

# **SMM0328- COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS**

## **Apresentação do professor**

- **Engenharia de Materiais (UFSCar-1988);**
- **Mestrado** em Engenharia Mecânica: Materiais e Processos, área de concentração: Metalurgia Física e Mecânica de Fratura (Unicamp-2008);
- **Doutorado** em Engenharia Metalúrgica e de Materiais: área de concentração: Metalurgia Física, Transformação de Fases (EPUSP-2012);
- **Pós-doutorado** em Engenharia de Materiais: Propagação de trinca por fadiga, em aço API5LX70, em meio de etanol (UFSCar, 2017);
- **Experiência industrial (1991-2013): 22 anos em indústrias de vários segmentos: automotiva, equipamentos de óleo & gás, movimentação, mineração, eólica, siderurgia e hidromecânicos;**
- **Professor da EEL-USP de 2013 a 2016;**
- **Professor da EESC-USP, desde 2016;**

**Trabalhando com aços há 30 anos: Metalurgia Física/Transformação de fases relacionadas à propriedades mecânicas, Análise de falhas.**

• **Qualificações: Ensaio de ultrassom (ASNT-1997) e Supervisor de radioproteção (CNEN-2003)**

- **DOWLING, NORMAN E. – Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue.**
- ANDERSON, T. L. - Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications, Second Edition, CRC Press, NY, 680p.
- MEYERS, M.A.;CHAWLA K.K. - Mechanical Behavior of Materials, N.J.:Prendice Hall, 1999.680p.
- DIETER,GEORGE – Metalurgia Mecânica
- HERTZBERG, R.W. – deformation and fracture mechanics of engineering materials. John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- FUCHS, H. O. & STEPHENS, R. I. - Metal fatigue in engineering. New York, John Wiley, 1980. 318p

## **REFERÊNCIAS:**

- **Fatigue of Materials**– S.Suresh, Cambridge University Press, **1998**.
- **Metalografia e Análise de Falhas**, Tibério Cescon e Cesar R.F. Azevedo, ABM, São Paulo, **2006**;
- **ASM Handbook Vol. 11 - Failure Analysis** – 2002;
- **ASM Handbook Vol. 12 – Fractography**– 1987;
- **ASM Handbook Vol. 19 – Fatigue and Fracture**– 1996;
- **Analyses and Prevention of Aircraft Structural Failures**, curso- L. Molent, **2011**;
- **Engineering disasters: learning from failure**, N. Chawla, apresentação, 2007;
- **What Really Sank the Titanic**, Jennifer Hooper McCarty & Tim Foecke, Citadel Press Books, 2008;

## **REFERÊNCIAS:**

- **Metallurgy of the RMS Titanic**, National Institute of Standards and Technology- NIST-IR 6118, Tim Foecke.
- **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**– Richard W. Hertzberg, John Willey and Sons, 1996.
- **Comportamento Mecânico e Fratura de Componentes e Estruturas Metálicas**, Paulo Sergio C. Pereira da Silva, UFPR, 1999;
- **Apostila do curso: Fadiga de materiais metálicos**, Itamar Ferreira, Unicamp, 2003.
- **Mecânica dos Materiais**, Claudio Geraldo Schön, Elsevier, 2013.
- **Apostila do curso Mecânica de Fratura Elasto-Plástica**, Cláudio Ruggieri, EPUSP, 2010;
- **Apostila do curso Fadiga de Materiais Estruturais**, Cláudio Ruggieri, EPUSP, 2010;
- **Relatórios de análise de falhas do Prof. José B. Marcomini.**

**Metodologia:** serão disponibilizados no moodle (e-disciplinas), antes do horário normal das aulas, salvo imprevistos:

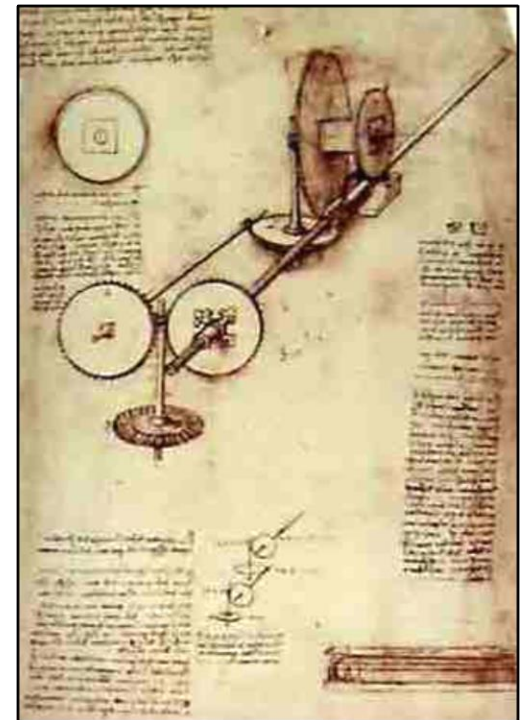
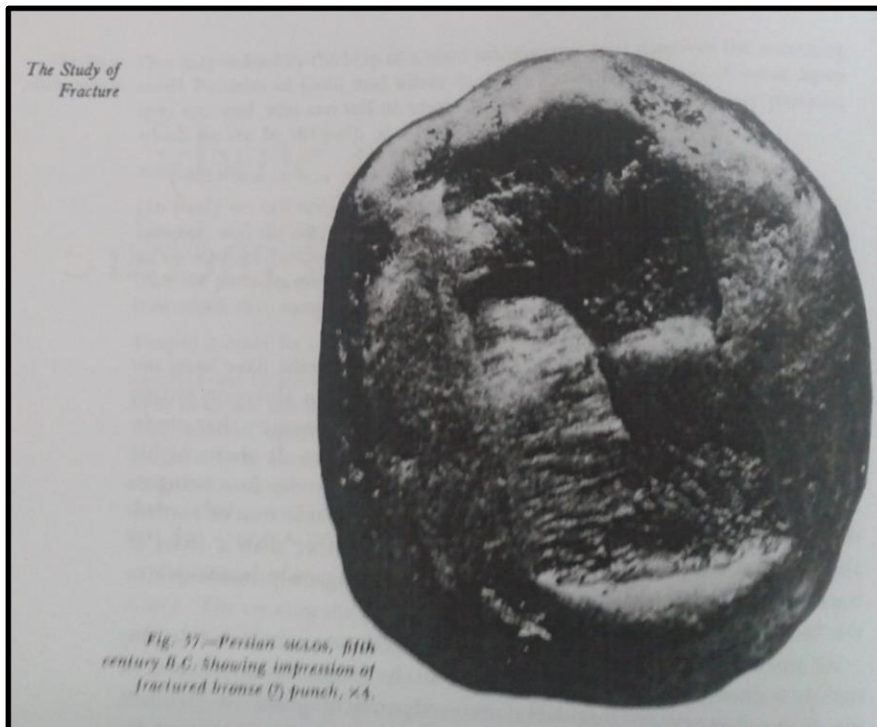
- **Videoaulas** gravadas;
- **Slides** da aula em pdf;
- Alguns **textos explicativos**;
- **Vídeos**;
- **Questionários orientativos** para direcionamento do estudo (**não é necessário enviar** o questionário respondido);
- Alguns **Capítulos de livros**;

**INTRODUÇÃO:**

**FRATURA EM CORPOS COM  
DESCONTINUIDADE E  
PEQUENO HISTÓRICO DA MECÂNICA DA  
FRATURA**

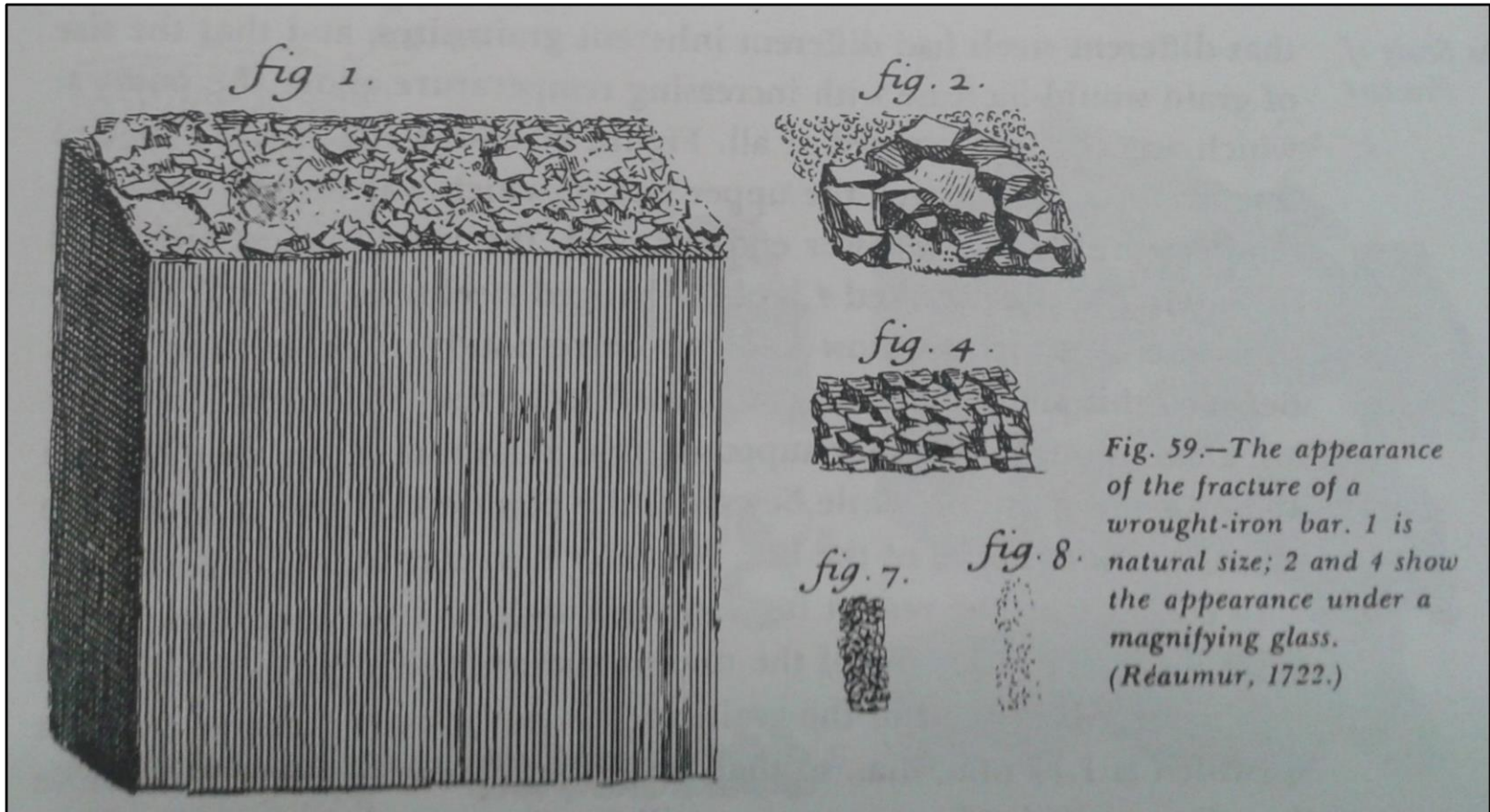
# HISTÓRICO DO ESTUDO DAS FRATURAS

- Desenvolveu-se devido à falhas;
- Séc.V- DC-Siglos – fratura do punção;
- Leonardo Da Vinci (1452-1519) – laminação de fios de ouro: probabilidade de um arame metálico apresentar trincas era diretamente proporcional ao seu comprimento



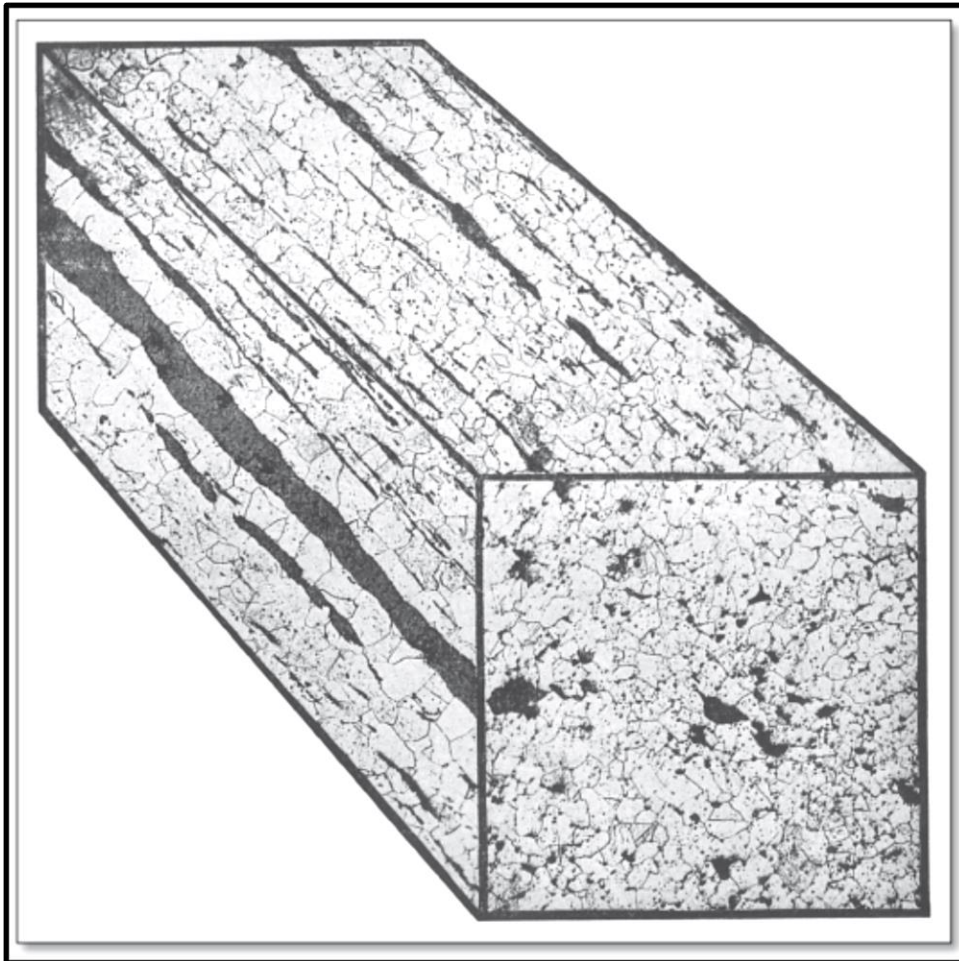


- **Réaumur** publicou suas **Memoirs em 1722** na qual discorre sobre ferro e aço;
- primeiro a reconhecer a estrutura de grãos do **ferro pudlado** através da **fratura intergranular**.



