

SMM0174- 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:

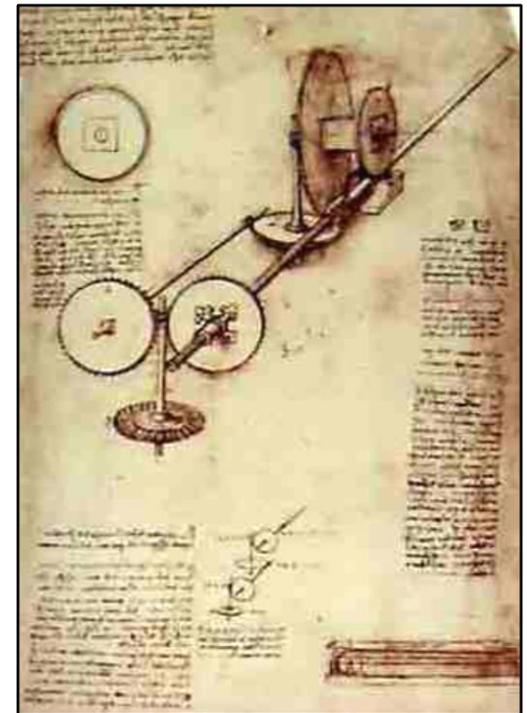
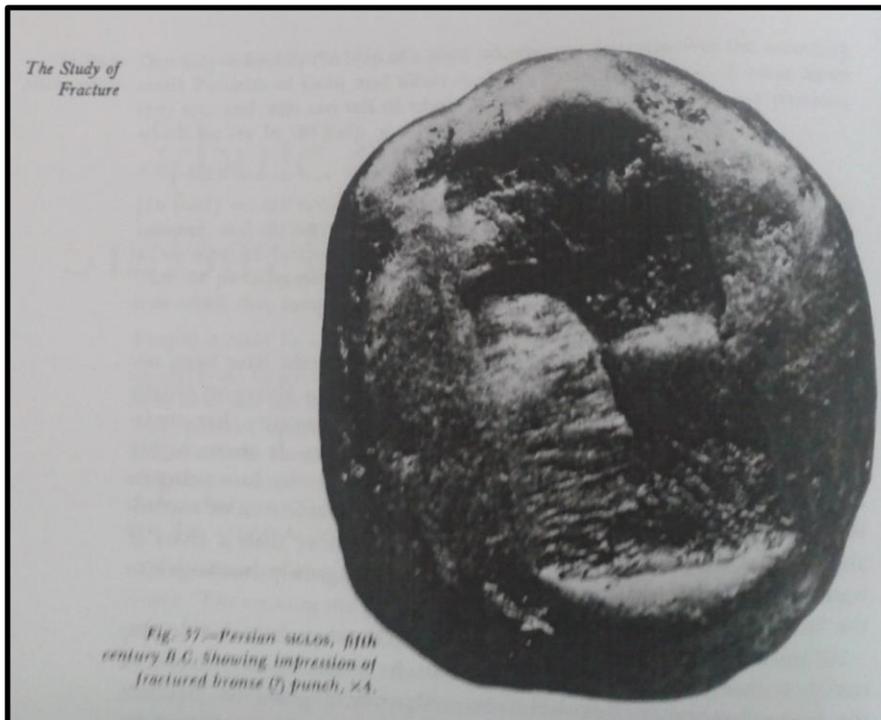
- **Videoaulas** gravadas;
- **Slides** da aula em pdf;
- Alguns **textos explicativos**;
- **Vídeos**;
- **Questionários orientativos** para direcionamento do estudo (**não é necessário enviar** o questionário respondido);
- Alguns **Capítulos de livros**;
- **Dúvidas** por e-mail para:
 - José Benedito **Marcomini**, professor, (**jmarcomini@usp.br**).

INTRODUÇÃO:

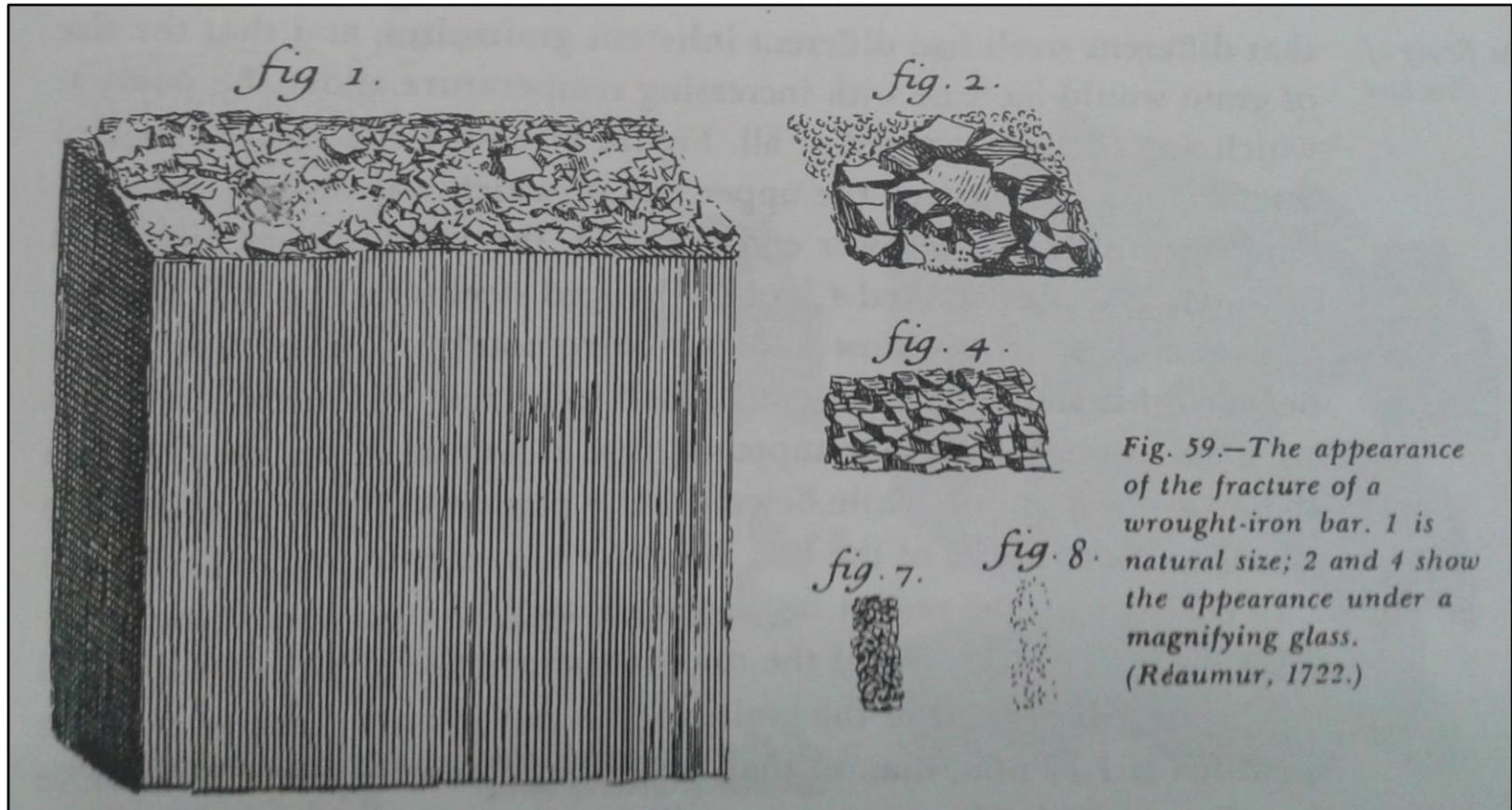
**FRATURA EM CORPOS COM
DESCONTINUIDADE E
PEQUENO HISTÓRICO DA MECÂNICA DA
FRATURA**

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).

