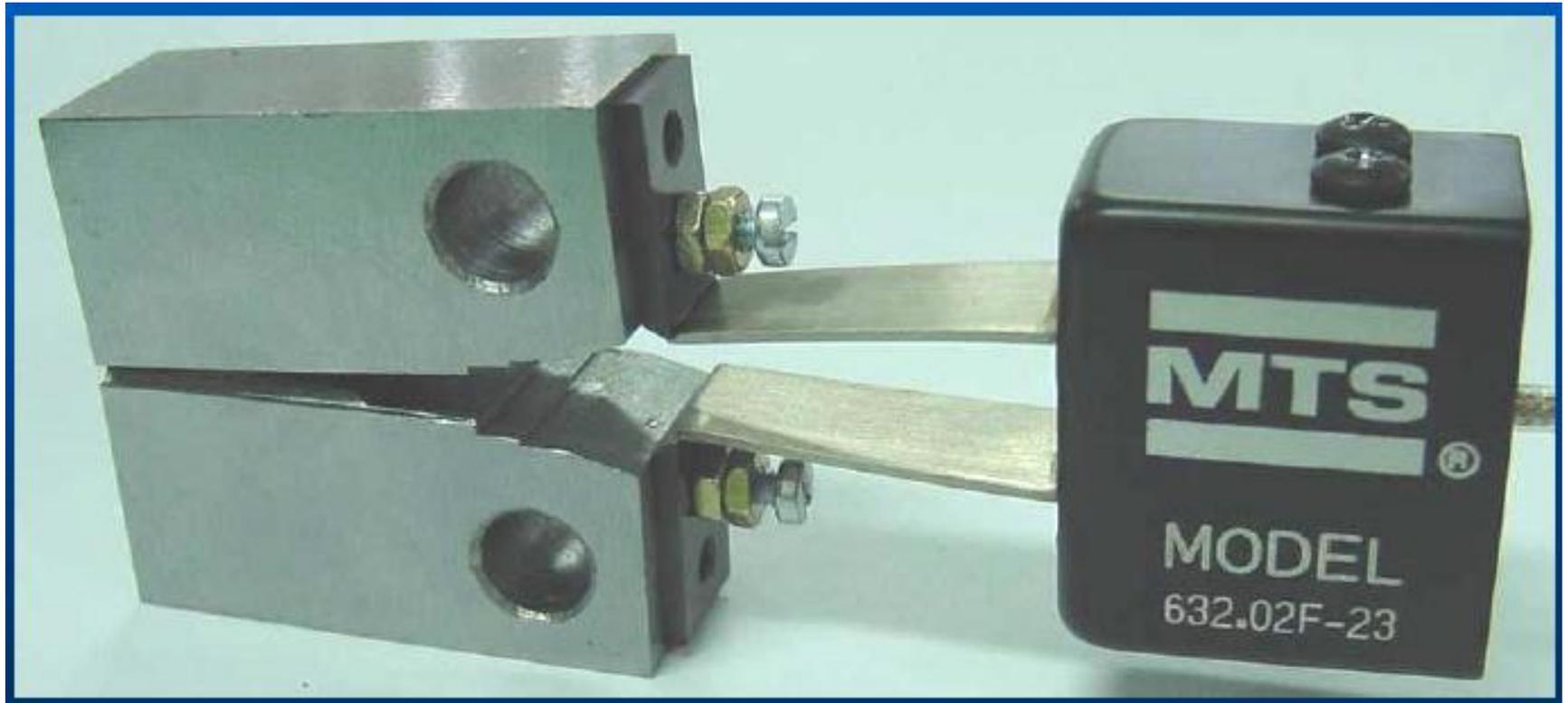
MECÂNICA DE FRATURA

MECÂNICA DE FRATURA ELASTOPLÁSTICA FUNCIONA MELHOR NOS CASOS EM QUE A ZONA PLÁSTICA É MAIOR, ISTO É, MATERIAIS MAIS DÚTEIS.



MECÂNICA DE FRATURA ELASTOPLÁSTICA- ENSAIOS

CTOD - MFEP



Definição de Fratura

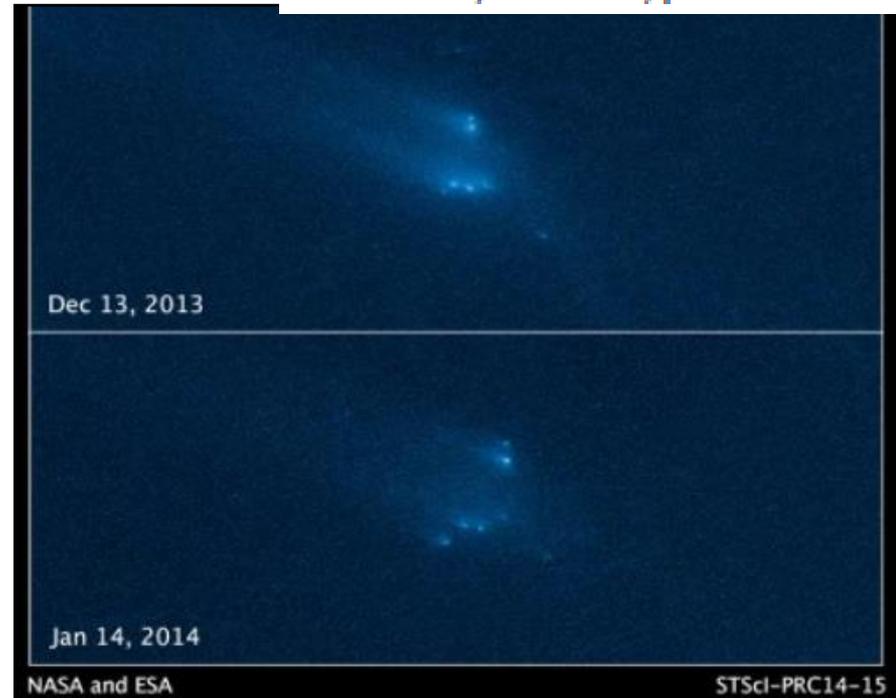
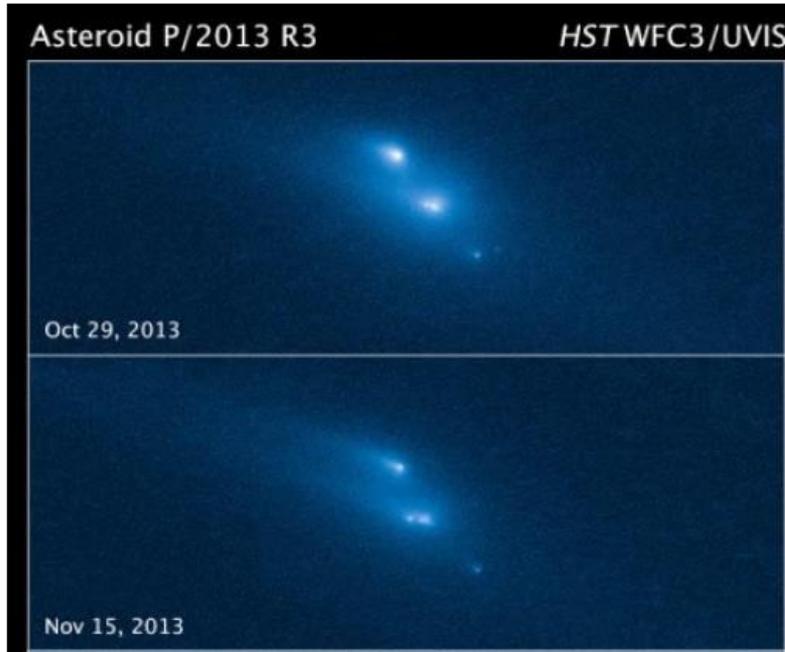
“É a separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes sob ação de uma tensão, devido ao início e propagação de uma trinca”

**FRATURA É UM TIPO DE
FALHA**

**PODE SER ESTUDADA EM
VÁRIAS ESCALAS**

Despedaçado pela luz!

14/03/2014, às 10:17, por Cássio Barbosa



Os 4 maiores fragmentos: 200 m de diâmetro. Velocidade de distanciamento: 2 km/h sugere que rompimento foi lento, iniciando no final de 2013 e terminando no início de 2014. Não foi explosão: a pressão da luz solar foi a causa raiz. A luz carrega momento linear: radiômetro de Crooks.

FRATURAS NA NATUREZA

Jupiter in Ultraviolet

Cometa shoemaker-levy 9 – fraturou-se em 21 fragmentos devido ao campo gravitacional do planeta, em julho de 1994. O menor fragmento era do tamanho da Terra. A Energia do impacto foi similar à gigantescas bombas nucleares.

FOTO ORIGINAL DO HUBBLE ENVIADA PELO DR. PETER LEONARD.

↑ H ↑ N ↑ Q₂ ↑ D/G
↑ B ↑ Q₁ ↑ R ↑ L

Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2

ESTUDO DE FRATURA EM NANOESCALA

Dual-beam FIB-SEM instrument

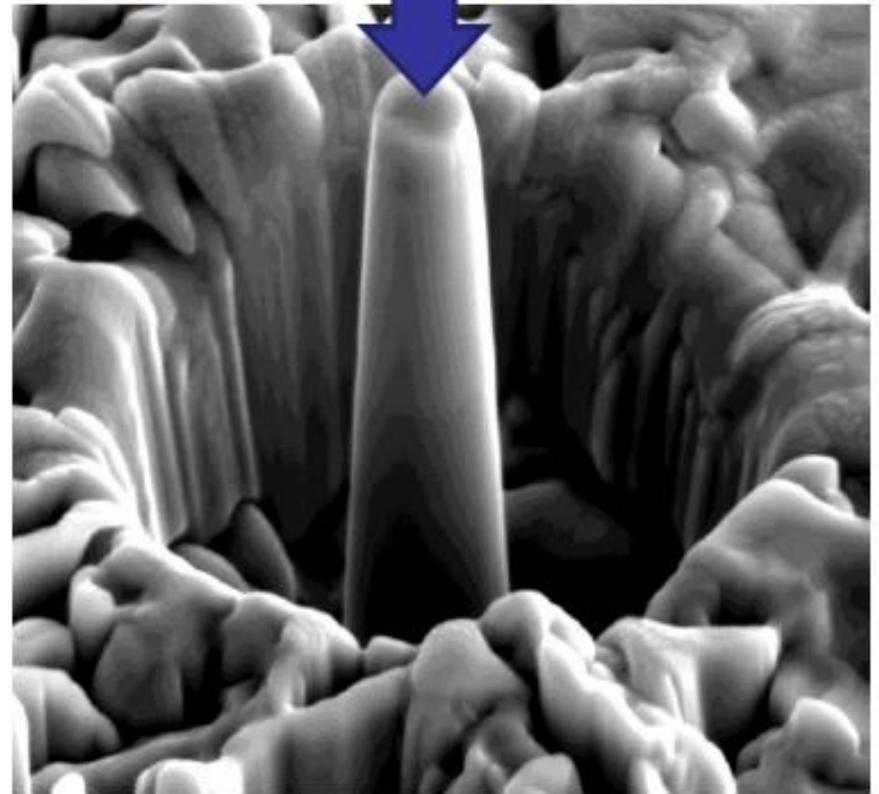
Test specimens

Fracture
mechanics



→ Fracture toughness (K_{Ic})

