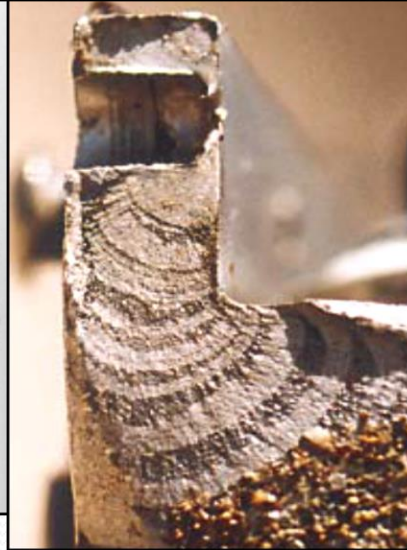
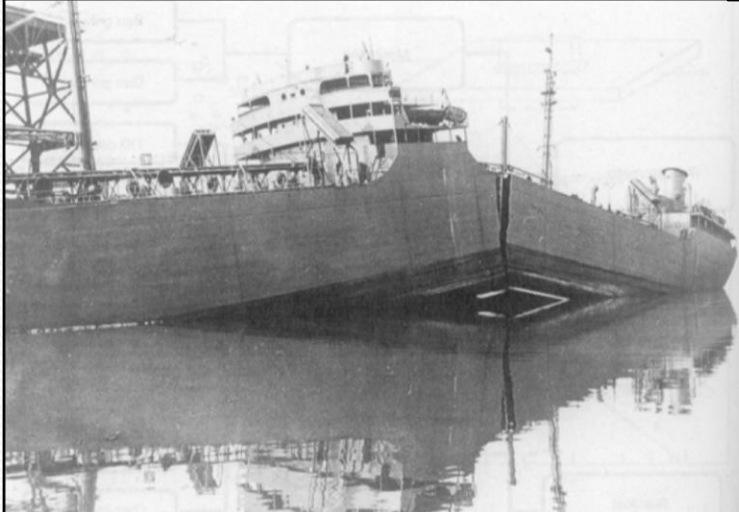


# SMM0330-PRINCÍPIOS DE ANÁLISE DE FALHAS EM COMPONENTES



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

## **REFERÊNCIAS:**

- **Fatigue of Materials**– S.Suresh, Cambridge University Press, **1998**;
- **O Desenvolvimento Histórico da Metalurgia Física** – Robert Franklin Mehl, Tradução: José Roberto Gonçalves da Silva, apostila, UFSCar, 1985.
- **Metalografia e Análise de Falhas**, Tibério Cescon e Cesar R.F. Azevedo, ABM, São Paulo, **2006**;
- **ASM Handbook Vol. 11 - Failure Analysis** – 2001;
- **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;
- **Metallurgy of the RMS Titanic**, National Institute of Standards and Technology- NIST-IR 6118, Tim Foecke.

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

## **REFERÊNCIAS:**

- **A History of metallography**– Cyril Stanley Smith, University of Chicago Presss, **1960**;
- **Mecânica da Fratura na Indústria Nuclear**, Maneschy, J.E., Miranda, C.A.J., Eletrobras – Eletronuclear, Rio de Janeiro, **2014**.
- **Physical Metallurgy** , Cahn, R.W., 2a. Ed, Elsevier, pp-01-31, **1970**.

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# PROGRAMA

- Histórico;
- Introdução: Visão geral da análise de falhas, Estudos de caso;
- Ensaaios Não destrutivos;
- Escala da fratura, Modelos atomísticos;
- Micromecanismos de fratura;
- Fenômenos de fragilização, Estudos de caso, técnicas mais comuns e Fractografia Quantitativa;
- Aspectos metalúrgicos em fadiga, Ensaaios, Estudos de caso;
- Tensões residuais, Falhas durante o processo, Estudos de casos;
- Falhas em serviço, Estudos de casos, procedimento de análise de falhas;
- Estudos de casos.

## Metodologia das aulas

- **Videoaulas gravadas** e disponibilizadas no moodle;
- **Vídeos** disponibilizados no moodle;
- **Pdf dos slides** disponibilizados no moodle;
- **Questionário orientativo** disponibilizado no moodle (não é necessário entregar);
- **Dúvidas** por e-mail para:
  - **Joseane** Moreira Giarola ([joseanegiarola@usp.br](mailto:joseanegiarola@usp.br)),  
doutoranda, monitora do PAE;
  - **José Benedito Marcomini** ([jmarcomini@usp.br](mailto:jmarcomini@usp.br)).

# AVALIAÇÃO

- Uma **prova** (NP) e um **trabalho** (NT):  $MF=(NP+NT)/2$ ;
- **Prova**: 27 de novembro; **entrega do trabalho** 03 de dezembro.
- Trabalho em grupos de **5 componentes, no máximo**;
- Escolher um **artigo** , trabalho ou relatório ou caso público de falha, **comentar criticamente**, baseado nos princípios de análise de falhas apresentados no curso;
- **Máximo de 20 páginas**, com figuras explicativas, especialmente da fratura (caso a falha seja fratura);
- Enviar digitado e **não manuscrito**, em **pdf**;
- Colocar o nome dos componentes na capa do trabalho (quem não tiver o nome no trabalho não terá nota);

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

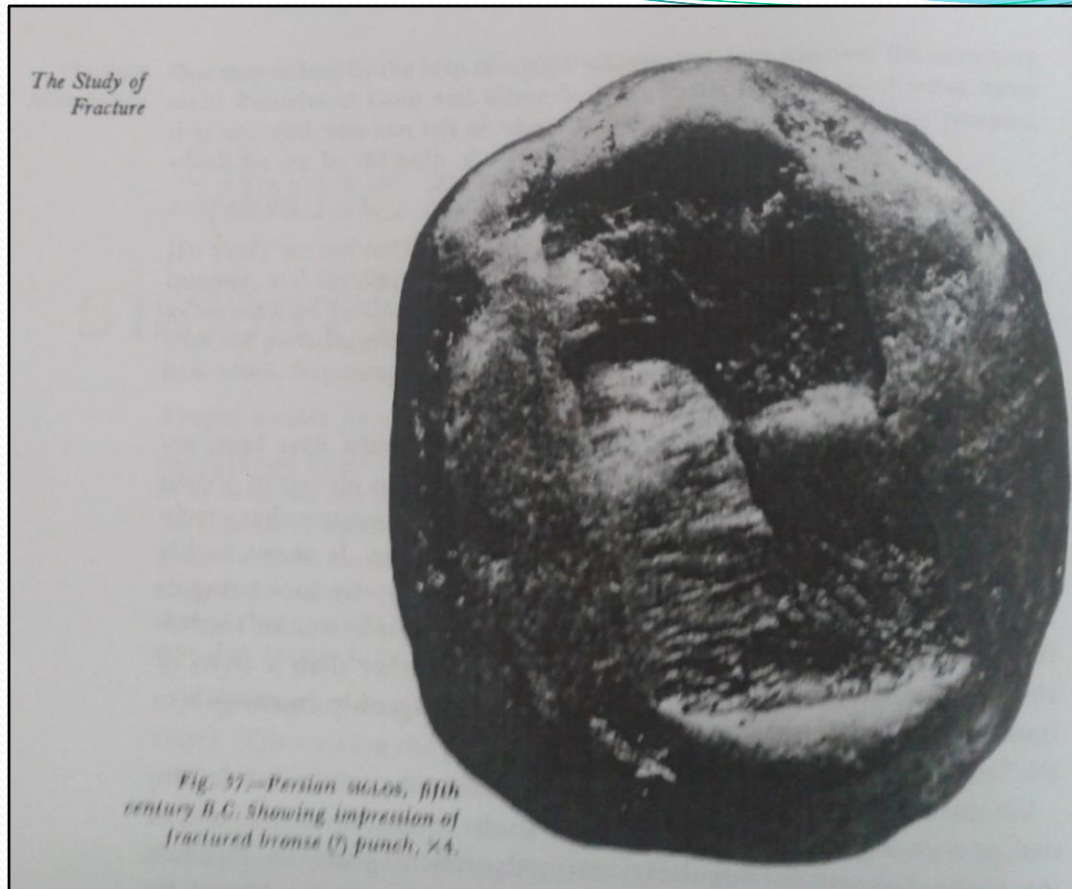
## PRIMÓRDIOS

Moeda da Pérsia- “Siglos” – séc.V- fabricada com prata (aprox. 5,4 g) e a parte traseira era “forjada” a frio ou a quente com uma matriz de bronze e, às vezes acabava deixando a “impressão digital” do matriz fraturada.



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

<http://www.ngccoin.com/>



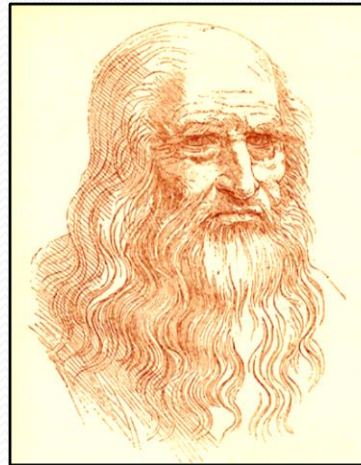
**IMPRESSÃO DA PARTE POSTERIOR DE UM SIGLOS PÉRSA - SÉC.V D.C. –MARCA DO PUNÇÃO DE BRONZE FRATURADO**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



## Leonardo da Vinci (1452-1519)

- **Pioneiro** no desenvolvimento do processo de **laminação**;
- Realizou os **primeiros estudos de falha em metais**, considerando a **influência do comprimento de arames na resistência à fratura**. Concluiu que a **probabilidade de um arame metálico apresentar trincas era diretamente proporcional ao seu comprimento**



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

## Esboço de um laminador-Da Vinci

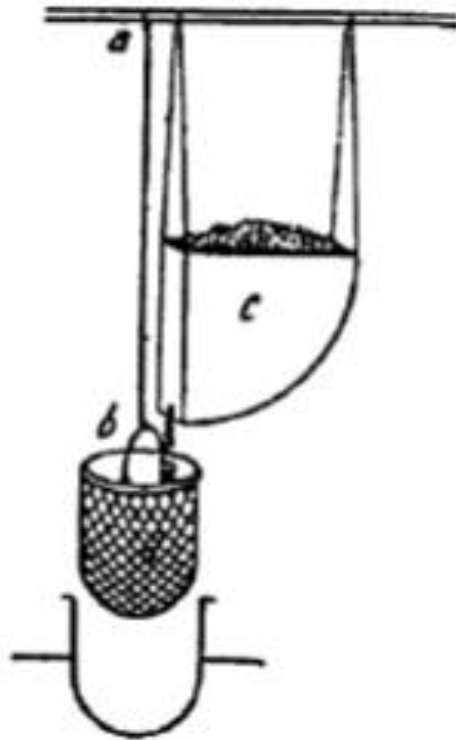
<https://www.flickr.com>



Laminador de Da Vinci

# ENSAIO DE TRAÇÃO

Leonardo Da Vinci (1452-1519)



Testar as propriedades dos fios de ouro que laminava: a probabilidade de um arame metálico apresentar trincas era diretamente proporcional ao seu comprimento

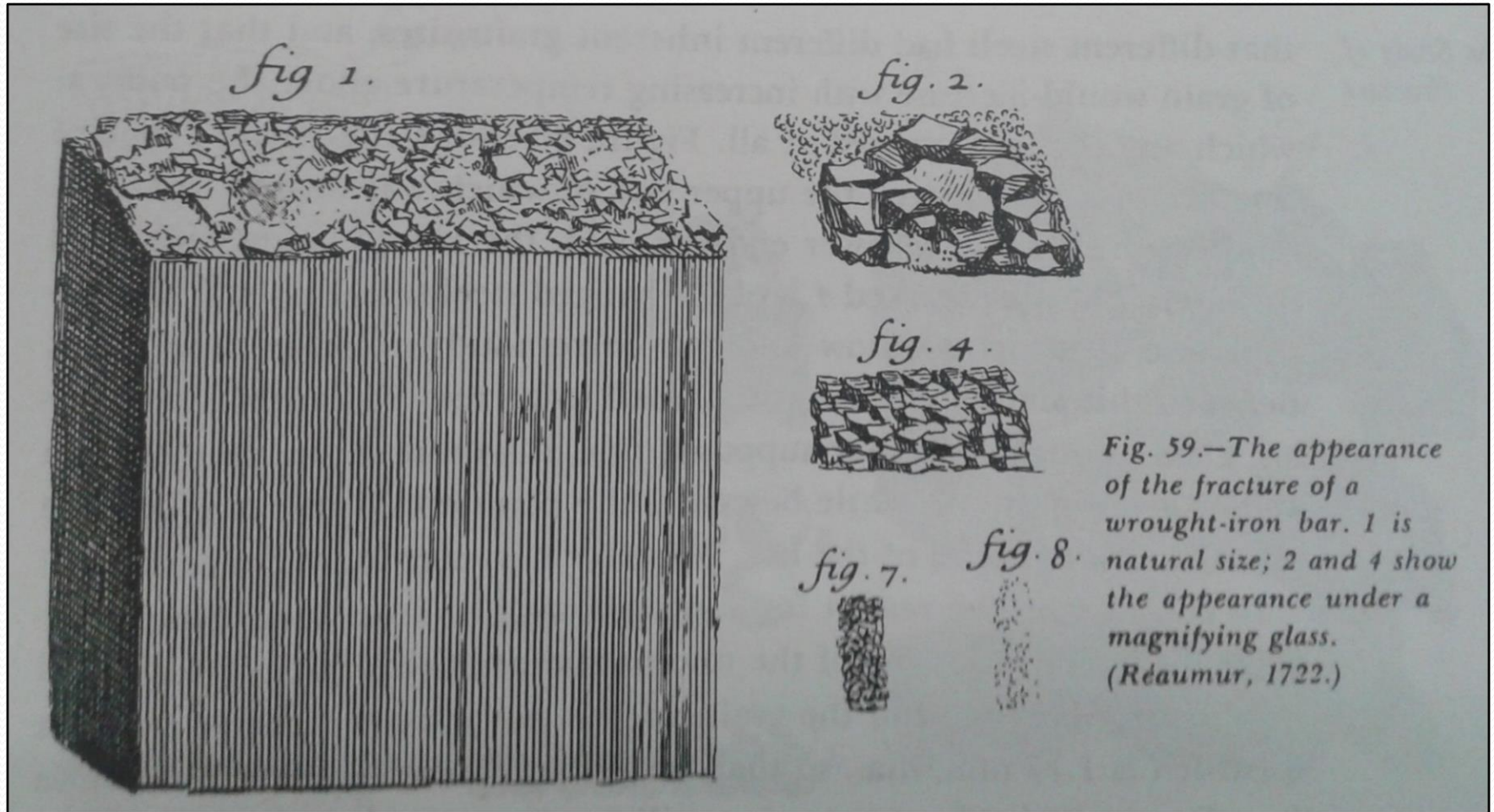
Esquema do ensaio de tração idealizado por Leonardo Da Vinci.