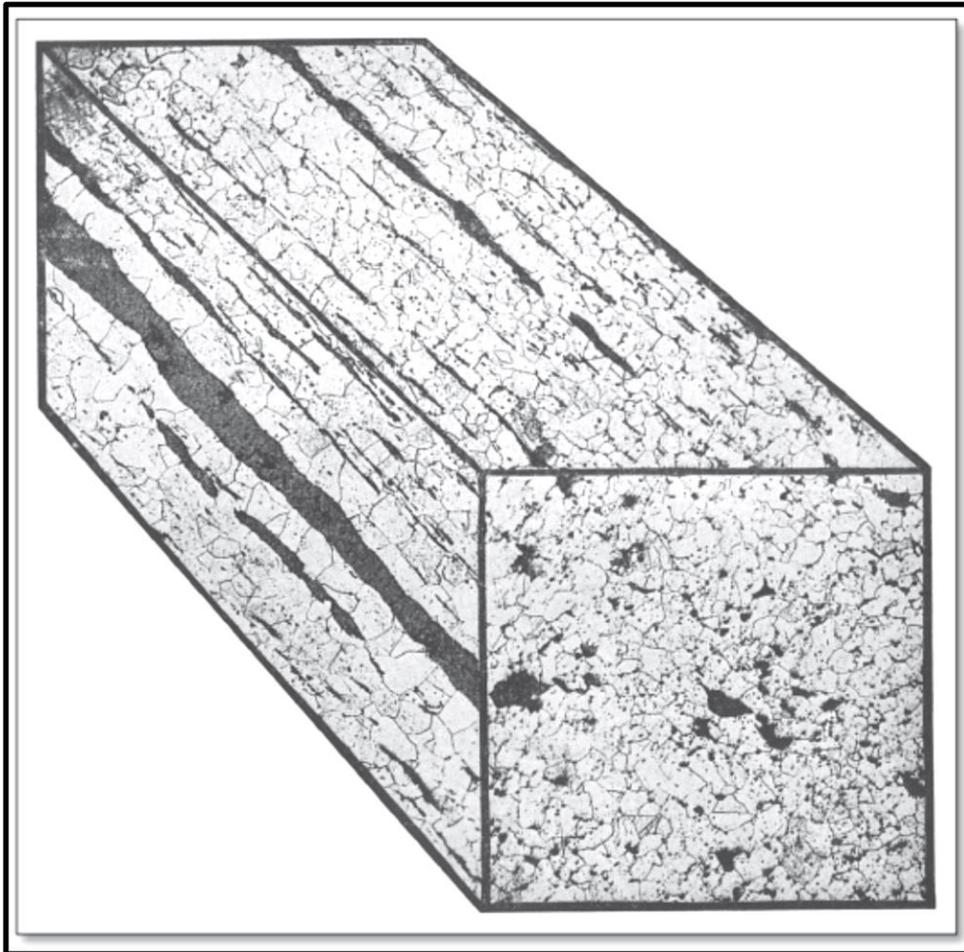


Figura 2.5

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

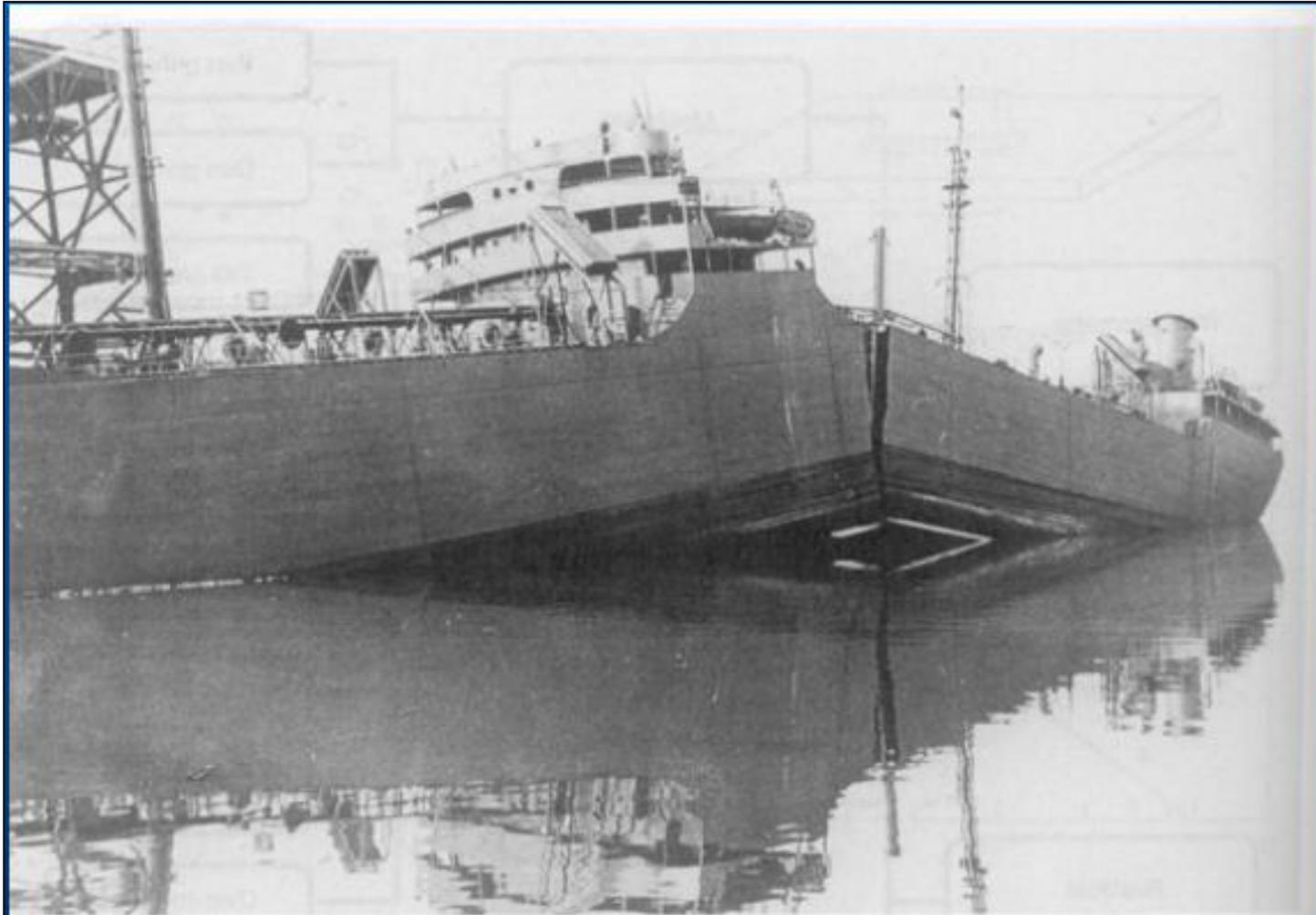
Desenvolvimento dos ensaio de ultrassom

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

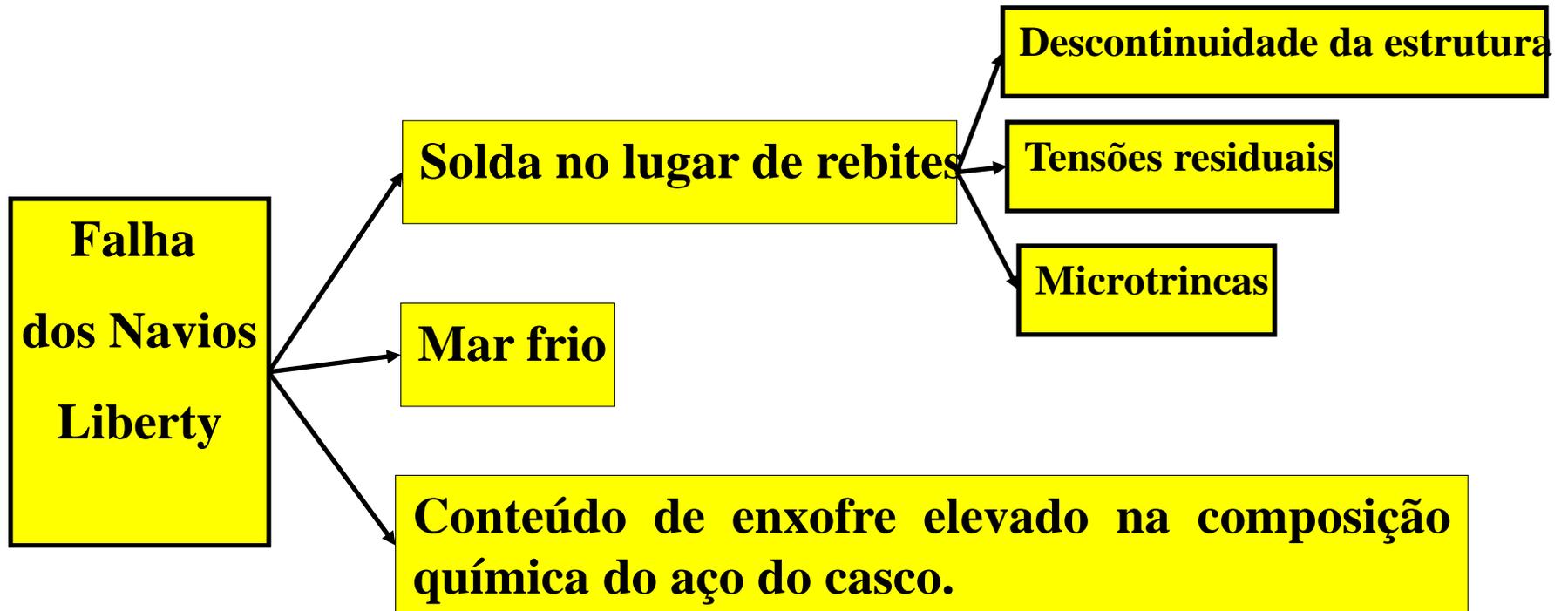
90 Navios com Falhas Severas

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

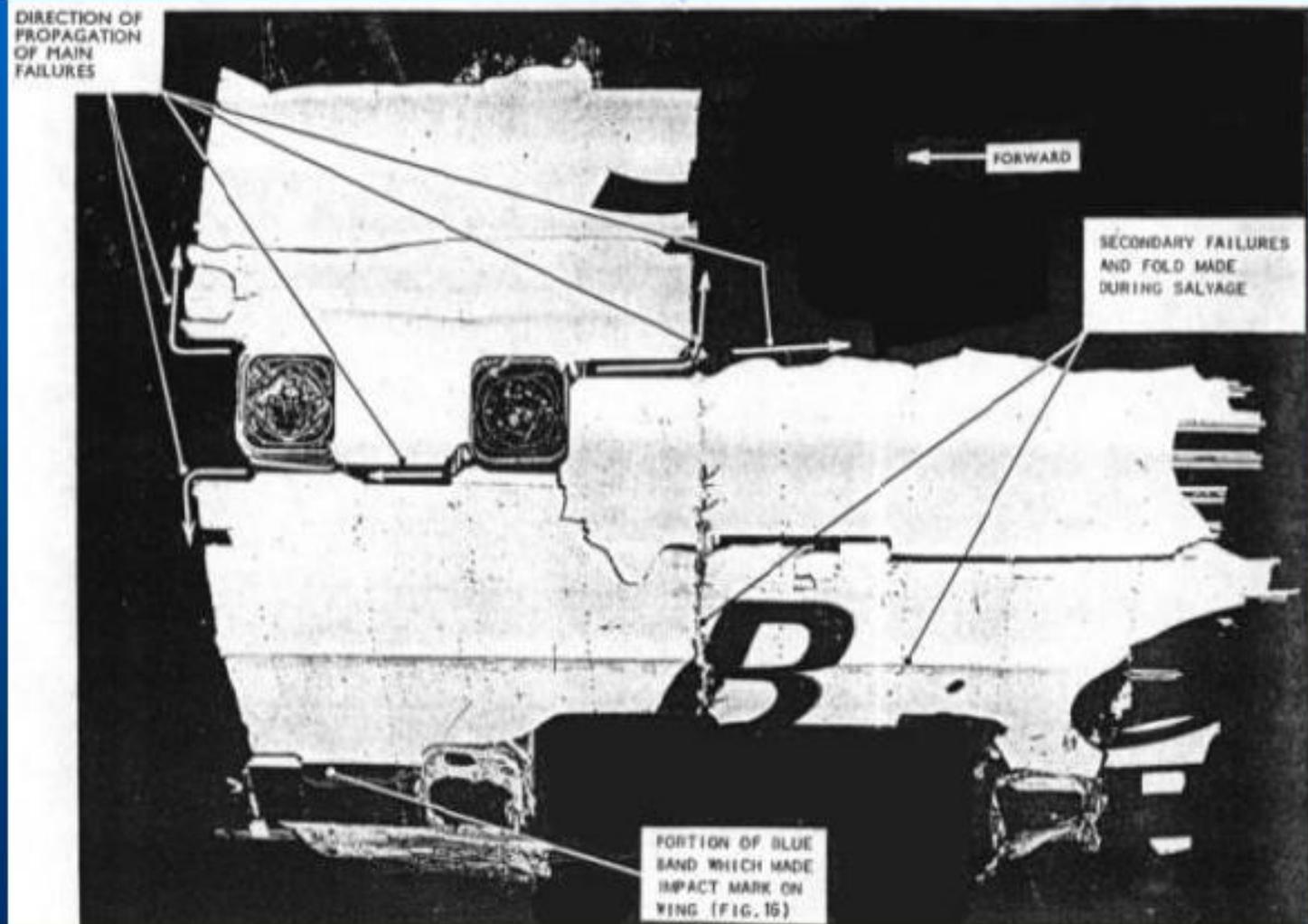
Aviões COMET



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)

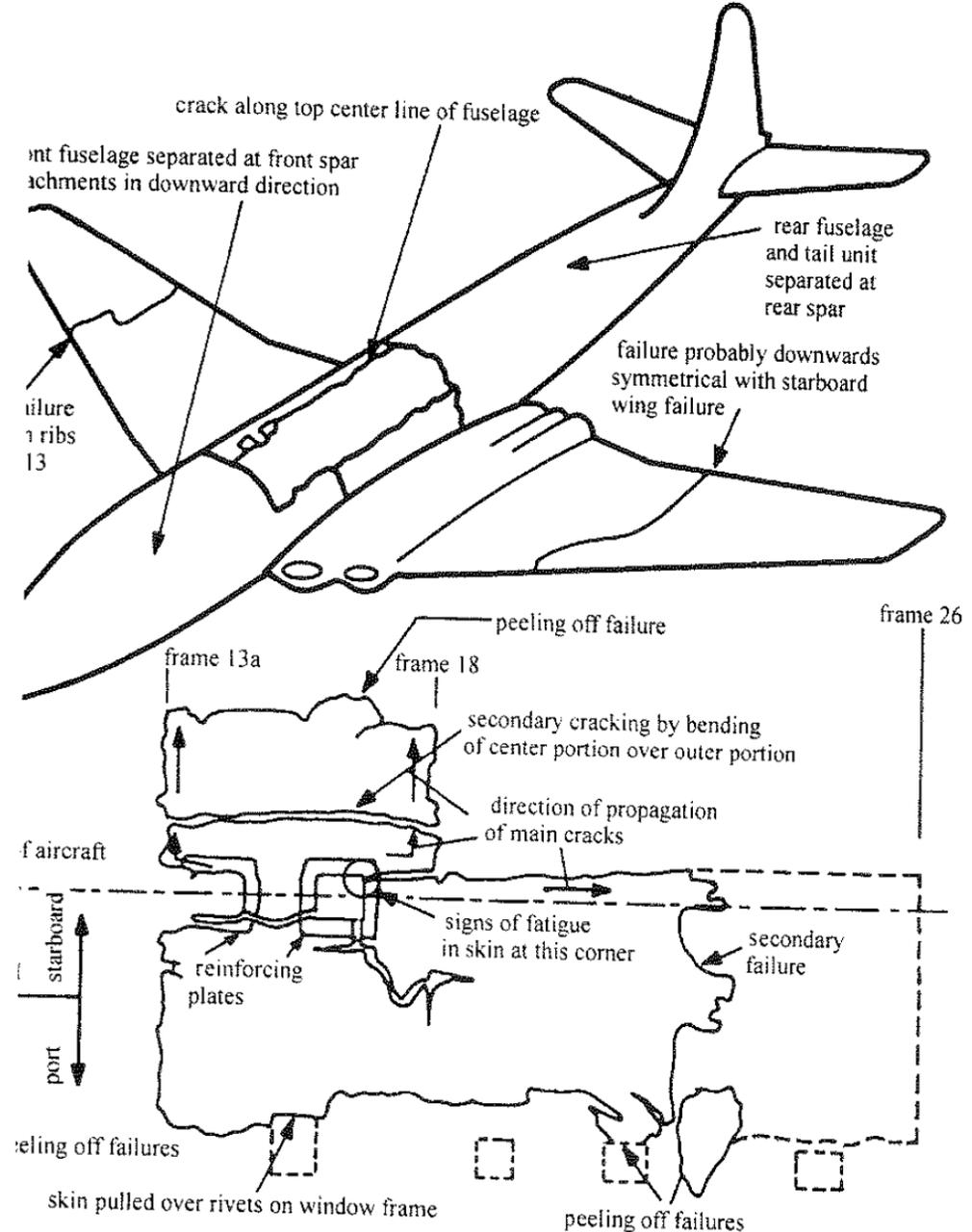
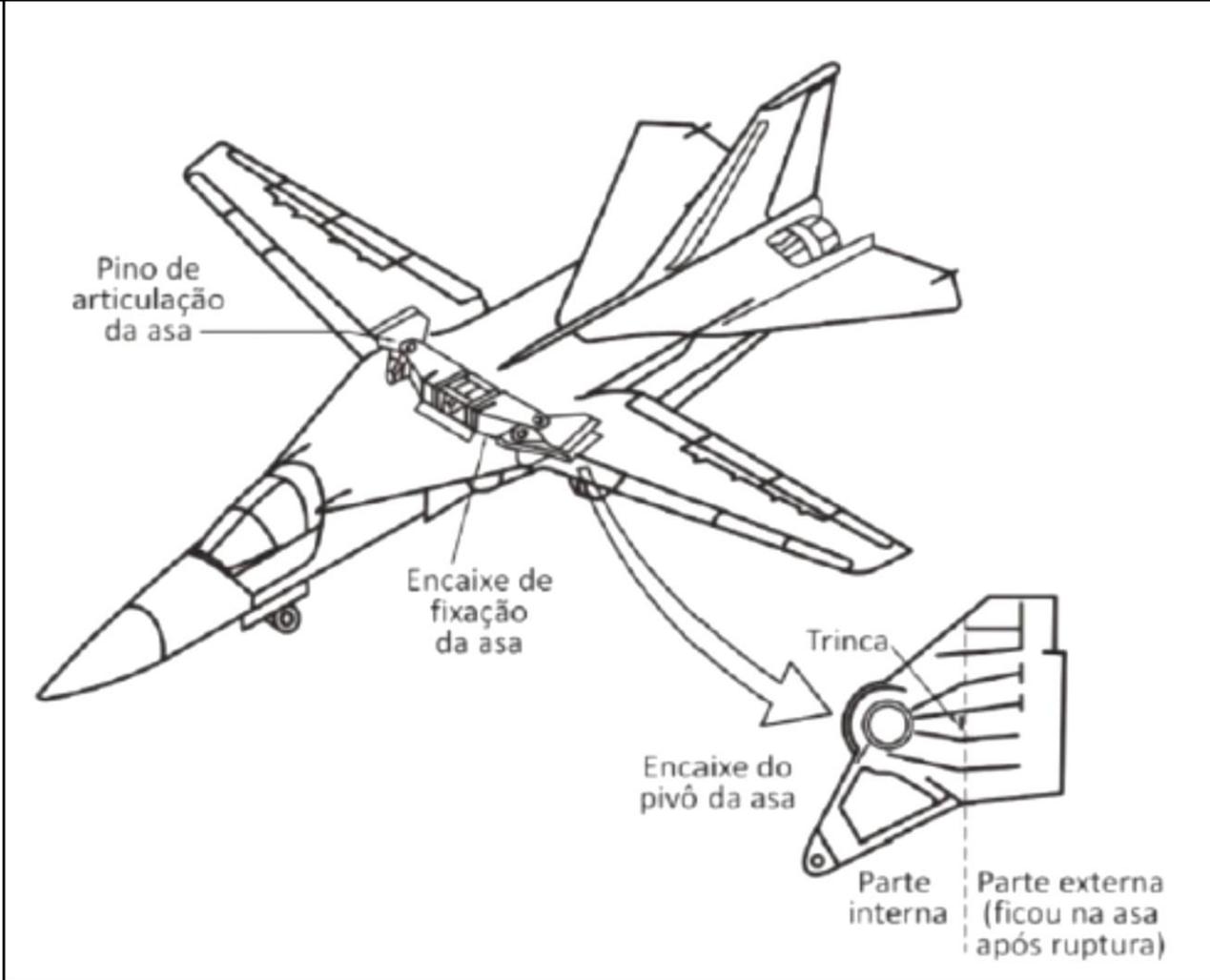