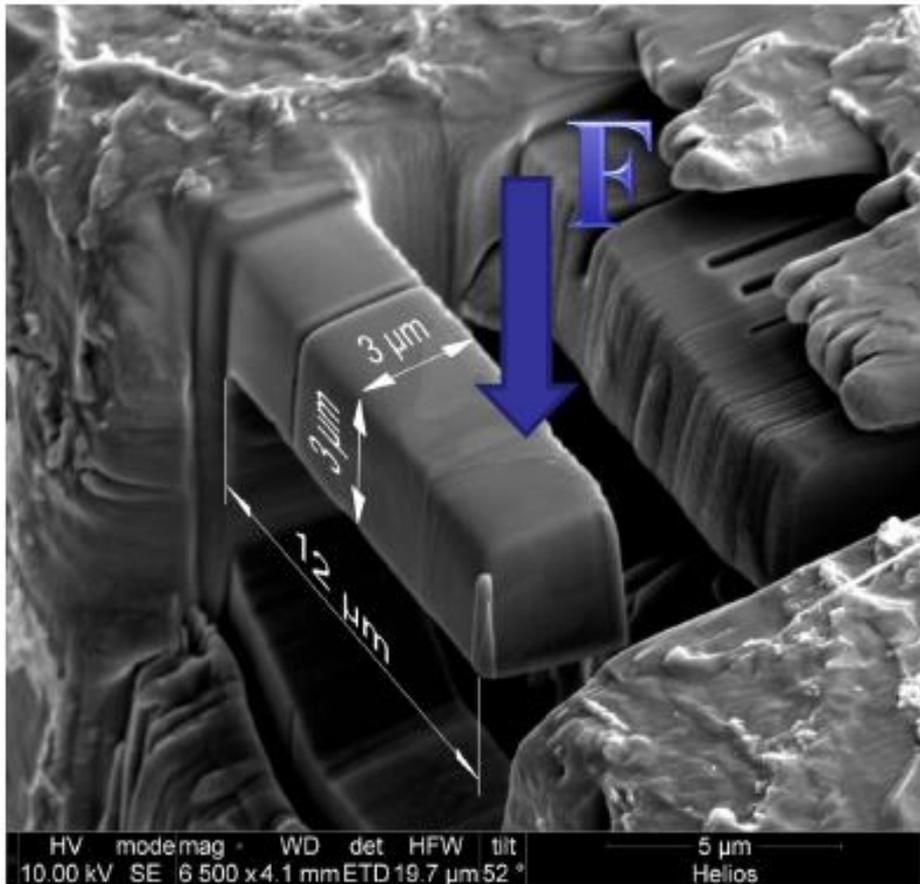
Compression **F**



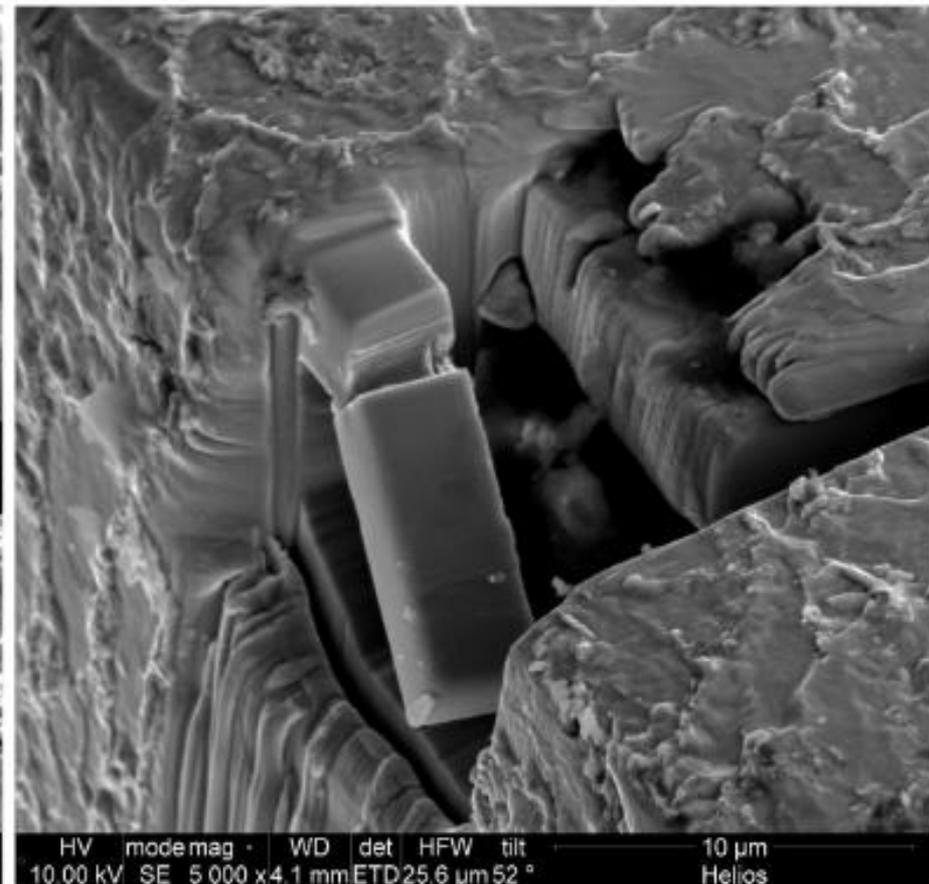
→ Yield stress (σ_y)

Fracture mechanics test: cantilever beam with notch

Before loading



After loading



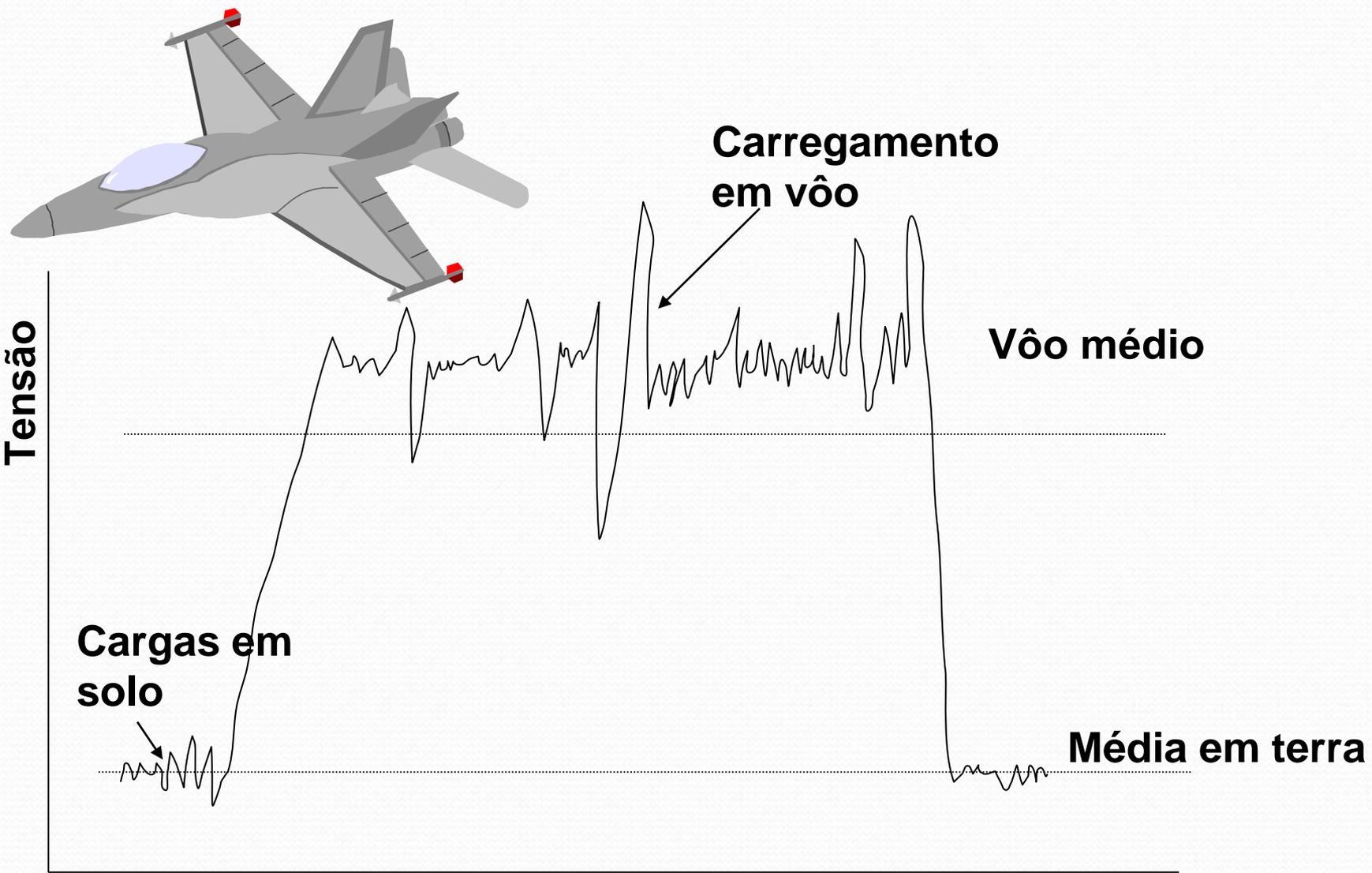


FADIGA

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).

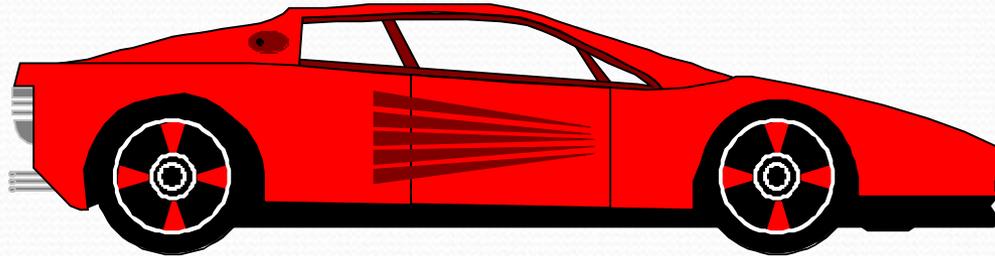
VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



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

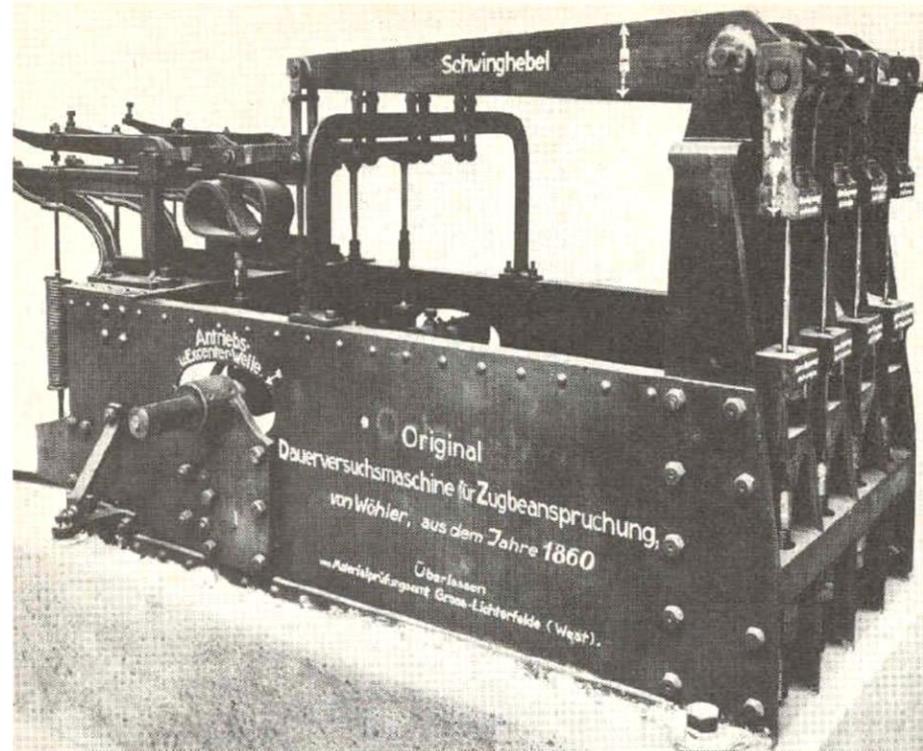
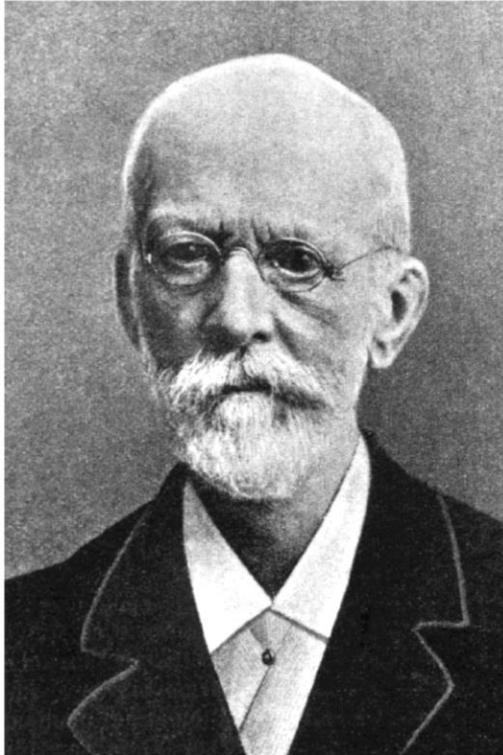
- **Fadiga de alto ciclo (controlado por tensão);**
- **Fadiga de baixo ciclo (controlada por deformação);**
- **Propagação** de trinca por fadiga;
- Avaliação da **sensibilidade ao entalhe;**
- **Fadiga por fretting;**
- **Fadiga multiaxial;**
- **Fadiga térmica: isotérmica e termomecânica;**
- **Fadiga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