- **Vannocio Biringucio** - uso da fratura como controle de processos metalúrgicos- De la pirotechnia – Veneza, **1540**;
- **Louis Savot**, descreveu mais especificamente o “**teste de fratura**” como método de controle da qualidade de sinos de bronze (**controle de som**), **1627**:
  - Depois de fabricar o sino se a **fratura fosse grosseira (grãos grandes)**, adicionavam **mais estanho**;
  - Se fosse muito **fino**: adicionava-se **mais cobre**;

- **Newton (1642-1727)- Em 1672**, chegou a estudar **superfícies de fratura** (alquimia, teologia);
- **Robert Boyle**, em seu “*Essay about the Origine and Virtues of gems*” (1672) foi o primeiro a registrar experimentos de fratura de cunho científico, para estudar a variação da orientação cristalina de acordo com a velocidade de resfriamento;

- **Réaumur** publicou suas **Memoirs em 1722** na qual discorre sobre ferro e aço;
- **Primeiro** exemplo de um trabalho combinando **observação, planejamento de experimentos e teoria na melhor tradição da ciência aplicada;**
- **Acreditava** que *“a forma e arranjo das partes visíveis eram efeitos de certas tendências naturais e qualidades das partes invisíveis”*

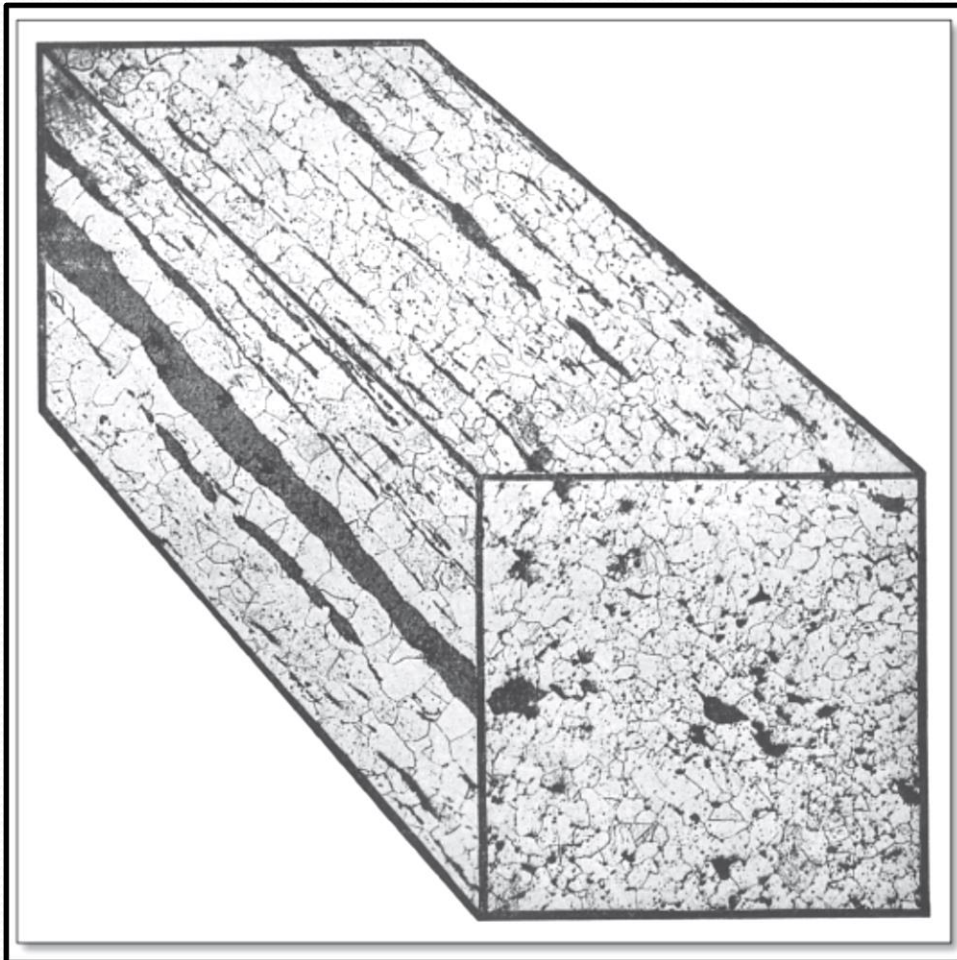
**Réaumur foi o primeiro a reconhecer a estrutura de grãos do ferro pudlado através da fratura intergranular;**



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

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

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



## **FERRO “PUDLADO”**

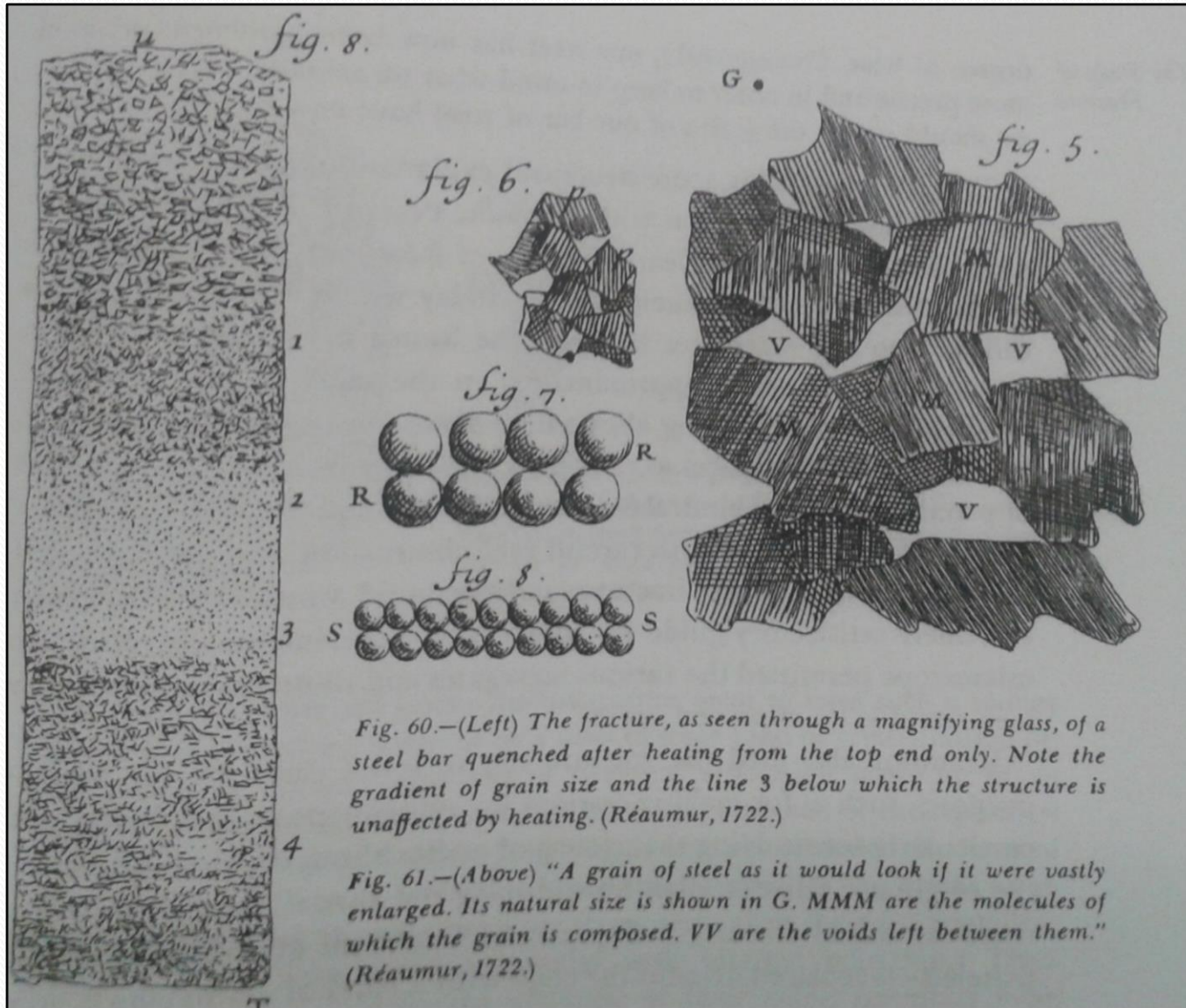
### **Figura 2.5**

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

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



**Réaumur aqueceu apenas uma das extremidades da barra de aço e temperou-o todo e fraturou-o para estudar a microestrutura**



Concluiu que quanto **menos espaços vazios V**, mais **duro seria o aço**. Ou seja **menor TG maior resistência!**

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

## ACIDENTE DE TREM ENTRE VERSAILLES E PARIS-1842

Returning to Paris derailed at Meudon, after the leading locomotive **broke an axle**. The first railway accident in the world to cause multiple deaths, it caused between 52 and 200 deaths



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

## HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

- Depois do acidente de trem, próximo a Versailles, **1842**, os estudos sobre fadiga se intensificaram;
- A origem deste acidente foi a **fratura por fadiga do eixo frontal da locomotiva**;

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

- Acidentes de trens levaram ao desenvolvimento do estudo da fadiga (trens- ensaios acústicos- início do ultrassom);



(wikipedia)

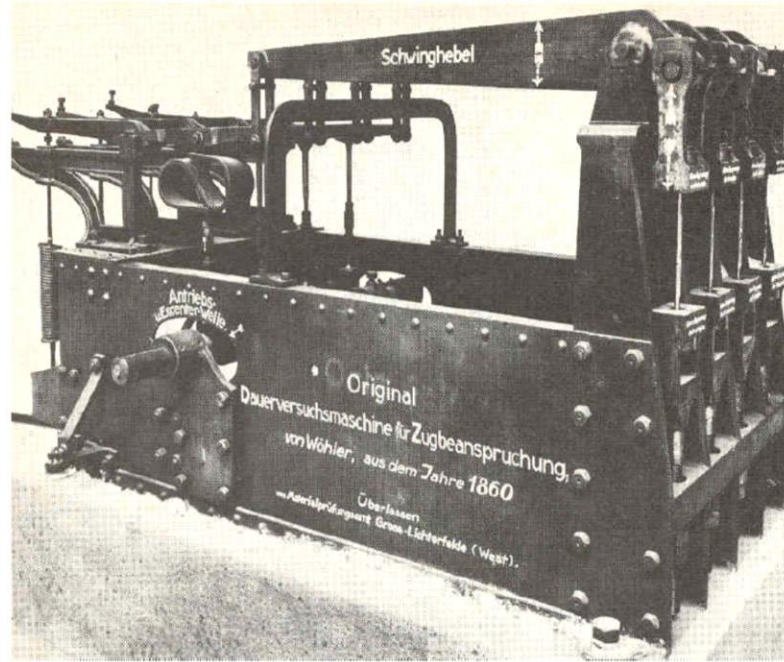
- **Wilhelm August Julius Albert** ( 1787 – 1846):  
Engenheiro de Minas -1º estudo de fadiga de metais em 1829-  
testou uma corrente de ferro do guidaste carregando e descarregando a  
mesma.