Fig. 1.1. Schematic diagram illustrating the location of fatigue cracks in a failed Comet airplane. (After Petroski, 1996.)

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.**

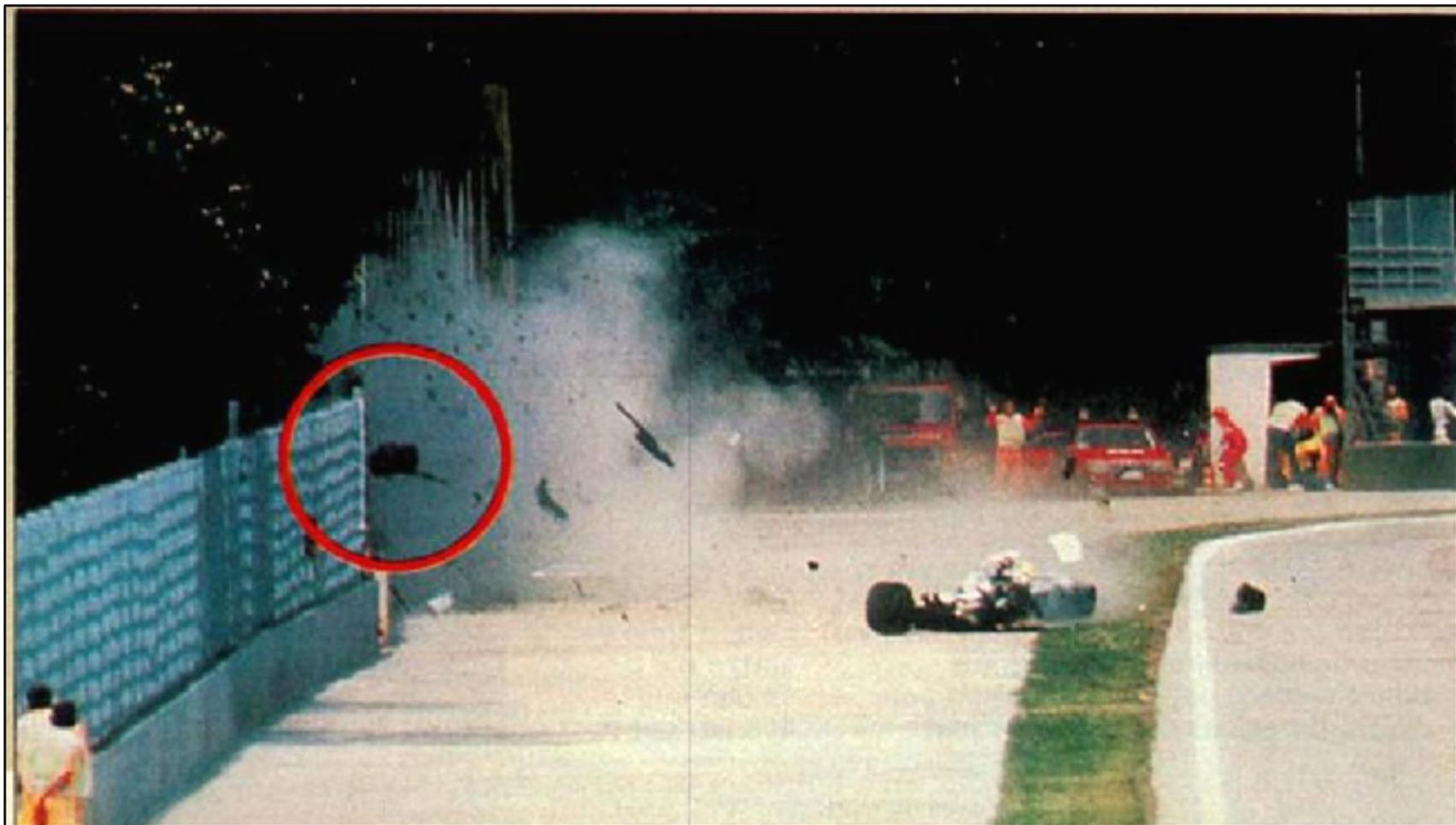






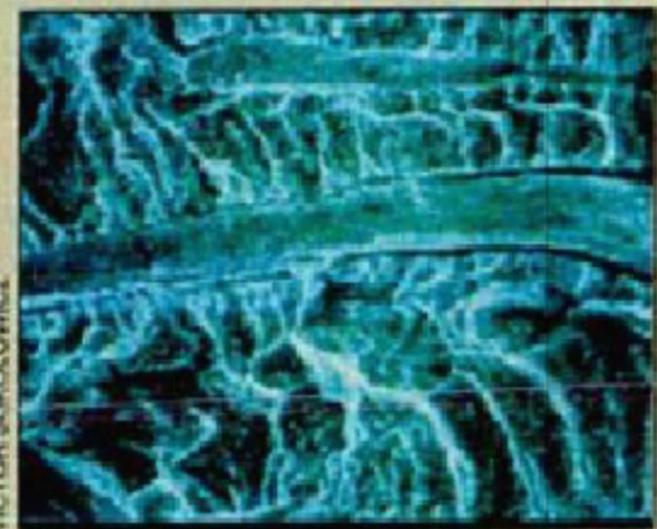
Causa: corrosão-fadiga

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.

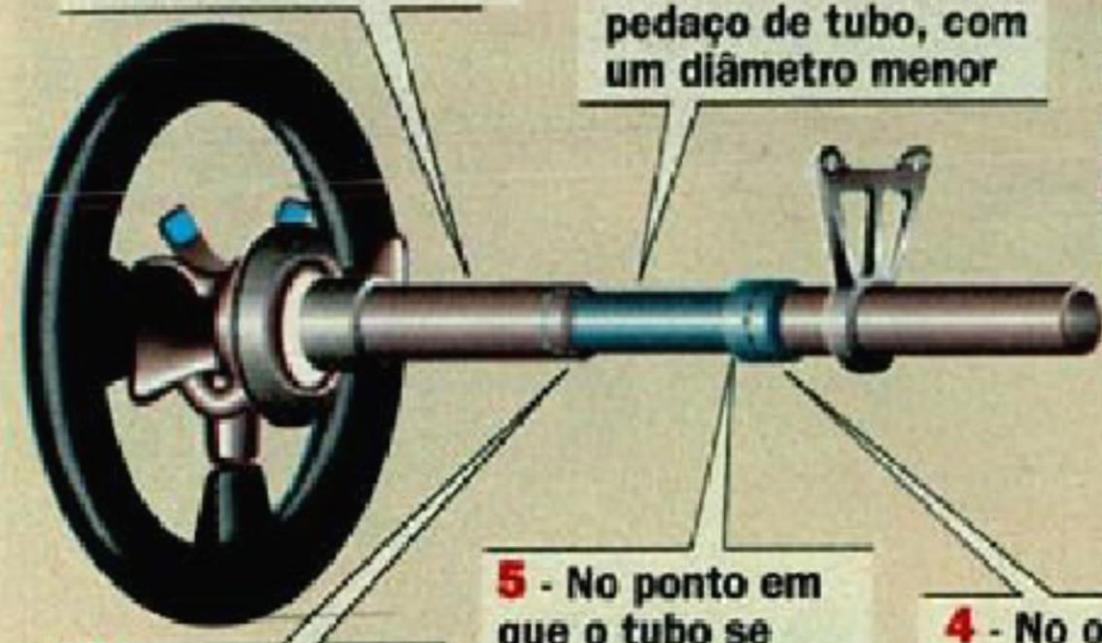


1 - A pedido de Senna, a coluna de direção foi aumentada em cerca de 5 centímetros

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

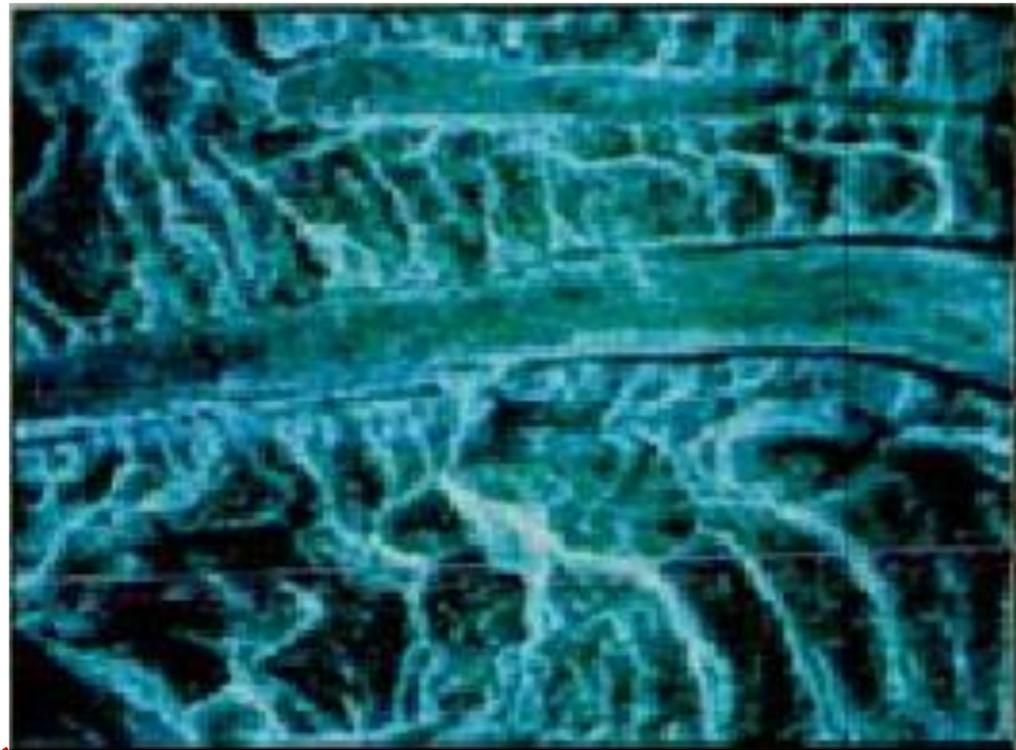
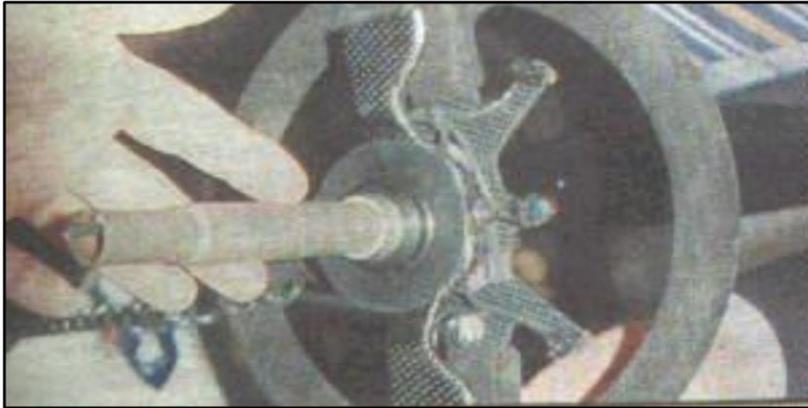