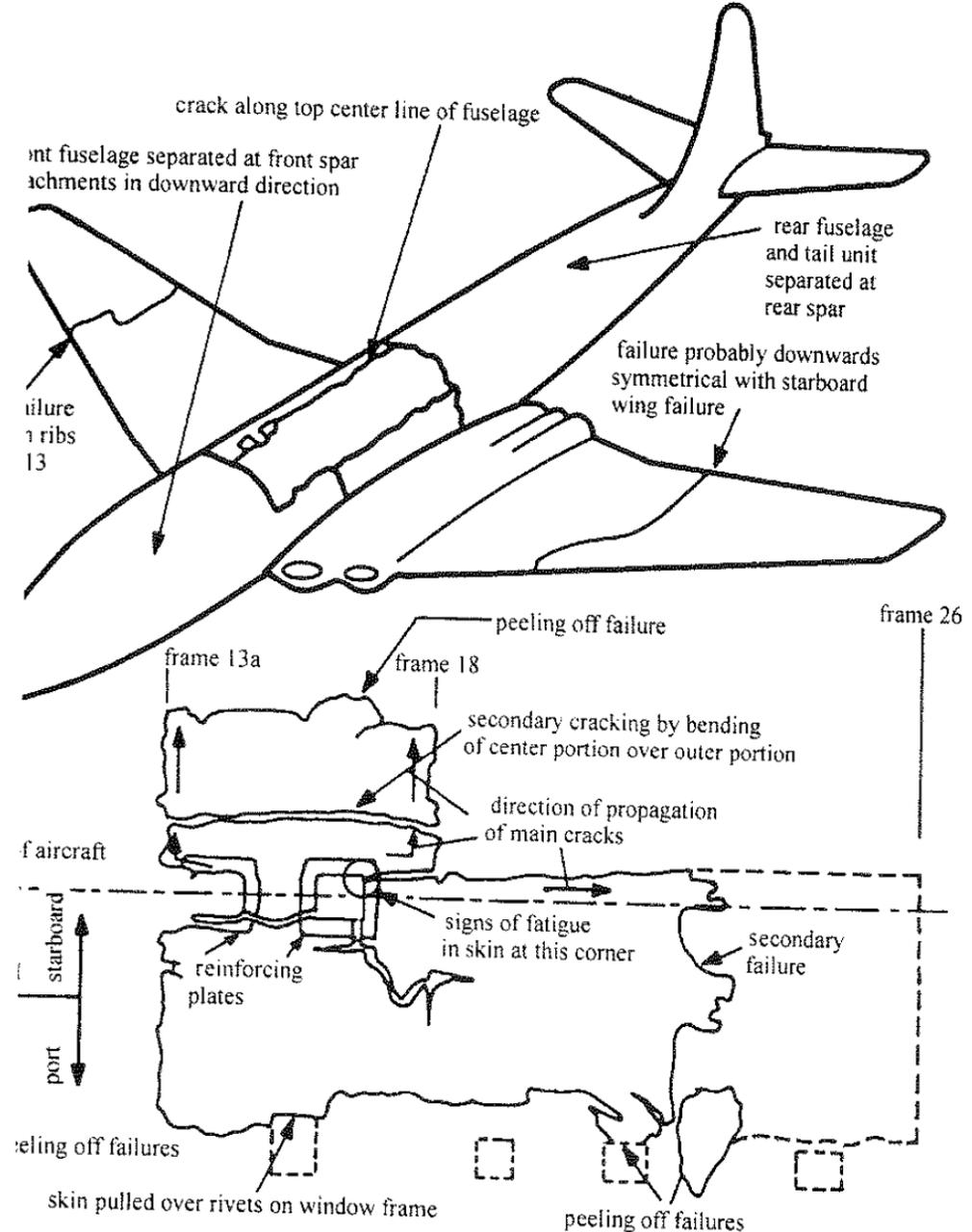
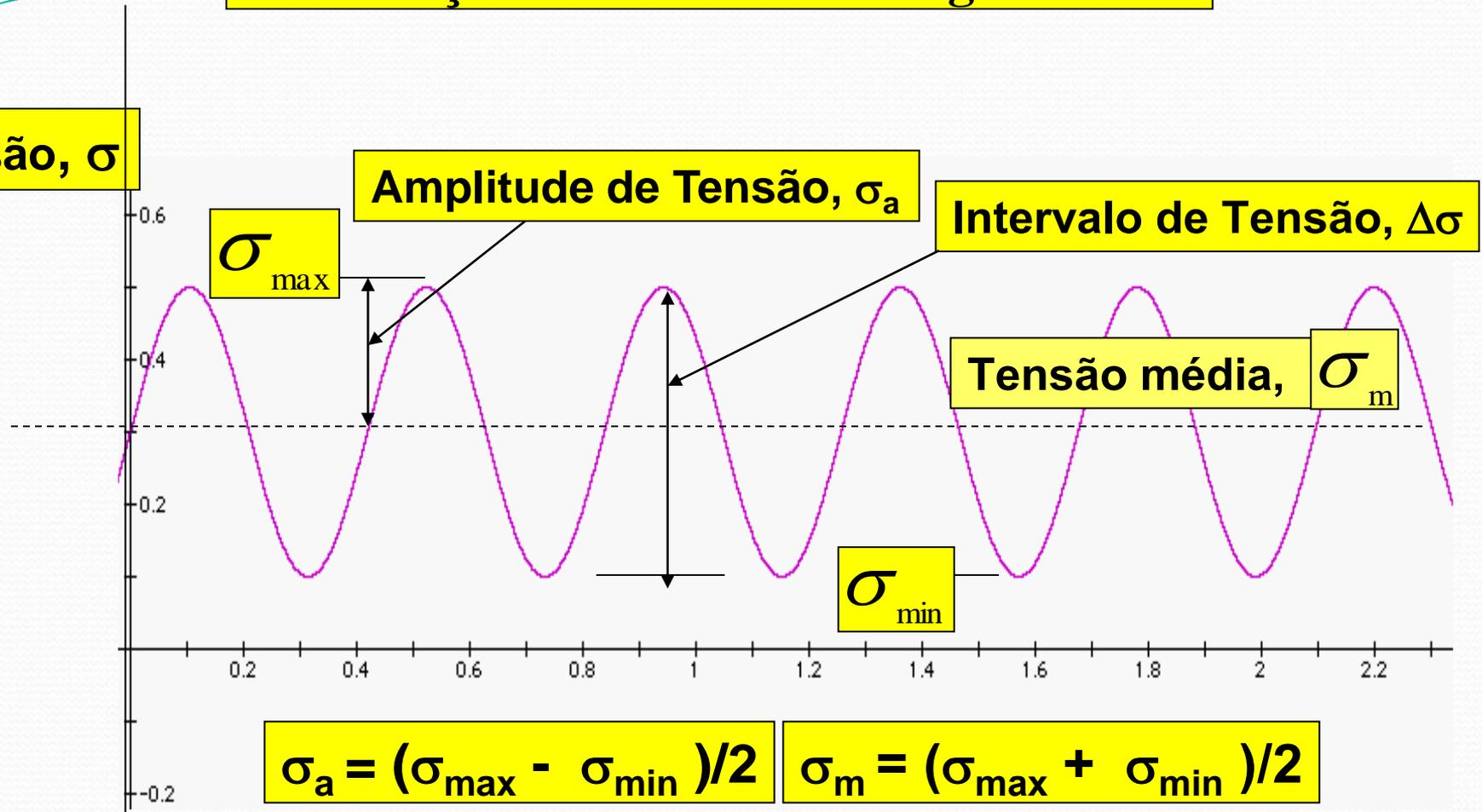


Fig. 1.1. Schematic diagram illustrating the location of fatigue cracks in a failed Comet airplane. (After Petroski, 1996.)

DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão, σ



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

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

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

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

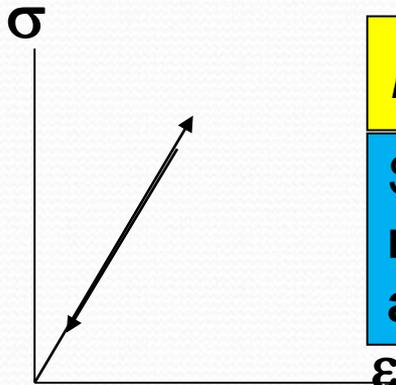
RAZÃO DE AMPLITUDE

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$

Análise Clássica da Fadiga

Metodologia Tensão-Vida

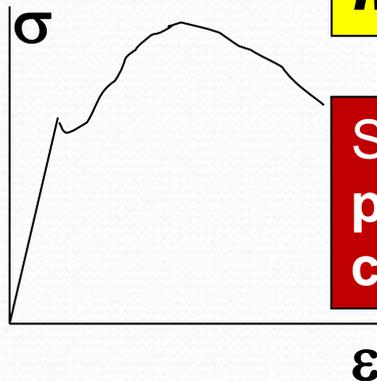
Metodologia Def. - Vida



Metodologia Tensão-Vida

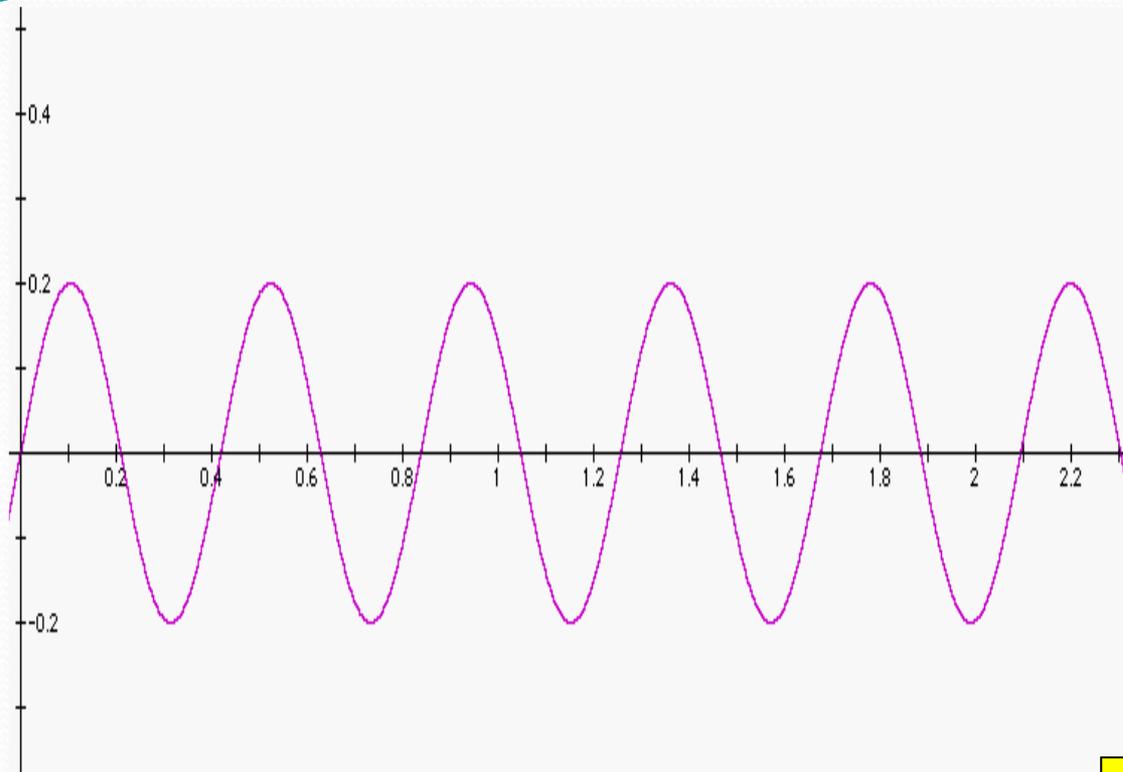
Se as tensões forem sempre dentro do regime elástico (abaixo do LE): fadiga de alto ciclo ou controlada pela tensão

Metodologia Def. - Vida



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

Carregamentos completamente reversos



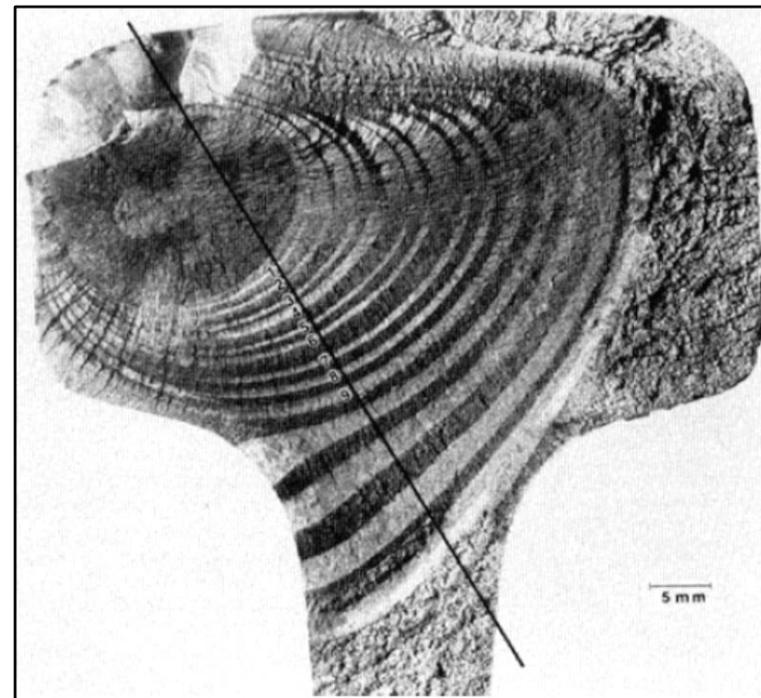
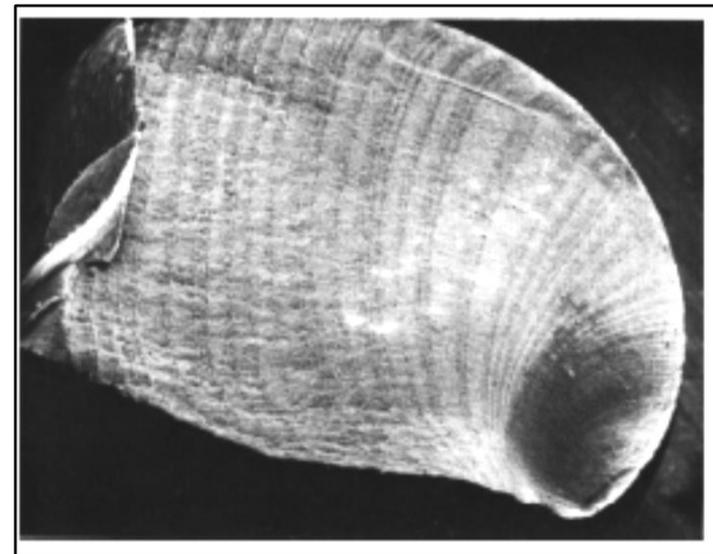
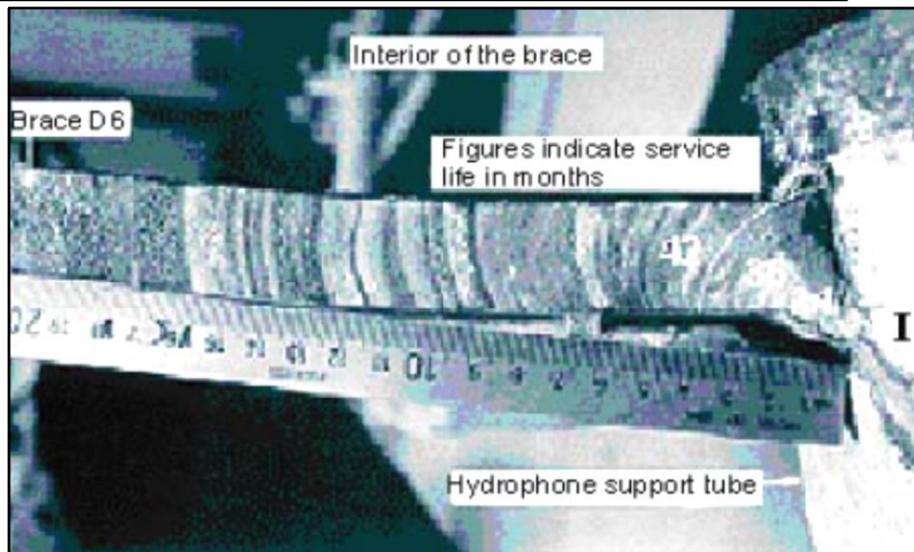
Tensão Média, $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2 = 0$