**Séc.XVIII – Henry Cort: redução direta em fornos de pudlagem (Puddle-argila);**

**Produto: Ferro pudlado (escórias, inclusões).**



**Figura 2.5**

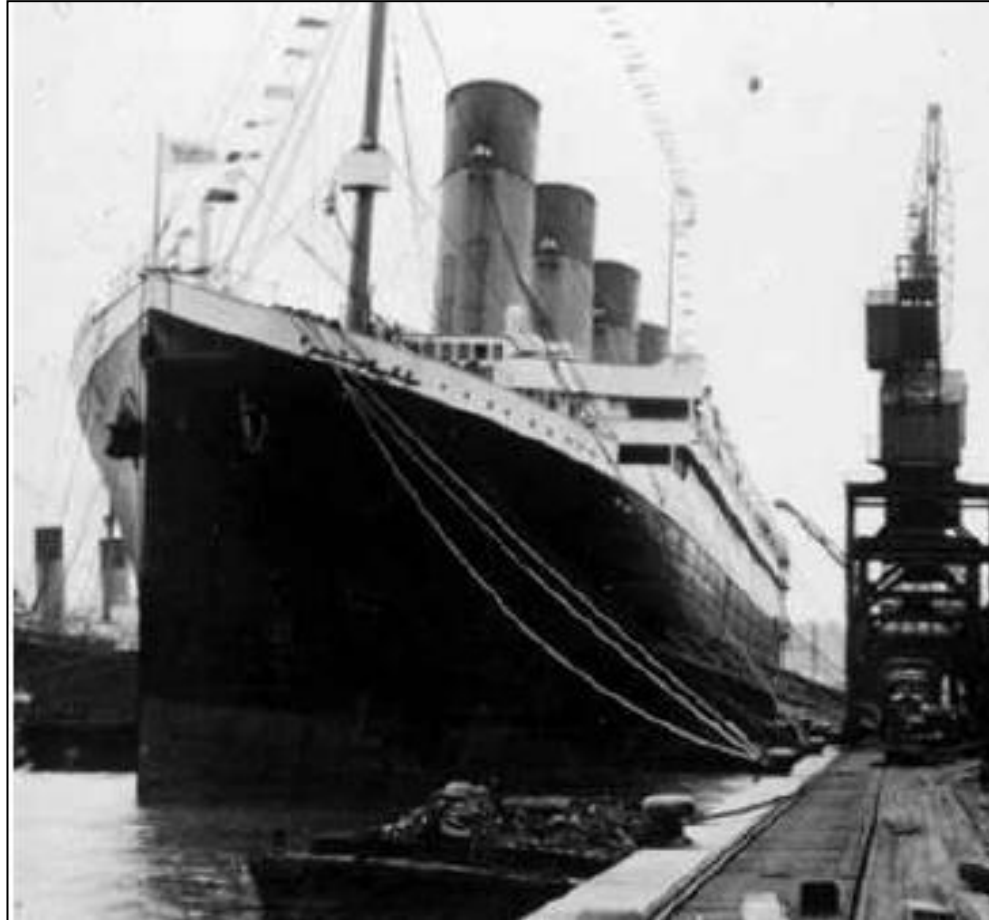
Ferro “forjado”. Reconstrução tridimensional com três micrografias. Reproduzido de [8]. Observa-se o alongamento das inclusões não-metálicas na direção de forjamento.

**FERRO “PUDLADO”**

**QUAL A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO NA  
PRESENÇA DE TRINCAS?**

**QUAL A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE  
FRATURA E DO DESENVOLVIMENTO DA  
MECÂNICA DE FRATURA?**

# TITANIC- ABRIL, 1912



# **APÓS TITANIC**

**Desenvolvimento da Mecânica de Fratura**

**Desenvolvimento dos ensaio de ultrassom**

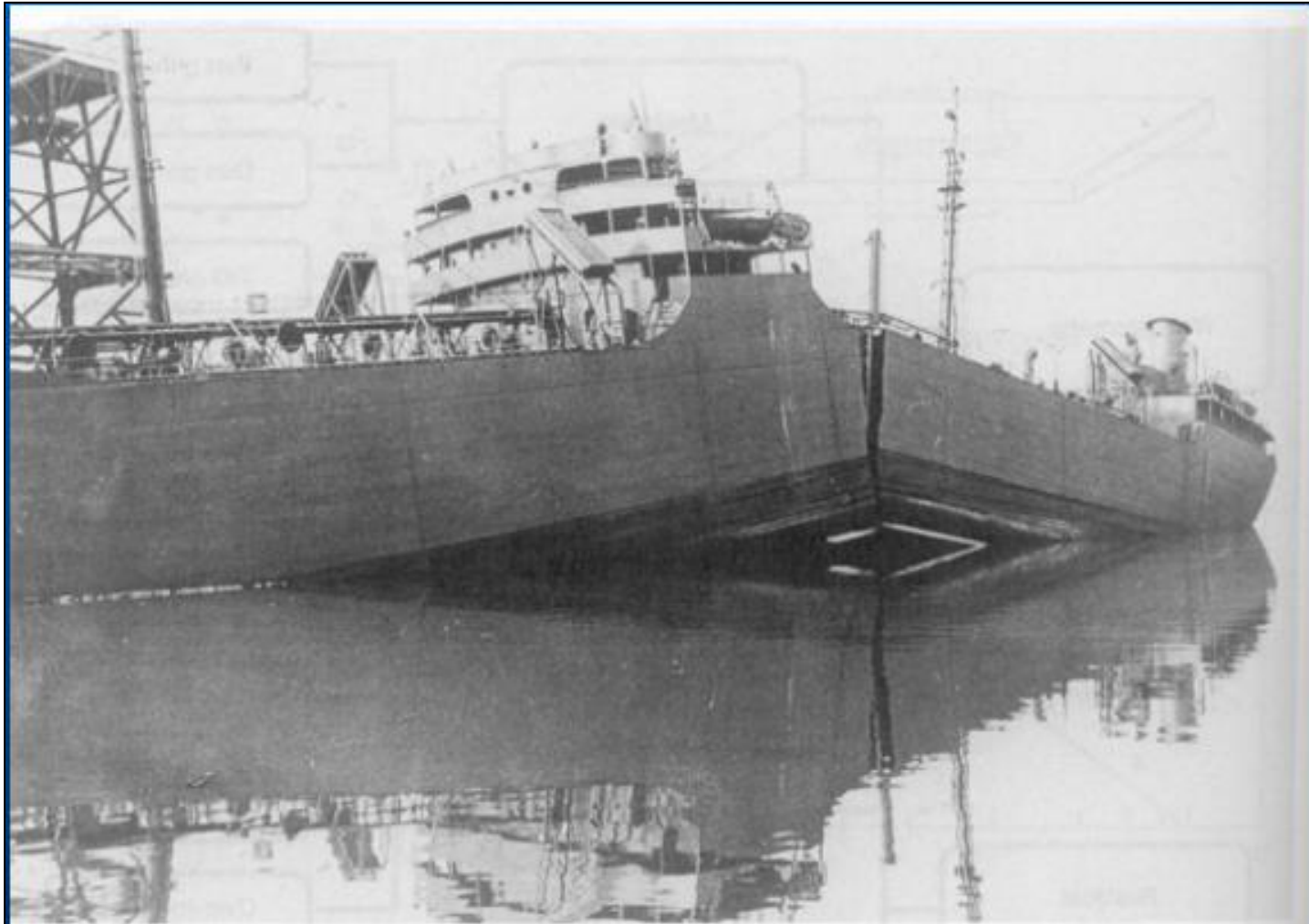
O desenvolvimento dos **ensaios não destrutivos** foi muito importante porque **auxiliam em filosofias de projeto** com vistas aos conceitos de **prevenção de falhas: “Falha Segura” e “Tolerância ao Dano”**.

- **Inspeção visual;**
- **Inspeção visual remota;**
- **Líquido penetrante;**
- **Ultrassom;**
- **Partículas magnéticas;**
- **Correntes parasitas (Eddy Current);**
- **Radiografia industrial: gamagrafia e raios-X;**
- **Neutronografia;**
- **Emissão de Barkhausen.**



# Inspeção Visual Remota- XLG3 (GE)





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



- **Navios Liberty (1943):**

***2700 Navios Construídos***

***400 Navios com Falhas***

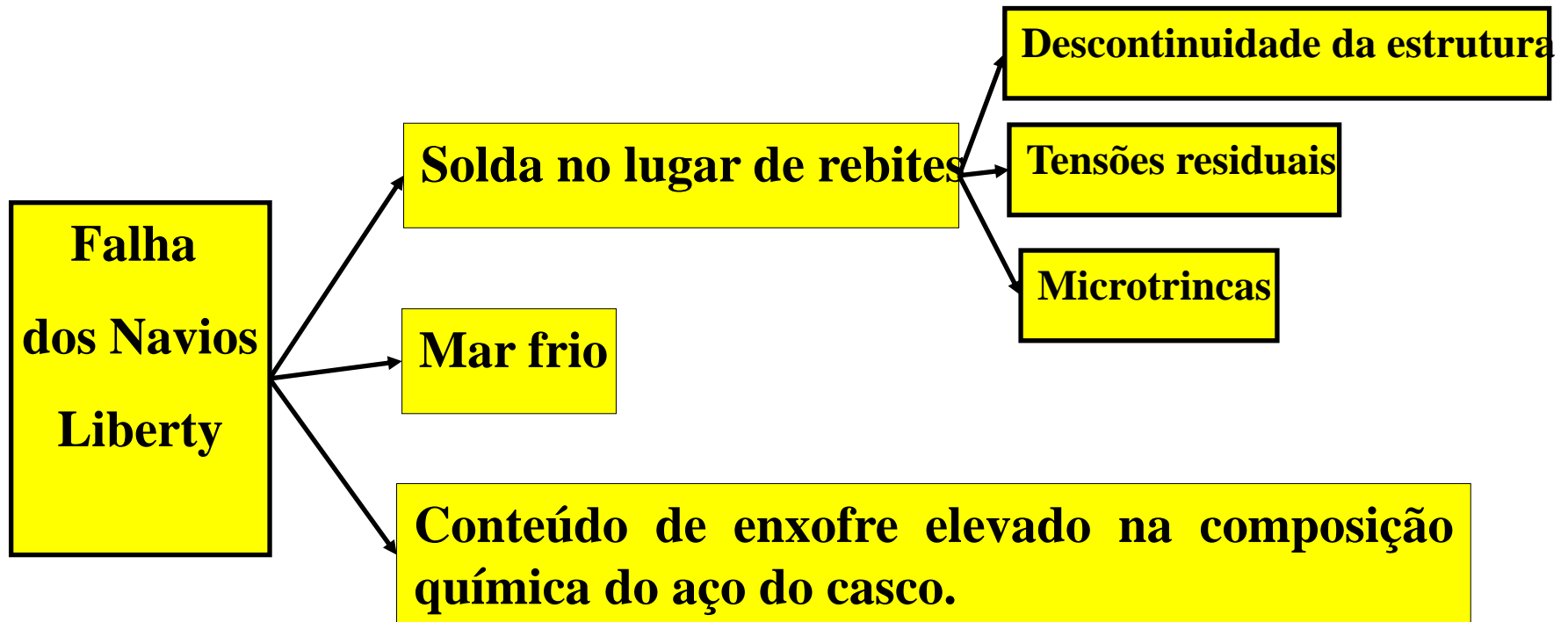
***90 Navios com Falhas Severas***

***20 Navios com Falhas Catastróficas***

**O estaleiro acelerou a fabricação dos navios: eram afundados pelos submarinos alemães no Atlântico Norte.**

**Para agilizar a fabricação, montagem do casco era feita a partir da soldagem de módulos previamente produzidos:**

- **Utilização de máquinas automáticas de soldagem, sem experiência;**
- **Cordões de solda defeituosos (concentradores de tensão);**
- **Cruzamento de cordões de solda (concentrador de tensão);**
- **Como consequência, aumento da temperatura de transição F-D e redução da tenacidade à fratura.**



**Mais de 90% dos casos de falha ocorrem por mecanismos de fadiga:**

- **Fadiga mecânica;**
- **Fadiga Térmica;**
- **Fadiga termomecânica;**
- **Fadiga em alta temperatura;**
- **Corrosão-fadiga e outros mecanismos combinados.**

# AVIÕES DE HAVILLAND-1954

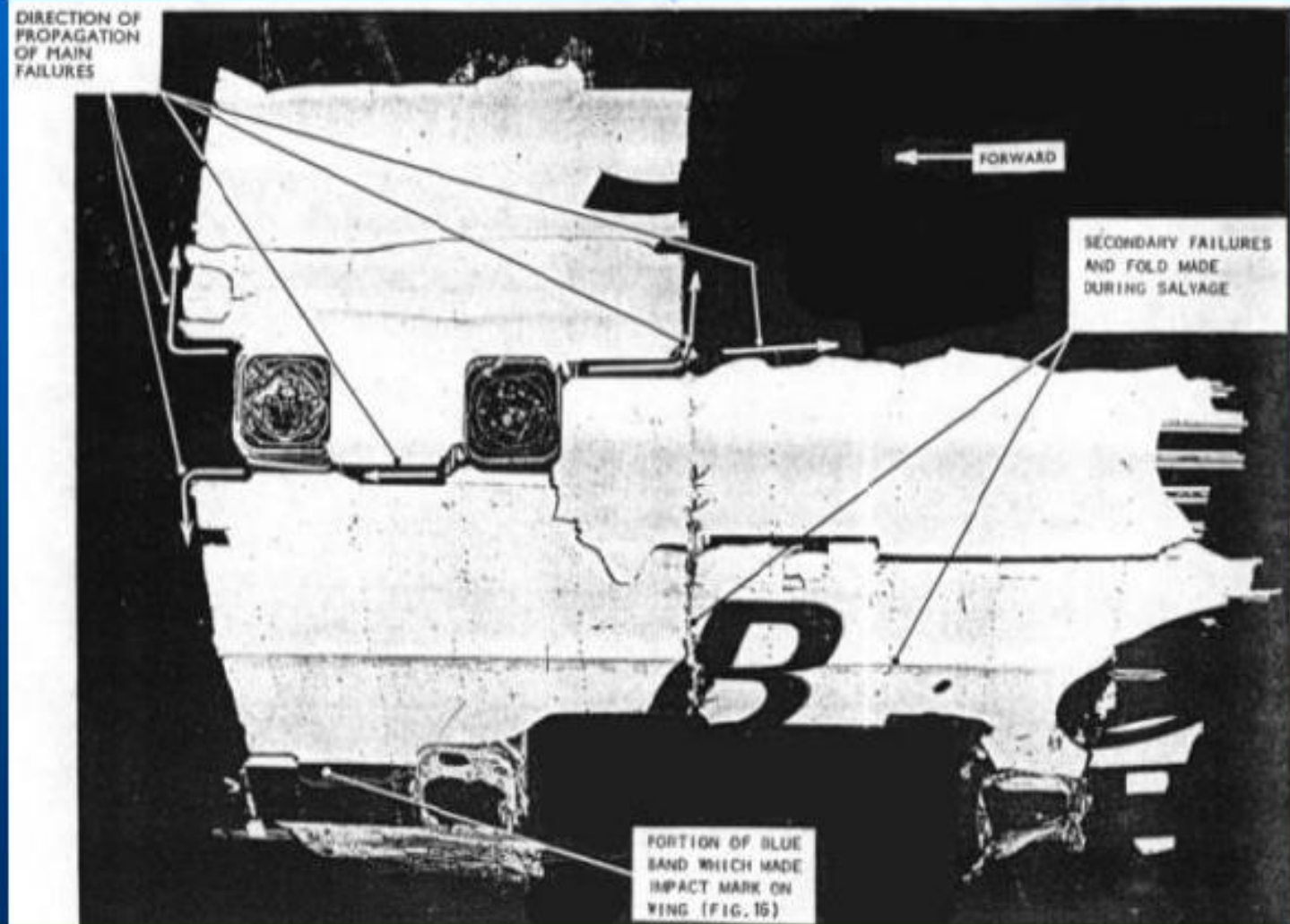
## Aviões COMET



**VER FILME**



# Jatos Comet



# 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 pressurizado com pressões duas vezes maiores que a dos outros aviões (56,9kPa)