3 - Em um dos lados da emenda o tubo é soldado por dentro da coluna

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

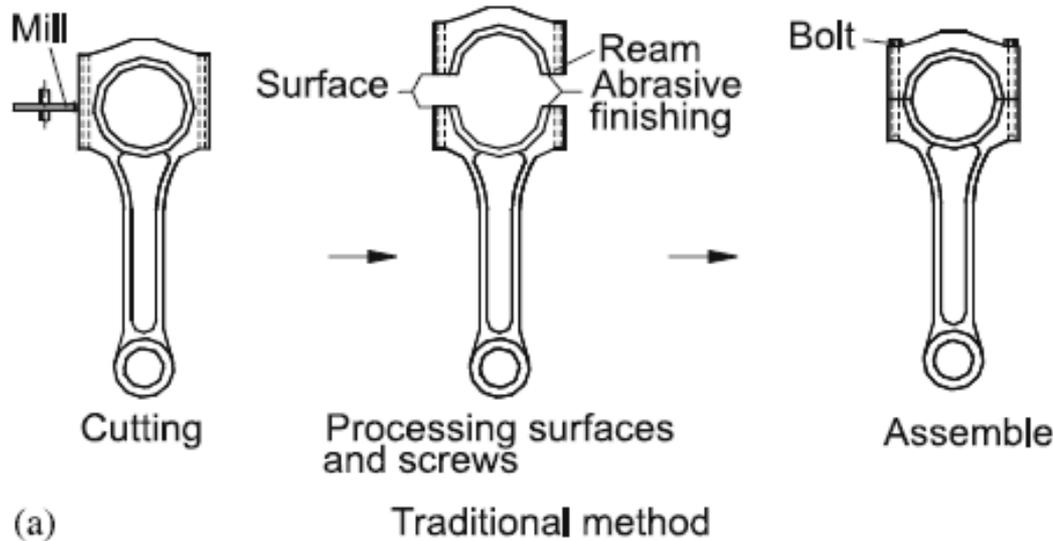
Quando estão em processo de fadiga, os metais apresentam estrias (*foto*) que são diferentes das provocadas em caso de uma ruptura por impacto



**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.**

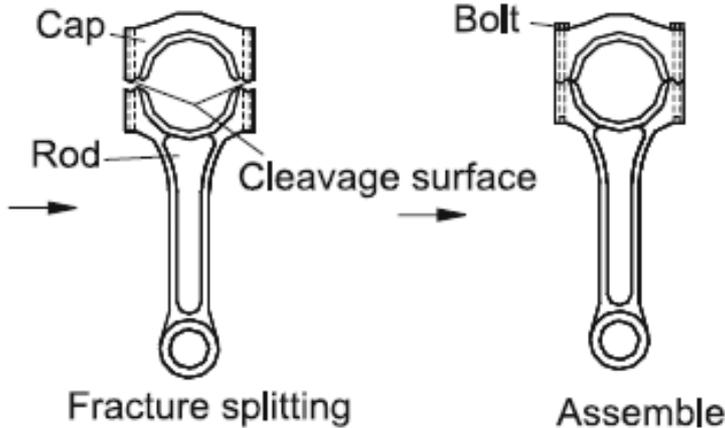
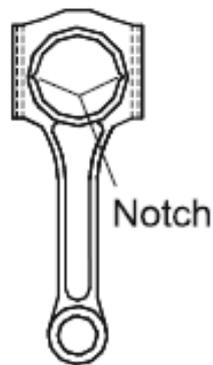
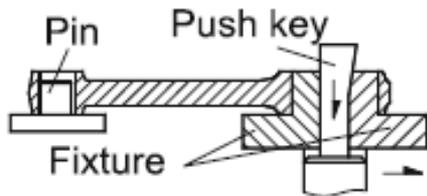
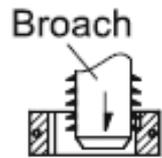
DESVANTAGENS:

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

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



PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE BIELA FRATURADA

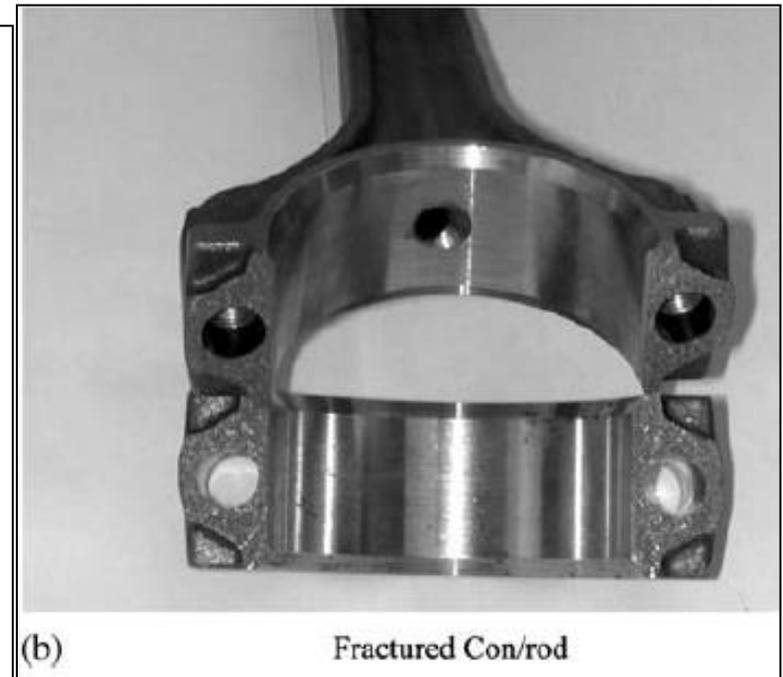


Cutting notch

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**

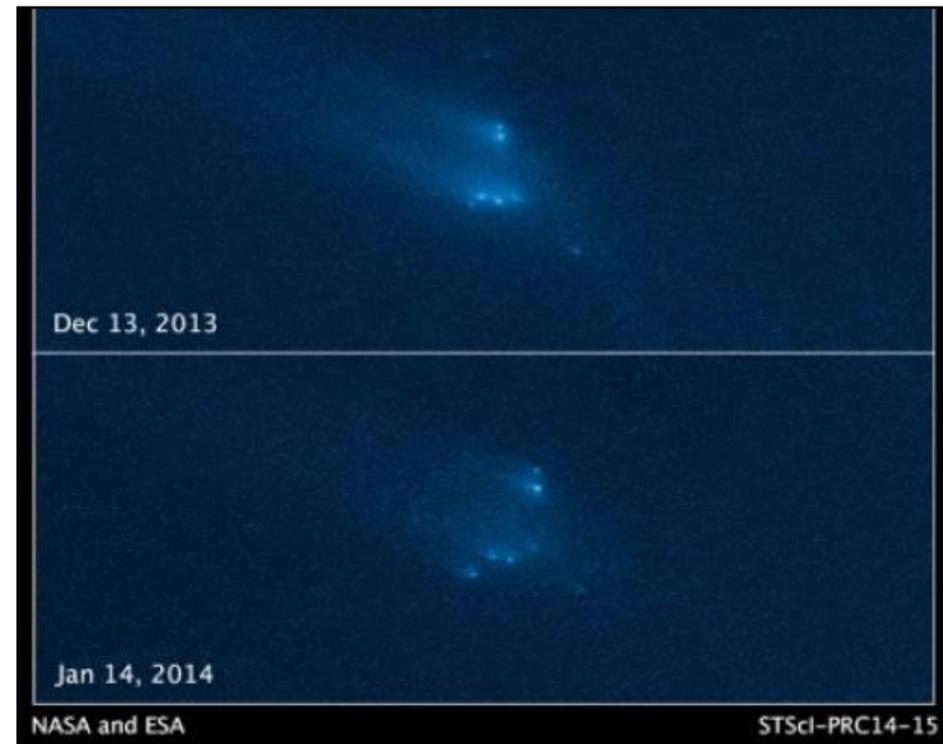
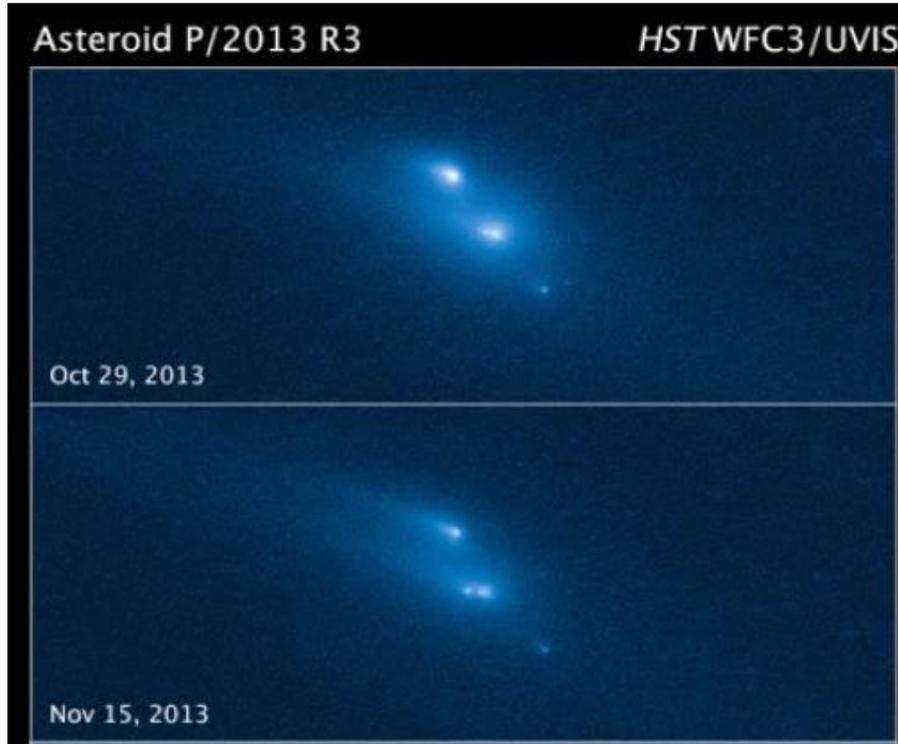
**SISTEMAS
COMPLETOS:
AUTOMÓVEL**

EDIFÍCIOS

**PLANETAS ,
METEORITOS,
COMETAS E
ASTERÓIDES**

Despedaçado pela luz!

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

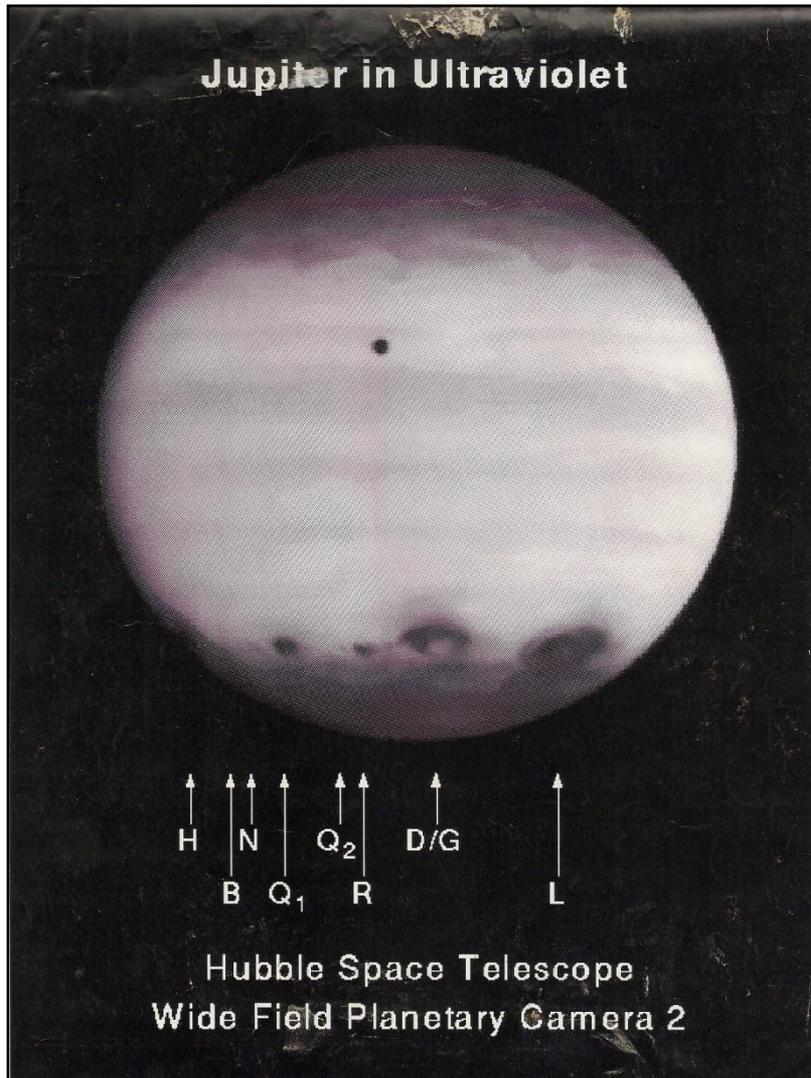


Os 4 maiores fragmentos: 200 m de diâmetro. Velocidade de distanciamento: 2 km/h sugere que rompimento foi lento, iniciando no final de 2013 e terminando no início de 2014. Não foi explosão: a pressão da luz solar foi a causa raiz. A luz carrega momento linear: radiômetro de Crooks.