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

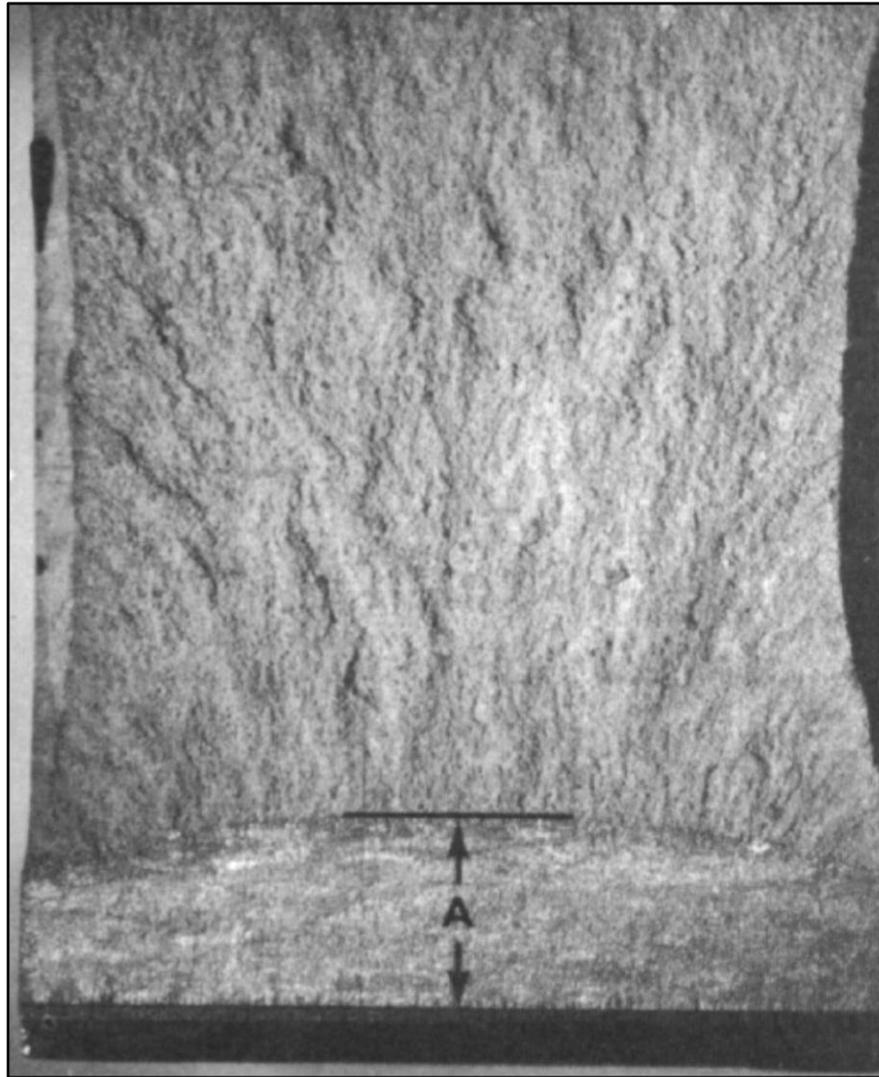
Razão de Amplitudes, $A = \sigma_a / \sigma_m = \infty$

**UTILIZADO NAS
HOMOLOGAÇÕES
DE PEÇAS
AUTOMOTIVAS**

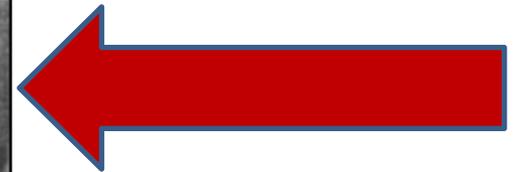
FADIGA- MARCAS DE PRAIA



FADIGA- MARCAS DE PRAIA

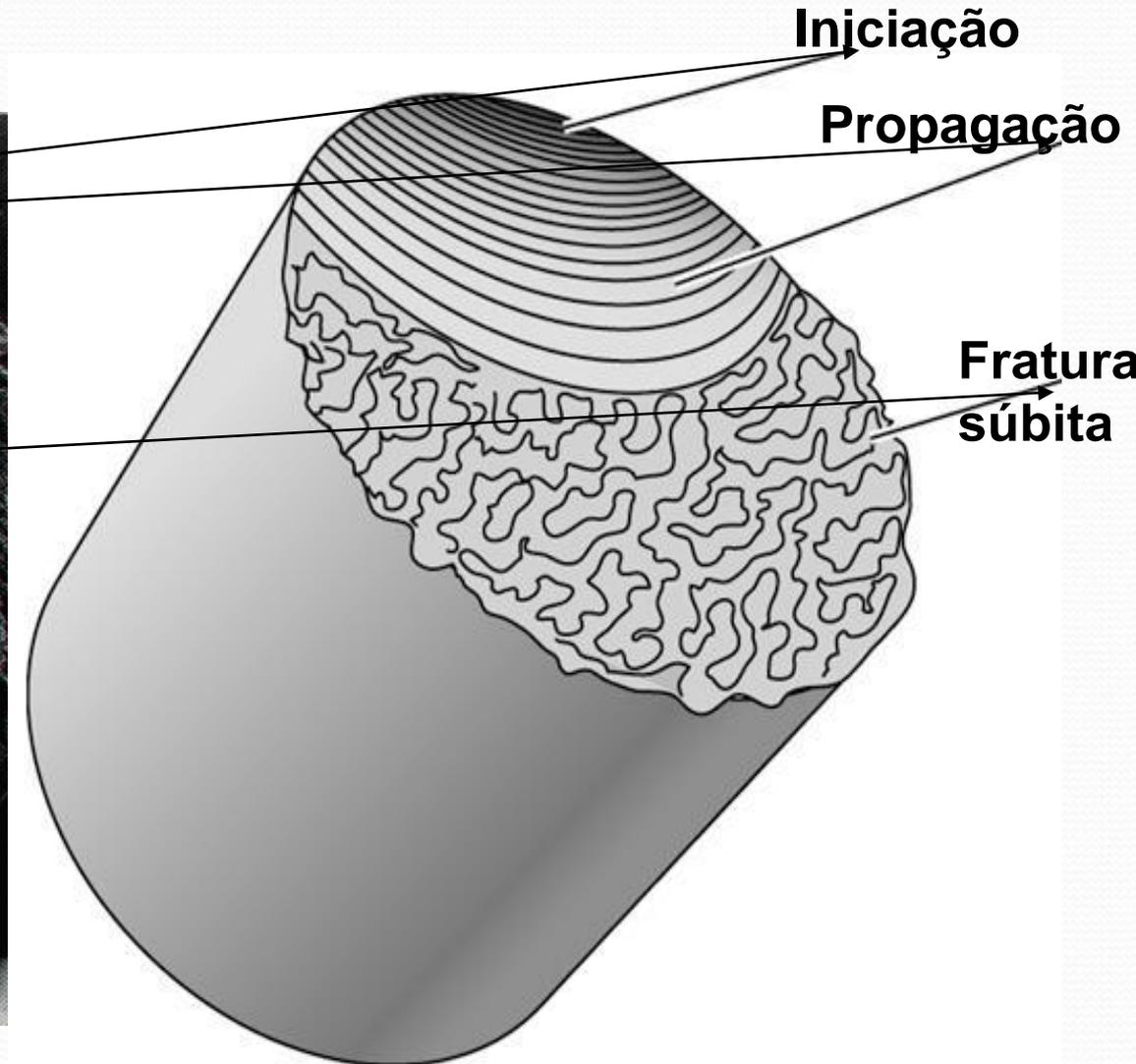
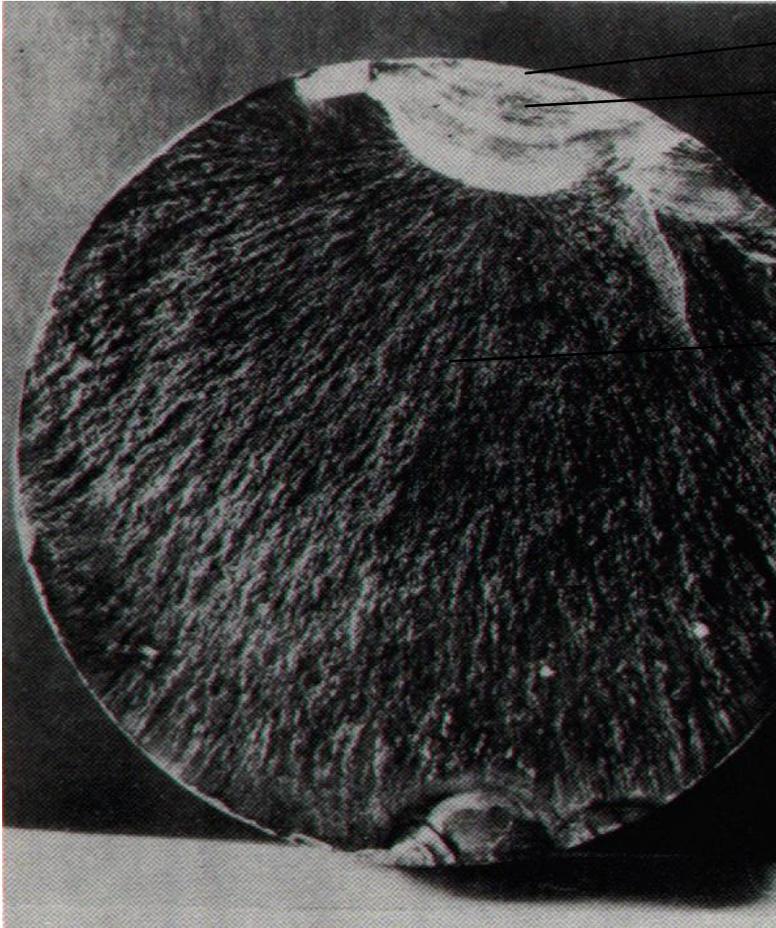