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

- Em **1843**, **W.J.M Rankine**, Engenheiro Ferroviário inglês reconheceu as características de fadiga na superfície de fratura e percebeu a criticidade dos concentradores de tensão em peças de máquinas;
- A “Institution of Mechanical Engineers” na Inglaterra começou a pesquisar a chamada “**Teoria da cristalização**”. Acreditava-se que a fragilização do material por fadiga ocorria por um processo de cristalização da microestrutura subsuperficial;
- O termo **fadiga**, exclusivamente relacionado à fratura por esforços cíclicos, foi introduzido por Braithwaite (1797 – 1870) em **1854**;
- **Obs: Poncelet (1788-1867), Matemático e Engenheiro Francês, já havia utilizado este termo genericamente para fratura de metais.**

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

○ August Wöhler 1819 – 1914



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



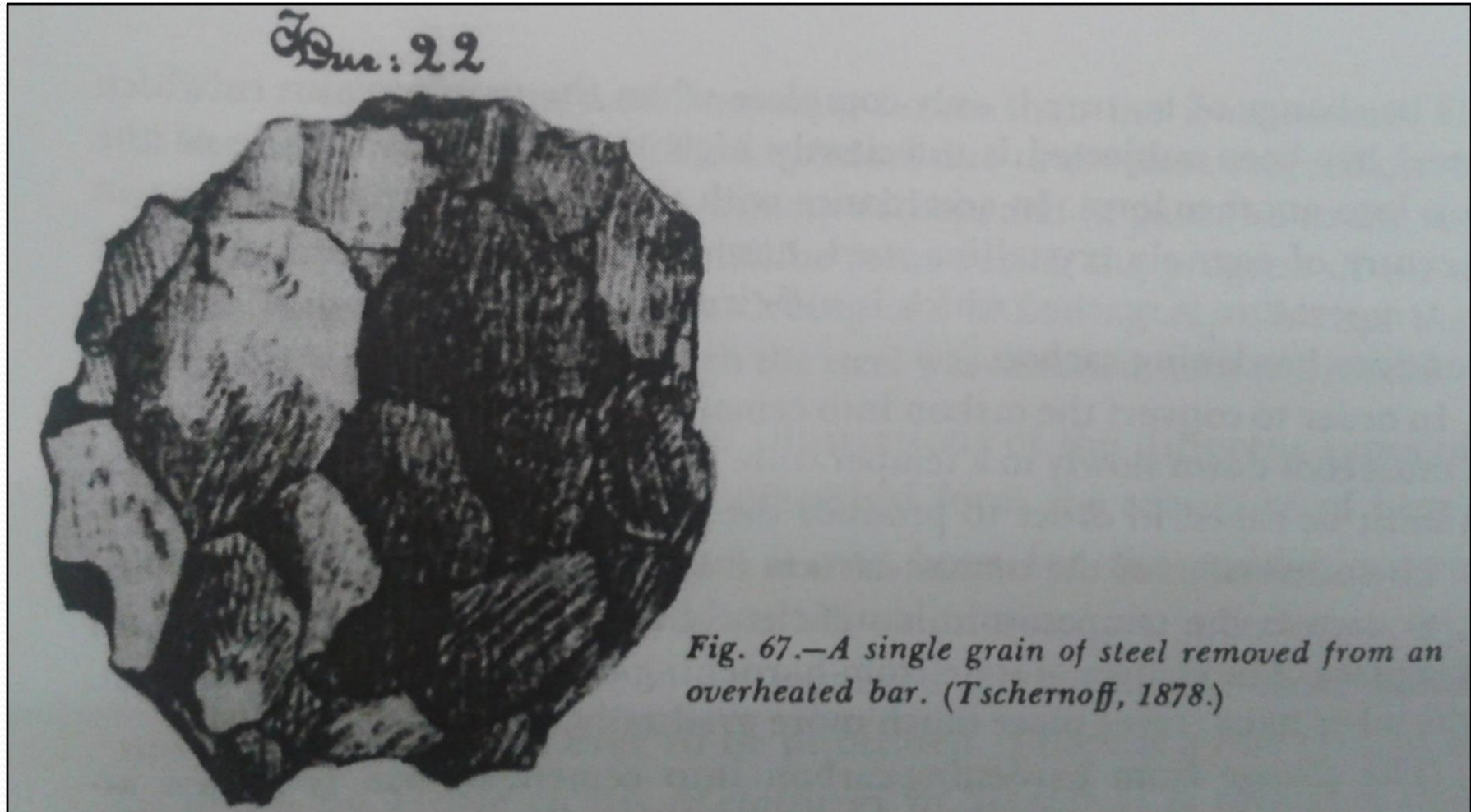
JOHN BRAITHWAITE, Builder of the "Novelty."  
(From an engraving in the *Mechanics' Magazine*.)

(wikipedia)

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

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

**Tschernoff, em 1878,** estudou a fratura intergranular e demonstrou a real forma da estrutura de grãos do aço.



# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS



**Acidente de Monteparnasse-  
França-1895-falha de freio.  
Réplica no museu em  
Canela(RS).**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



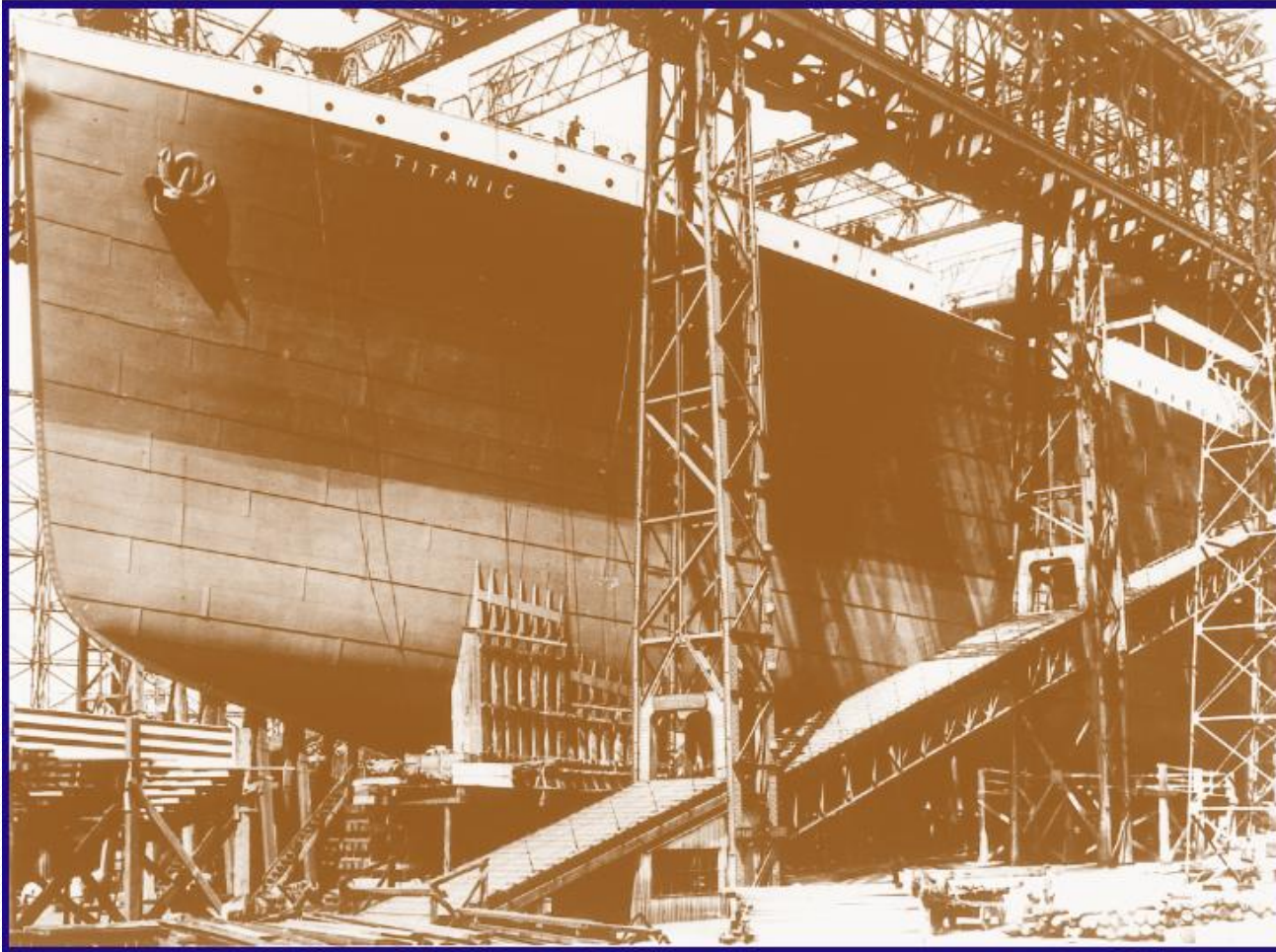
# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

## TITANIC- ABRIL, 1912



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# TITANIC- ABRIL, 1912



**Construído em ritmo frenético. Foram registrados mais de 250 acidentes de trabalho.**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# TITANIC- ABRIL, 1912

Compartimentado-rebites: compartimentos separados.

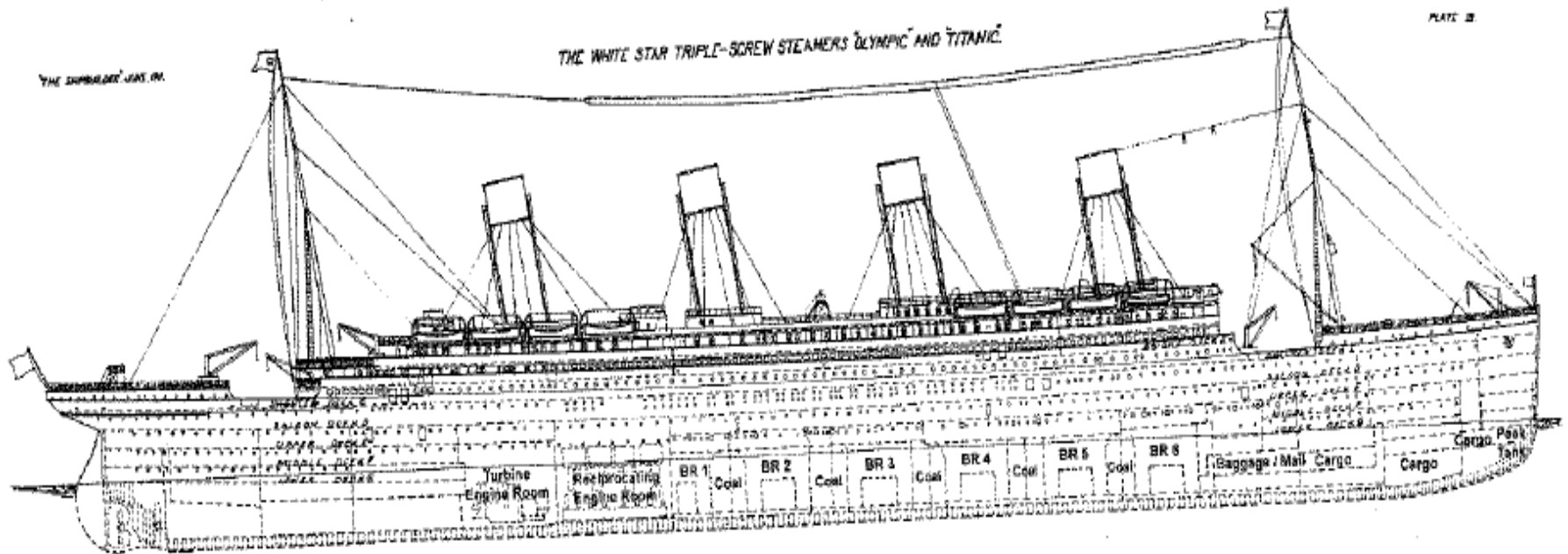
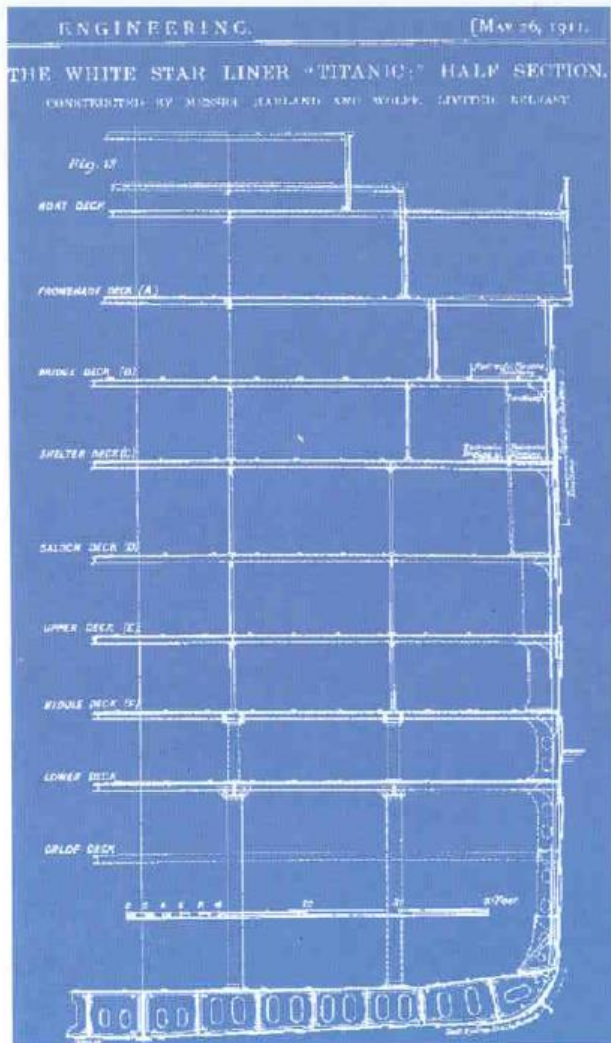


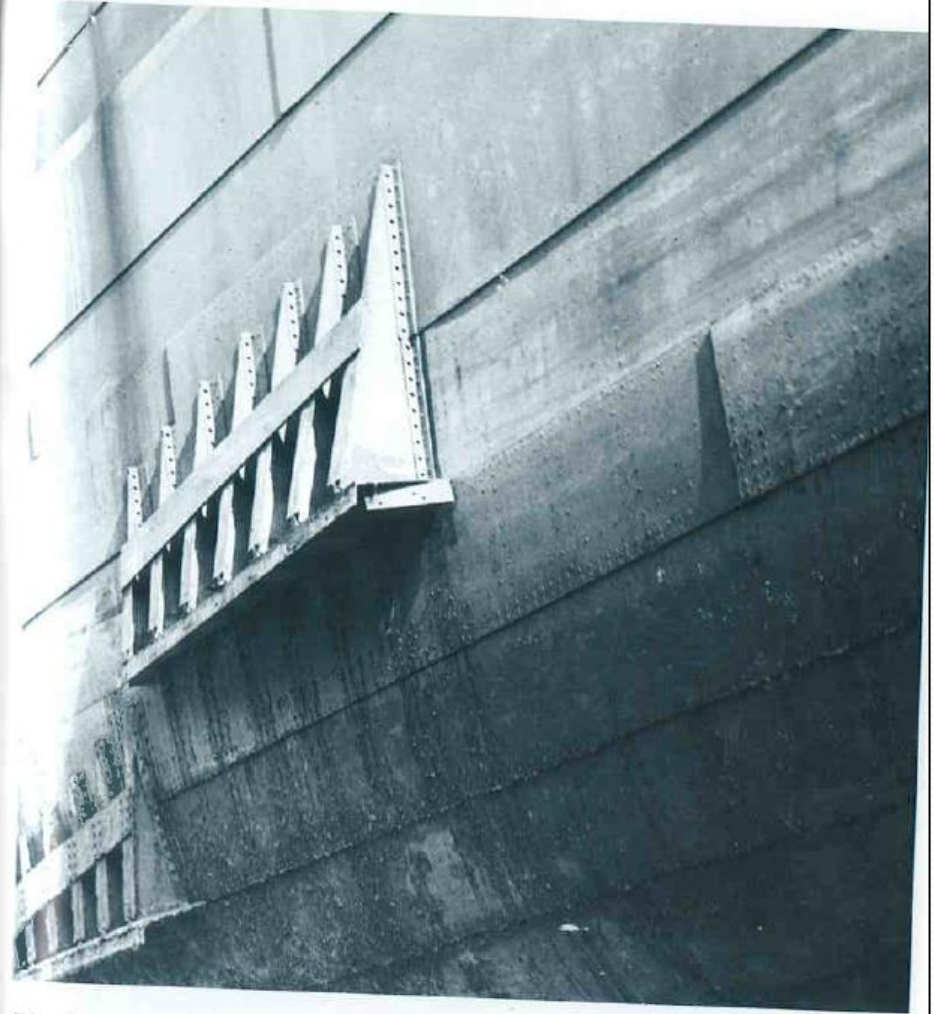
Figure 1.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

# TITANIC- ABRIL, 1912



A blueprint of the *Titanic's* hull showing all nine decks in cross section.