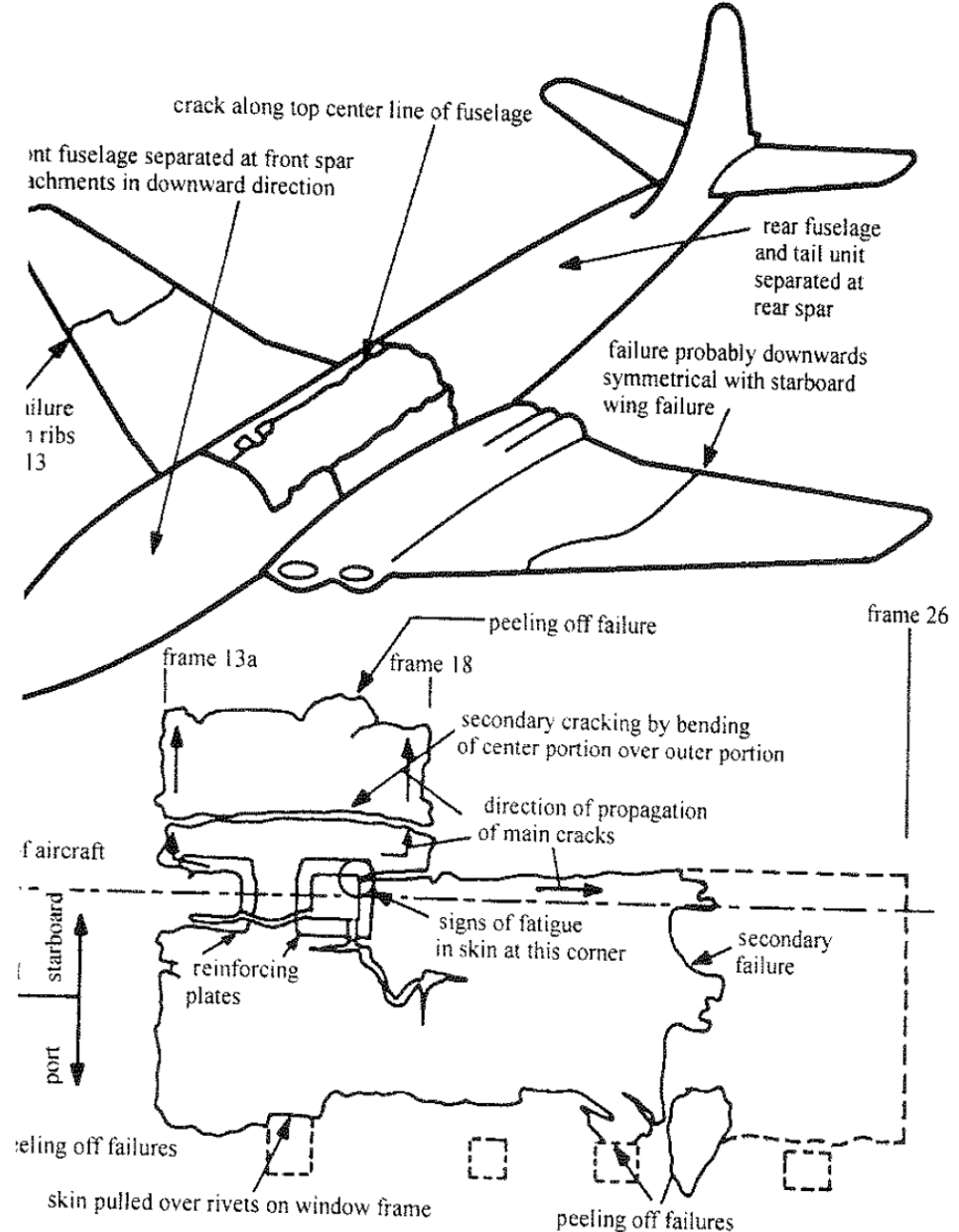
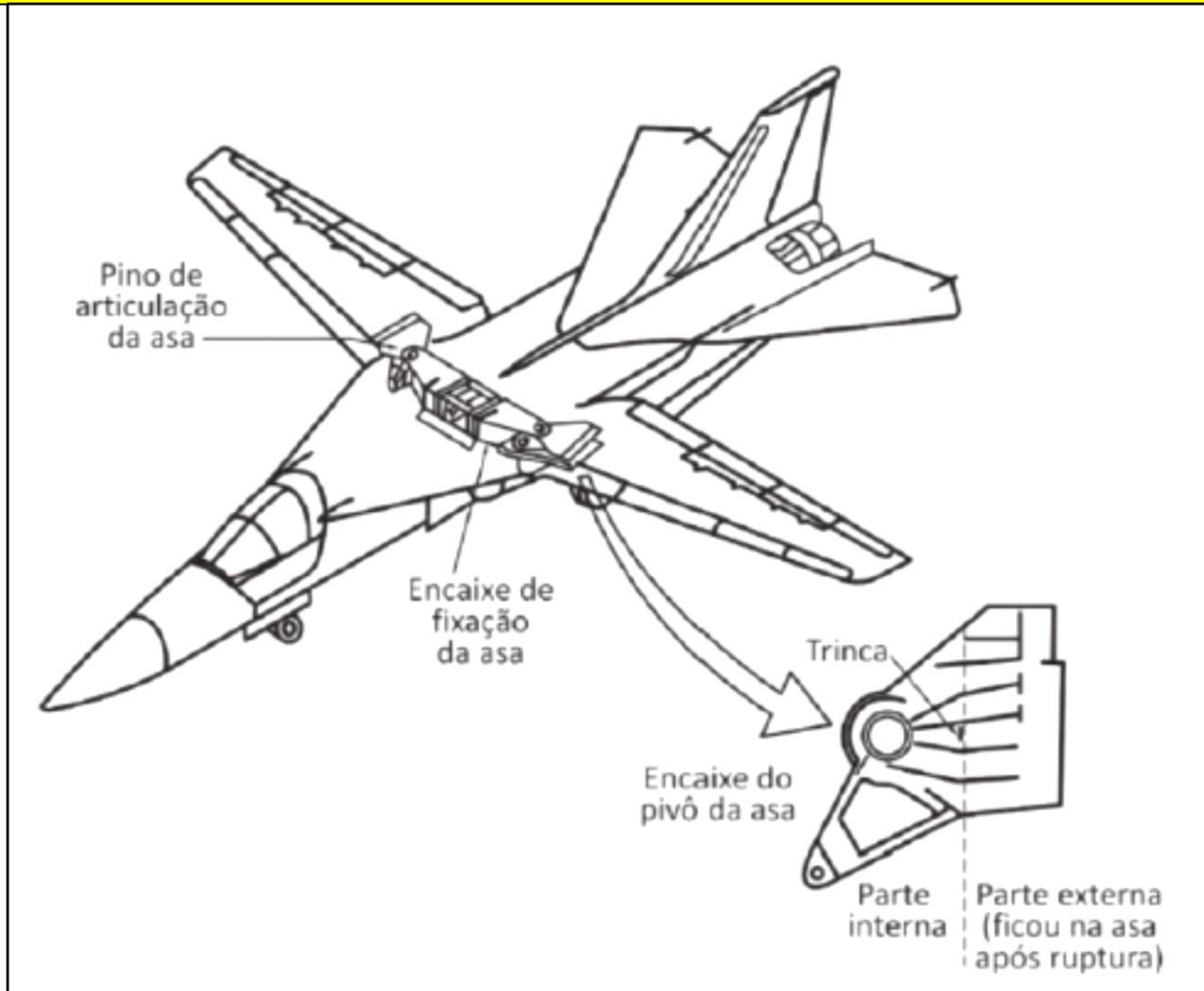


Fig. 1.1. Schematic diagram illustrating the location of fatigue cracks in a failed Comet airplane. (After Petroski, 1996.)

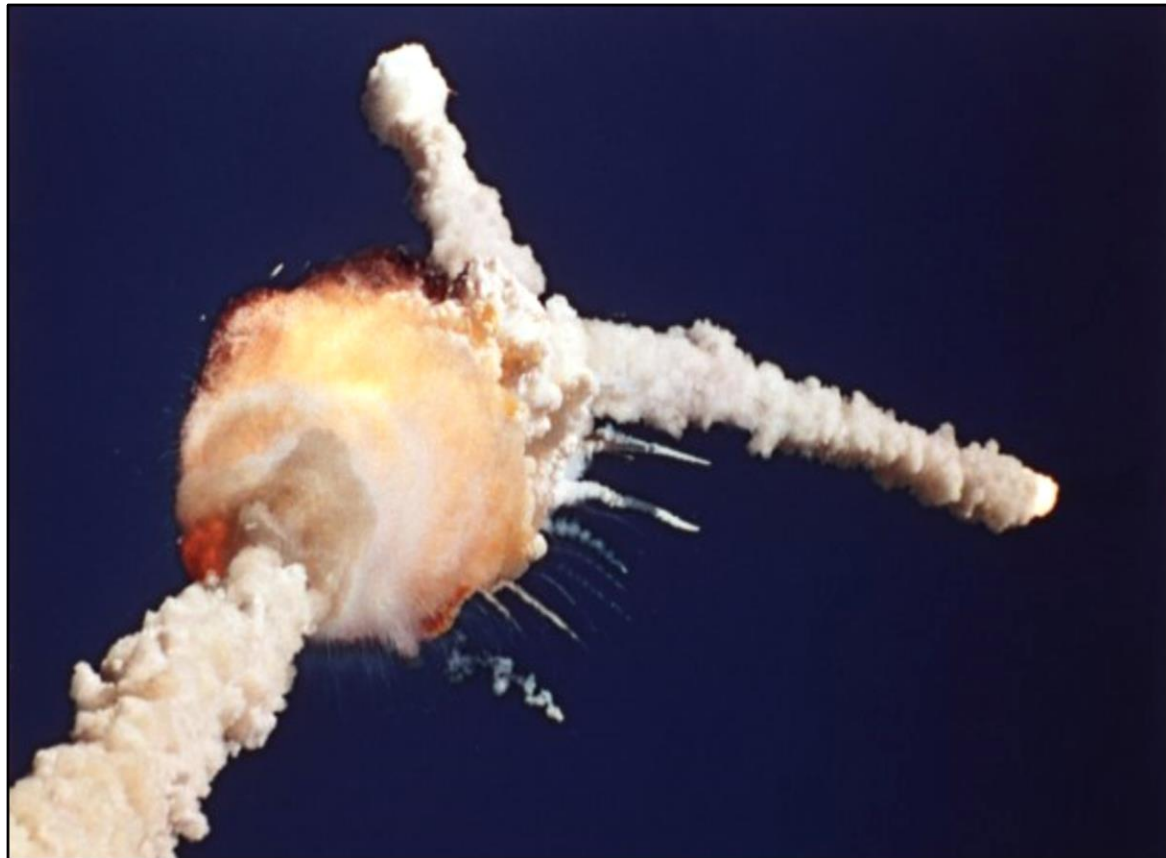


**Acidente com um caça F-111 com apenas 104 horas de voo (1969)- ano que o homem pisou na Lua –deflagrou o desenvolvimento de projetos com tolerância ao dano pela Força Aérea Americana- peça com defeito de forjamento, na asa.**





**Em 1986 um acidente deixou o mundo em choque, com a morte de sete tripulantes, incluindo uma professora, que seria a primeira civil a ser enviada ao espaço. O ônibus espacial Challenger explodiu 73 segundos após o lançamento, em sua décima missão. A análise da falha mostrou que a temperatura na hora e local do lançamento ( $\sim 2^{\circ}\text{C}$ ) contribuiu para fragilizar um anel de vedação na parte inferior de um dos foguetes permitindo o contato entre as chamas e o combustível.**



## **Boeing 737 da Aloha Airlines (28 de abril de 1988) Havaí**

- Avião com 19 anos de uso, nivelou a **7 000 metros, teto da primeira classe desapareceu** rombo de 6 metros na fuselagem acima e ao lado da fileira de assentos;
- **Uma comissária, de pé no corredor, foi sugada para fora.**









**Causa: corrosão-fadiga**

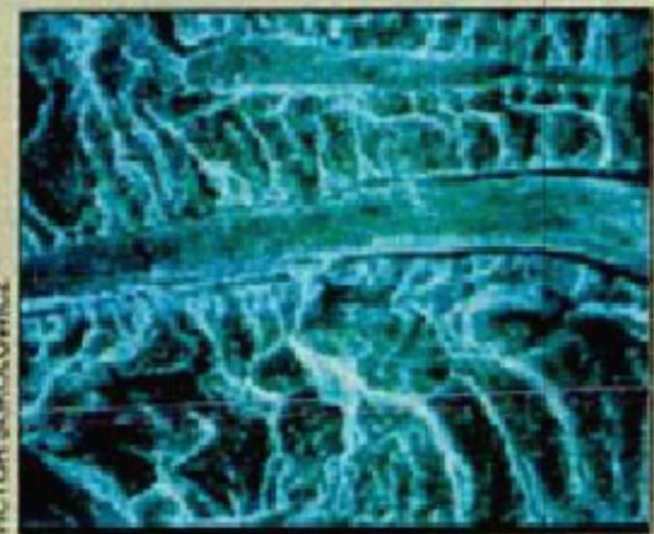
**Acidente com Ayrton Senna na fórmula 1, em 1994, causado, ao que tudo indica, pela fratura por fadiga de uma emenda soldada da barra de direção.**



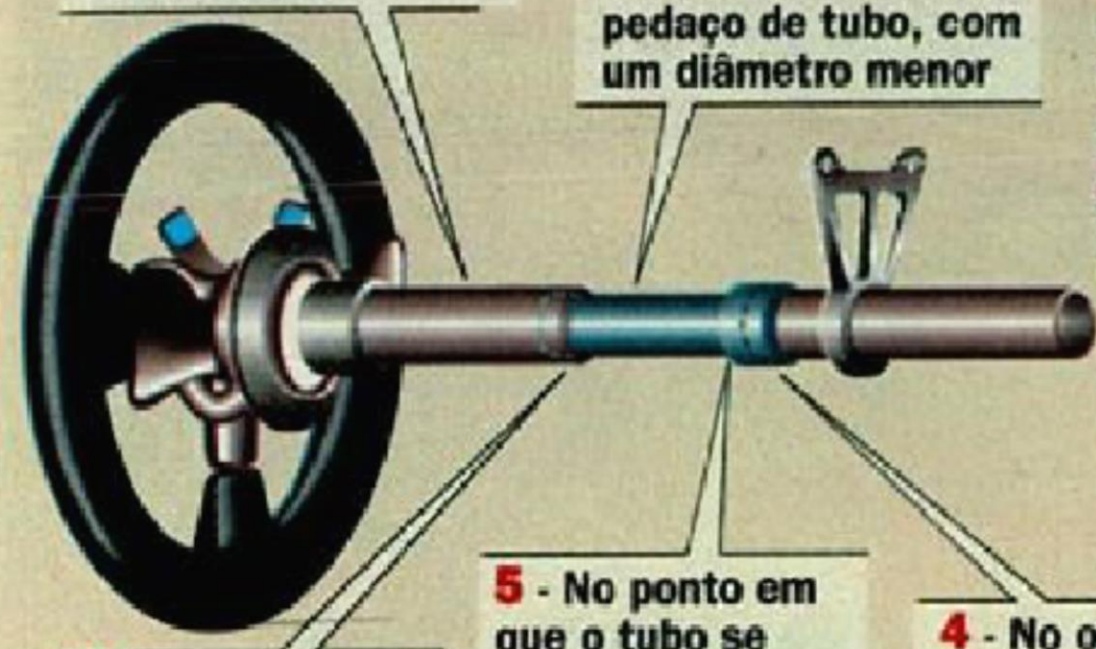


**1** - A pedido de Senna, a coluna de direção foi aumentada em cerca de 5 centímetros

**2** - Para fazer a emenda, os técnicos da Williams cortaram a coluna de direção e acrescentaram um pedaço de tubo, com um diâmetro menor