ANÁLISE DE FALHAS APLICADA À NATUREZA

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

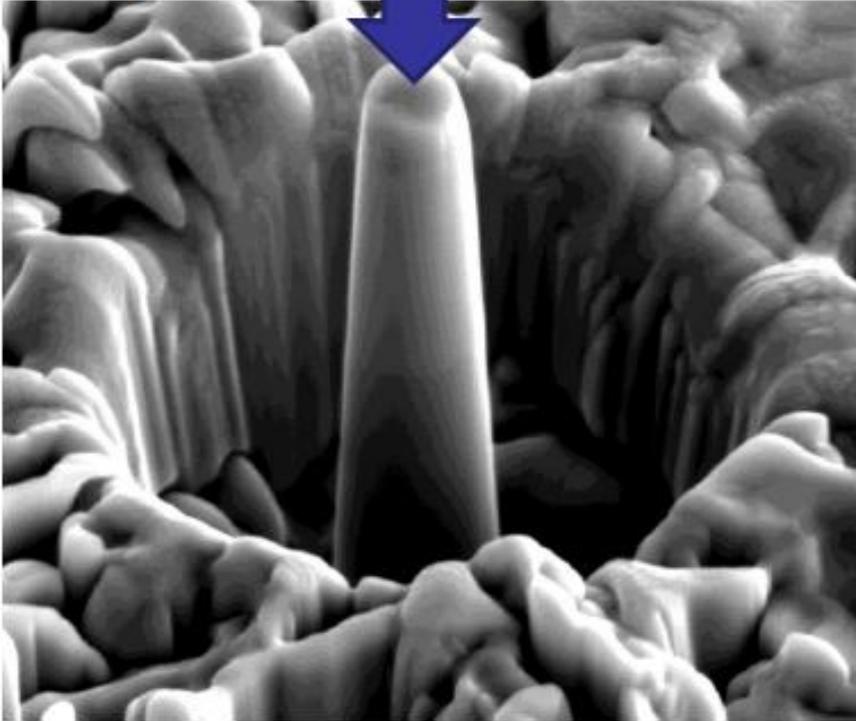
Dual-beam FIB-SEM instrument

Test specimens

Fracture mechanics



Compression **F**

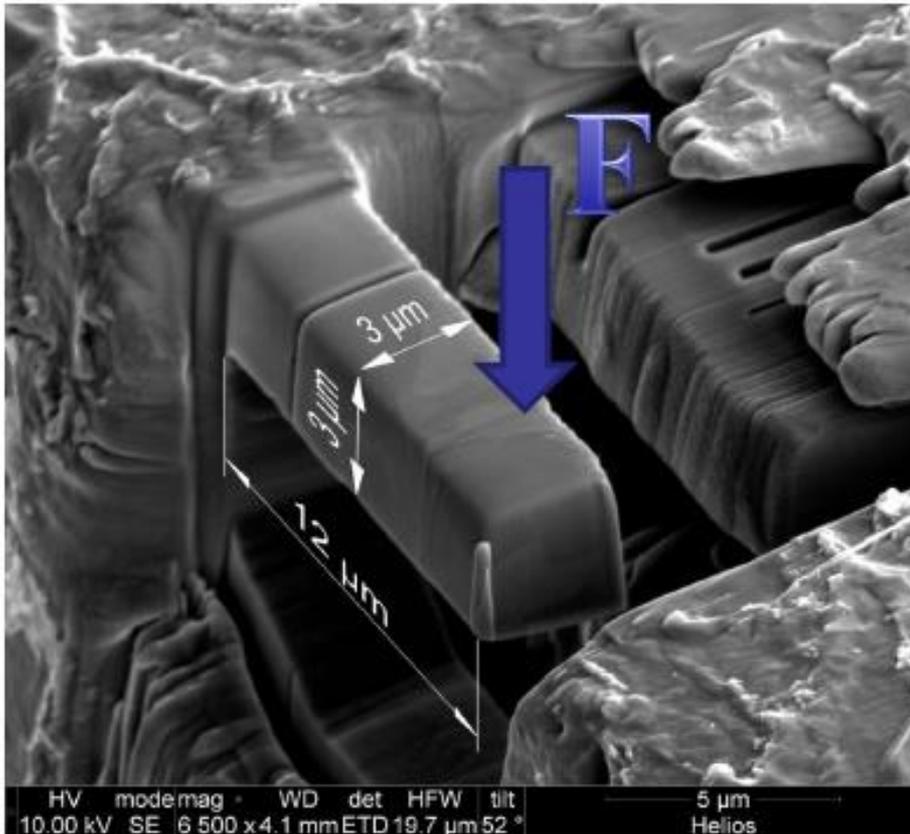


→ Fracture toughness (K_{Ic})

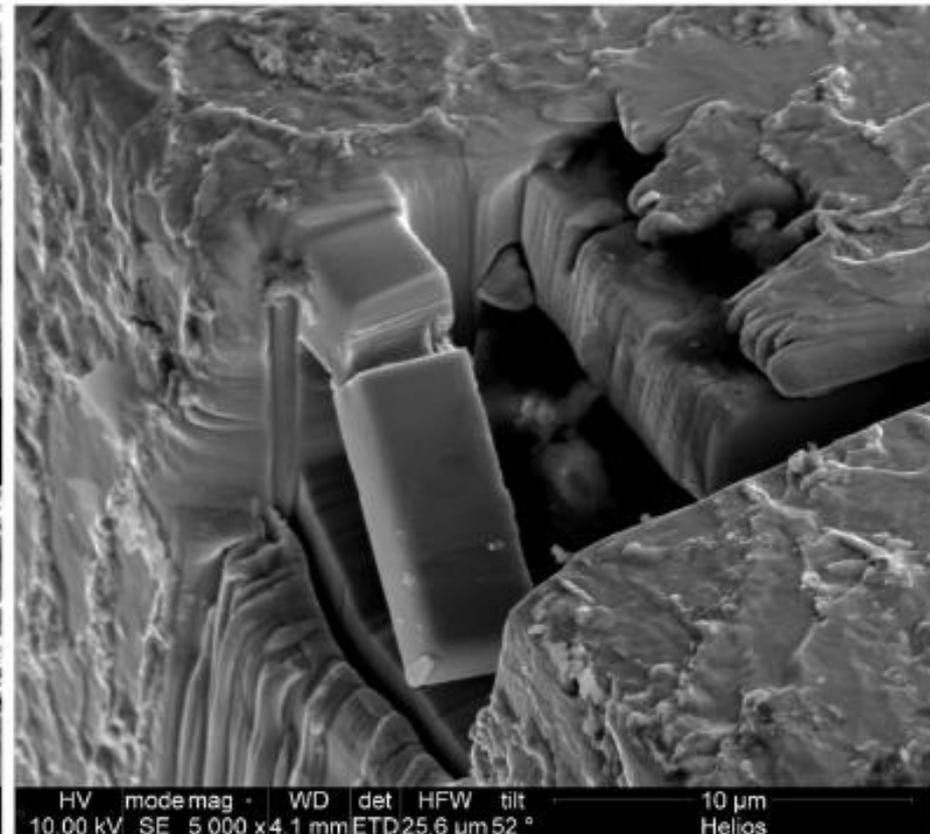
→ Yield stress (σ_y)

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

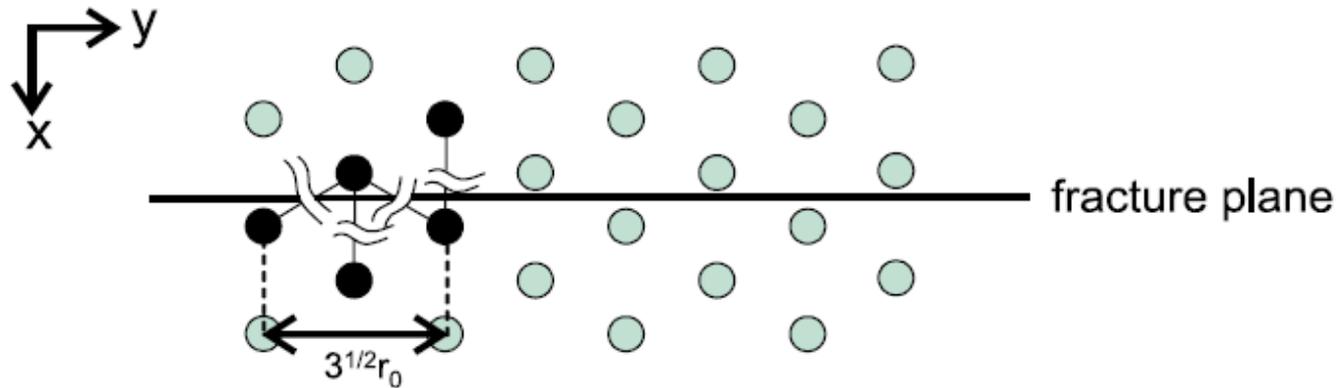
CONFERENCE ON FRACTURE OF THE
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES-
NATIONAL RESEARCH COUNCIL

MODELOS ATOMÍSTICOS

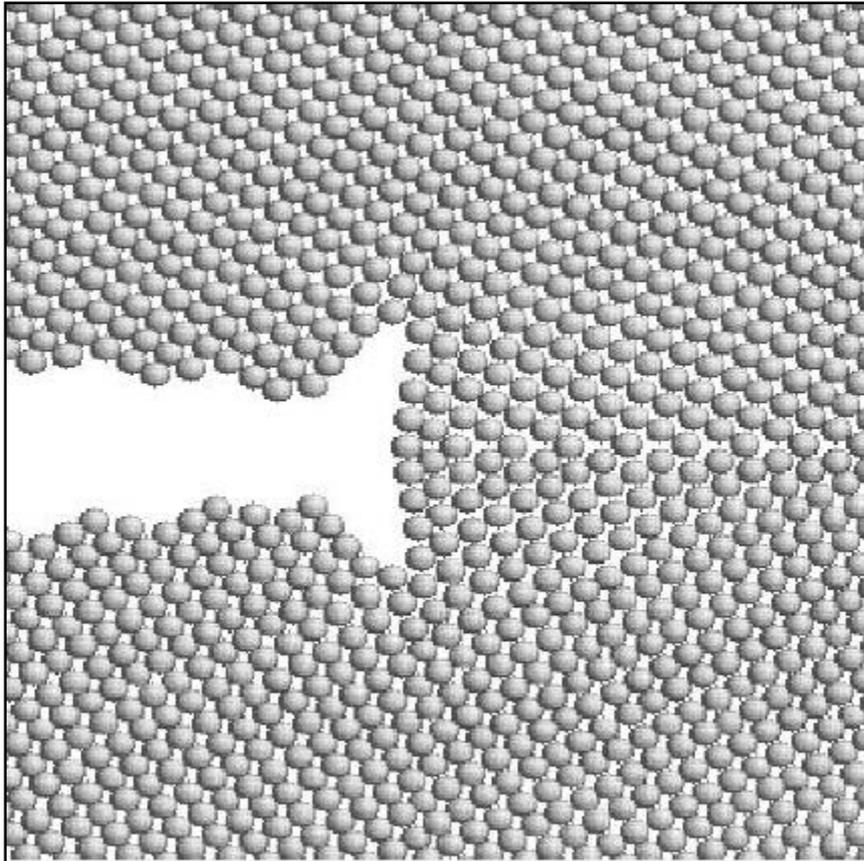
A energia superficial de fratura (γ) relaciona-se com a tensão necessária para a fratura (σ_{\max}), em nível atômico, pela equação

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

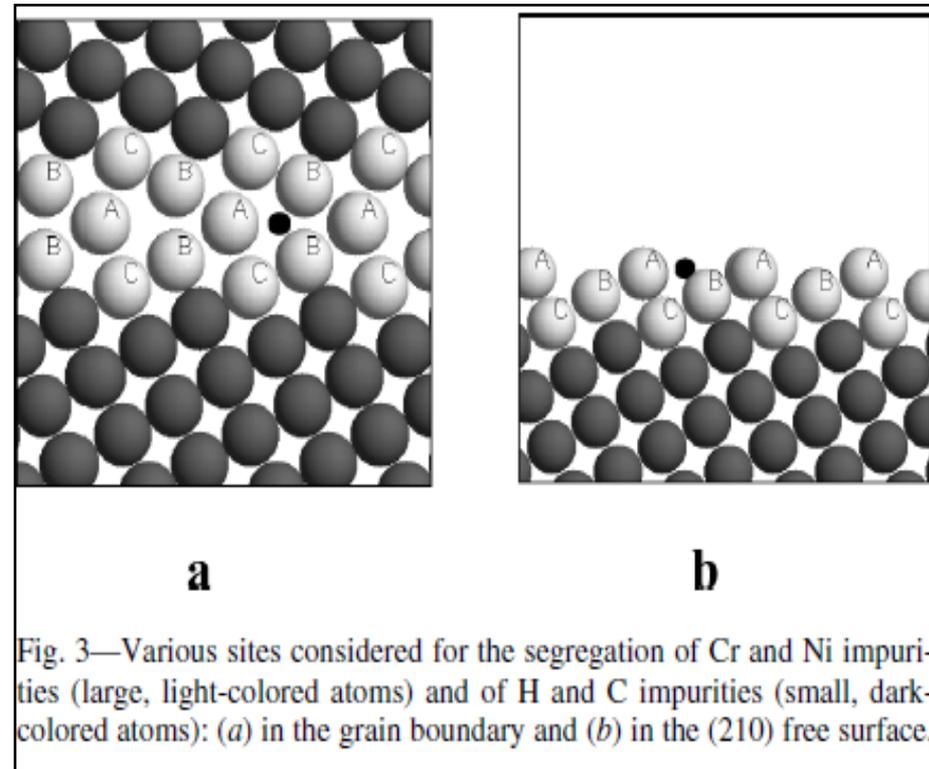
E é o módulo de Young e a é a distância interatômica sem deformação