This photo taken during *Titanic's* construction shows the joggled surface that was created by *Titanic's* overlapping steel plates. (Harland and Wolff Photographic Collection, © National Museums Northern Ireland, Ulster Folk Transport Museum)

## TITANIC- ABRIL, 1912

- Fatos: na noite de 14 de abril de 1912 às **23h40min** a tripulação visualizou o Iceberg de 50 a 300.000 ton- **após 40 s** houve a colisão;
- Às **2h20min** ocorreu o afundamento com mais de 1500 vítimas.
- Análise do Titanic (1991-2008): **Dr. Tim Foeck e Dra. Jennifer Hooper McCarty**;
- Duas **principais** teorias:
  - **Qualidade do aço** do casco somado à **falta de conhecimento da mecânica de fratura**;
  - **Qualidade dos rebites**.

# TITANIC- ABRIL, 1912

## Remains of the *Titanic*

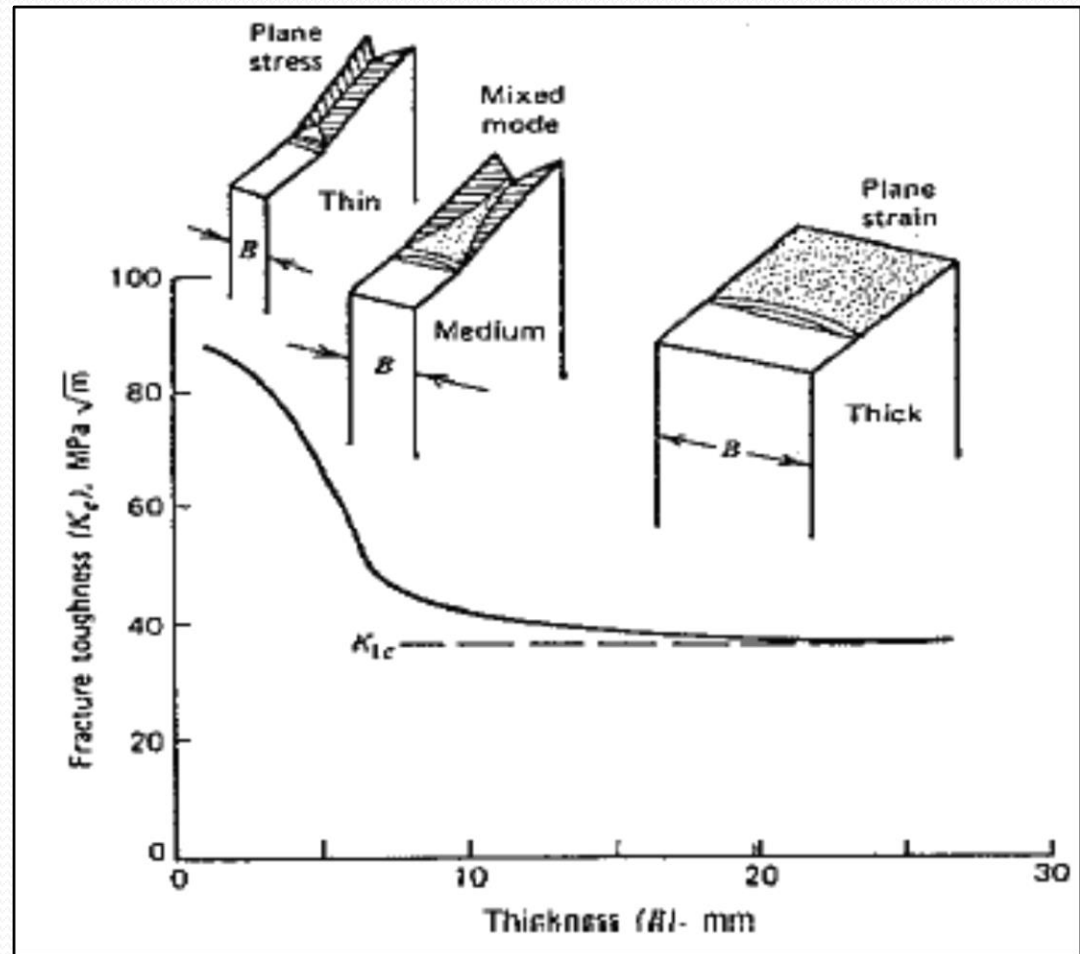
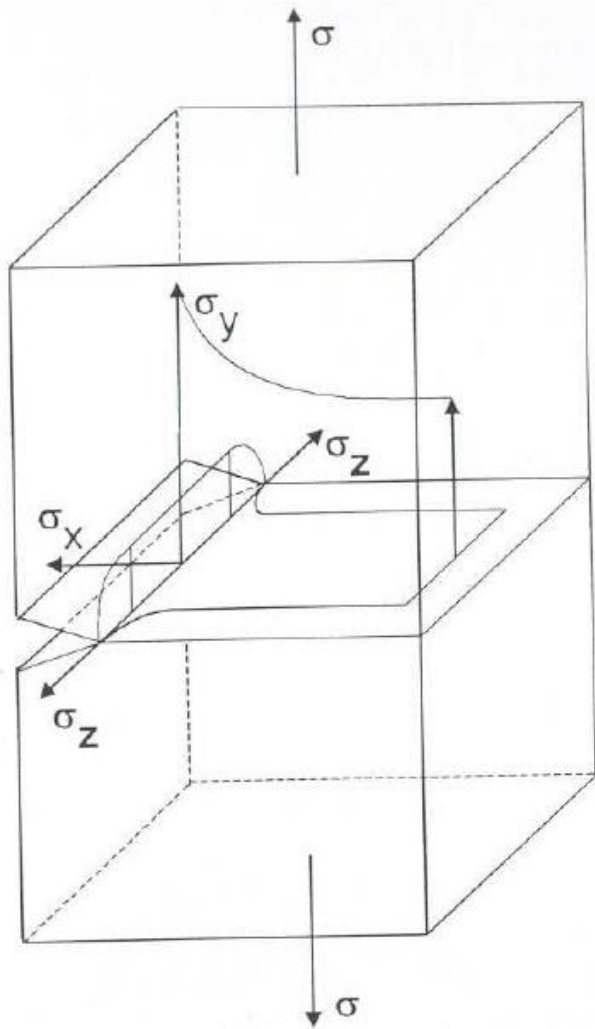


# TITANIC- ABRIL, 1912

## Desconhecimento da Mecânica de Fratura:

- Temperatura de transição frágil-dúctil é levantado com cp de impacto- secção de (10x10)mm;
- Baseados nisso aumentaram a espessura das chapas para construção no navio (50mm)- maior espessura- estado plano de tensões passa para estado plano de deformações-aumenta a criticidade do estado triaxial de tensões-reduz  $K_{IC}$ .

# ESTADO TRIAXIAL



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

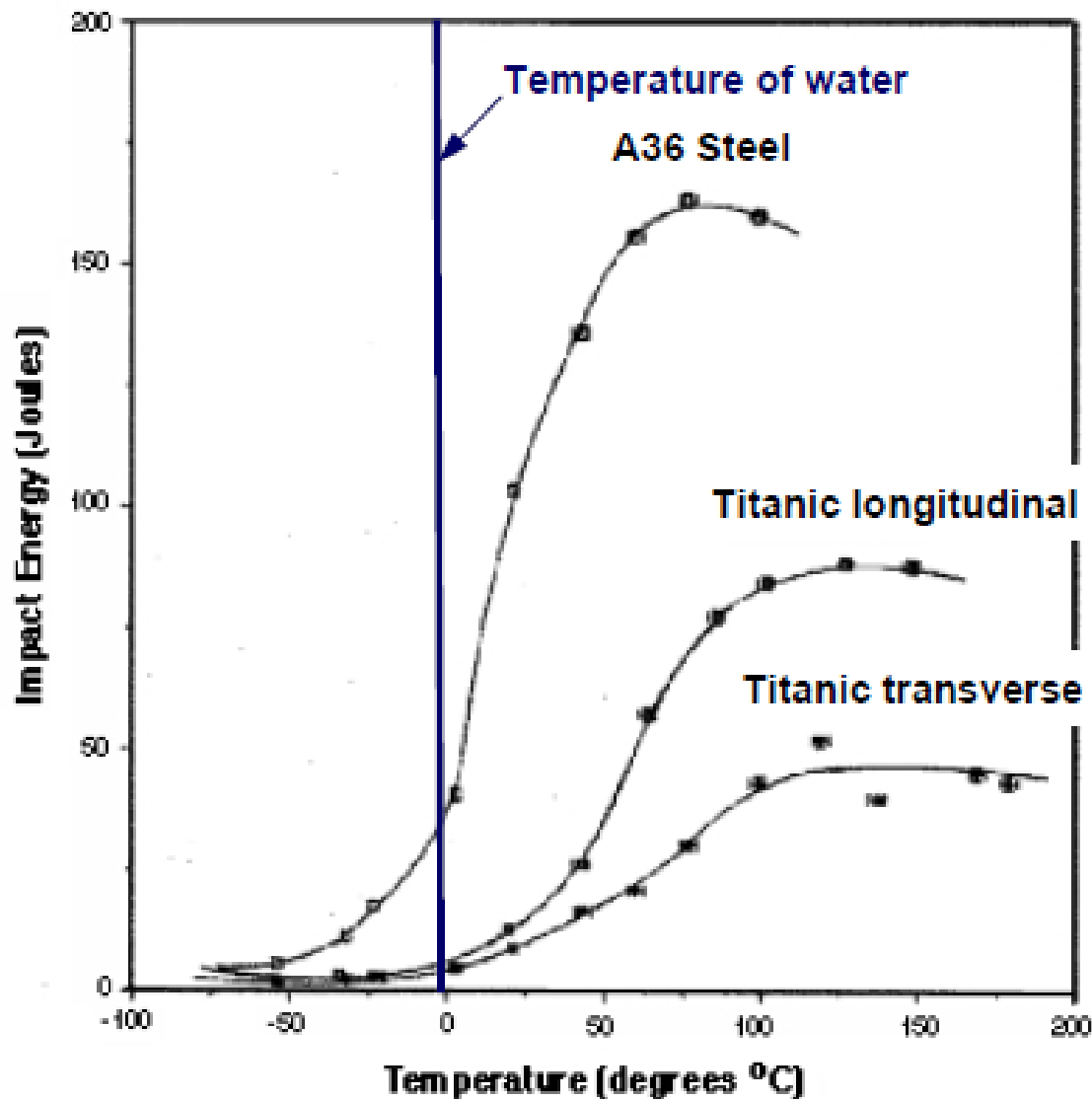


# TITANIC- ABRIL, 1912

## Análise da composição química do aço

Material	C	Mn	P	S	Si	Cu	O	N	Mn-to-S Ratio
<i>Titanic Hull Plate</i>	0.21	0.47	0.045	0.069	0.017	0.024	0.013	0.0035	6.8:1
ASTM 36	0.20	0.55	0.012	0.037	0.007	0.01	0.079	0.0032	14.9:1