VICTOR SANCHEZ



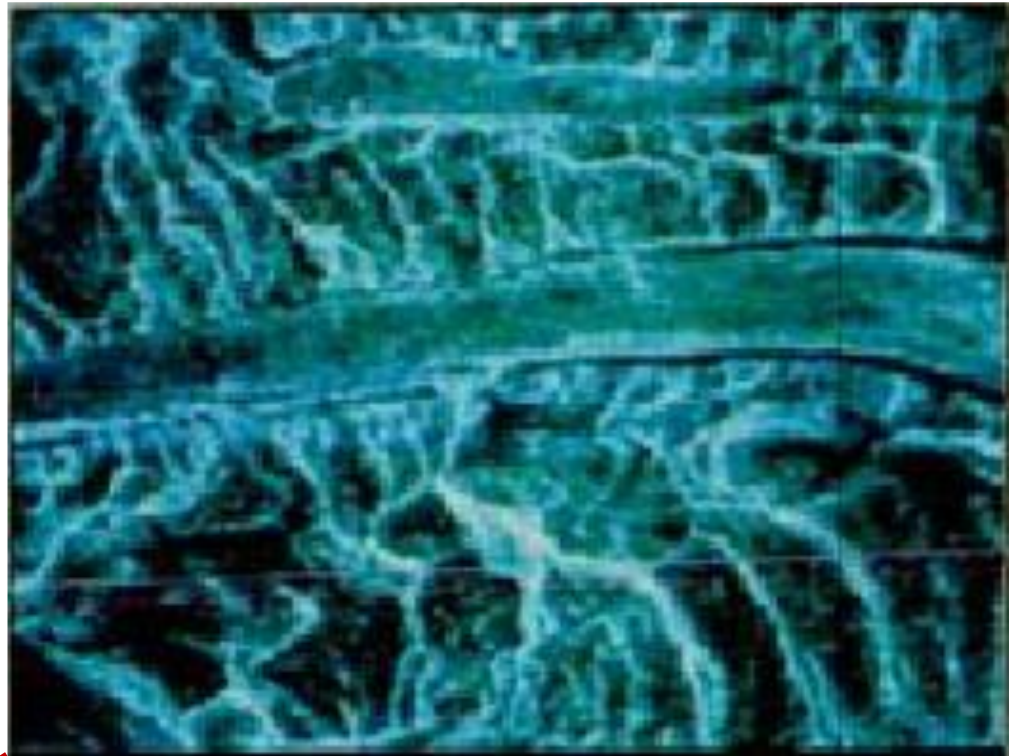
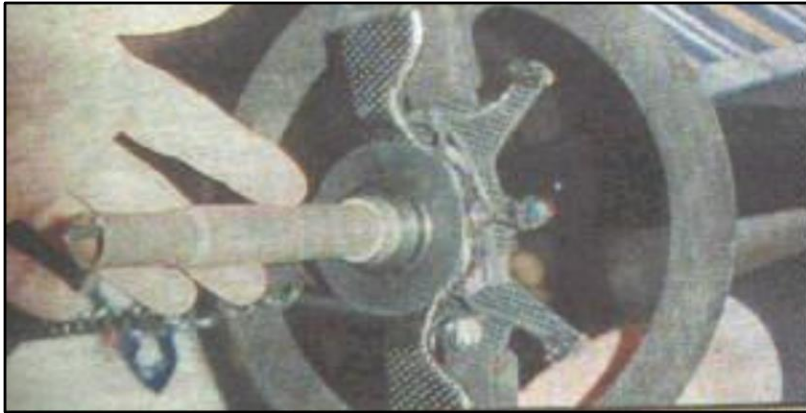
**3** - Em um dos lados da emenda o tubo é soldado por dentro da coluna

**5** - No ponto em que o tubo se alarga, num ângulo de 90 graus, se dá a ruptura por fadiga de material

**4** - No outro lado, o tubo se alarga e é a coluna que fica por dentro

Quando estão em processo de fadiga, os metais apresentam estrias (*foto*) que são diferentes das provocadas em caso de uma ruptura por impacto

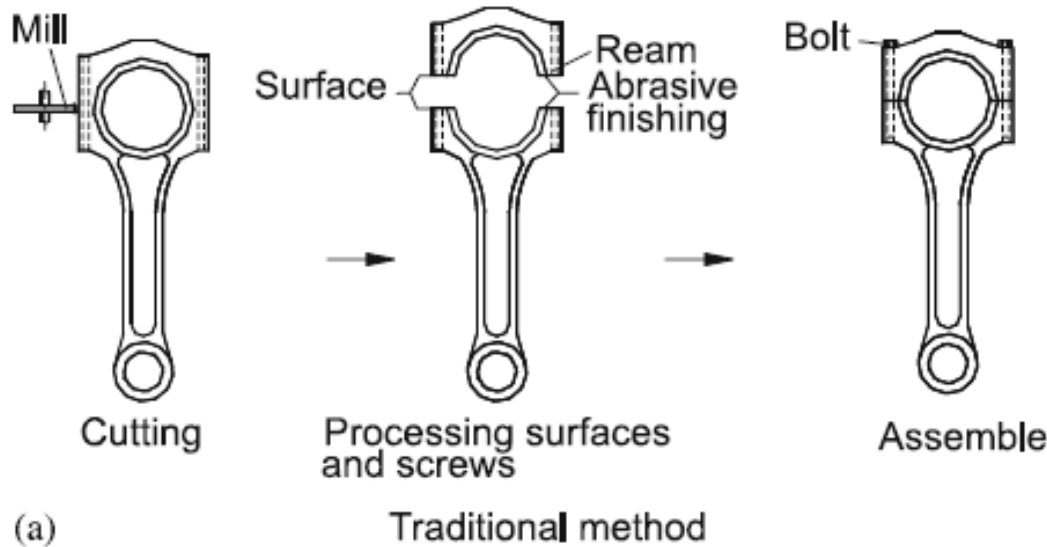




**MEV DA SUPERFICIE DE  
FRATURA APRESENTANDO  
ESTRIAS PRÓXIMAS À REGIÃO  
DA SOLDA**

# CONTROLE DE PROCESSO: CASO ONDE A FALHA É BEM VINDA?!

## PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE BIELA



### MÉTODO TRADICIONAL:

- **CORTE,**
- **ACABAMENTO POR**
- **USINAGEM;**
- **MONTAGEM.**

### DESVANTAGENS:

- **PERDA DE MATERIAL;**
- **REBARBA;**
- **DESALINHAMENTO.**

**É NECESSÁRIO CONHECER O  
COMPORTAMENTO DO MATERIAL  
EM PRESENÇA DE  
DESCONTINUIDADE!!!**

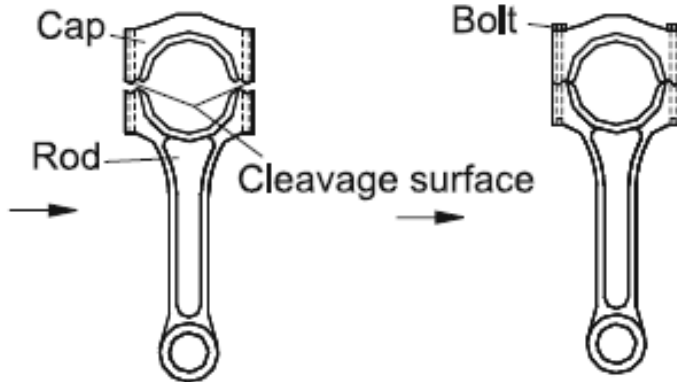
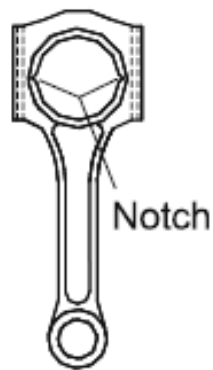
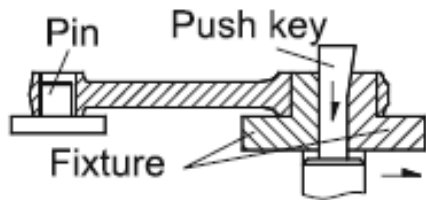
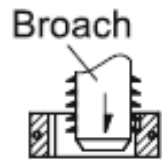


(a)

Conventional Con/rod



# PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE BIELA FRATURADA

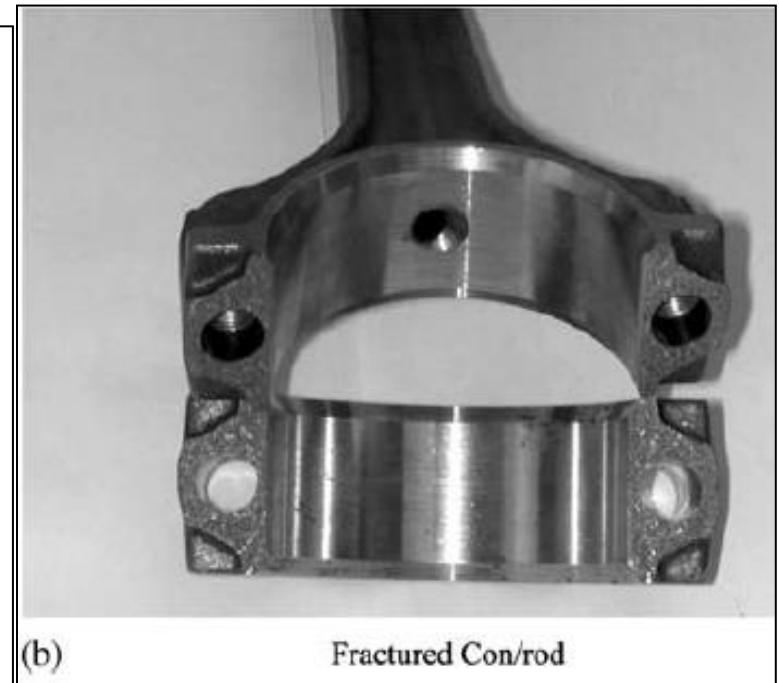


Cutting notch

Fracture splitting

Assemble

(b) Fracture splitting method



**MATERIAL DEVE SER ADEQUADO: PRINCIPAL PARÂMETRO DO PROCESSO**

Table 1. Chemical composition of fracture splitting steel (%)

Designation	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
C70S6BY	0.72	0.22	0.50	0.009	0.06 ~ 0.07	0.061	0.04

Int J Adv Manuf Technol (2005) 25: 883–887  
DOI 10.1007/s00170-003-2022-2

Z. Gu · S. Yang · S. Ku · Y. Zhao · X. Dai

**Fracture splitting technology of automobile engine connecting rod**

## **PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE BIELA FRATURADA**

### **DIFICULDADES:**

**MATERIAL DEVE ATENDER OS REQUISITOS DE FADIGA, RESISTÊNCIA E DUTILIDADE PARA A APLICAÇÃO, ALÉM DE APRESENTAR: BOA USINABILIDADE, FRATURA FRÁGIL (POUCA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA), “FRAGILIDADE APROPRIADA”**

# CONTROLE DA FALHA: CASOS ONDE A FRATURA É BEM VINDA?!

## ESTAÇÕES ESPACIAIS E A REENTRADA

### Estações espaciais

ANTONIO FERNANDO BERTACHINI DE ALMEIDA PRADO E  
PETRÔNIO NORONHA DE SOUZA

EM TORNO DE 380KM DE ALTURA-FORA DA ATMOSFERA



*A estação espacial Skylab em órbita.*



**SKYLAB – 1973-1979 – REDUÇÃO DO TEMPO ÚTIL PELA MAIOR ATIVIDADE SOLAR QUE EXPANDIU A ATMOSFERA.**

# CONTROLE DA FALHA: CASOS ONDE A FRATURA É BEM VINDA?!

## ESTAÇÕES ESPACIAIS E A REENTRADA



A Conquista do Espaço: do Sputnik a Missão Centenário  
Othon Cabo Winter e Antonio Fernando Bertachini De Almeida Prado

**MIR – 1986-2001**

**Estações espaciais**

ANTONIO FERNANDO BERTACHINI DE ALMEIDA PRADO E  
PETRONIO NORONHA DE SOUZA

Facilita o cálculo de previsão de onde cairão as possíveis partes que não se queimarem (conservação de momento linear). Além disso, existe um procedimento de desativação e até propulsão da estação no local preferencial de reentrada.

Figura 9.2: A explosão não afeta a trajetória do CM.



$$\vec{P}_x \text{ antes} = m \vec{v},$$
$$\vec{P}_{x, \text{depois}} = (M + m) \vec{V}.$$

Então,

$$m \vec{v} = (M + m) \vec{V} \Rightarrow \vec{V} = \frac{m}{M + m} \vec{v}.$$

O CONHECIMENTO DO **COMPORTAMENTO MECÂNICO** DOS MATERIAIS EM PRESENÇA DE DESCONTINUIDADES COMO **TRINCA**, AUXILIA EM UMA IMPORTANTE ÁREA DE ESTUDOS: **ANÁLISE DE FALHAS**.

A PRESENÇA DE UMA DESCONTINUIDADE/**TRINCA** LEVA À **FRATURA** DOS MATERIAIS: UM **TIPO DE FALHA**.

# ESCALAS DE FRATURA

**NANOESTRUTURAS:  
GRAFENO, FULERENO  
BUCKMINSTER**

**MICRODISPOSITIVOS  
: CHIPS**

**PEÇAS  
PEQUENAS: BIELA,  
VIRABREQUIM**

**GRANDES PEÇAS:  
VIGA DE PONTE  
ROLANTE**

**GRANDES EQUIPAMENTOS:  
COMPORTAS , REATORES  
QUÍMICOS E NUCLEARES**

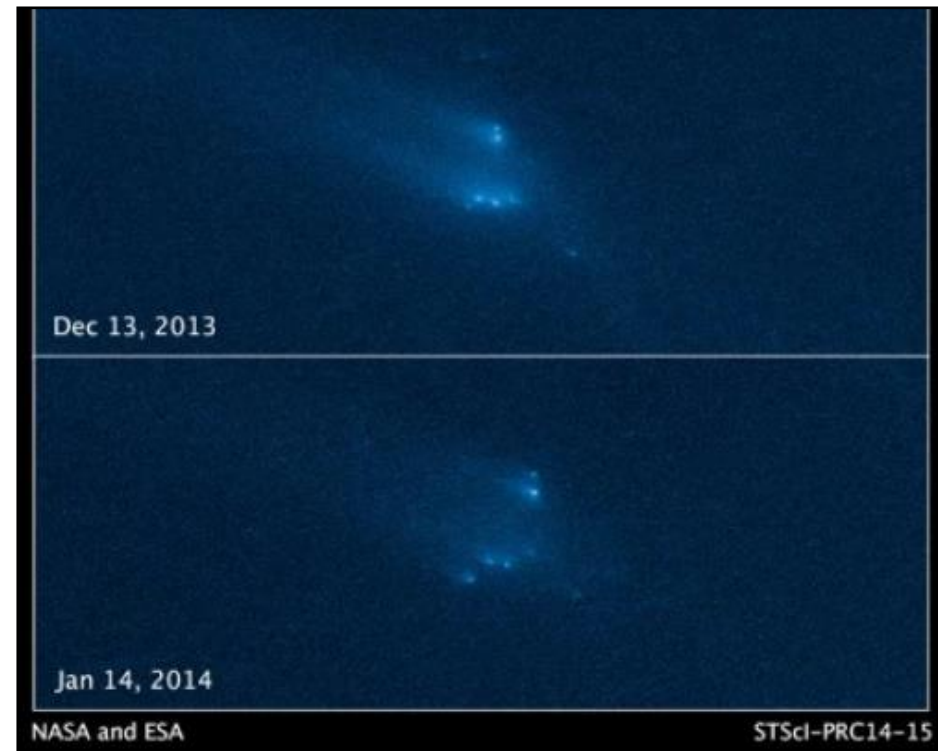
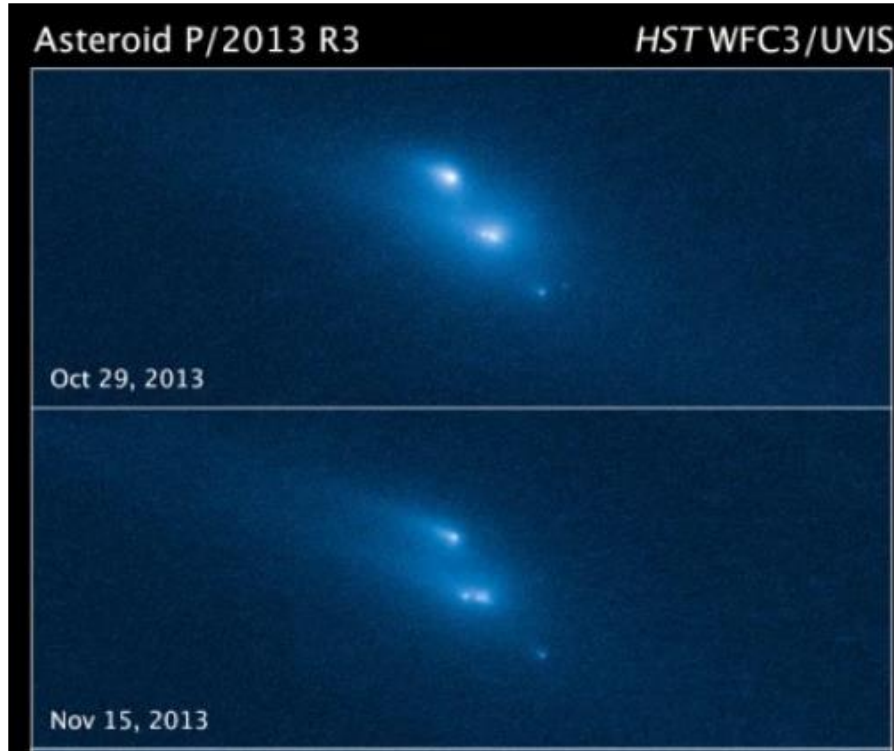
**SISTEMAS  
COMPLETOS:  
AUTOMÓVEL**