**SEM
MARCAS
DE PRAIA**

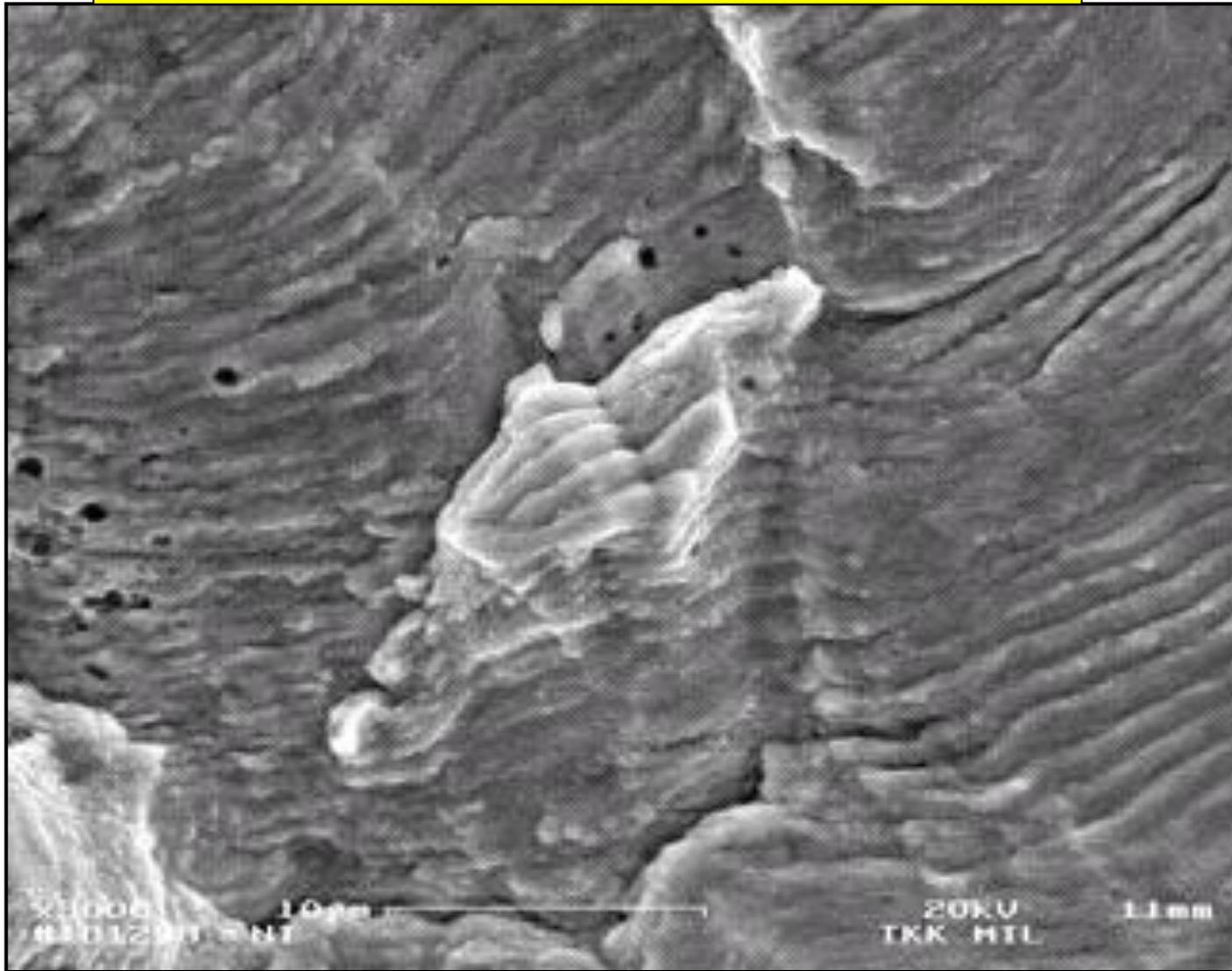


8. Trinca produzida por fadiga em
c.p. de Mecânica da Fratura

Fraturas de Fadiga e Características Macroscópicas



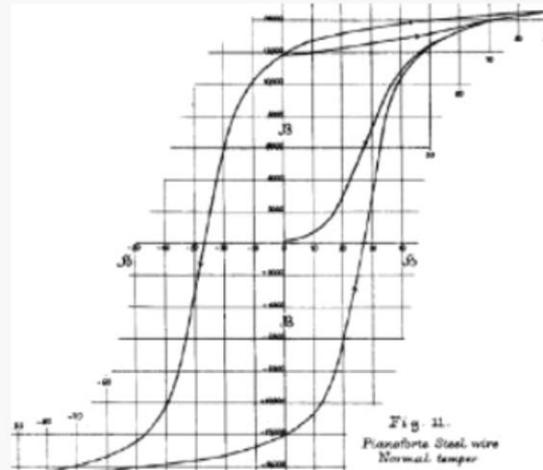
ESTRIAS-MICROSCÓPICAS



**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. $\times 1000$.

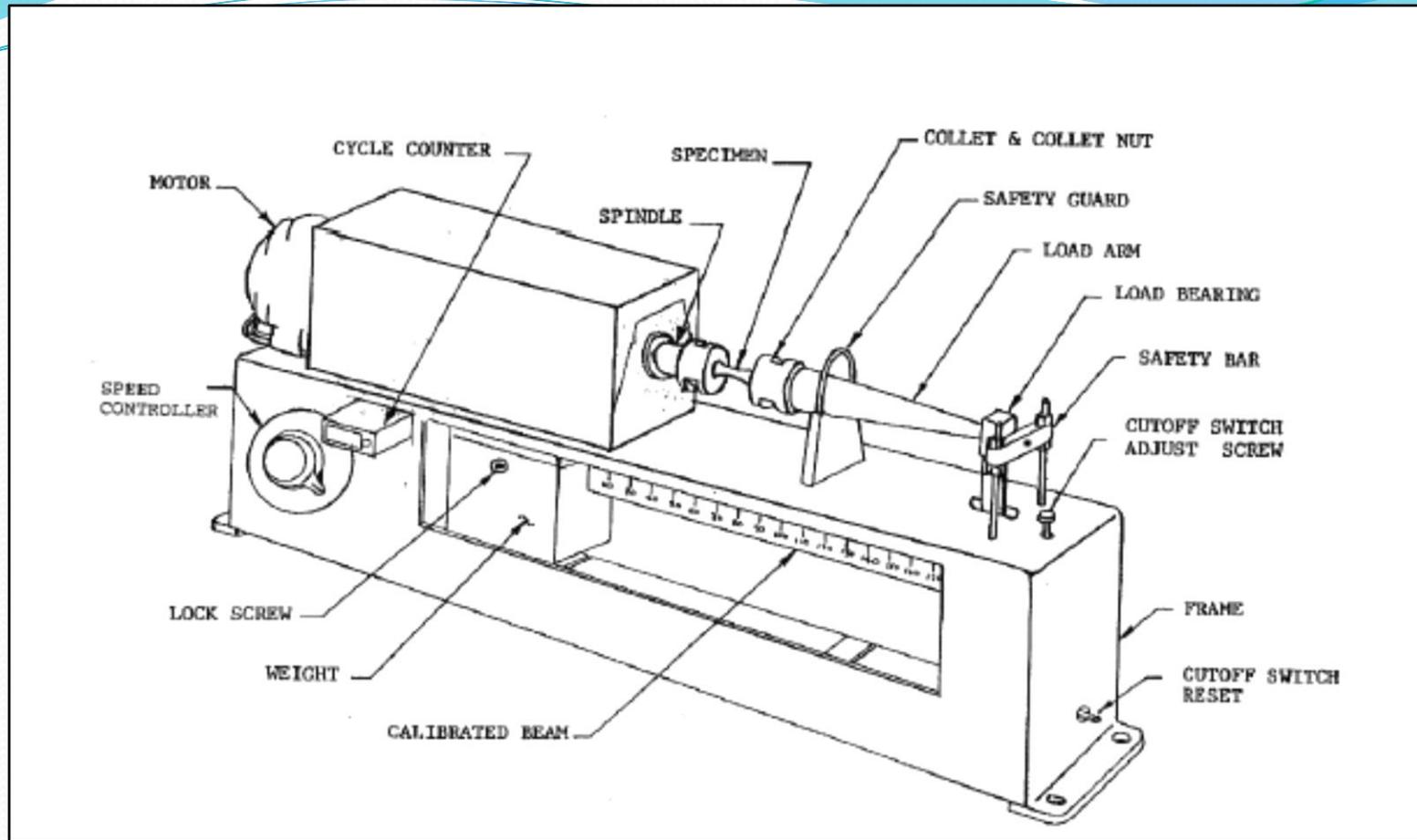


Fig. 11. Same after 10,000 revolutions. $\times 1000$.



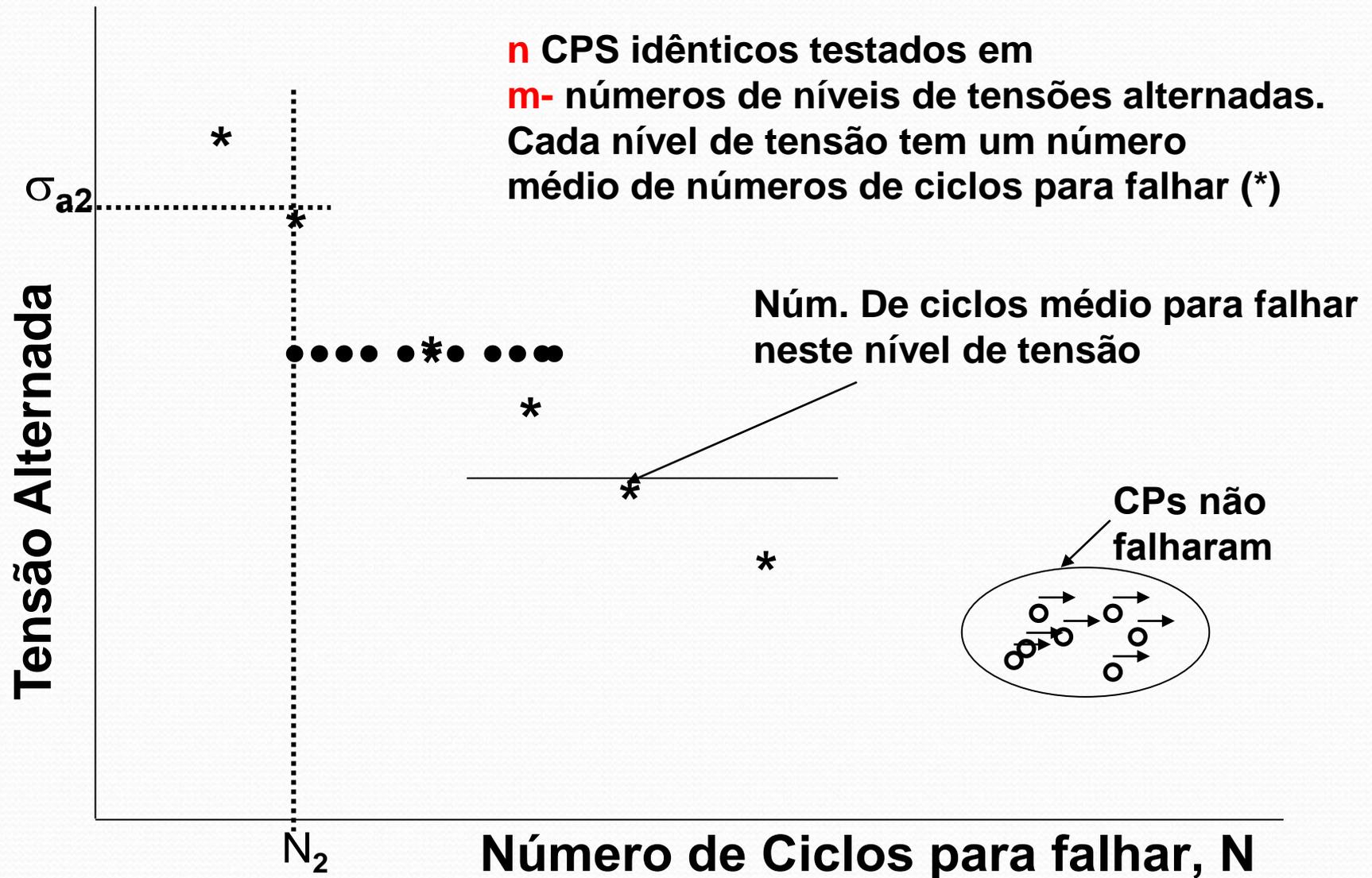
Fig. 12. Same after 40,000 revolutions. $\times 1000$.

ENSAIO DE FADIGA

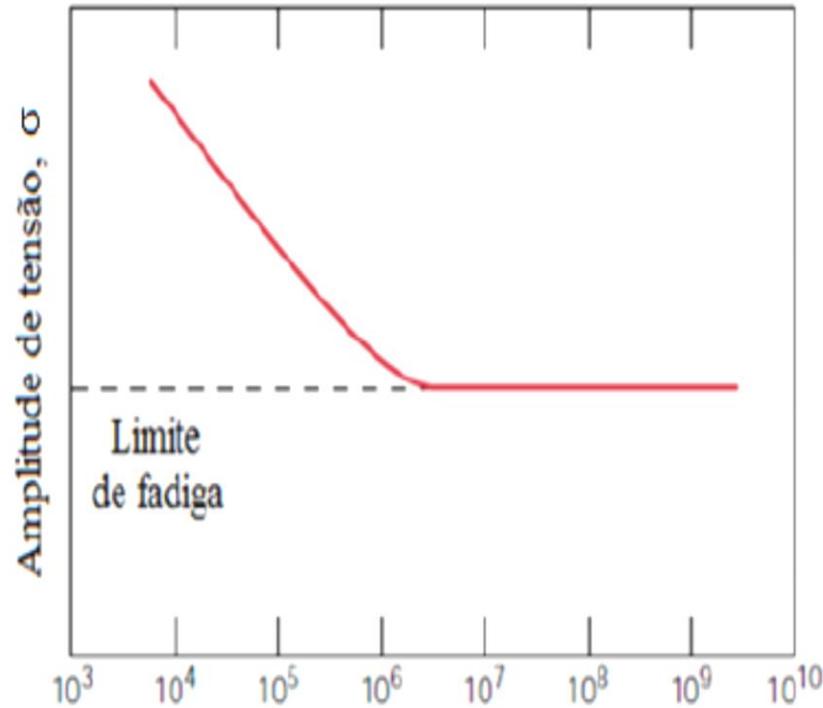


•Wöhler (1852) – Conclui, entre outras que o fenômeno da fadiga de alto ciclo é dependente de condições macroscópicas e microscópicas o que leva a uma dispersão estatística, aleatória.