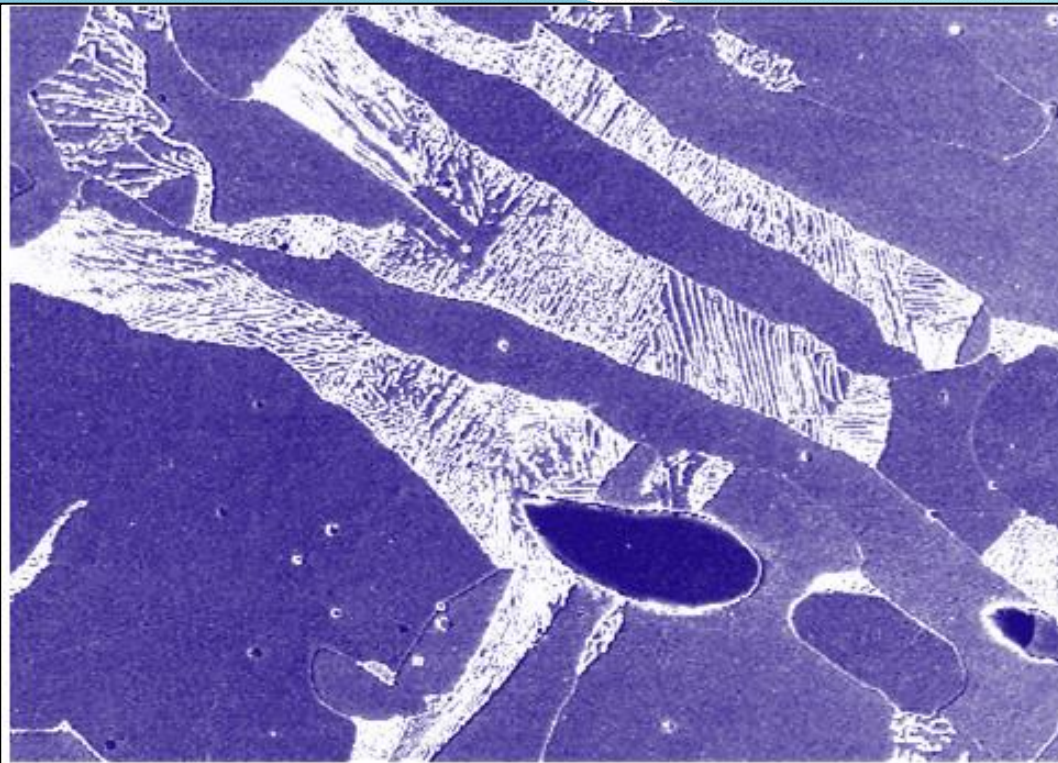
Prof.Dr. José Benedito Marcomini



**Temperature of the water was  $-2^{\circ}\text{C}$ !!**

## TITANIC- ABRIL, 1912

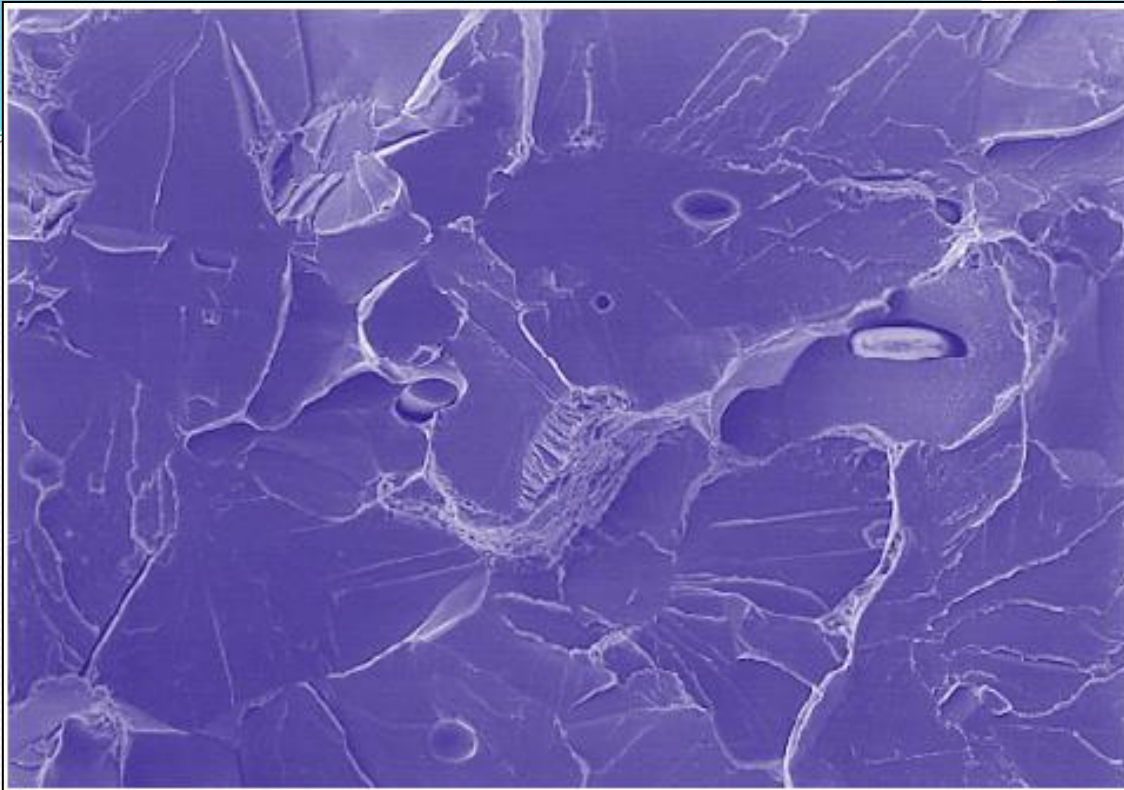
- **Pela composição química, a baixa relação Mn/S leva a formação de mais MnS, o que aumenta a fragilidade e aumenta a temperatura de transição frágil-dúctil;**
- **O aço do Titanic era semi- acalmado, baixa desoxidação, o que fragiliza o aço;**
- **Foram encontrados sulfetos tanto na micrografia da estrutura quanto na superfície de fratura, na análise de MEV.**



10  $\mu\text{m}$

Figure 4. A scanning electron micrograph of the etched surface of the *Titanic* hull steel showing pearlite colonies, ferrite grains, an elongated MnS particle, and nonmetallic inclusions. Etchant is 2% Nital.

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

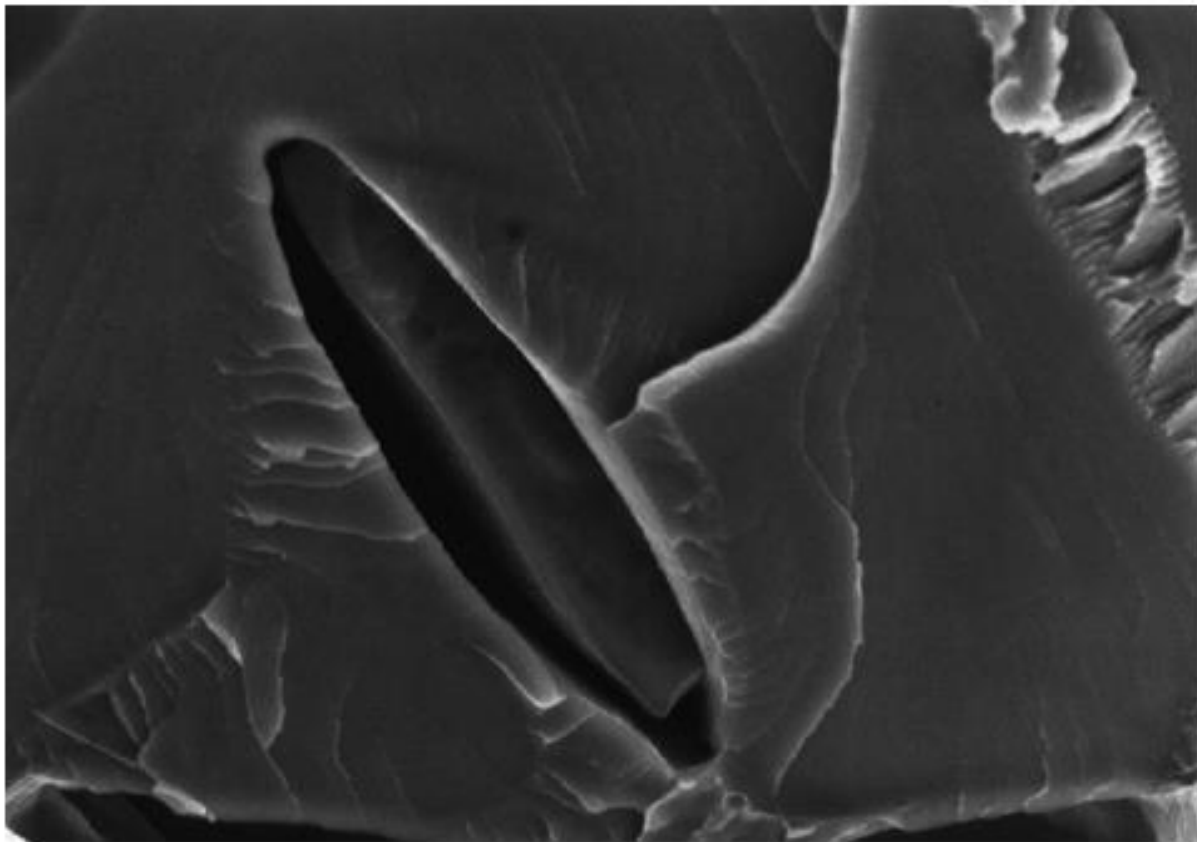


20  $\mu\text{m}$

Figure 5. A scanning electron micrograph of a Charpy impact fracture surface newly created at 0°C, showing cleavage planes containing ledges and protruding MnS particles.

**MICROMECHANISMO DE FRATURA POR CLIVAGEM E QUASE-CLIVAGEM DEMONSTRAM QUE O SULFETO NÃO FOI O CAUSADOR DA FRATURA. FOSSE ESTE O CASO HAVERIA A OCORRÊNCIA DE DIMPLES.**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



5  $\mu\text{m}$

Figure 6. A scanning electron micrograph showing a fractured MnS particle protruding edge-on from the fracture surface.<sup>13</sup>

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

## TITANIC- ABRIL, 1912

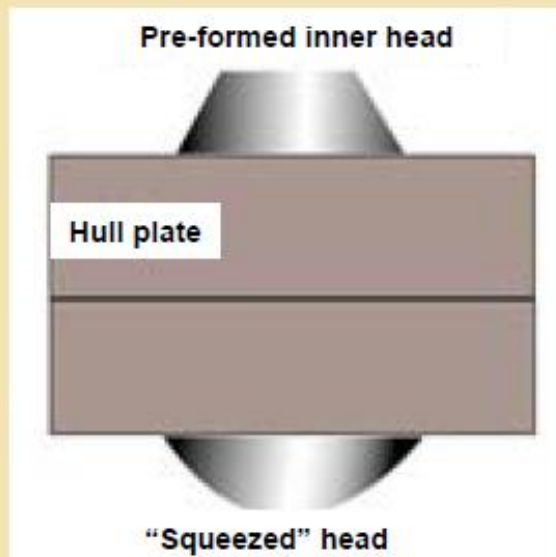
**Conclusion #1: The brittle steel theory is wrong.**

- **A primeira conclusão** apresentada no livro [4] é que a **teoria do aço frágil estava errada: a amostra do casco** retirada para o ensaio de impacto, em 1991, era de uma **região já fraturada em três pontos**, tratando-se, portanto, de uma **chapa particularmente frágil**;
- **O alongamento** do ensaio de tração está  **muito bom**, retirado de outra região, provavelmente;
- **O ensaio de impacto não** seria o melhor método para avaliação da fragilidade do aço **pois a taxa de deformação envolvida é muito maior do que a que ocorreu de fato**;

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# TITANIC- ABRIL, 1912

## ANÁLISE DOS REBITES

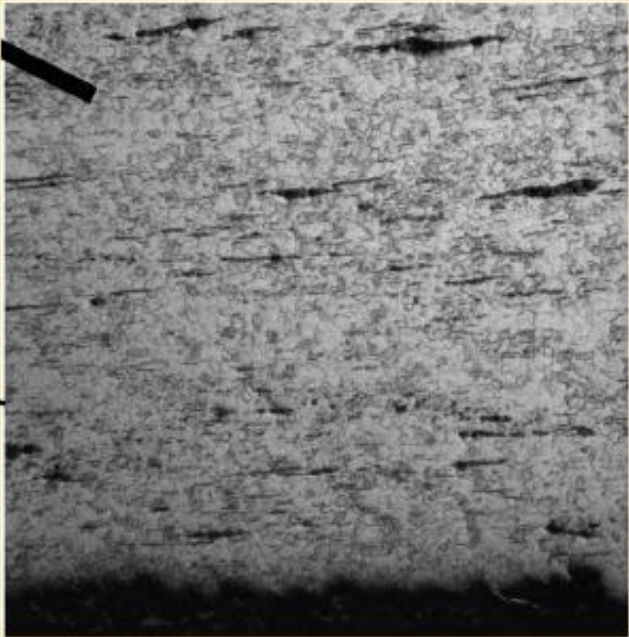
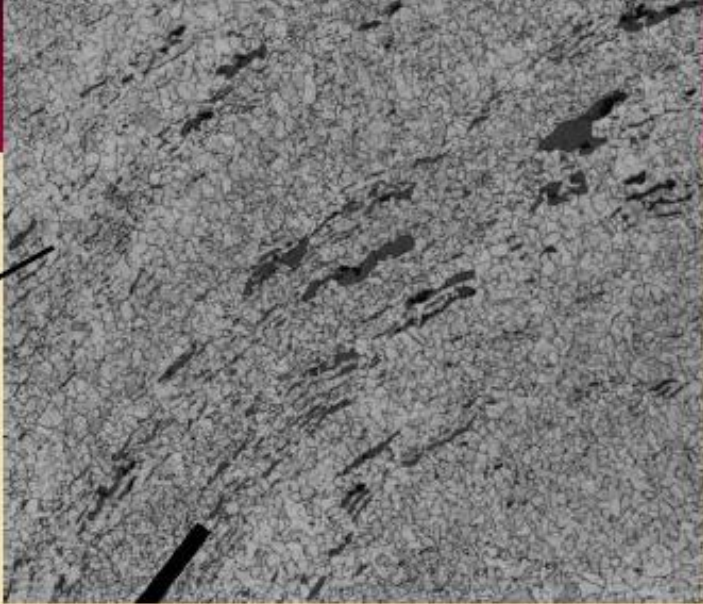
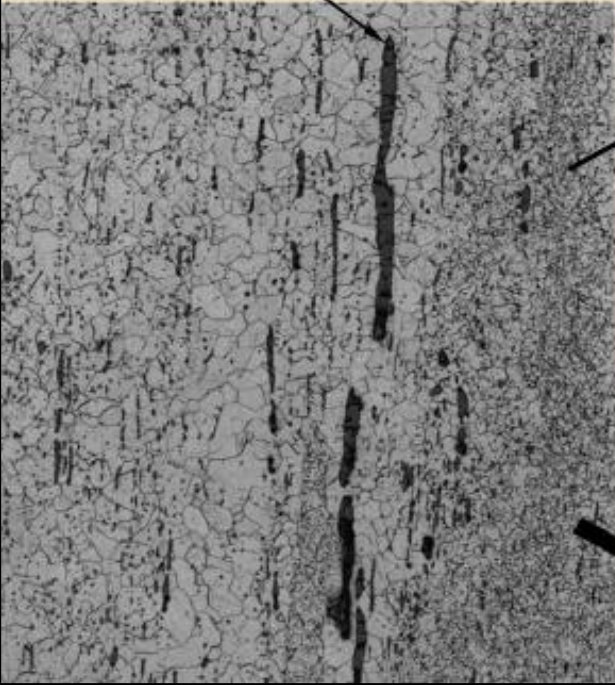