**EDIFÍCIOS**

**PLANETAS ,  
METEORITOS,  
COMETAS E  
ASTERÓIDES**

## 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.**



## ANÁLISE DE FALHAS APLICADA À NATUREZA

Jupiter in Ultraviolet



H N Q<sub>2</sub> D/G  
B Q<sub>1</sub> R L

Hubble Space Telescope  
Wide Field Planetary Camera 2

**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.**

# ESTUDO DE FRATURA EM NANOESCALA

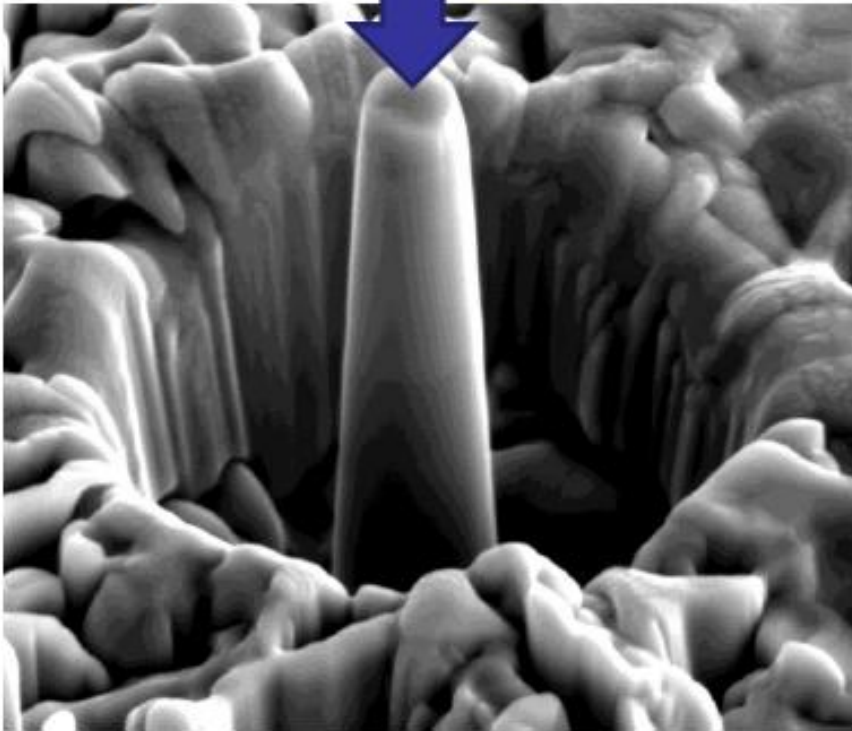
Dual-beam FIB-SEM instrument

## Test specimens

Fracture mechanics



Compression

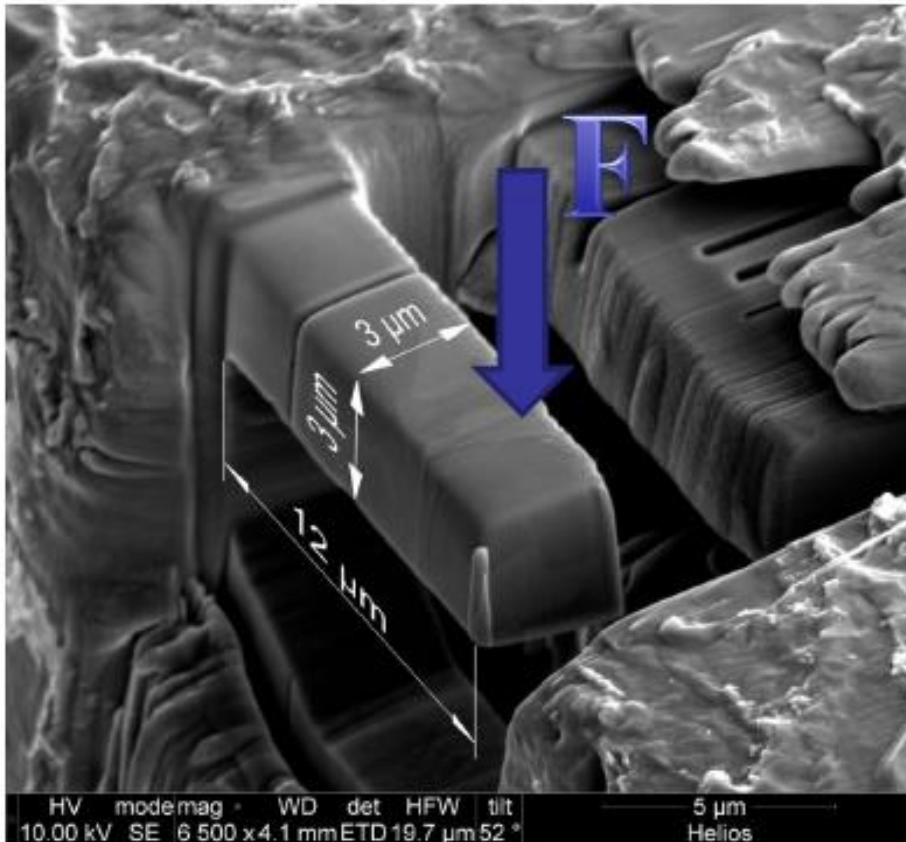


→ Fracture toughness ( $K_{Ic}$ )

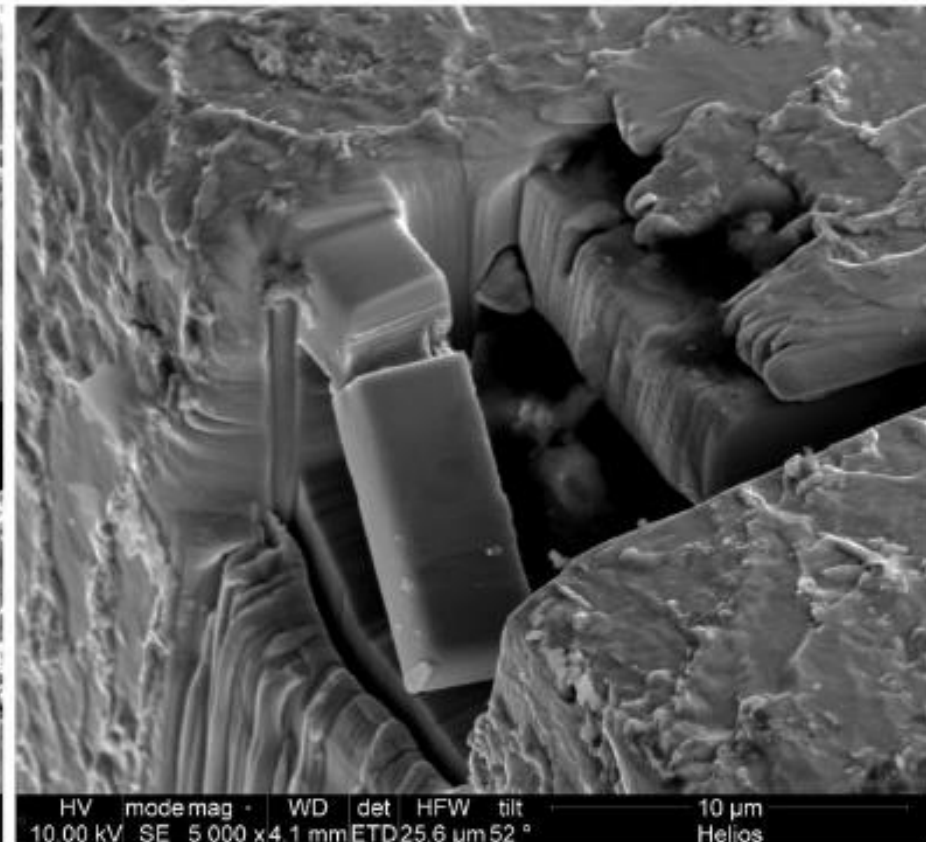
→ Yield stress ( $\sigma_y$ )

# Fracture mechanics test: cantilever beam with notch

Before loading



After loading





O **estudo da fratura** tornou-se tão importante que os cientistas da época achavam que seria necessário o aprofundamento das investigações nesta área, em direção ao **mecanismo de fratura em nível atômico**. A partir de uma **reunião no MIT** (Massachusetts Institute of Technology), em **1957**, de um seleto e pequeno grupo de cientistas, foi elaborado um **encontro internacional**. Assim, entre **12 e 16 de abril de 1959**, ocorreu a **Conferência Internacional sobre Mecanismos Atômicos de Fratura**, sediado em **Swampscott, Massachusetts**, na New Ocean House

# Fracture

---

Proceedings of an international  
conference on the atomic mechanisms of  
fracture held in Swampscott, Massachusetts,  
April 12-16, 1959.

*Sponsored by*

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION  
OFFICE OF NAVAL RESEARCH  
AIR FORCE OFFICE OF SCIENTIFIC RESEARCH  
SHIP STRUCTURE COMMITTEE

*Organized and directed by*

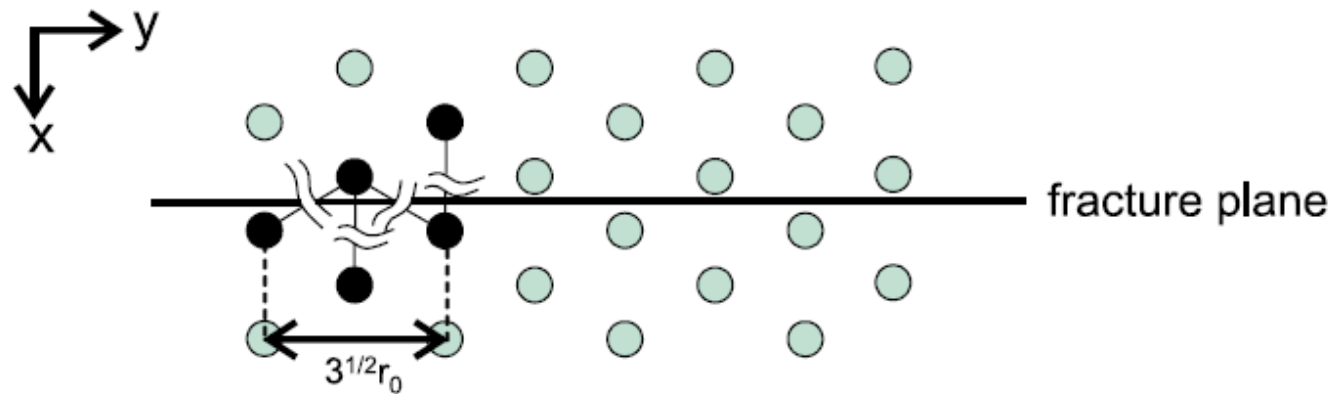
CONFERENCE ON FRACTURE OF THE  
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES-  
NATIONAL RESEARCH COUNCIL

## MODELOS ATOMÍSTICOS

A energia superficial de fratura ( $\gamma$ ) relaciona-se com a tensão necessária para a fratura ( $\sigma_{\max}$ ), em nível atômico, pela equação

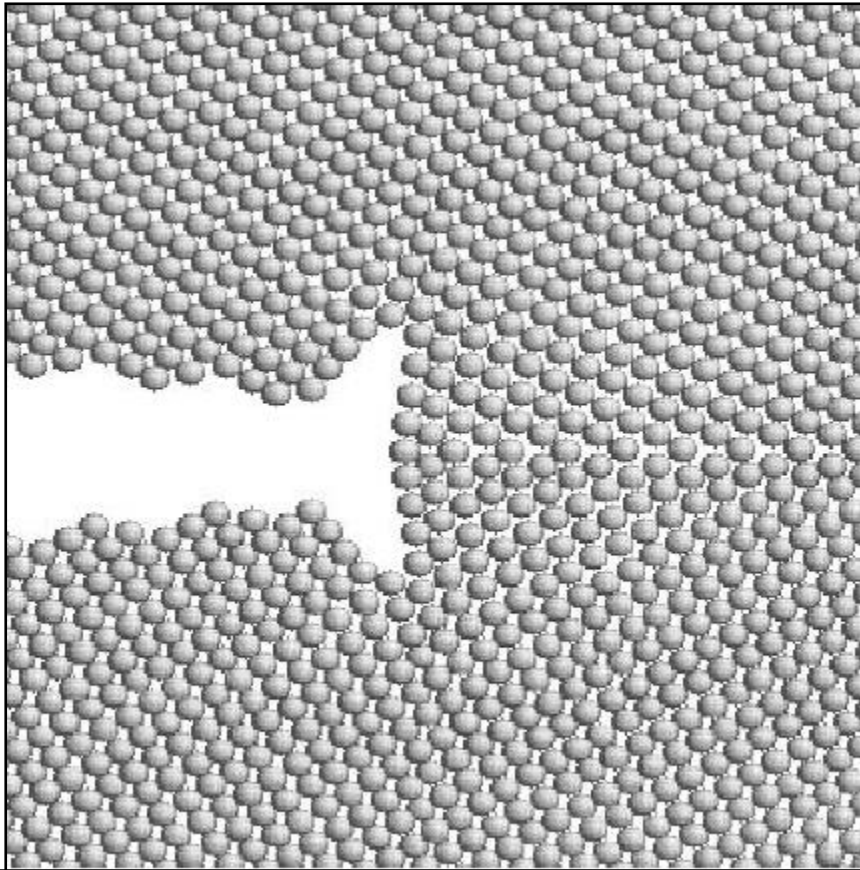
$$\sigma_{\max} = \left[ \frac{\gamma E}{a} \right]^{1/2}$$