MODELOS ATOMÍSTICOS

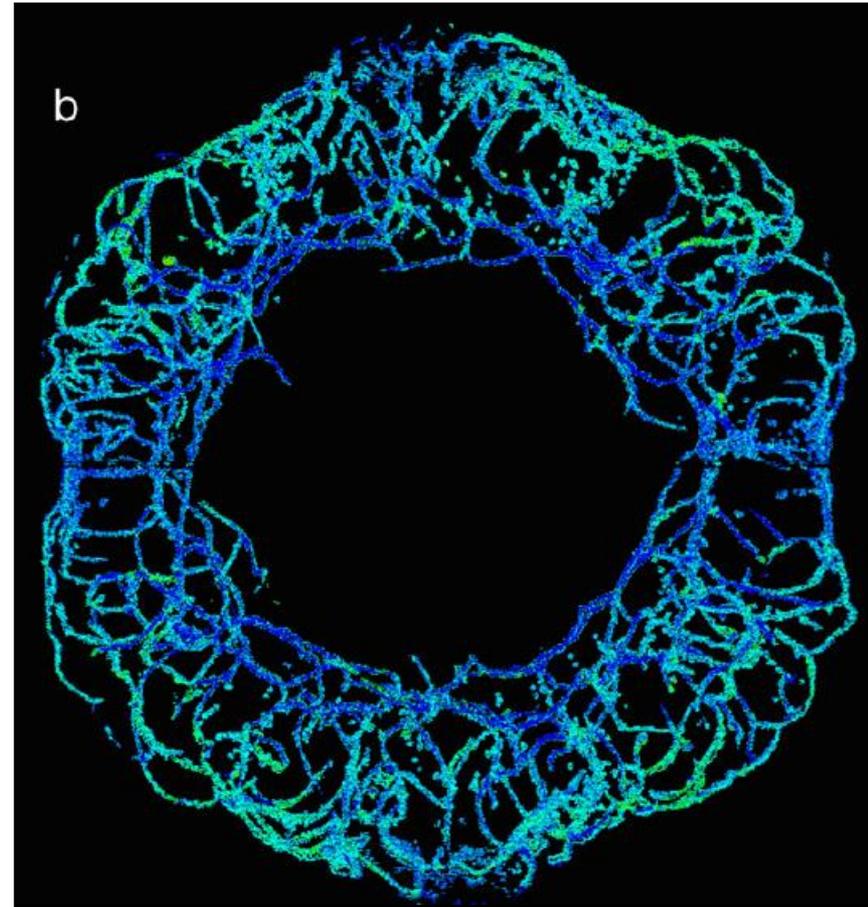
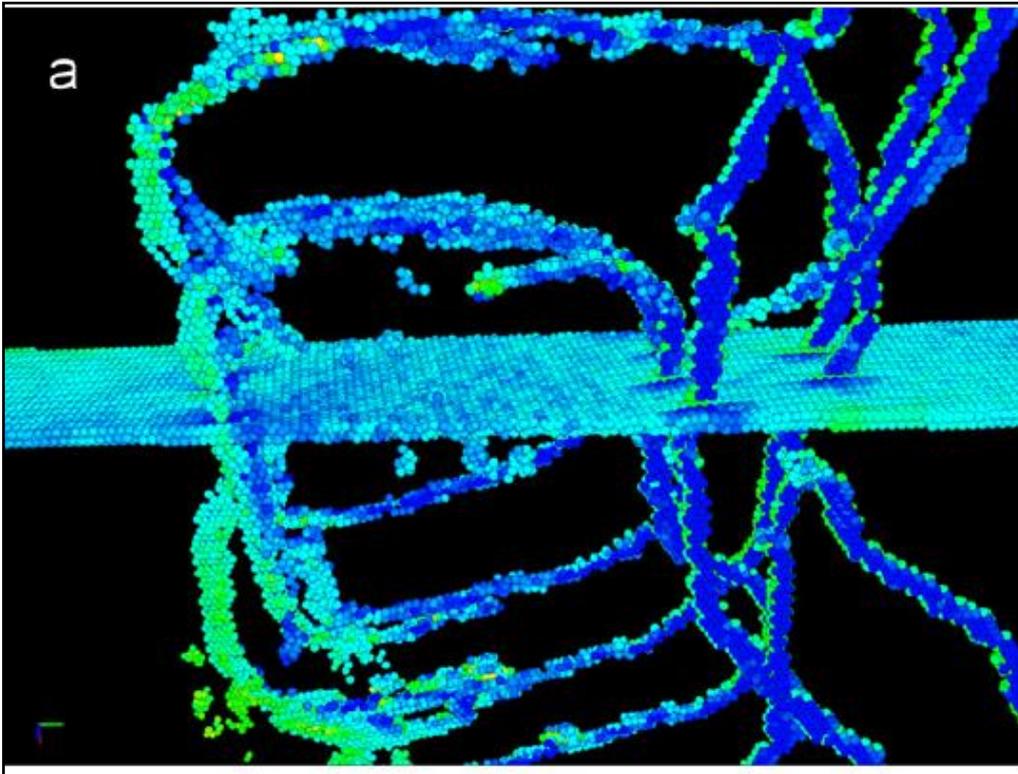


FRATURA INTERGRANULAR EM Fe



**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**

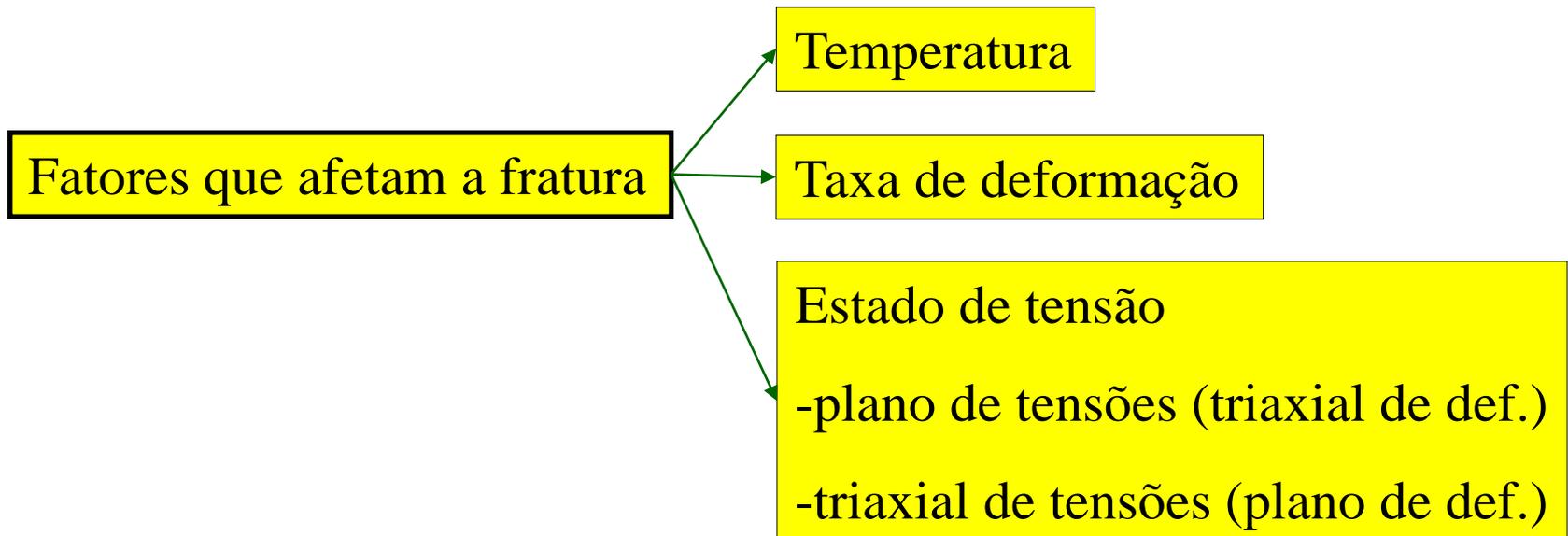
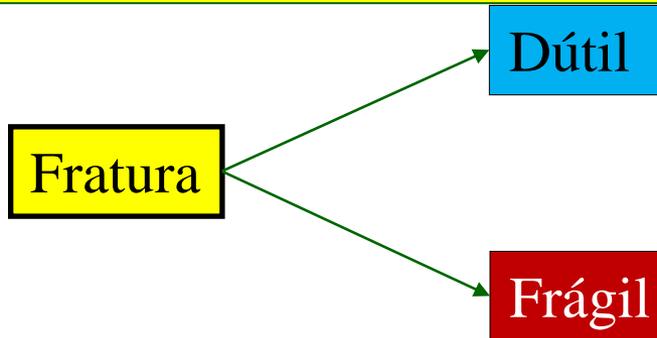
MODELOS ATOMÍSTICOS

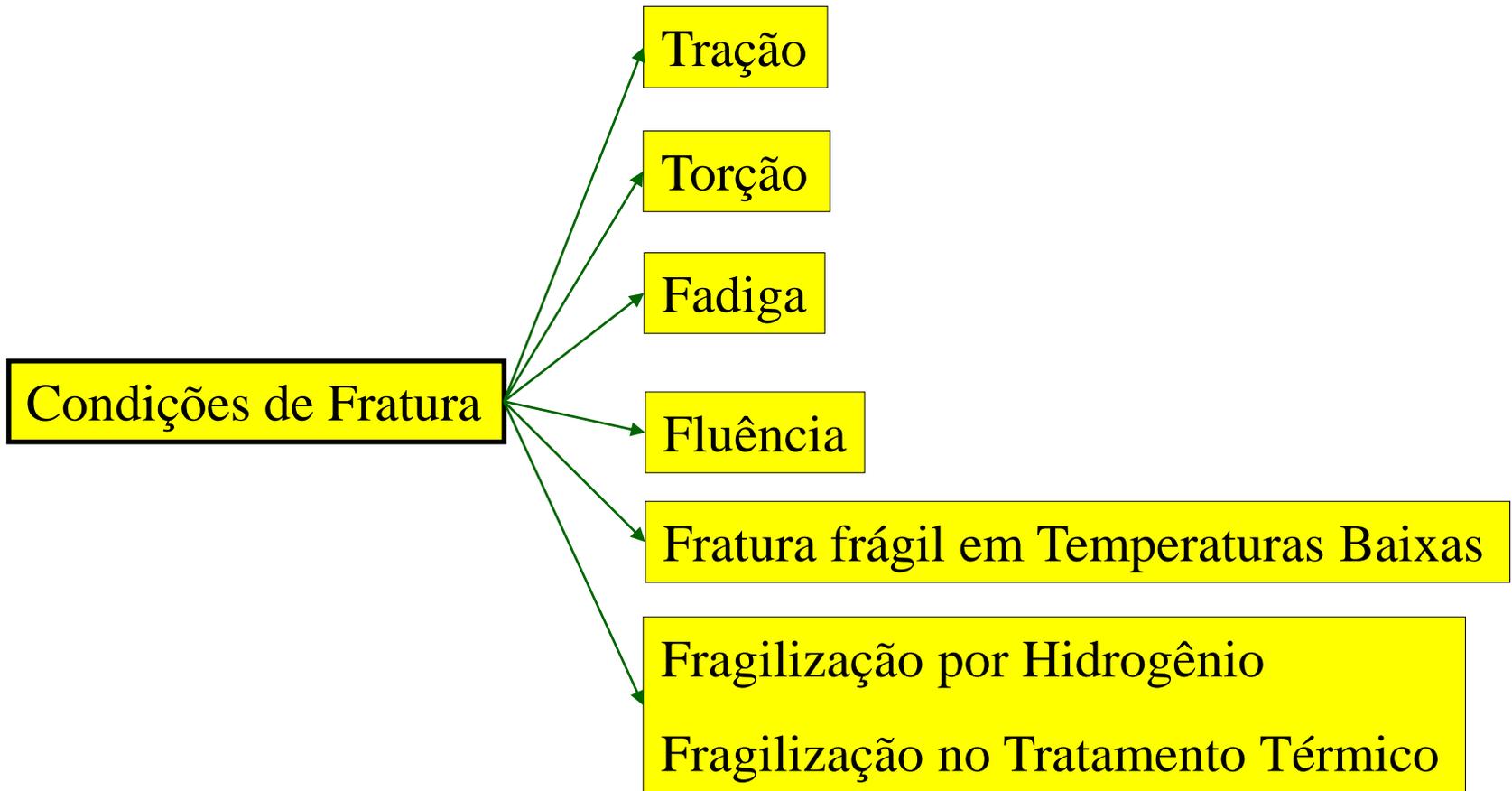


**NUCLEAÇÃO DE TRINCA EM LOOP DE
DISCORDÂNCIAS (MET)**

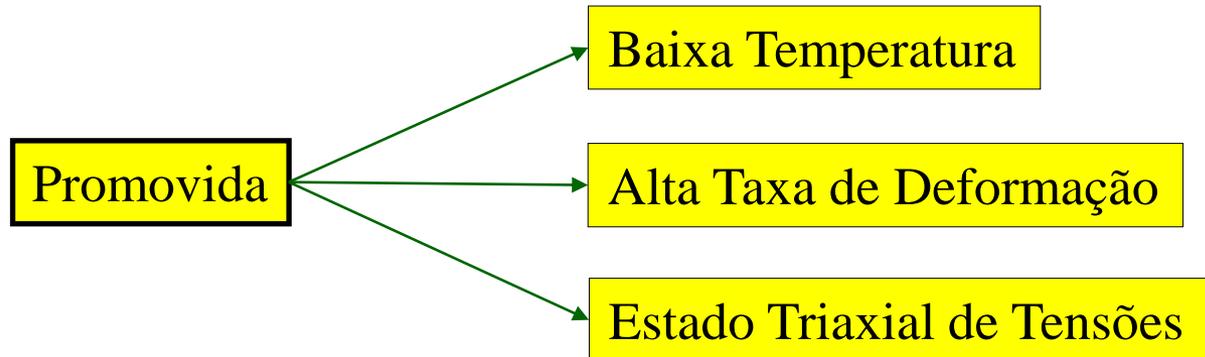
Fratura

“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”