**Hull of the *Olympic*, *Titanic*'s sister ship after a collision in 1911.**



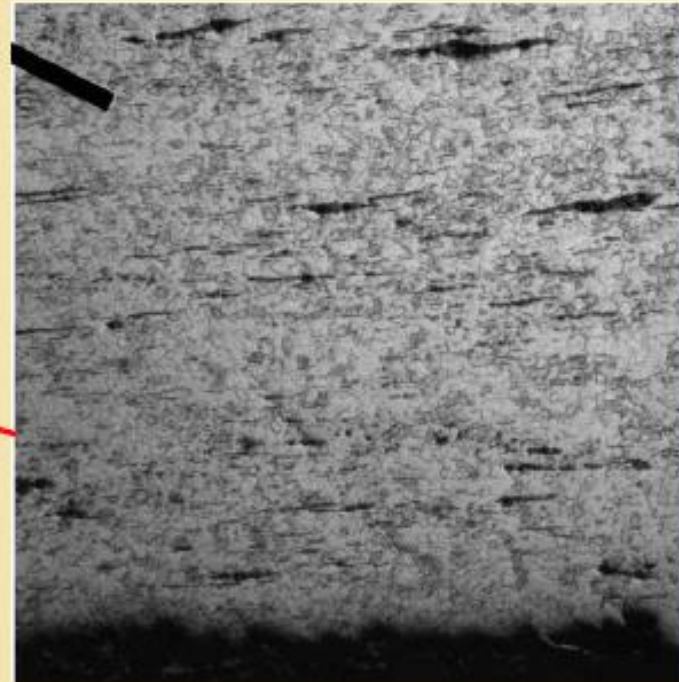
# Microstructure of Titanic Rivet

Fe-silicate "stringers"



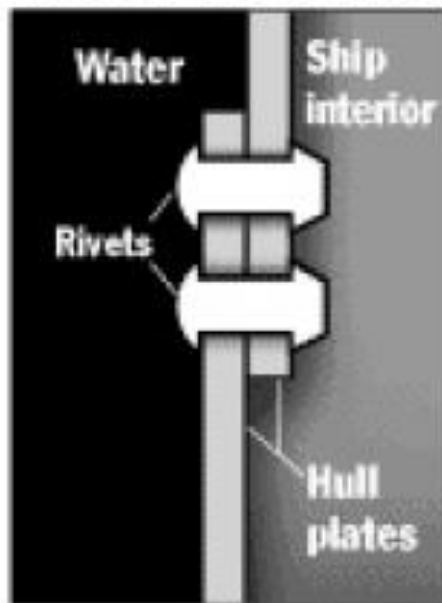
# Microstructure of Titanic Rivet

- Orientation of Fe-silicate stringers is perpendicular to loading axis at the end of the rivet
  - Much lower strength and inferior resistance to crack propagation



# TITANIC- ABRIL, 1912

## HOW THE RIVETS MAY HAVE CONTRIBUTED TO DISASTER



**1.** The rivets were used to seal the hull plates together, with the hammered end on the exterior.



**2.** Pressure from the iceberg collision may have caused the rivets to pop along some hull plates, causing the seams to open.



**3.** The total area open to the sea may have been no bigger than a closet door, through which 34,000 tons of water seeped.

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

## TITANIC- ABRIL, 1912

**A conclusão final indica que ocorreu uma combinação de fatores que levaram à falha dos rebites:**

- **“A natureza do impacto não usual”;**
- **Presença de grande quantidade de silicatos em sua estrutura.**

# **APÓS TITANIC**

**Desenvolvimento da Mecânica de Fratura**

**Desenvolvimento dos ensaio de ultrassom**

O desenvolvimento dos **ensaios não destrutivos** foi muito importante porque **são de grande auxílio em análise de falhas.**

- **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)



# 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.*



## HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

- Desenvolvimento do **ecobatímetro**, motivado pelo desastre do Titanic (detecção de icebergs) e impulsionado pela Primeira Guerra Mundial, do **tubo de raios catódicos** e do radar, desenvolvidos nas décadas de 30 e 40;
- **Sokolov**, na Rússia em **1929**, quem primeiro registrou experiências usando **cristais de quartzo** para introduzir vibrações **ultrassônicas** em materiais;
- O **primeiro** aparelho de **ultrassom** foi desenvolvido em **1942** por Sproule;
- Firestone (EUA) e Krautkramer (Alemanha);
- **Brasil-1979!**

# INÍCIO DE RELATOS DE ACIDENTES AÉREOS: 1917



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

● **Navios Liberty (1943):**

***2700 Navios Construídos***

***400 Navios com Falhas***

***90 Navios com Falhas Severas***

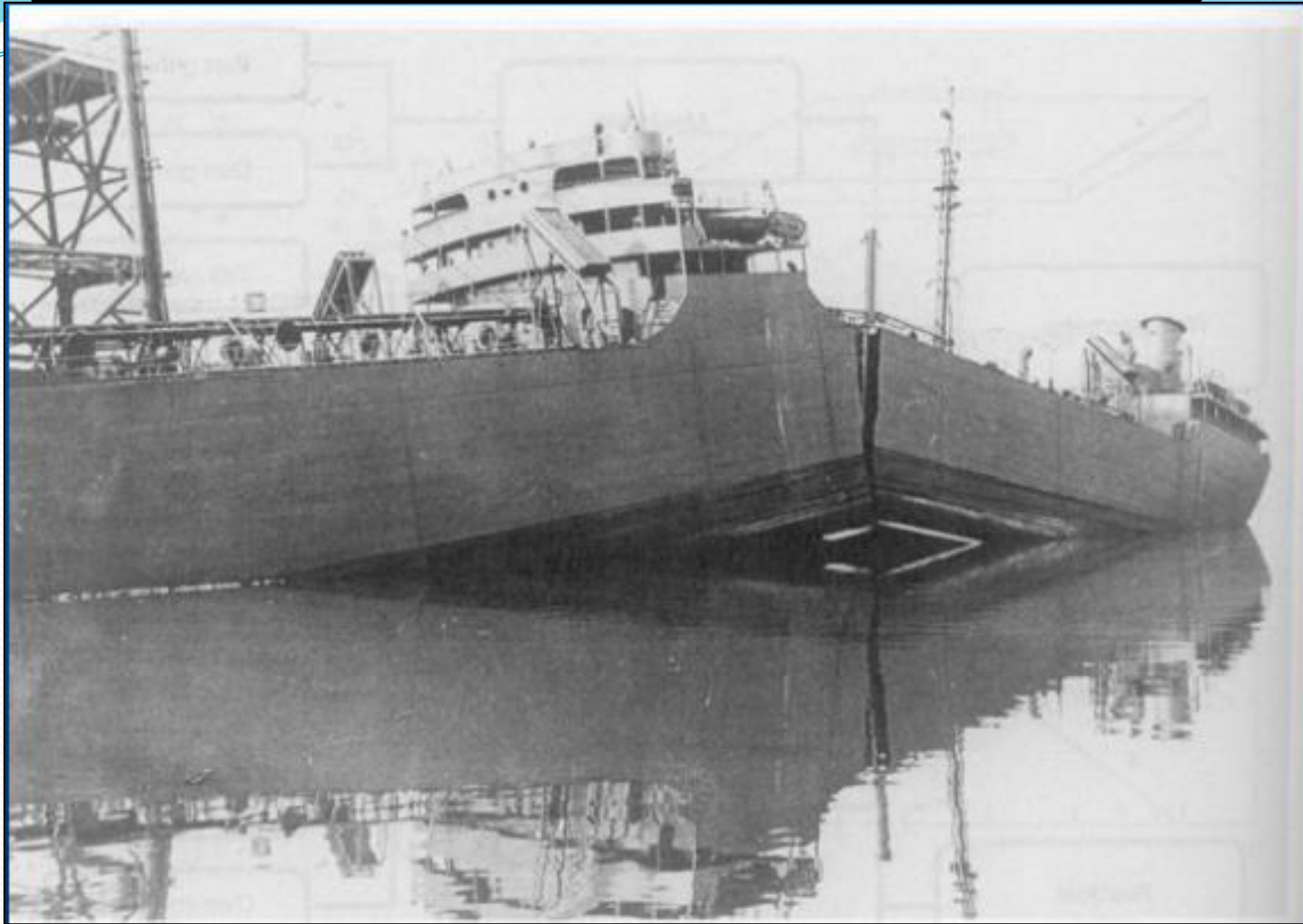
***20 Navios com Falhas Catastróficas***

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.**

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS



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

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS AVIÕES DE HAVILLAND-1954

## Aviões COMET



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

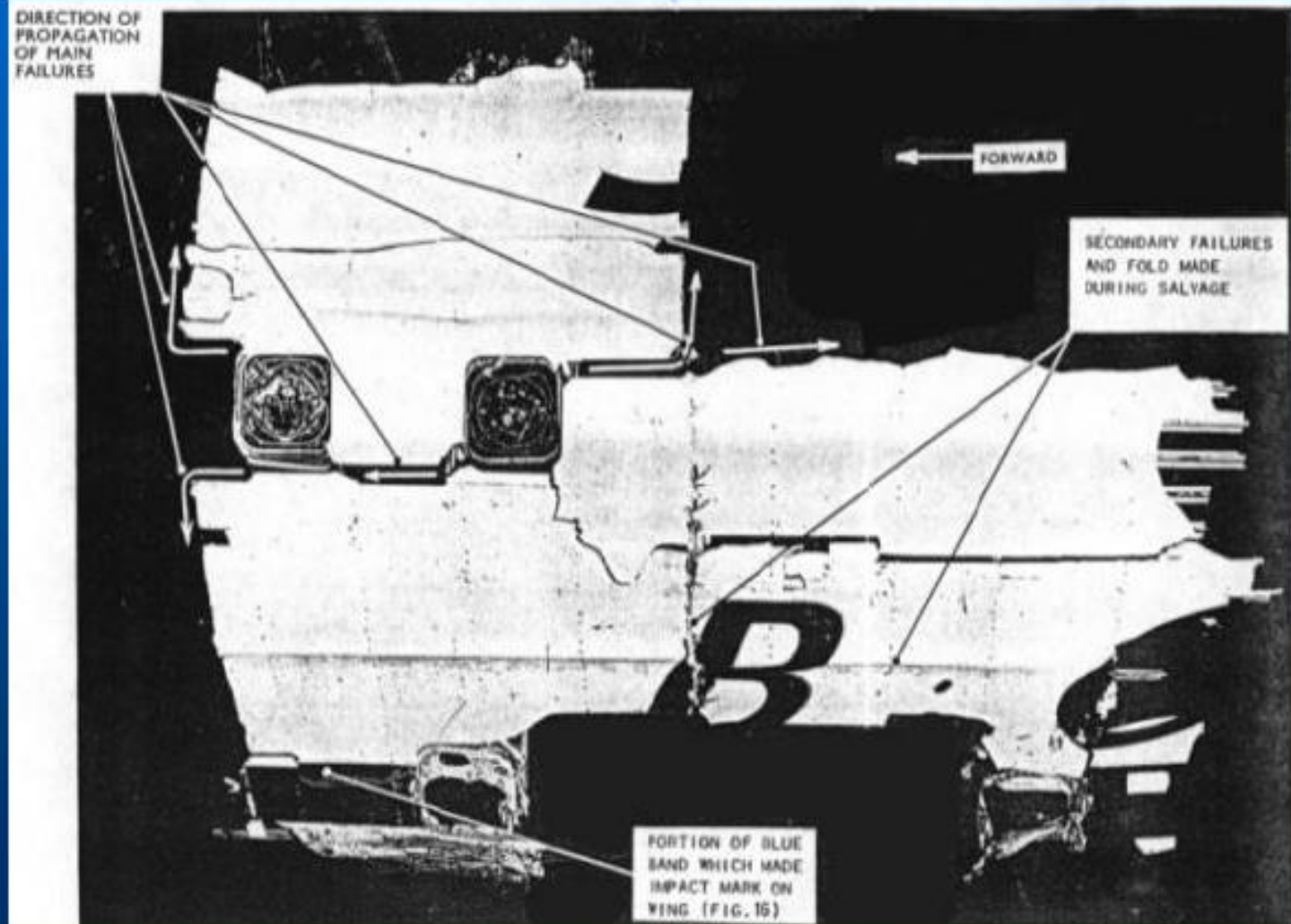
## **JATOS COMET (De Havilland)**

**Após teste em container pressurizado, com água.**



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# 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)