E é o módulo de Young e  $a$  é a distância interatômica sem deformação

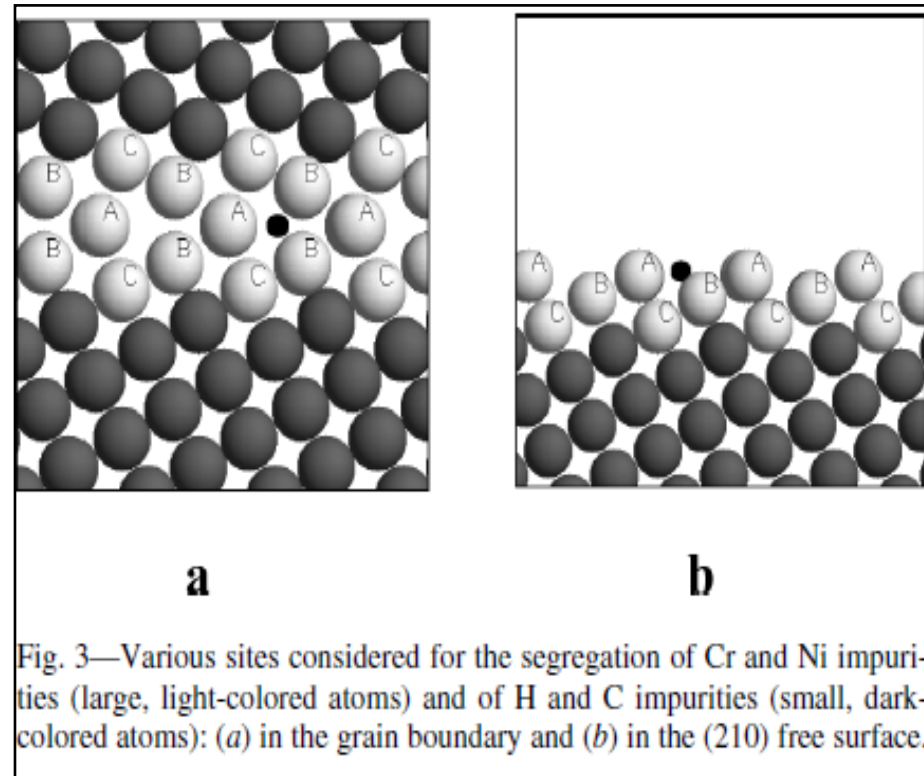




# MODELOS ATOMÍSTICOS

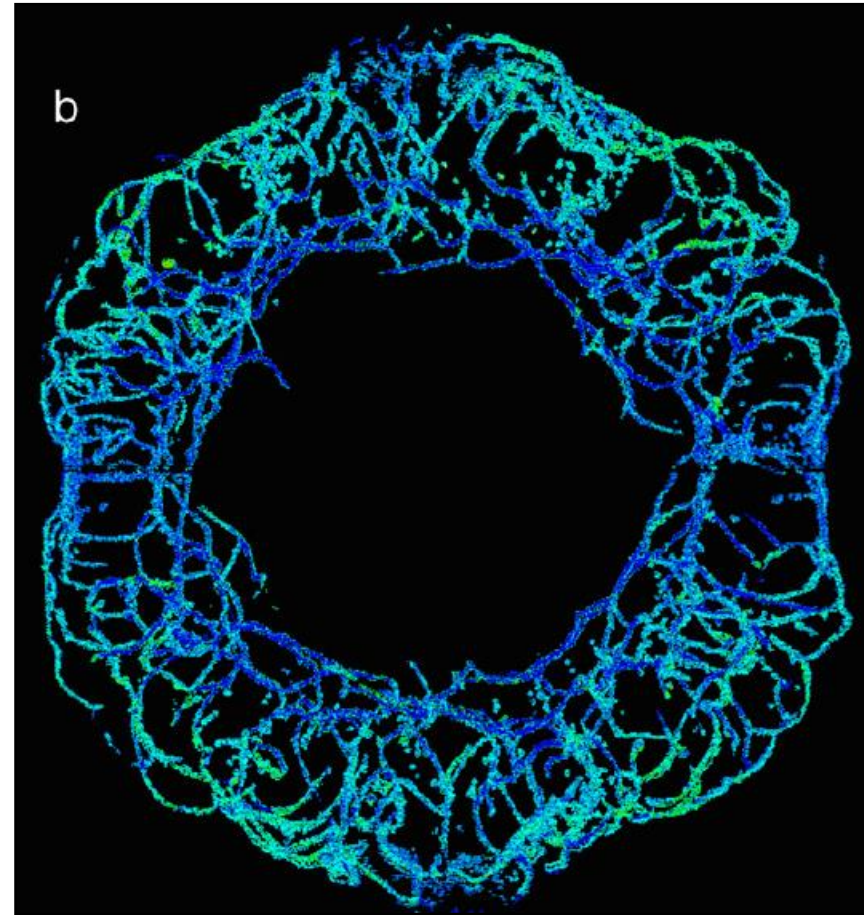
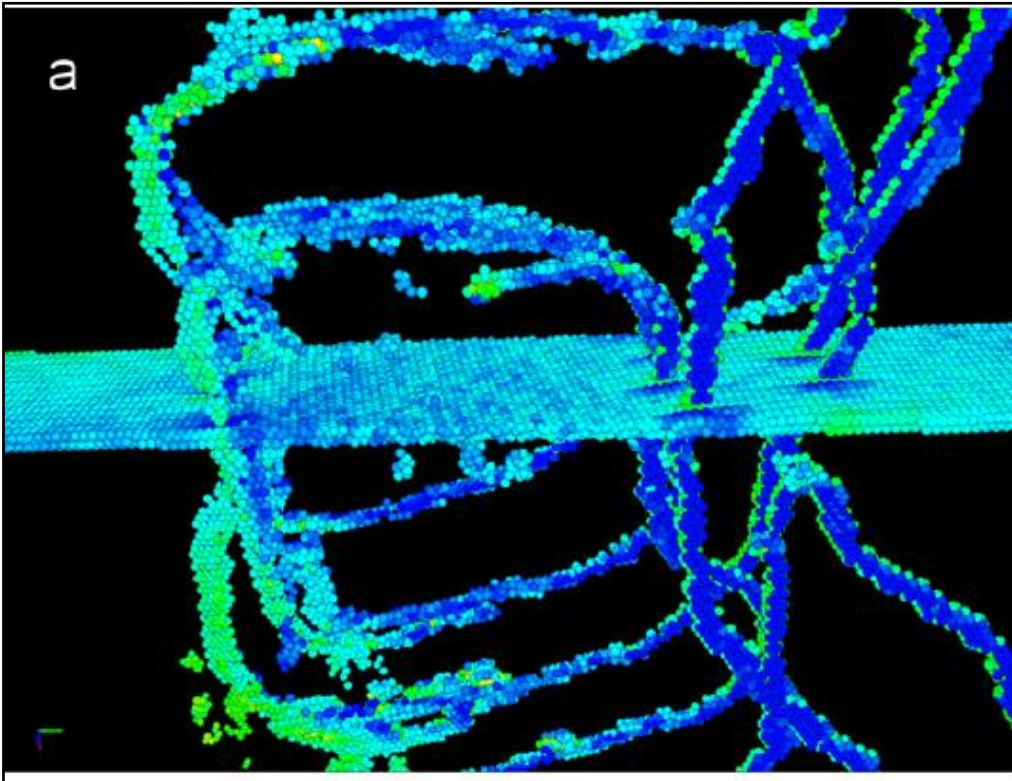


## FRATURA INTERGRANULAR EM Fe



**SIMULAÇÃO:  
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE  
ÁTOMOS SUBSTITUCIONAIS (Cr e  
Ni) E INTERSTICIAIS (C e H) NA  
FRATURA INTERGRANULAR.**

# MODELOS ATOMÍSTICOS

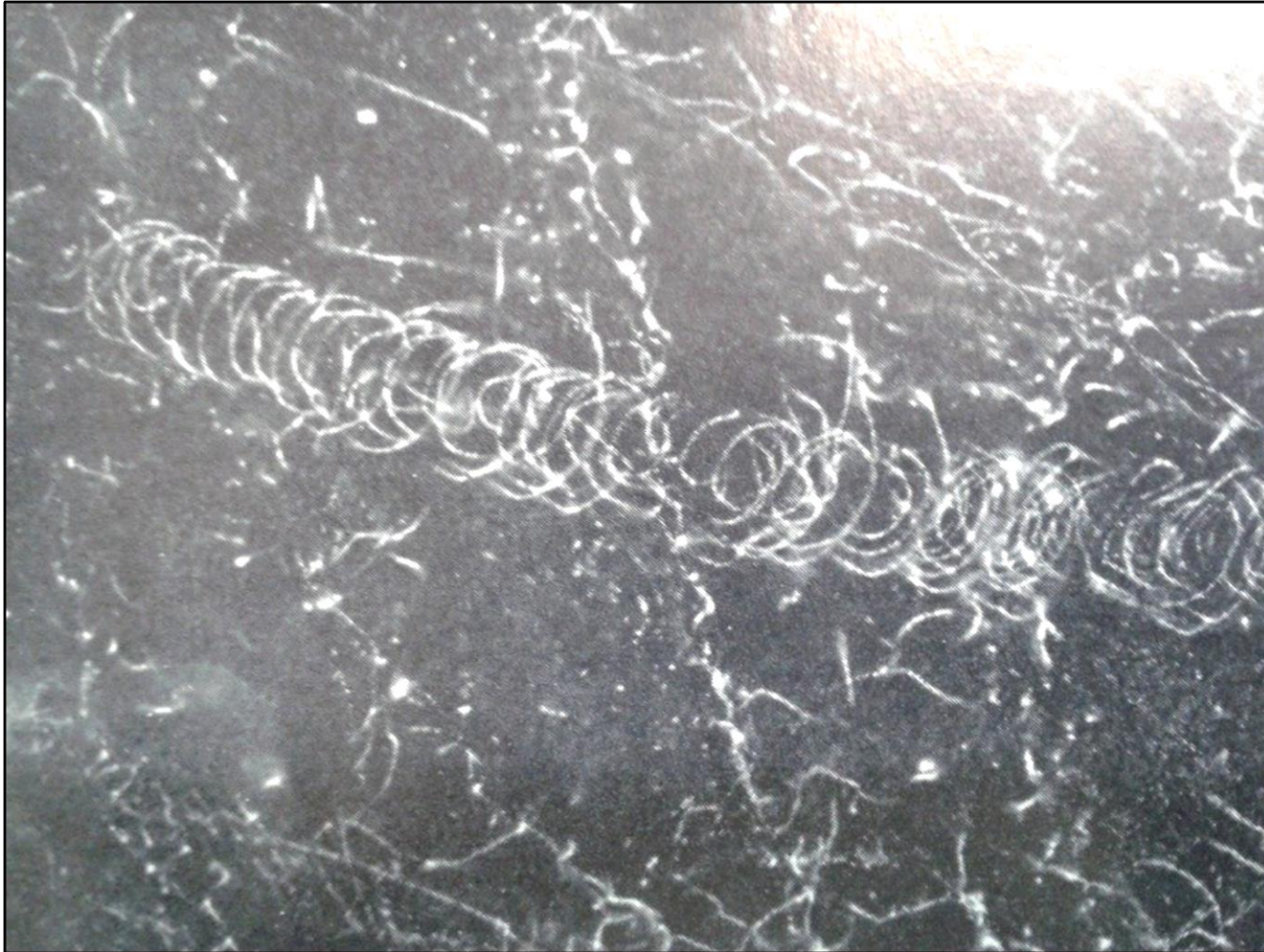


**LOOP DE LINHAS DE  
DISCORDÂNCIAS FORMADAS  
DURANTE FRATURA POR  
IMPACTO**

**LOOP DE DISCORDÂNCIAS É  
FORMADA TAMBÉM NA  
FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO  
E FRAGILIZAÇÃO POR RADIAÇÃO**



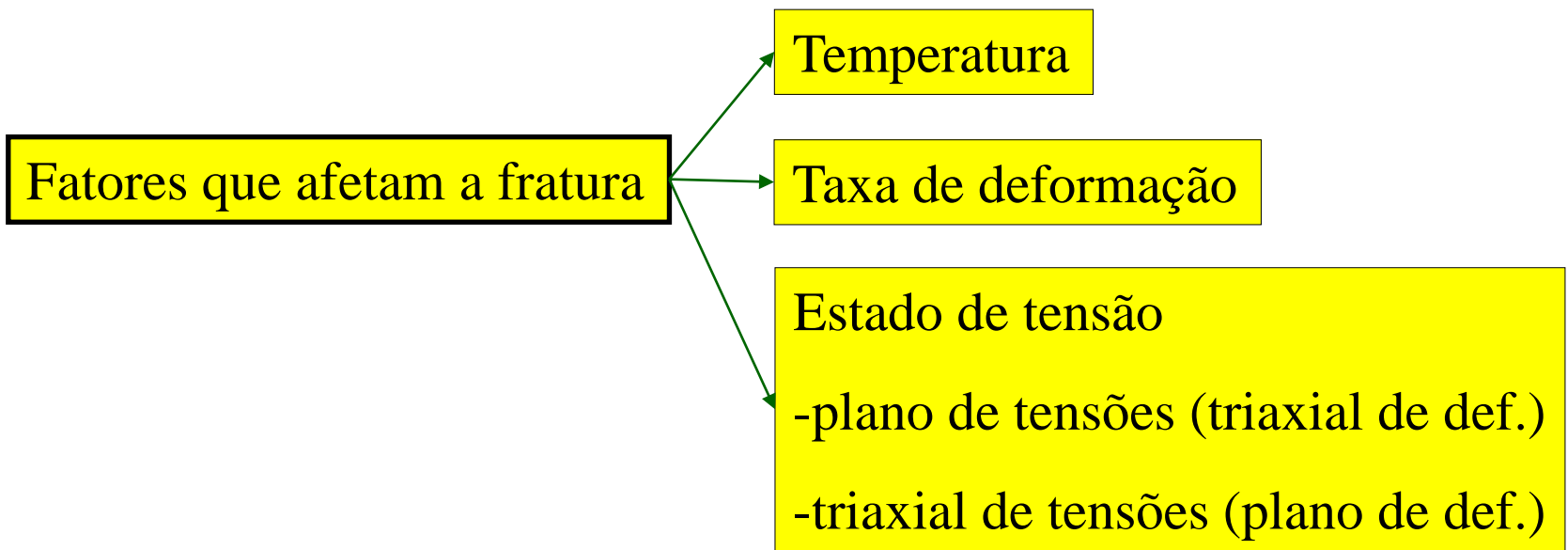
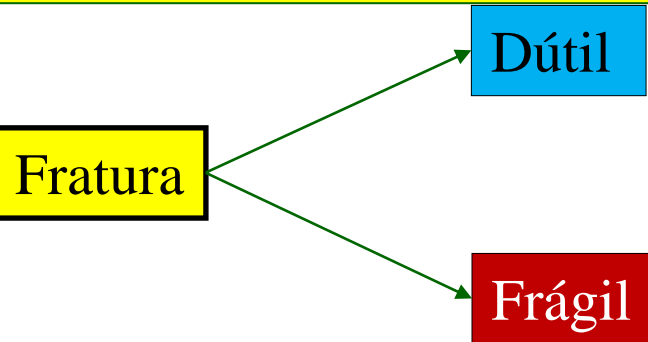
# MODELOS ATOMÍSTICOS