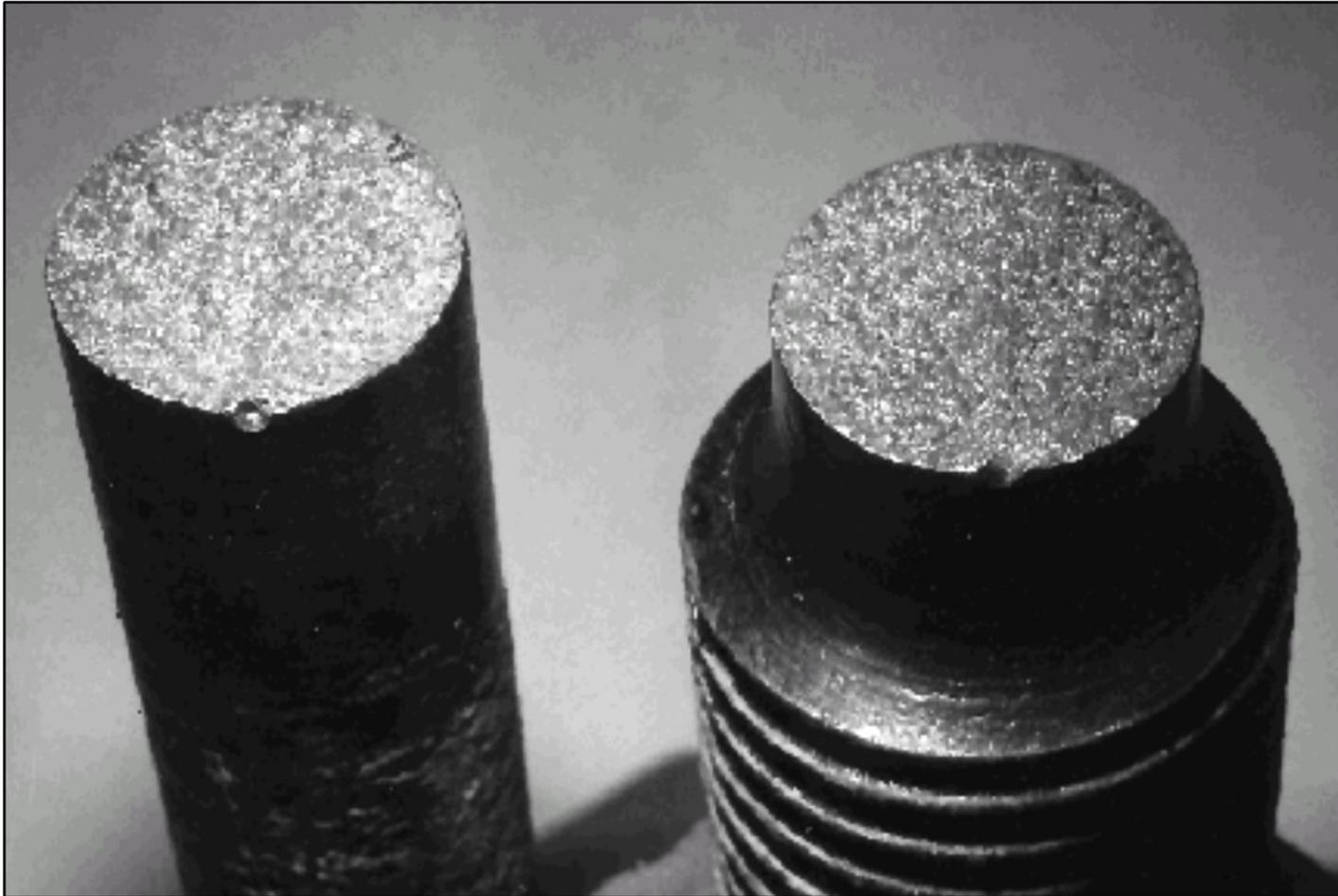
Fratura Frágil : Aspecto Macrográfico



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

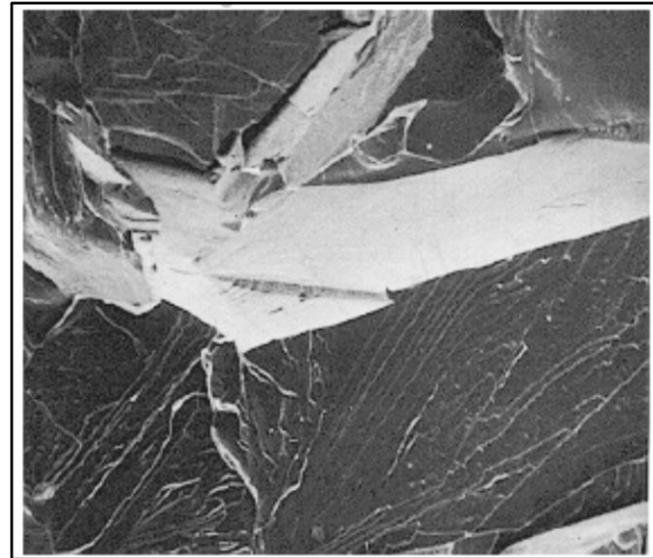
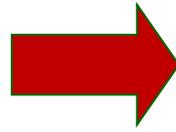
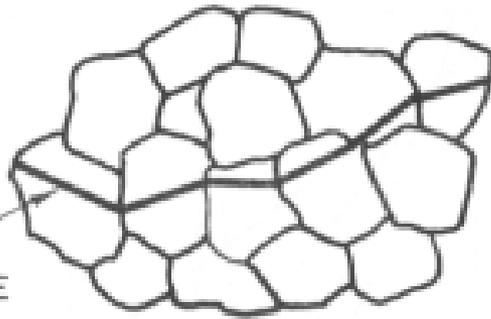
Fratura frágil em tração- aspecto macrográfico



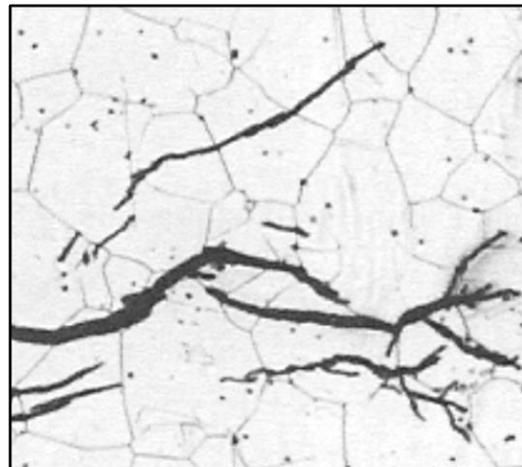
Fratura Frágil: Possível Aspecto Micrográfico

- 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

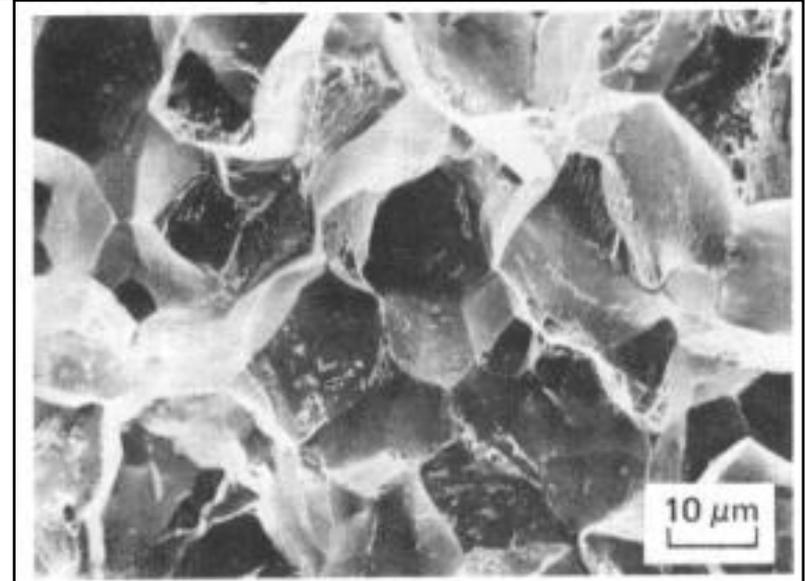
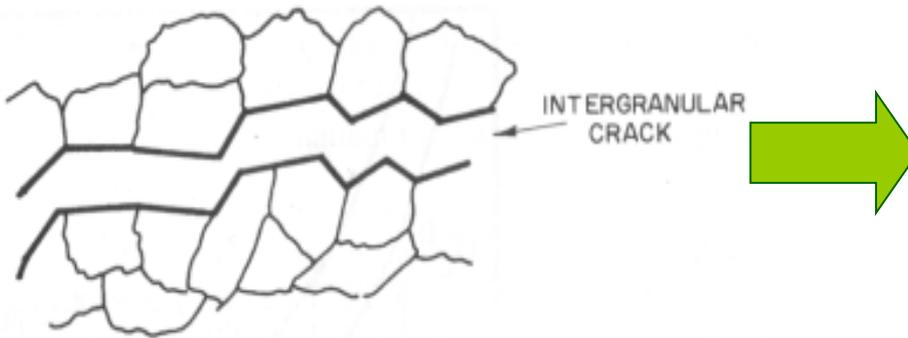


Fratura por Quase- Clivagem Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

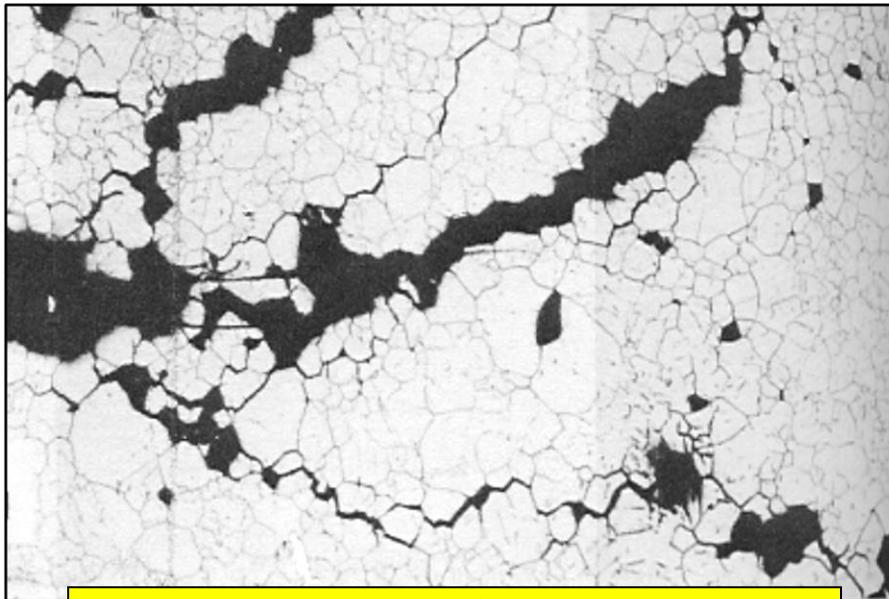


Microscópio Óptico (MO)

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



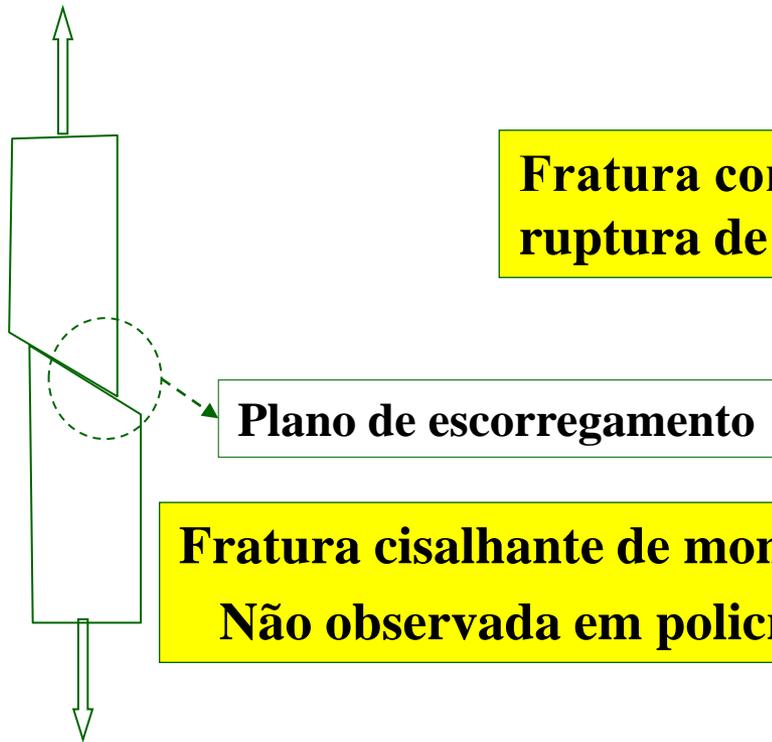
Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



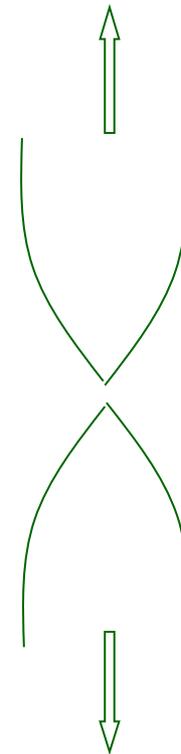
Microscópio Óptico (MO)