Prof.Dr. José

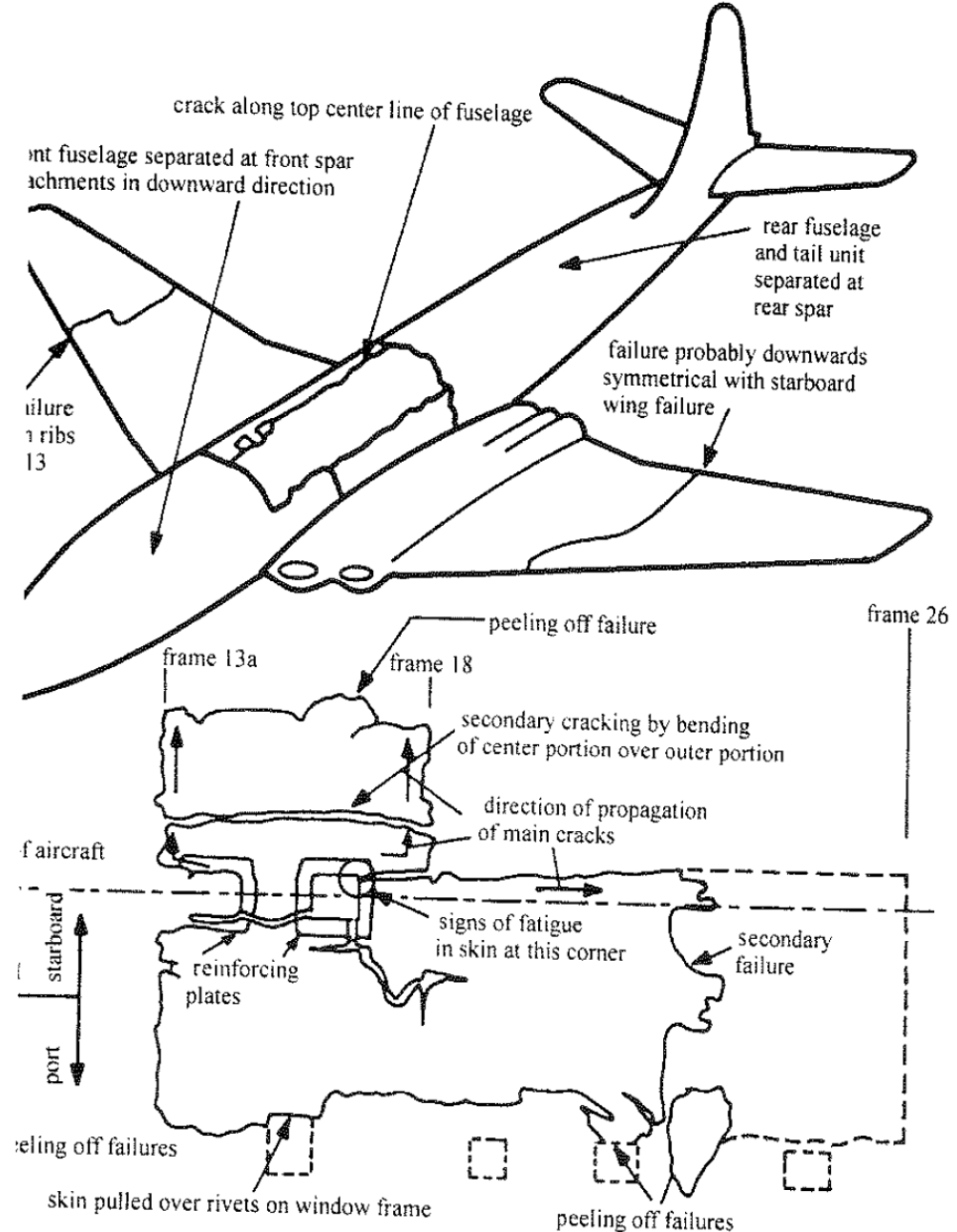


Fig. 1.1. Schematic diagram illustrating the location of fatigue cracks in a failed Comet airplane. (After Petroski, 1996.)



# A Tribute to Dr. Dennis Ryder (1926-2002): A Pioneer in Failure Analysis, Fractography, and Fatigue



first article in the *ASM Metals Handbook*, Vol. 11, *Failure Analysis and Prevention*, on “General Practice in Failure Analysis.”<sup>[1]</sup>

Havilland Comet aircraft.

*Dennis Ryder as headmaster outside Howell's school  
in Denbigh in North Wales in 1991*

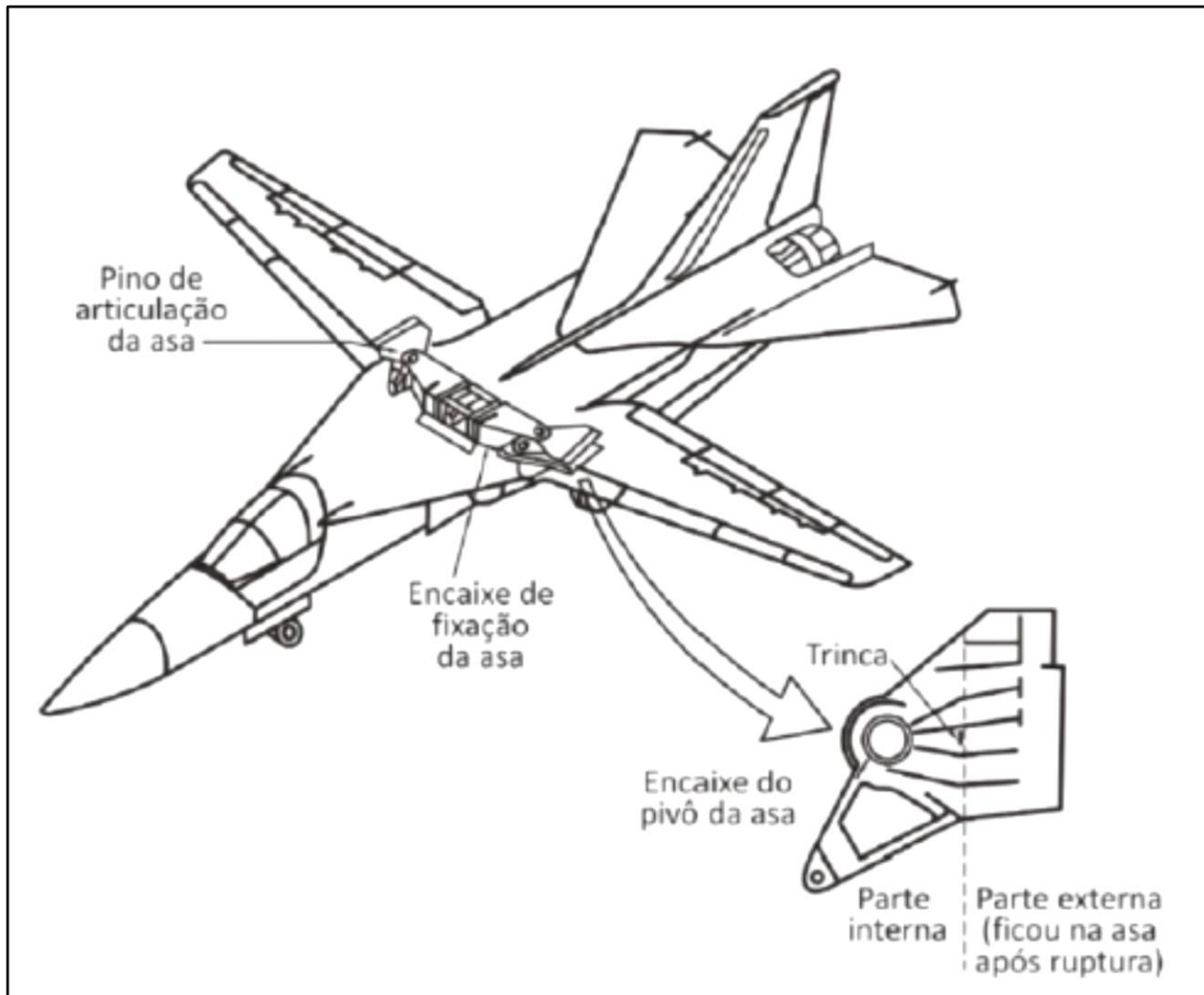
**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

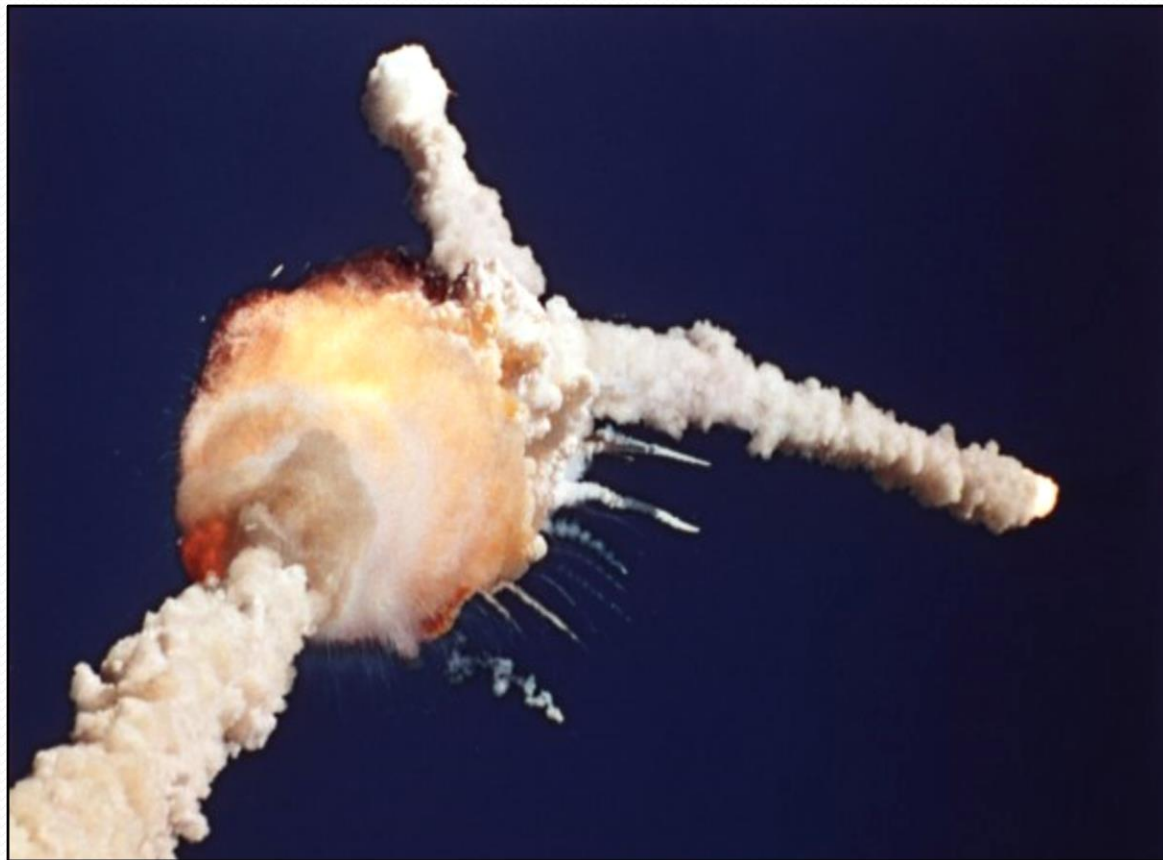
- **Fratura** de um rotor de turbina a vapor de um gerador de 165MW, operando a 3600 rpm , causando a **destruição da usina de Ridgeland, Chicago, (1954)**;
- **Explosão** de um rotor , produzido para a Arizona Public Service Co., durante testes;

A partir de então , a desgaseificação foi incluída no processo de elaboração de aços Ni – Mo – V para rotores que são aços mais susceptíveis a **fragilização por hidrogênio**.

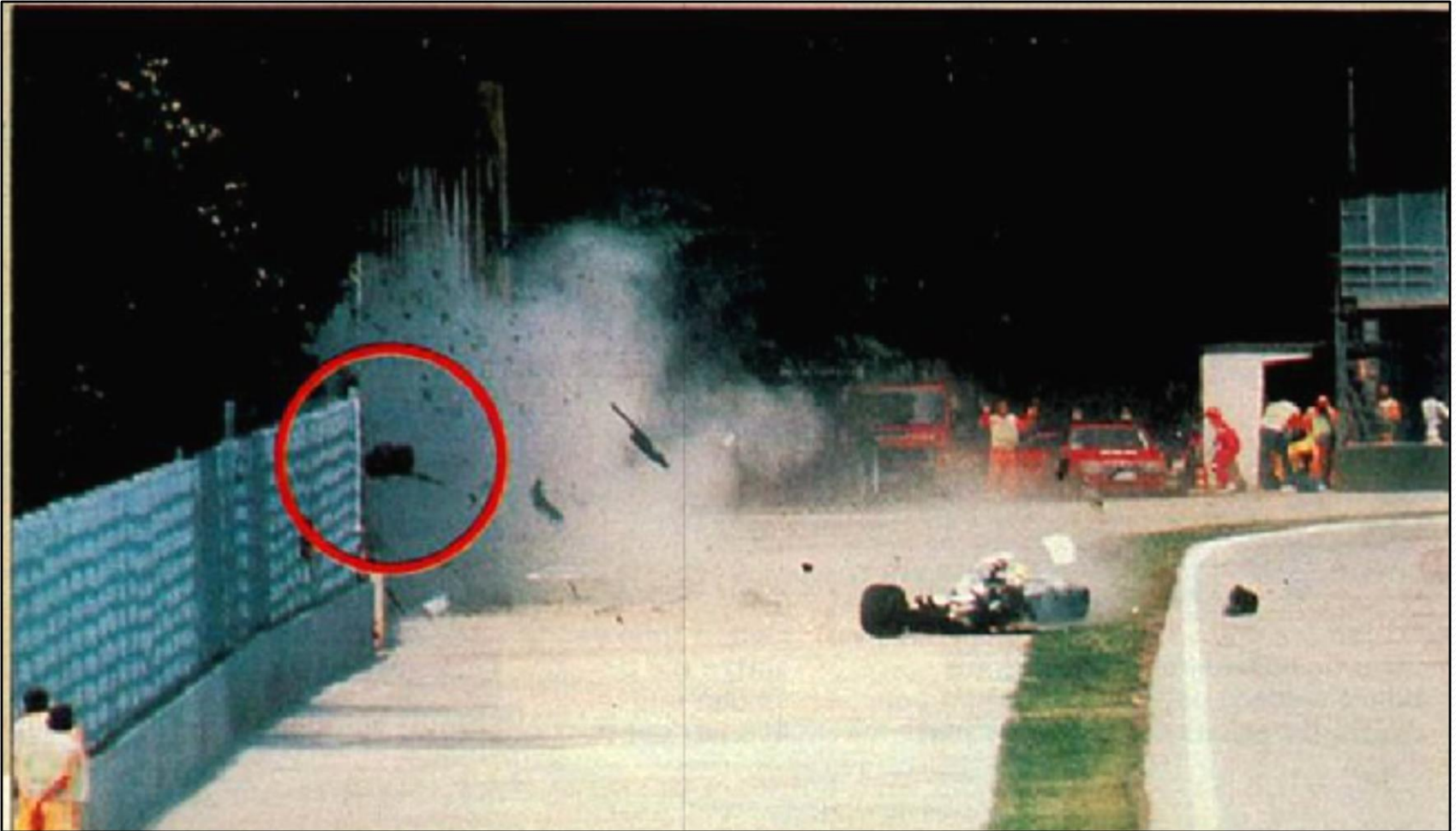
**Acidente com um caça F-111 com apenas 104 horas de voo (1969)- ano que o homem pisou na Lua –deflagrou o desenvolvimento de projetos com tolerância ao dano pela Força Aérea Americana- peça com defeito de forjamento, na asa.**