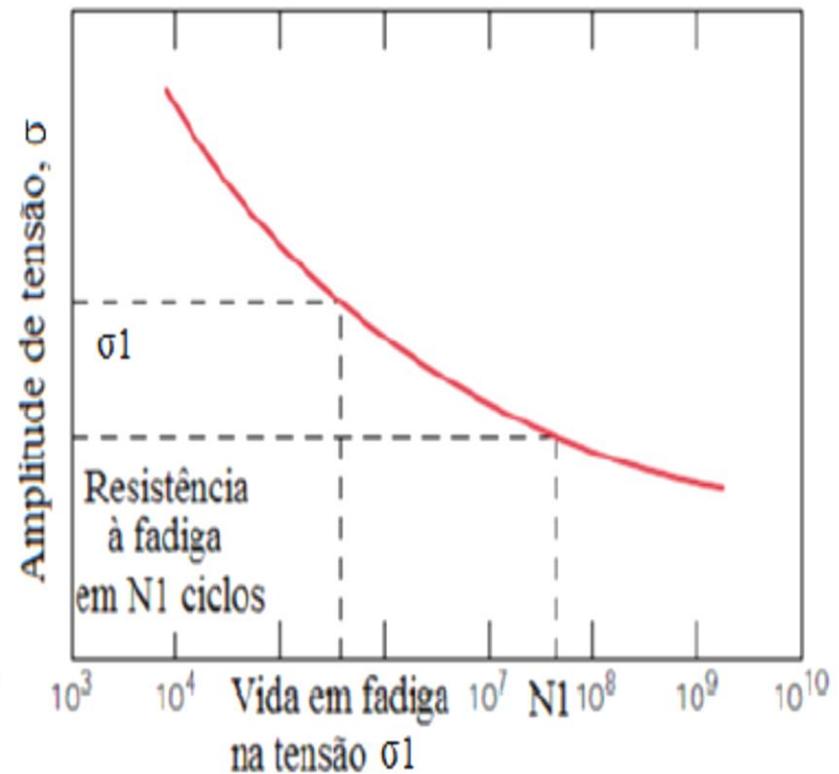
Dados S-N - Espalhamento nos Resultados experimentais



CURVA S-N APÓS TRATAMENTO ESTATÍSTICO



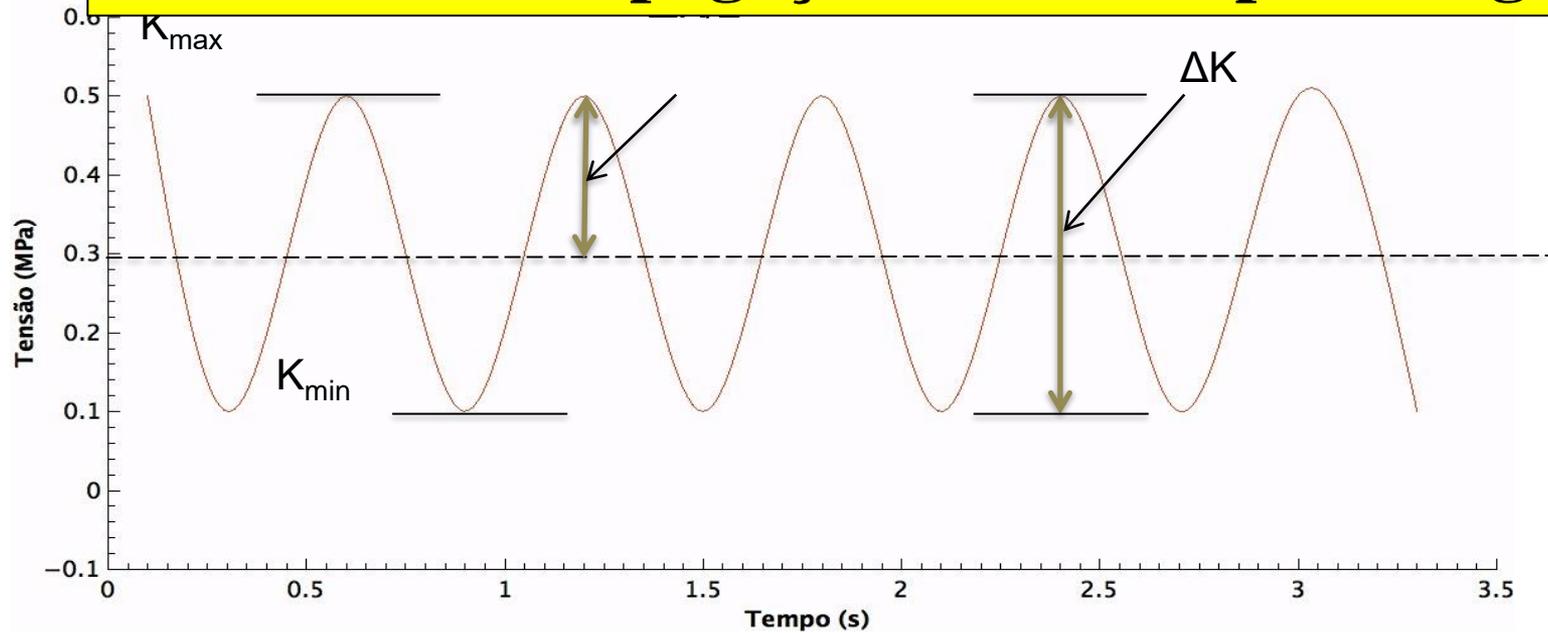
(a) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)



(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

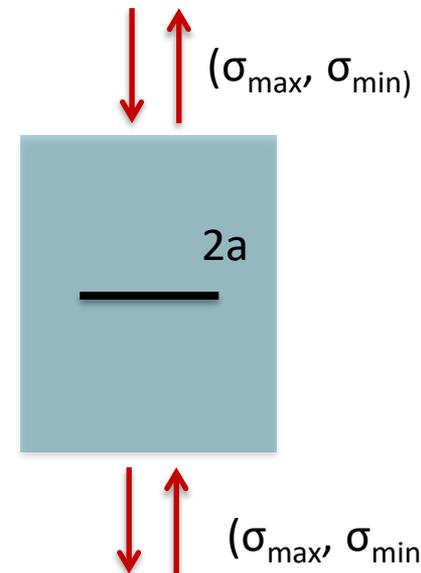


$$K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi * a}$$

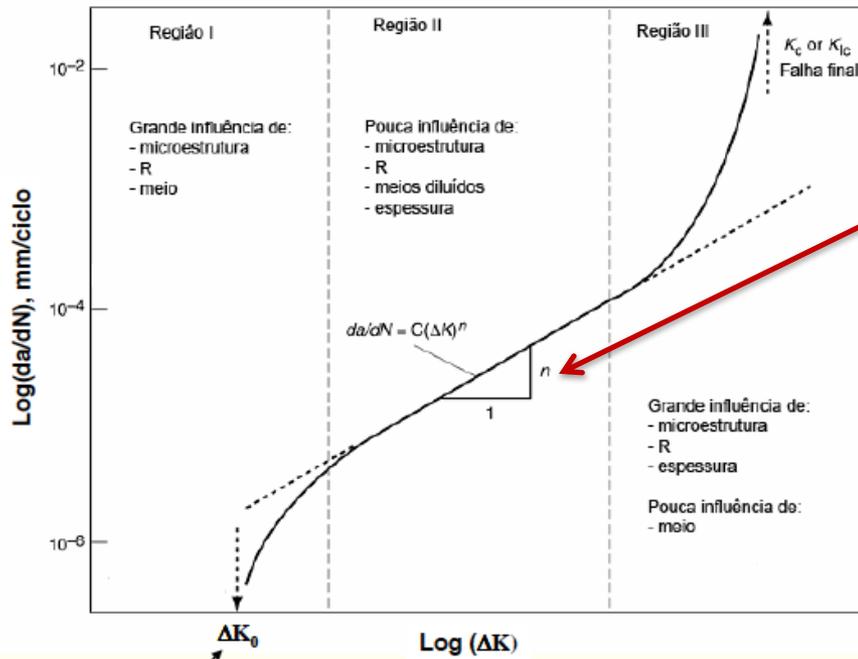
$$K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi * a}$$

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

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



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.

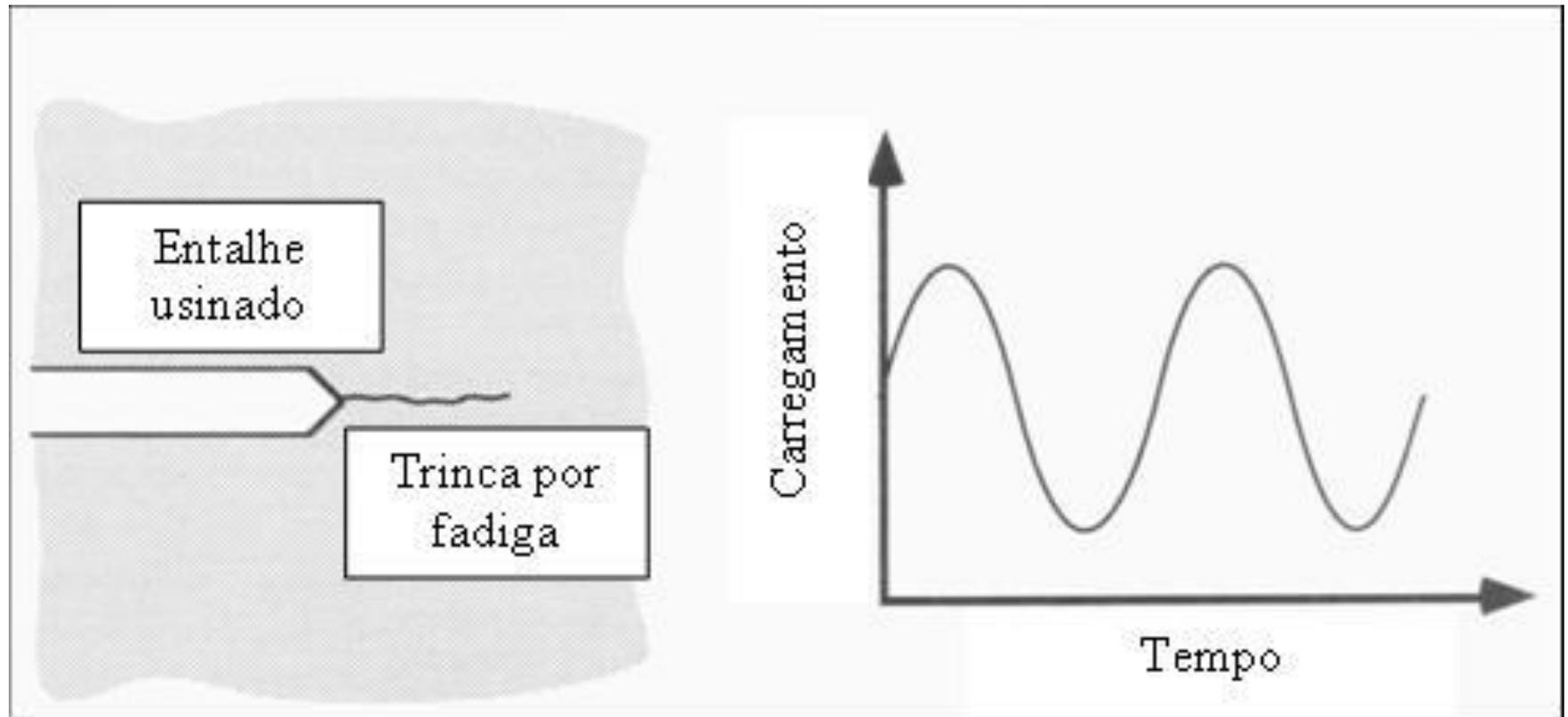
A principal **limitação** da equação de Paris é **não** levar em consideração o valor de **R**

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

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

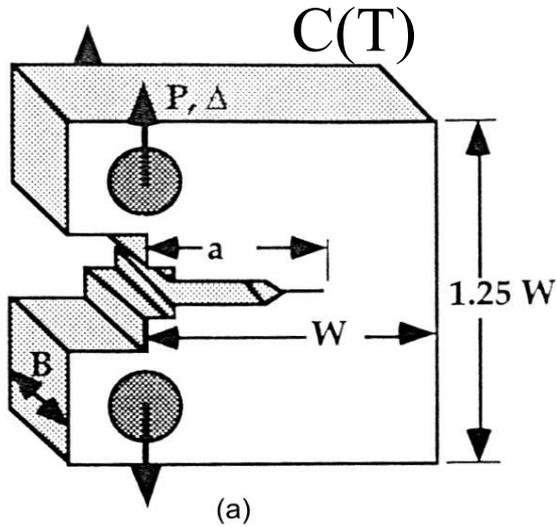
ou

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

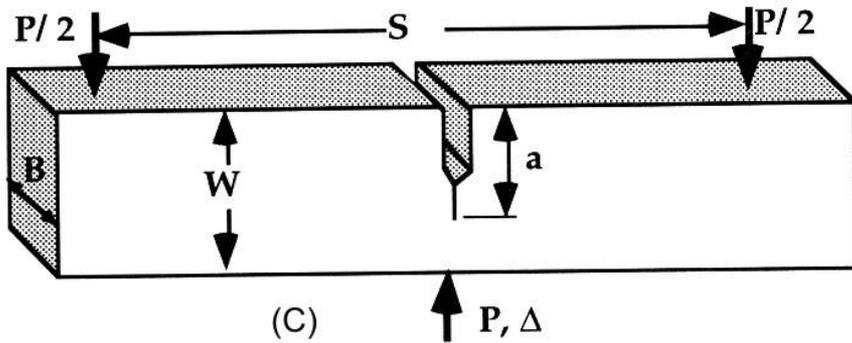


Uma trinca por fadiga é introduzida na ponta do entalhe usinado por meios de carregamento cíclico.