Fratura dúctil em tração: aspecto macrográfico

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

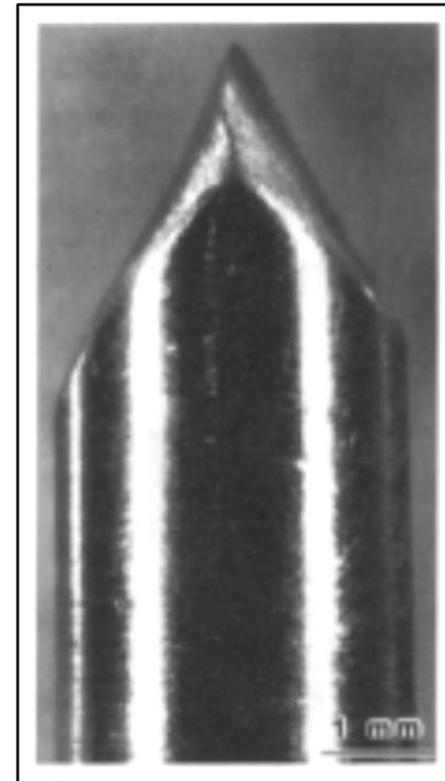
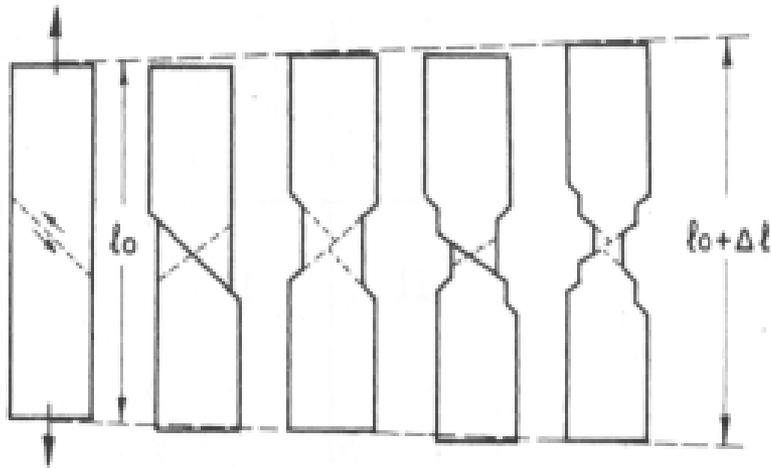


**Fratura cisalhante de monocristal dútil.
Não observada em policristais.**

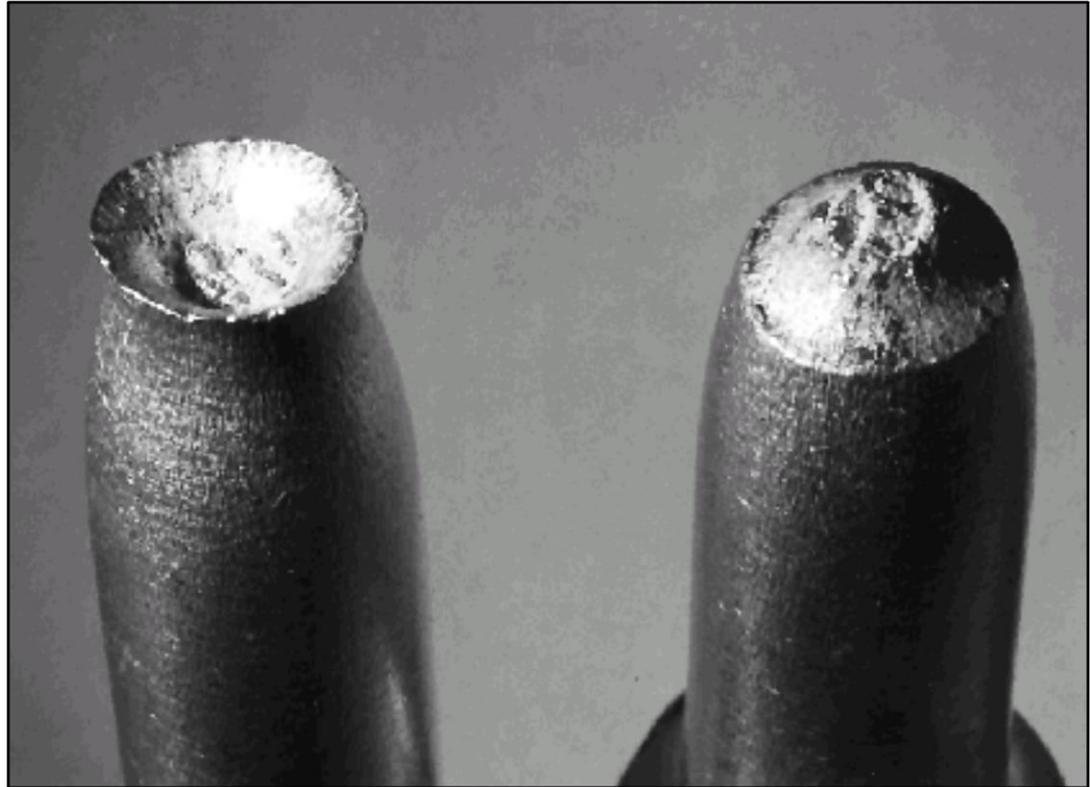
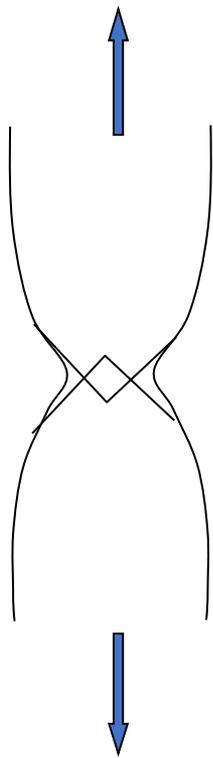


Considerando um monocristal de cobre, um metal dúctil, não há nucleação de trincas, e os cristais deformam plasticamente até iniciar a instabilidade plástica, chamada de empescoçamento.

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



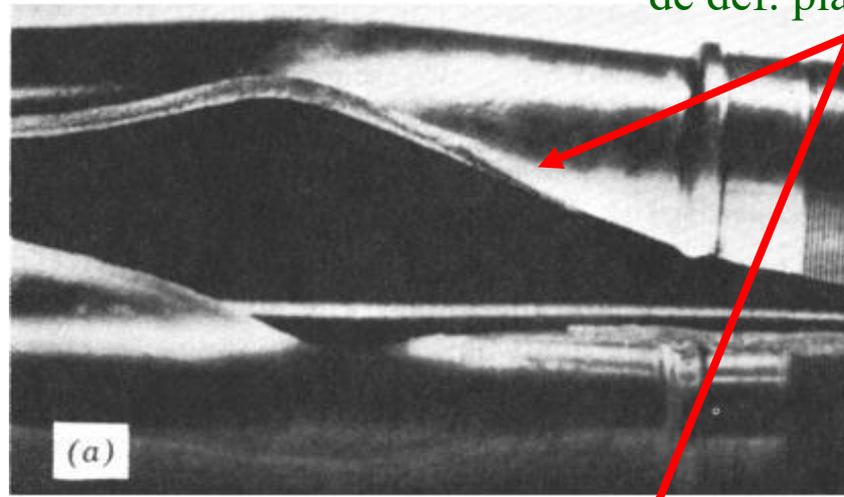
Fratura Dútil em metais policristalinos

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

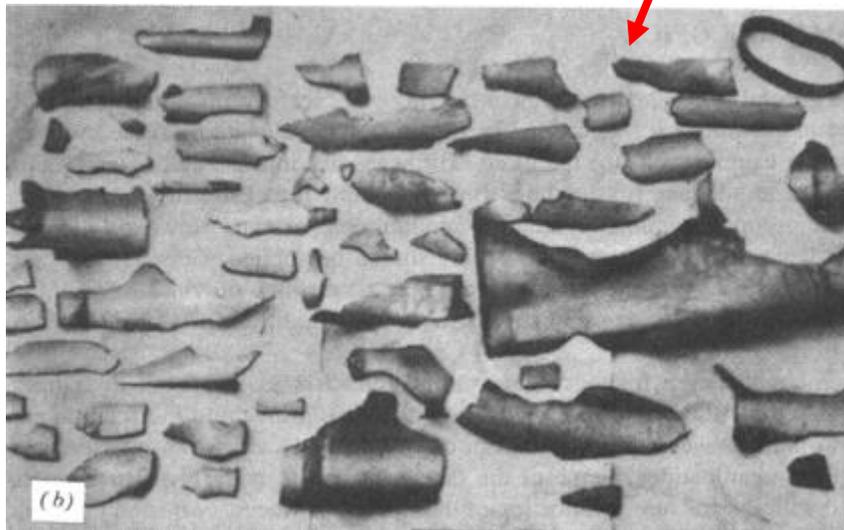


Figura de V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Fig. 4.1(a) and (b), p. 66.

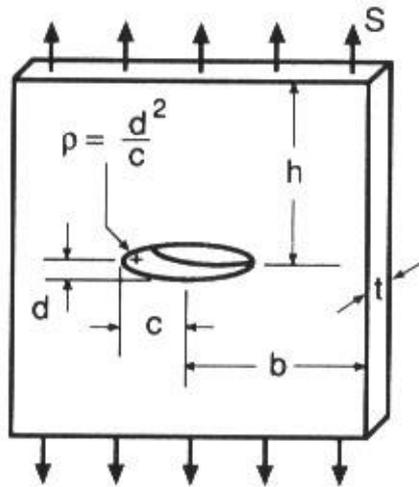
HISTÓRICO DA MECÂNICA DE FRATURA

- *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.*

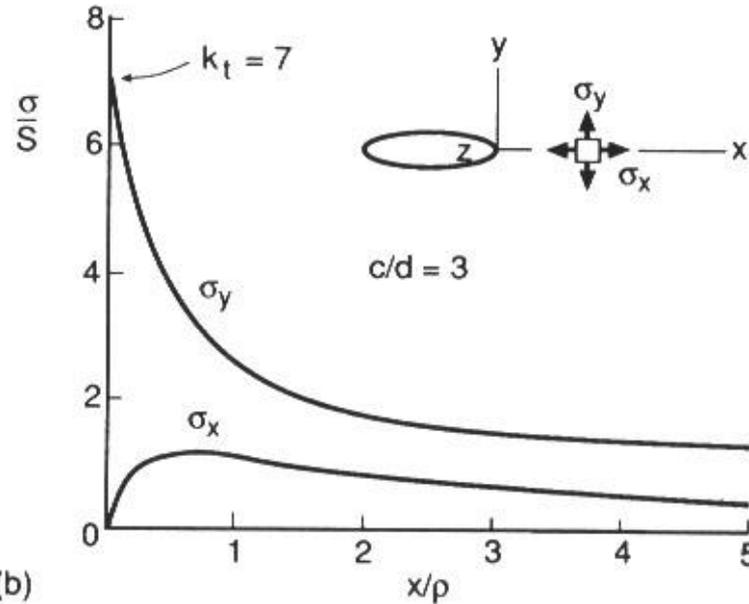
- **Antes do desenvolvimento da Mecânica da Fratura nos anos de 1950 – 1960, a análise de trincas em componentes ou estruturas não era possível;**
- **O projeto era baseado em resultados de ensaios de tração, flexão e compressão, conjuntamente com os critérios apresentados para corpos sem trincas (Mecânica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



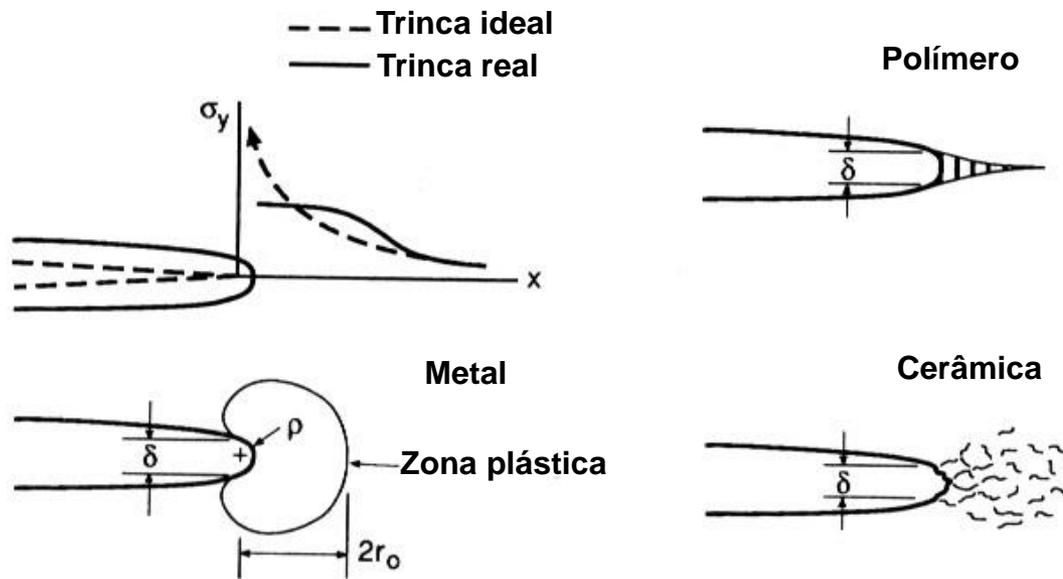
(b)

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

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

Quando d tende a zero (trinca), σ_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