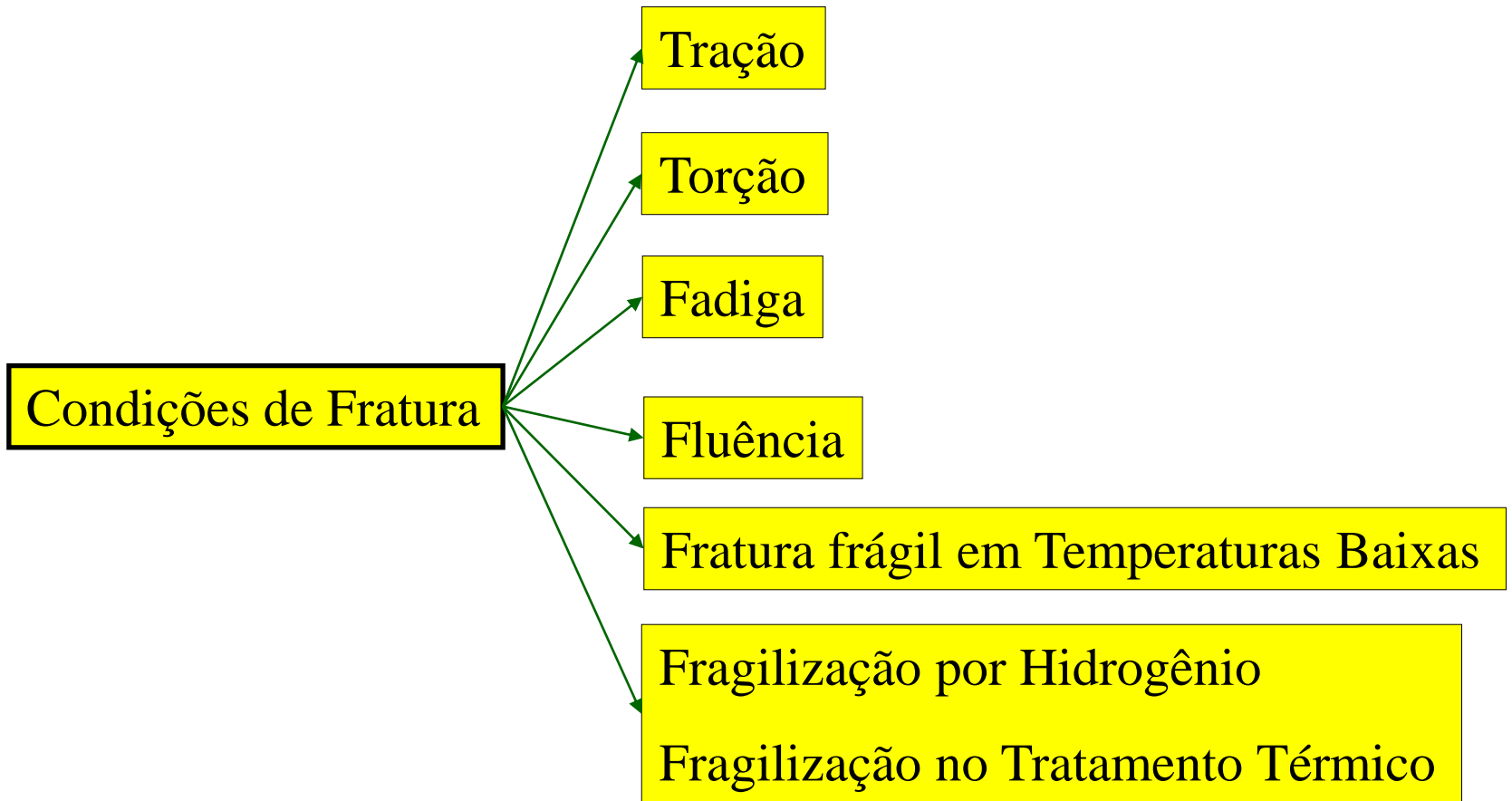


**NUCLEAÇÃO DE TRINCA EM LOOP DE  
DISCORDÂNCIAS (MET)**

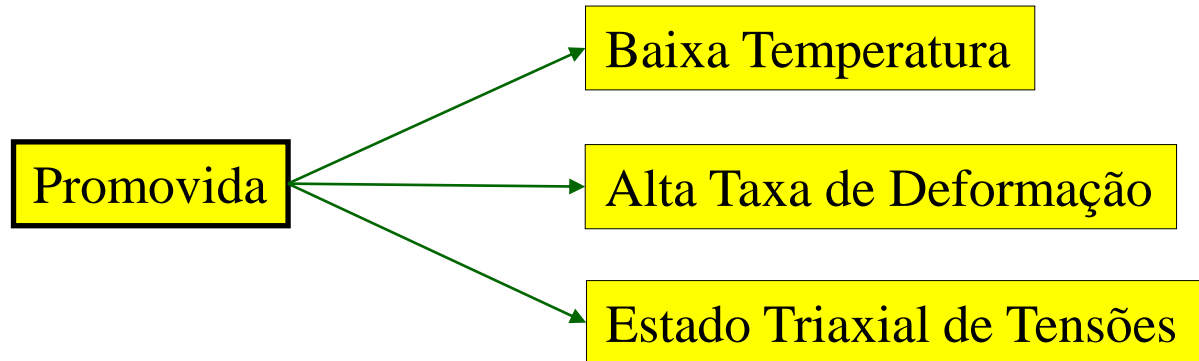
# Fratura

“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 Frágil : Aspecto Macrográfico

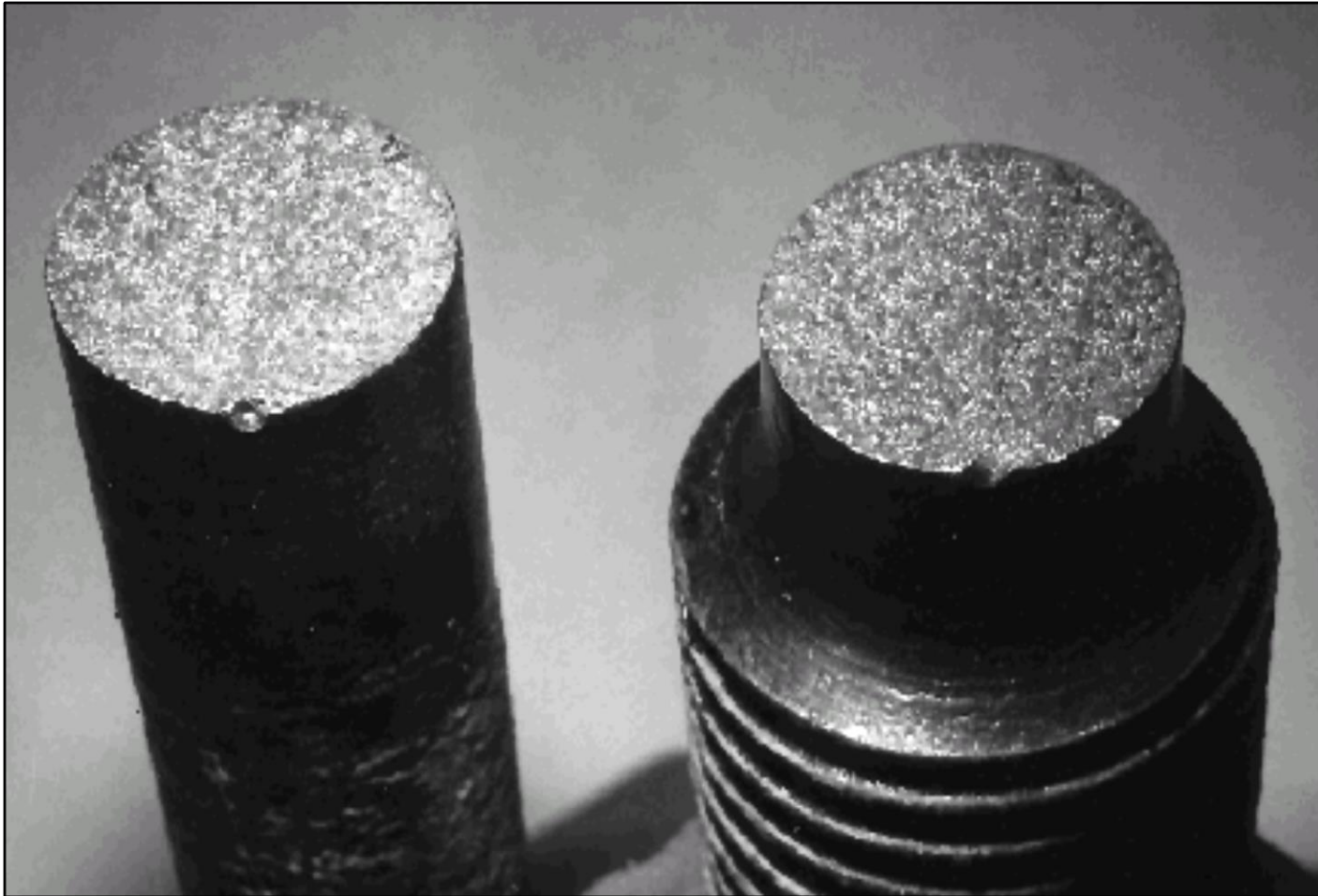


### Fratura frágil

- É caracterizada por uma ou mais trincas diretas na estrutura.
- Pouca ou nenhuma deformação.
- A trinca se propaga pelo caminho de menor resistência.
- Observada em monocristais e materiais policristalinos.
- A fratura frágil tem aparência brilhante enquanto a fratura dúctil tem aspecto escuro e acinzentado.
- Probabilidade é maior com a diminuição da temperatura, taxa de deformação e estado triaxial tensões



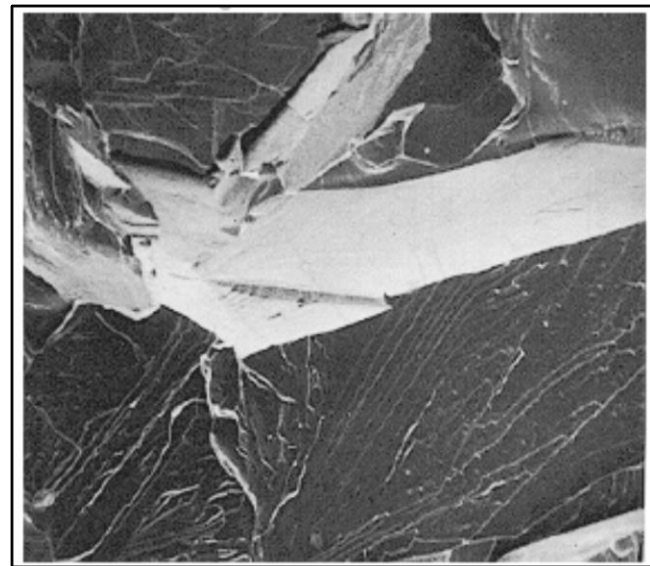
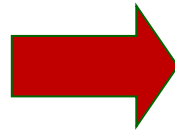
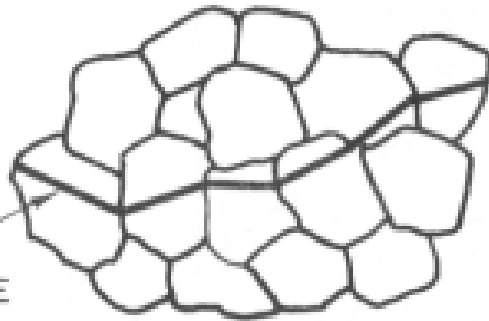
## Fratura frágil em tração- aspecto macrográfico



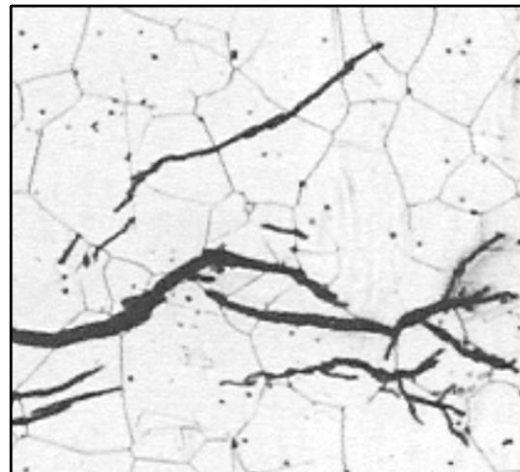
## Fratura Frágil: Possível Aspecto Micrográfico

- A clivagem ocorre na direção cristalográficas dos planos;
- Observada em metais com estrutura CCC e HC mas não em metais CFC;
- As faces de clivagem aparecem grãos com alta reflexividade, que dão um aspecto de fratura brilhante.

### Transgranular

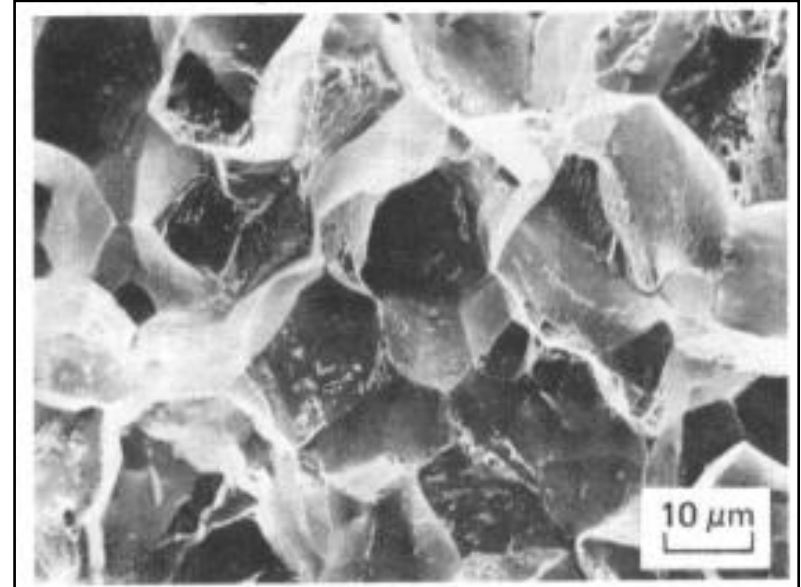
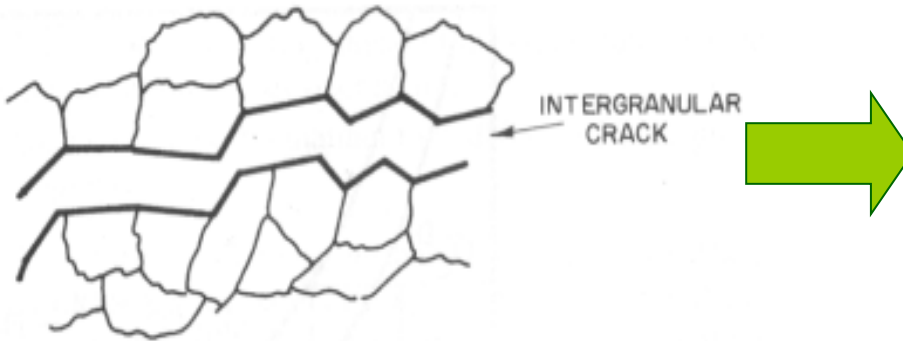


**Fratura por Quase- Clivagem  
Microscópio Eletrônico de  
Varredura (MEV)**

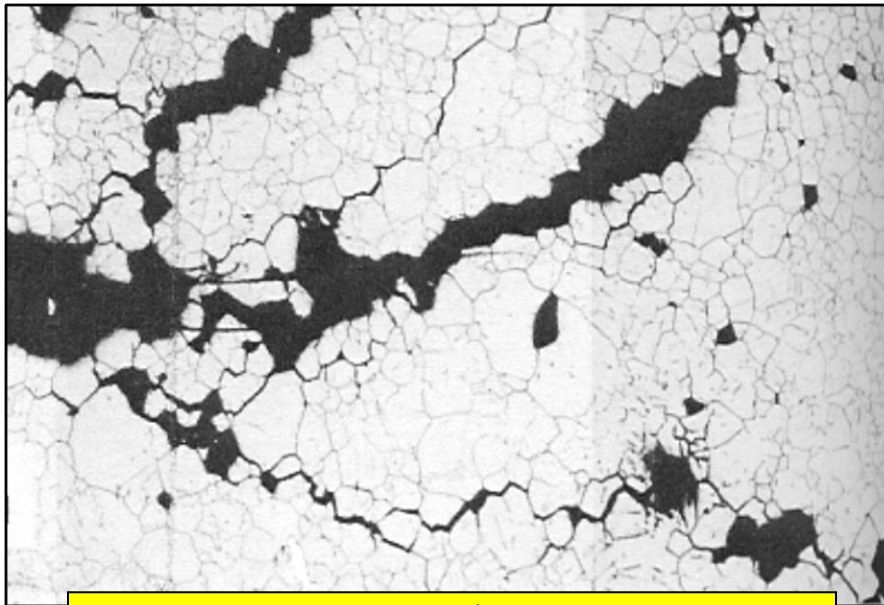


**Microscópio Óptico (MO)**

**Fratura Intergranular é um mecanismo de fratura de baixa energia, como a clivagem ou quase-clivagem**



**Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)**



**Microscópio Óptico (MO)**

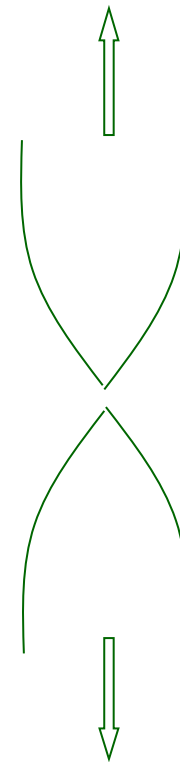
# Fratura dúctil em tração: aspecto macrográfico