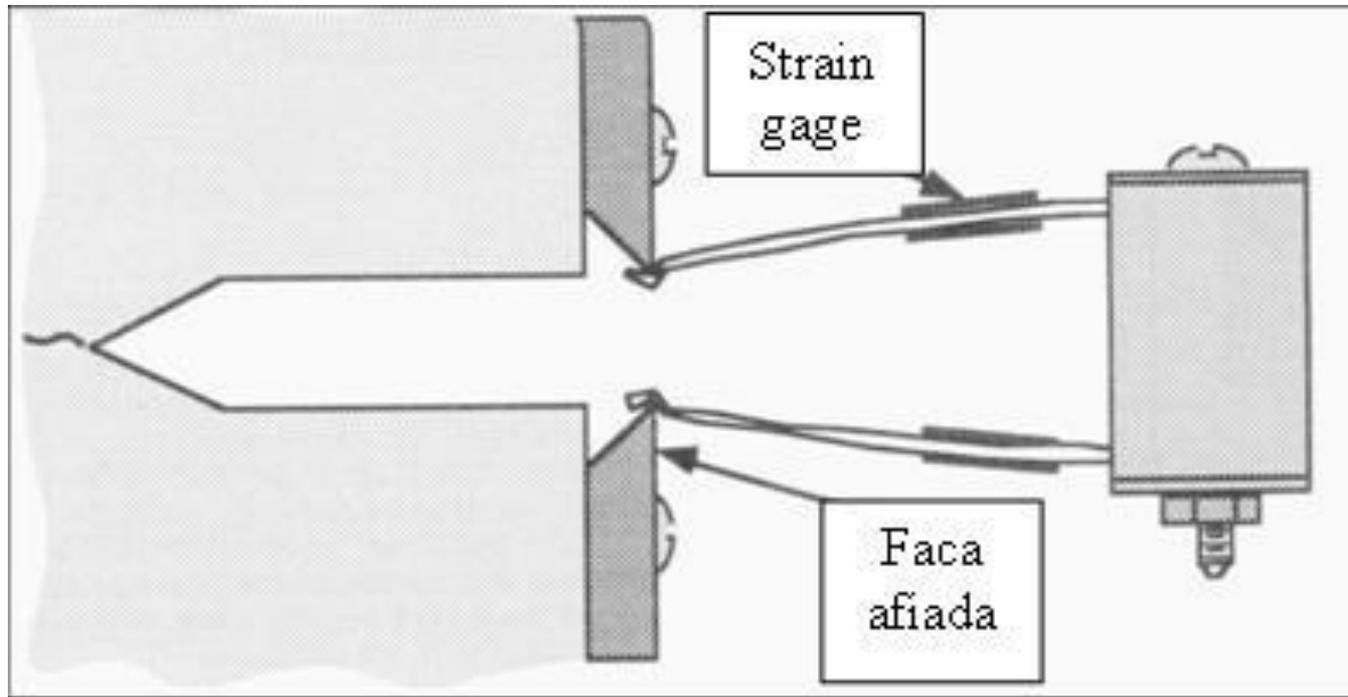
$$K_{IC} = \sigma Y \sqrt{\pi a}$$



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



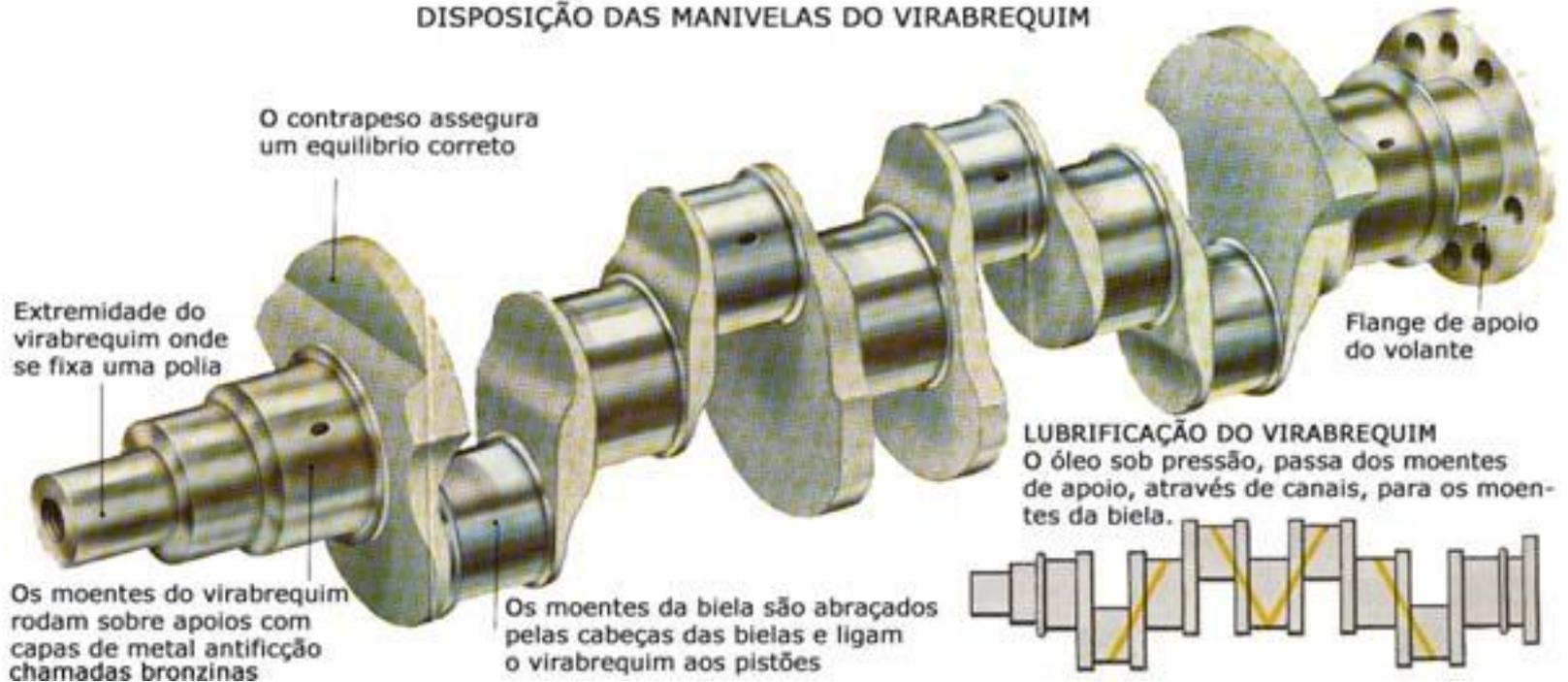
$$Y = f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 2,15 - 3,93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\} \right]$$

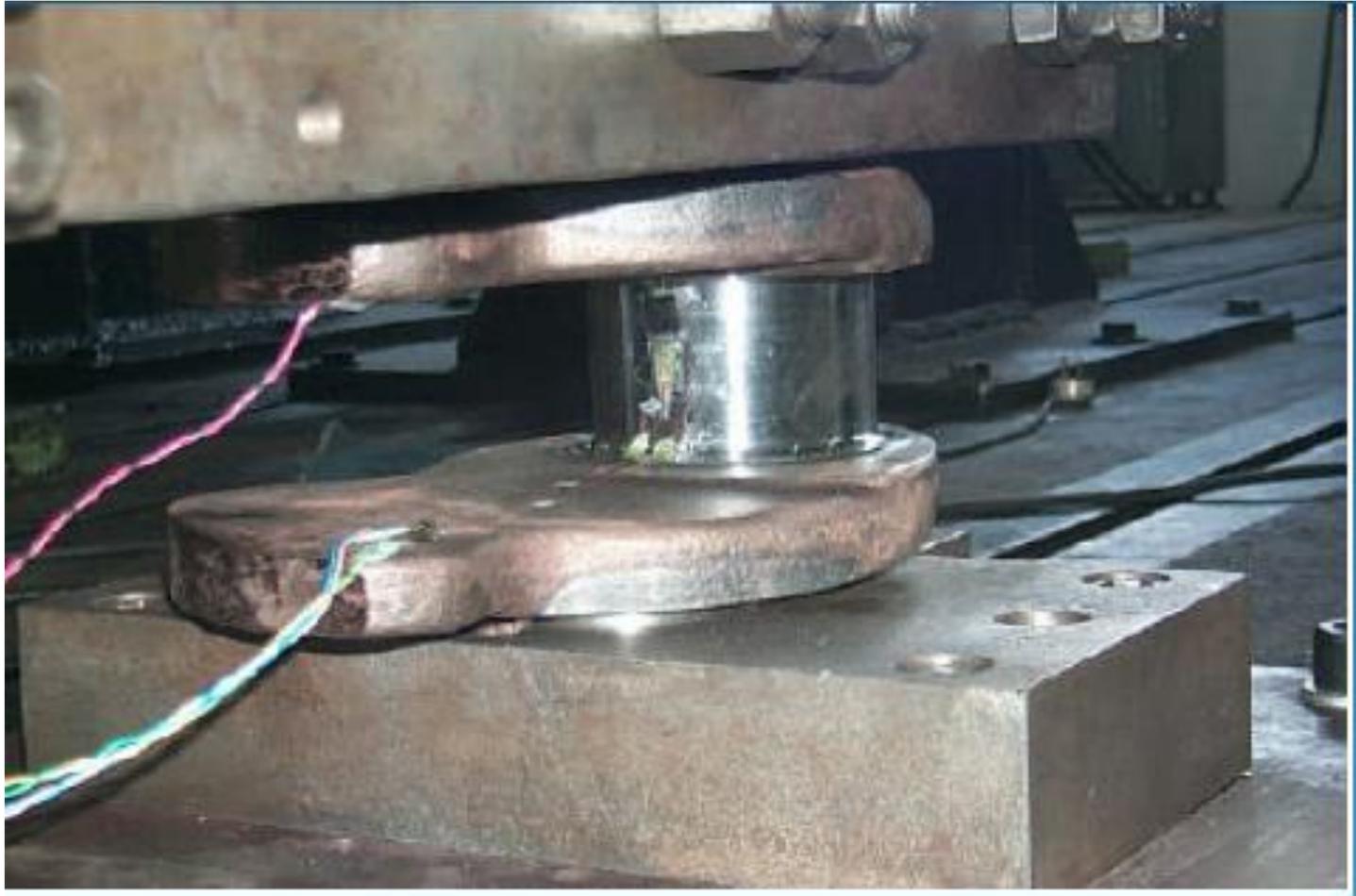


Medida do deslocamento da abertura da trinca : “clip gage”.
Medida do carregamento: células de carga da própria máquina.