**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.**

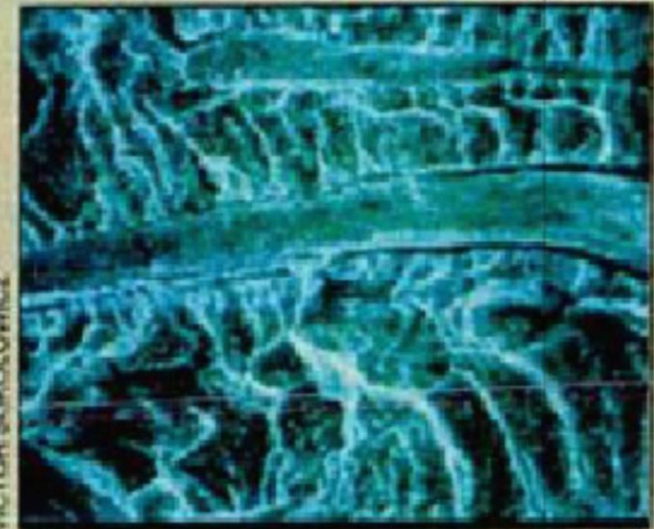


**Acidente com Ayrton Senna na fórmula 1, em 1994, causado, ao que tudo indica, pela fratura por fadiga de uma emenda soldada da barra de direção.**

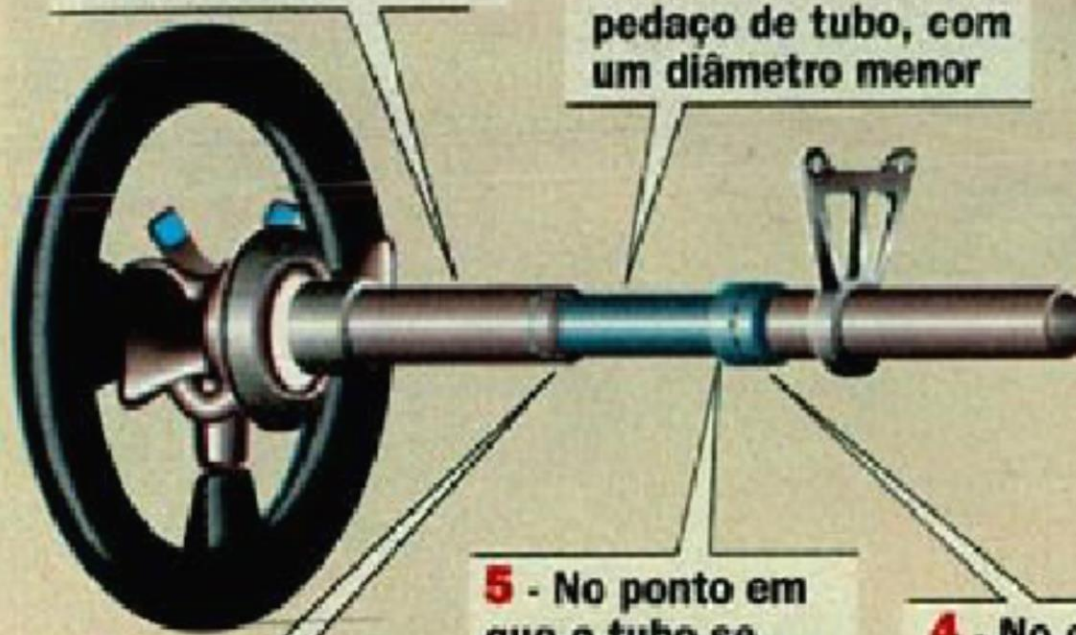


**1** - A pedido de Senna, a coluna de direção foi aumentada em cerca de 5 centímetros

**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

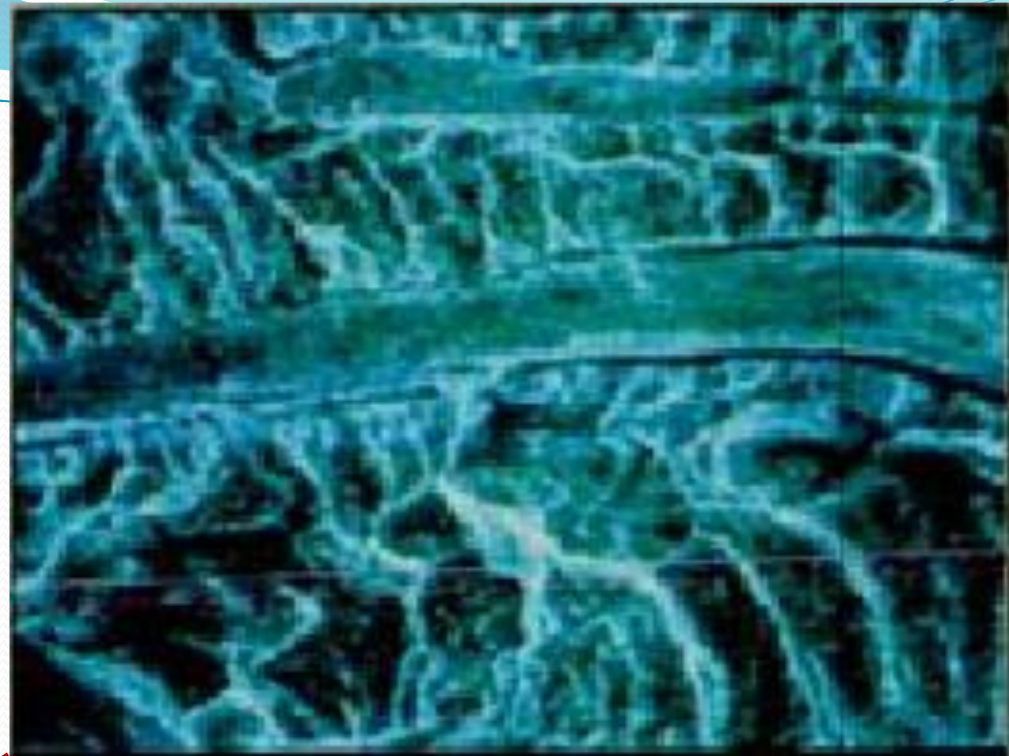
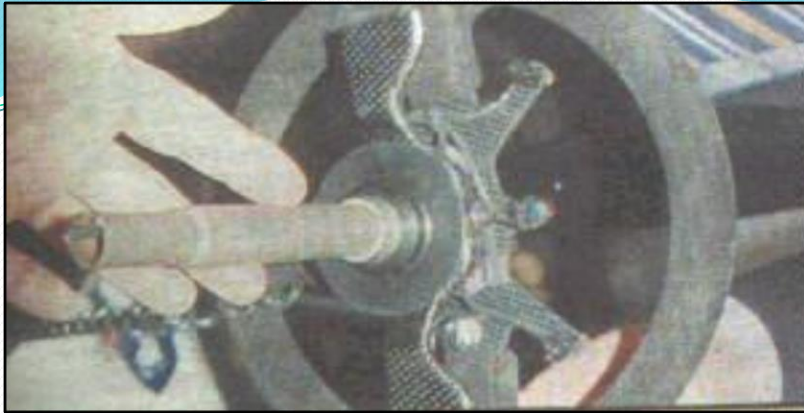


**3** - Em um dos lados da emenda o tubo é soldado por dentro da coluna

**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**

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS - BRASIL

O problema da qualidade dos trilhos†

Ary F. Torres, 1933

Ruptura por fadiga de eixos de tânderes e estradas de ferro†

Hubertus Colpaert, 1936

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



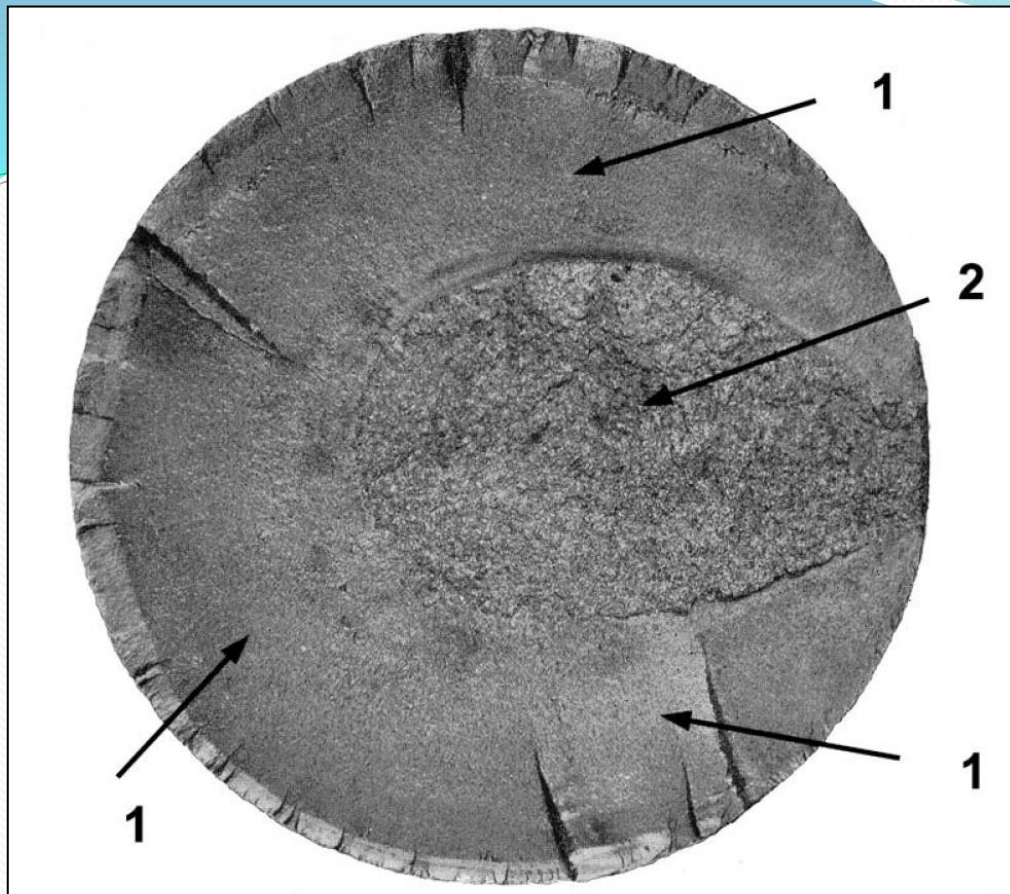


Figura 1. Aspecto da fratura do eixo de t tender. Setas 1 apresentam região lisa, de fratura estável, e seta 2 a região de fratura instável.

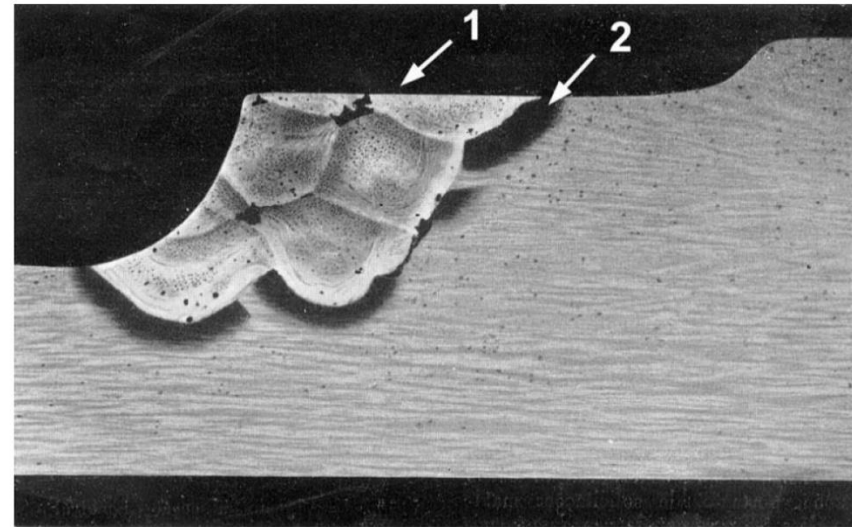


Figura 4. Zona restaurada do eixo – orlas restauradas pela solda (seta 1). Halo cinzento (seta 2) mostra a zona afetada termicamente no metal base. Reativo de iodo.

Aliás, em caso análogo estudado em laboratório estrangeiro, a solda foi dada como causa de ruptura por fadiga<sup>1</sup>. Posteriormente aos estudos feitos no

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



**FIM**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**