**Fratura completamente dúctil em policristais →  
ruptura de metais muito dúcteis como ouro e chumbo**



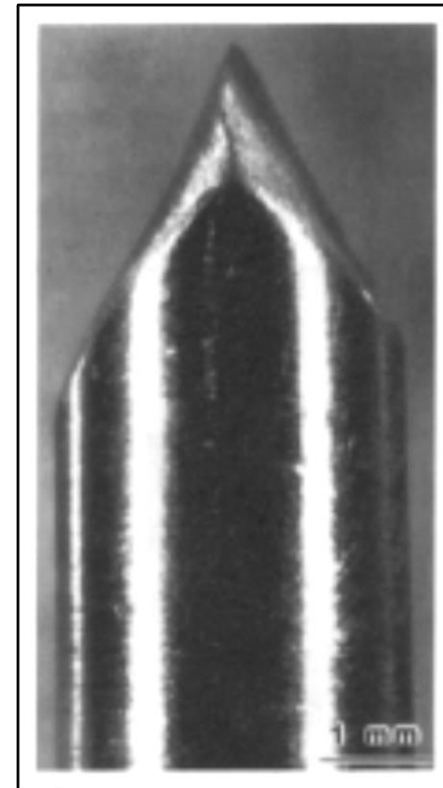
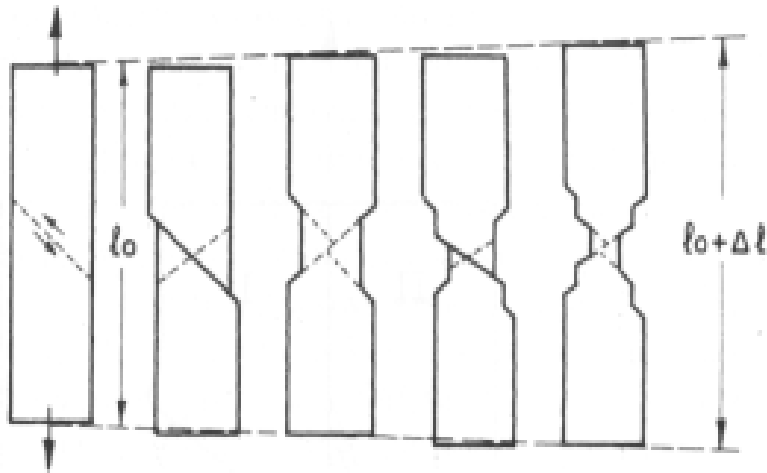
**Plano de escorregamento**

**Fratura cisalhante de monocristal dútil.  
Não observada em policristais.**

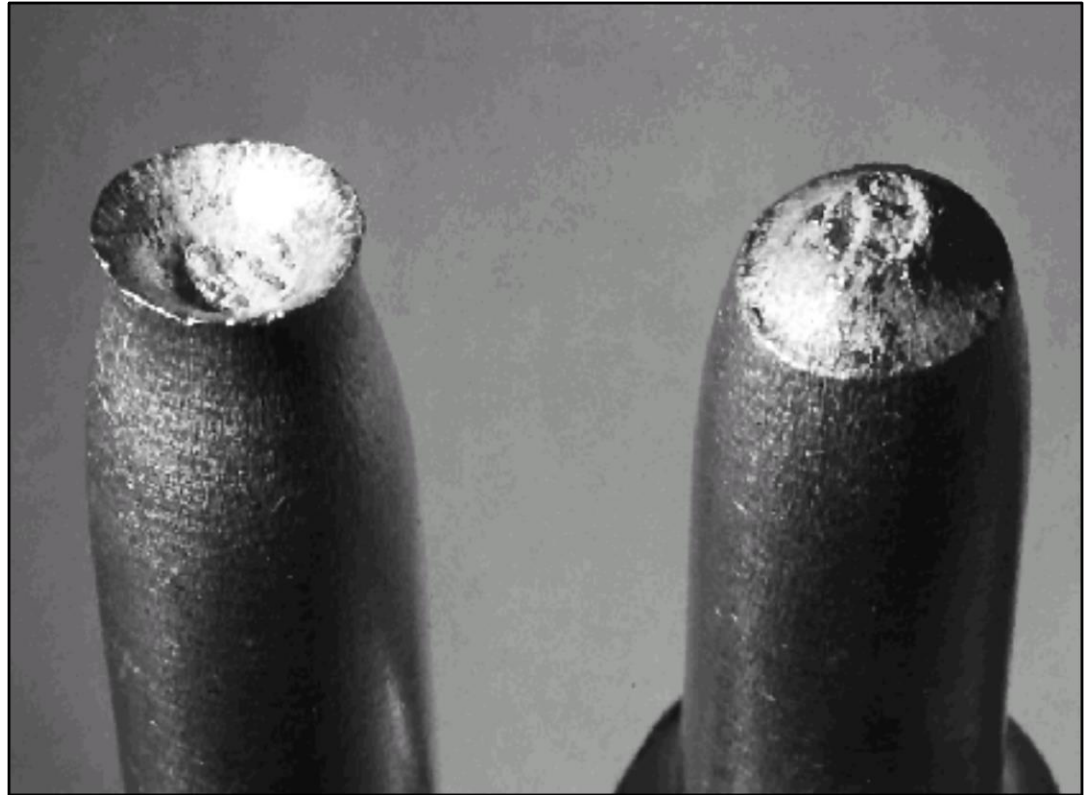
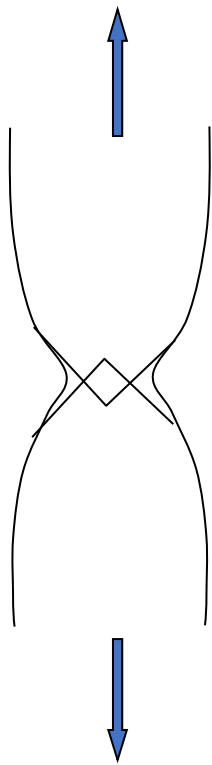


Considerando um monocristal de cobre, um metal dúctil, não há nucleação de trincas, e os cristais deformam plasticamente até iniciar a instabilidade plástica, chamada de empescoçamento.

A deformação é concentrada na região de instabilidade plástica até a separação cristalina ao longo de uma linha ou um ponto.



Cisalhamento de um “metal puro” – Ex.: Cobre



## **Fratura Dútil em metais policristalinos**

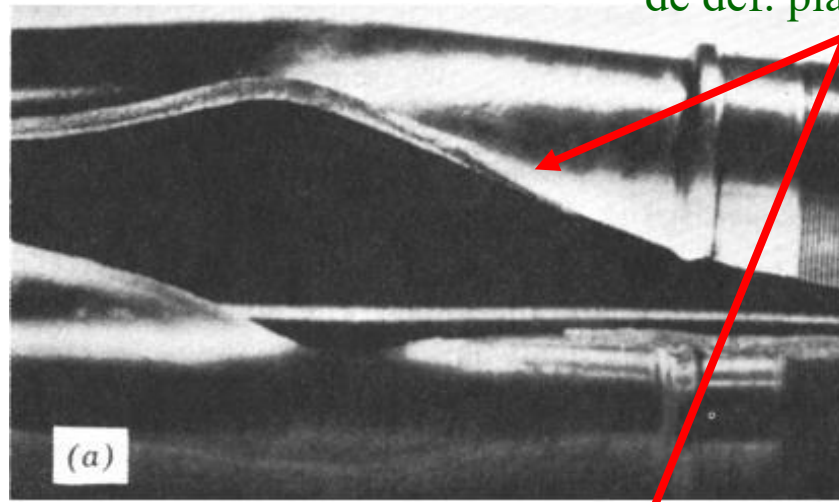
**Fratura Taça-Cone:** O empescoçamento leva a um **estado triaxial de tensões** e a trinca nucleia em partículas frágeis (formação de vazios na **interface matriz - partícula**). Aspecto escuro e acinzentado



## Exemplo: Falha em um tubo

- **Falha Dútil:**

- um pedaço
- grande deformações



Observe a quantidade de def. plástica.

- **Falha Frágil:**

- vários pedaços
- pouca deformação

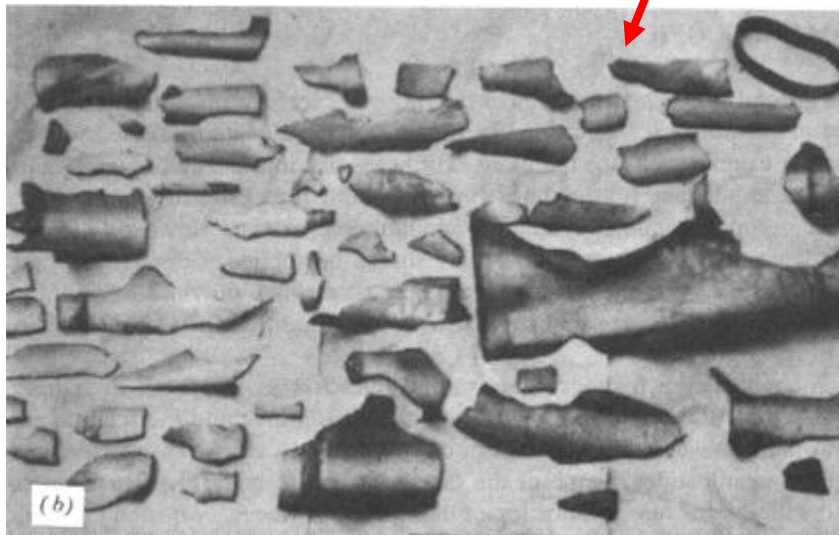


Figura de V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Fig. 4.1(a) and (b), p. 66.

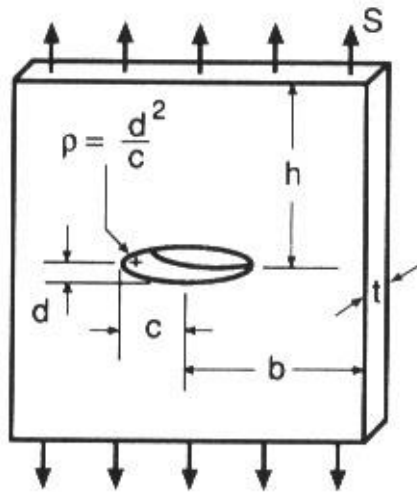
# HISTÓRICO DA MECÂNICA DE FRATURA

- *1913- Inglis desenvolve o modelo de tensões para um furo circular (rebites) e percebe que se o fizer elíptico- similar a trinca;*
- *1920- Griffith – Teoria da fratura para vidros:  
"uma trinca se propagará quando a diminuição da energia de deformação elástica é pelo menos igual à energia requerida para criar a nova superfície da trinca".*
- *1945- Orowan aperfeiçoa a teoria introduzindo uma componente plástica;*
- *1956-1957- Irwin propõe uma taxa crítica (G) de variação da energia potencial por unidade de área da trinca ( $dA = da \cdot t$ ), ou seja a força motriz;*
- *Surge o conceito “tenacidade à fratura” para designar diferentes parâmetros que mostram como a presença de uma trinca afeta a resistência mecânica de um material.*

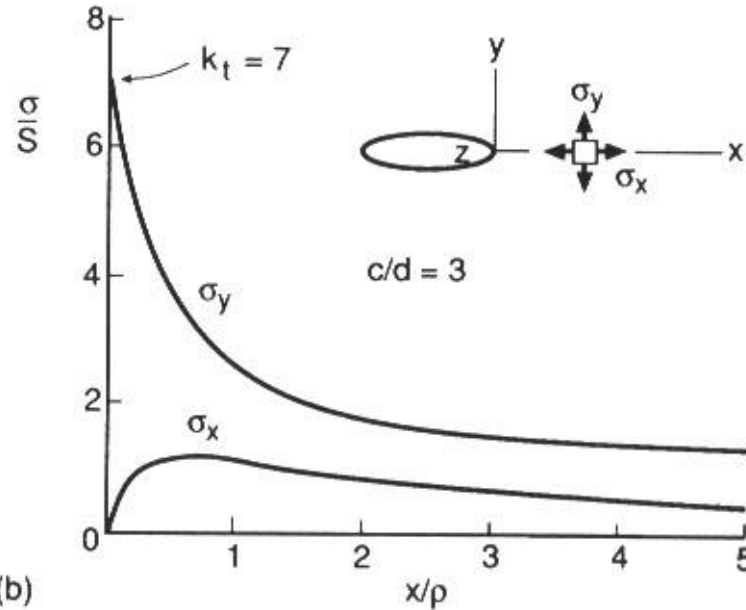
- **Antes do desenvolvimento da Mecânica da Fratura nos anos de 1950 – 1960, a análise de trincas em componentes ou estruturas não era possível;**
- **O projeto era baseado em resultados de ensaios de tração, flexão e compressão, conjuntamente com os critérios apresentados para corpos sem trincas (Mecânica dos sólidos);**
- **A evolução da Mecânica de fratura é a Mecânica de Integridade Estrutural.**

# Concentrador de Tensões - Trinca

- Considere o furo muito menor que a largura da placa
- O efeito do furo é muito relevante para a direção  $y$ .



(a)



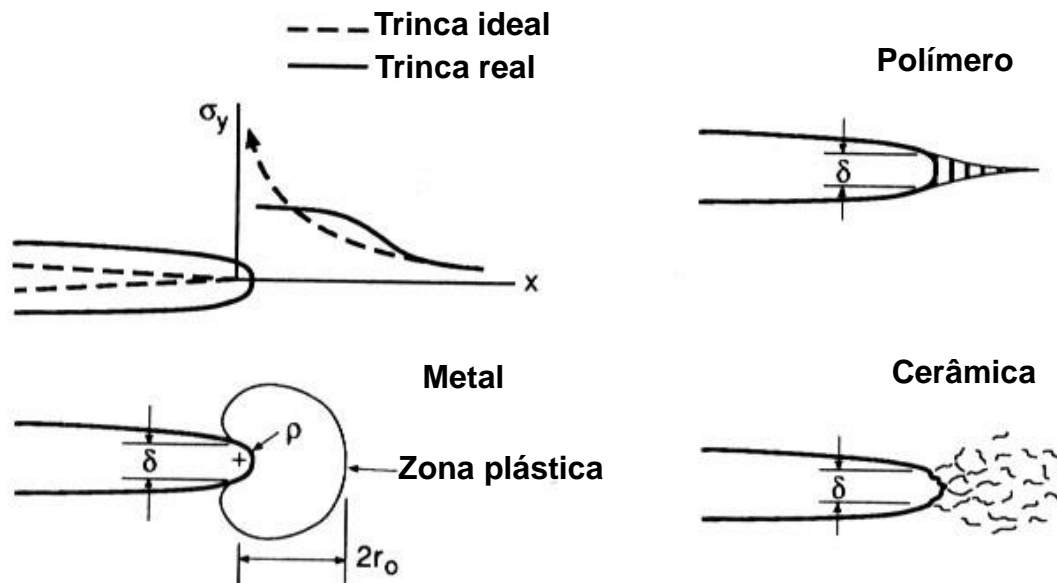
(b)

$$\sigma_y = S \left[ 1 + 2 \frac{c}{d} \right] = S \left[ 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \right]$$

$$k_t = \frac{\sigma_y}{S} = 1 + 2 \frac{c}{d} = 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}}$$

Quando  $d$  tende a zero (trinca),  $\sigma_y$  vai para o infinito, e assim  $K_t$ . Assim, uma trinca aguda causa um severa **concentração de tensão**, e a tensão seria **teoricamente infinita**.

- As **tensões** em materiais verdadeiros **não** podem ir para o **infinito**.
- O **fator limitante** é o **limite de escoamento**: formação da **zona plástica** na ponta da trinca.



Materiais **metálicos** fraturam a partir da **zona plástica**, materiais **poliméricos** por “**crazing**” (fratura das fibras) e **cerâmicos**, por **microtrincamento**.

**FIM**