ENSAIO DE FADIGA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

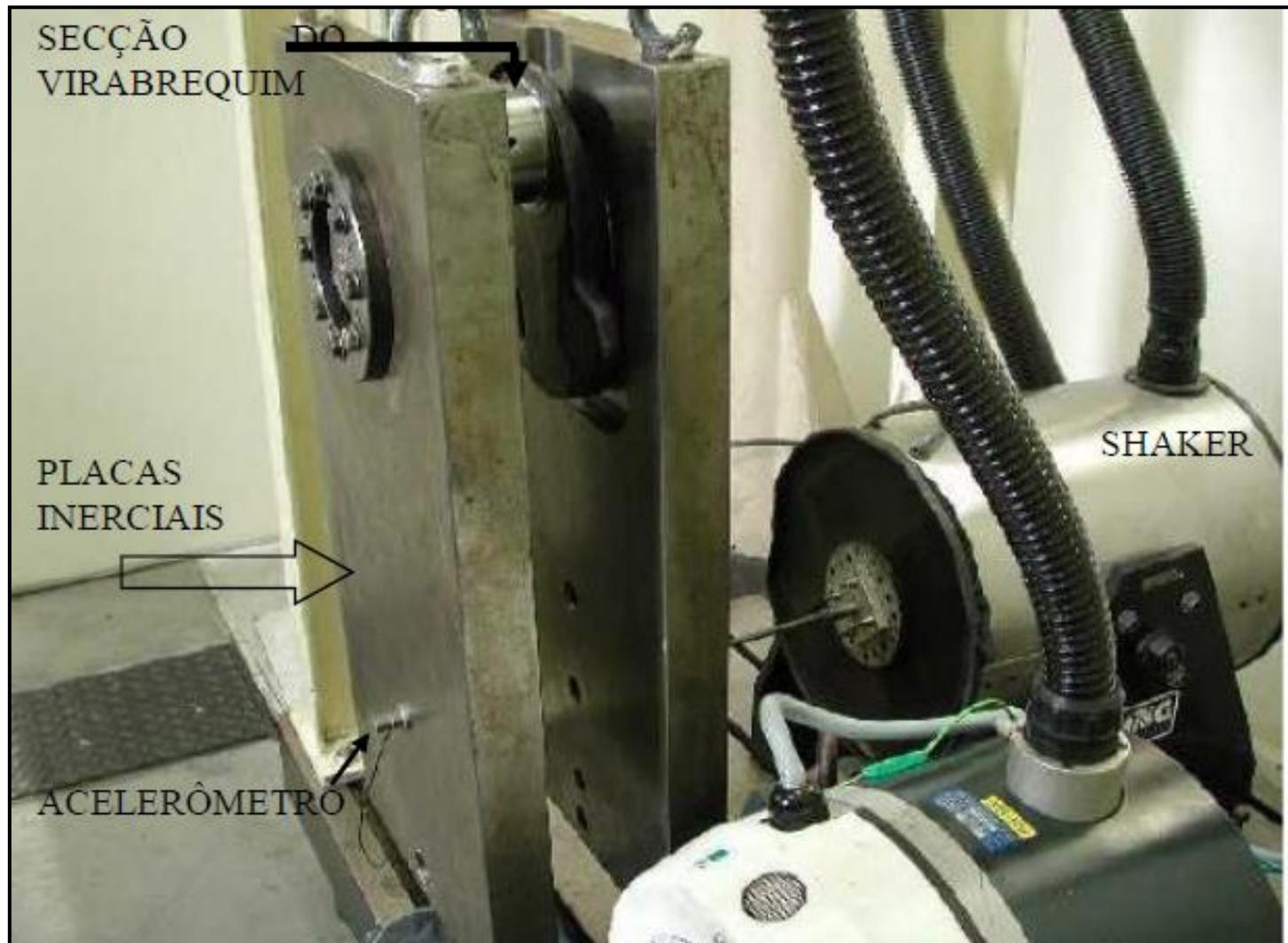
DISPOSIÇÃO DAS MANIVELAS DO VIRABREQUIM





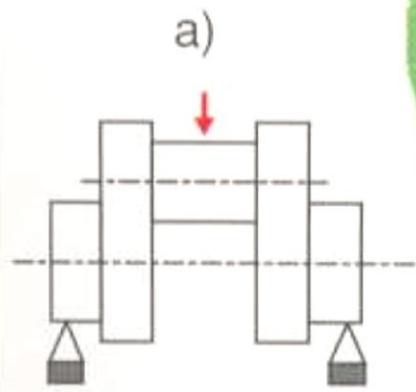
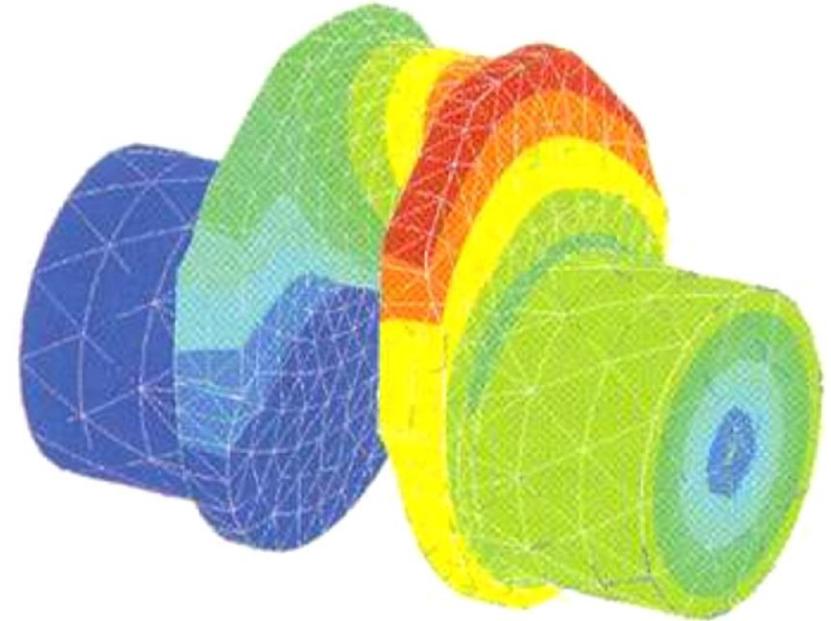
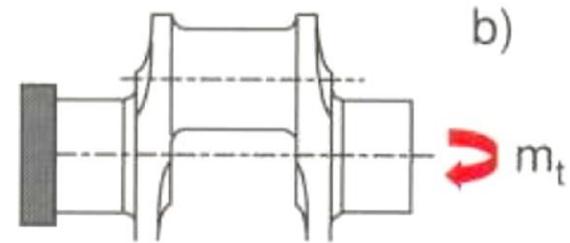
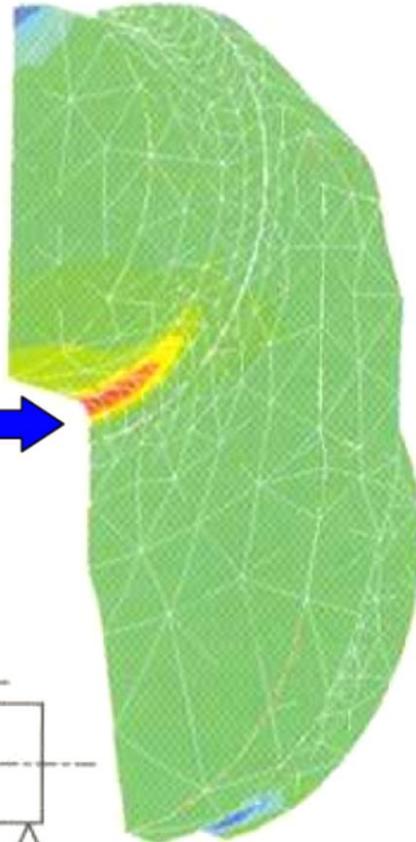
DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS

ENSAIO DE FADIGA



“SHAKER ELETROMAGNÉTICO”- RESONANT DWELL

Maior concentração de tensão no Fillet

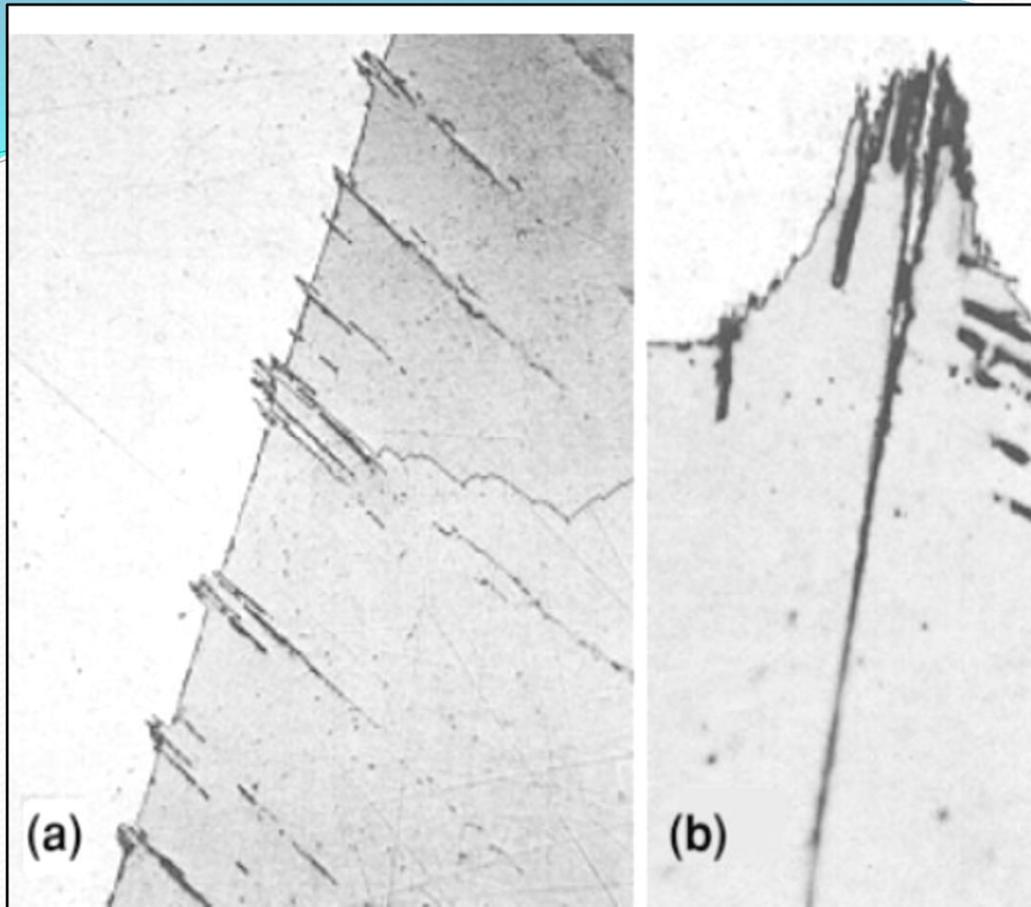


Modelo em elementos finitos apresentando maior concentração de tensão, por "bending", no raio de concordância(fillet) do pin journal.

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



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

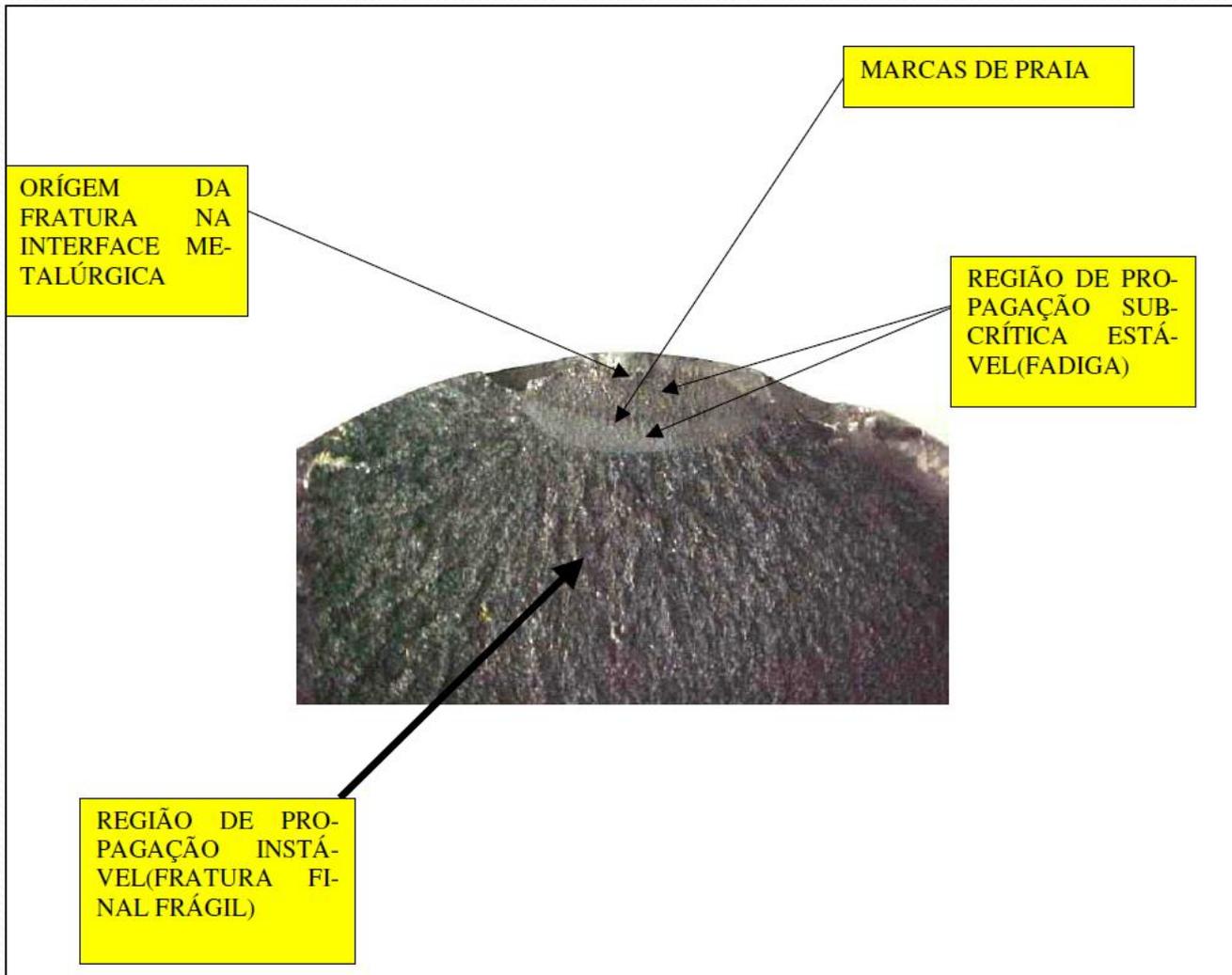


Extrusions observed in a a copper specimen and in b Fe-3 Si

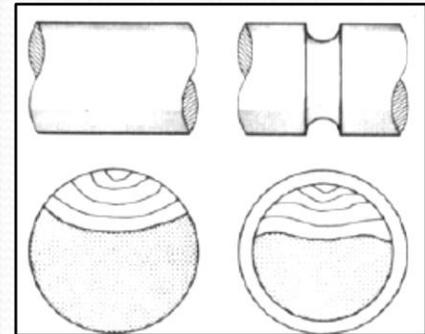


**Typical ladder-like structure of PSBs
(Metals Handbook, vol. 19)**

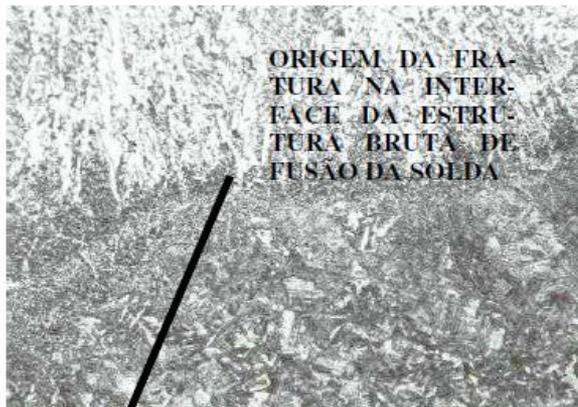
A TRINCA POR FADIGA É NUCLEADA NA SUPERFÍCIE, A NÃO SER QUE OCORRA UMA DESCONTINUIDADE SUBSUPERFICIAL.



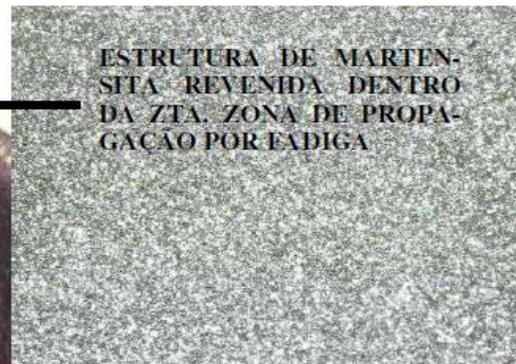
ALTAS TENSÕES



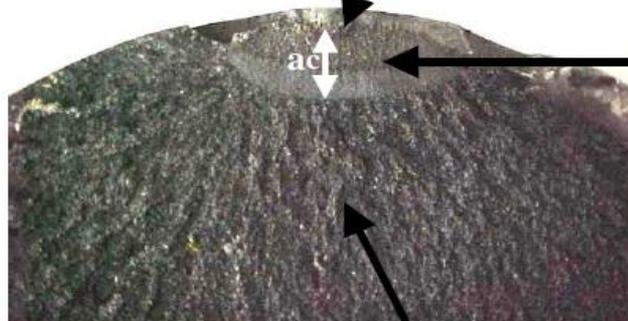
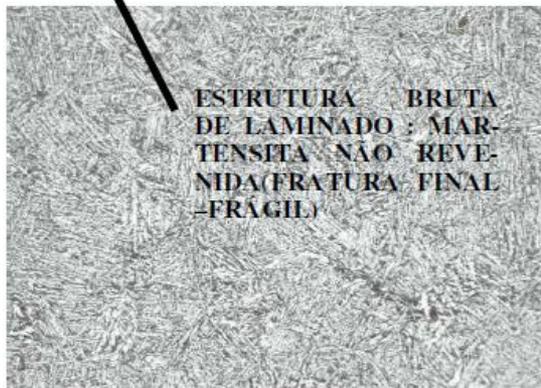
ORIGEM DA FRA-
TURA NA INTER-
FACE DA ESTRU-
TURA BRUTA DE
FUSÃO DA SOLDA



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!!