

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),
doutoranda, monitora do PAE;
 - **José Benedito Marcomini** (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

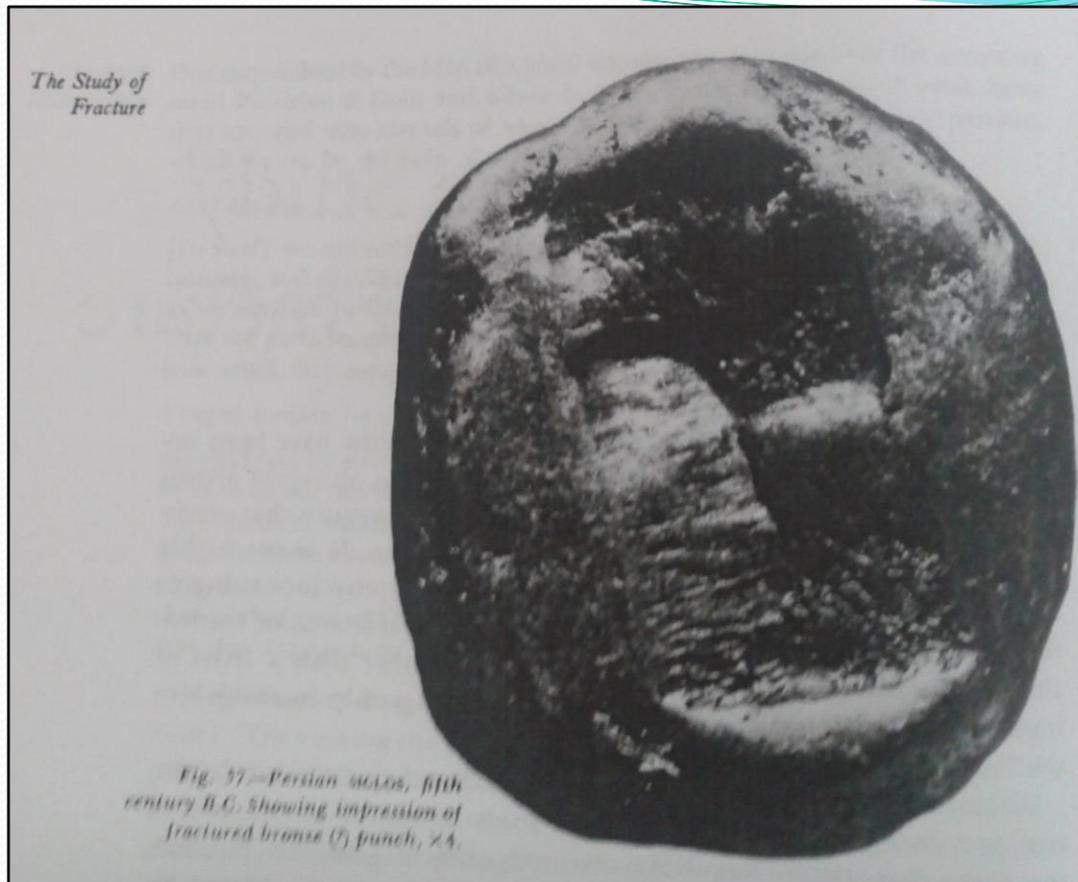
PRIMÓRDIOS

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/>

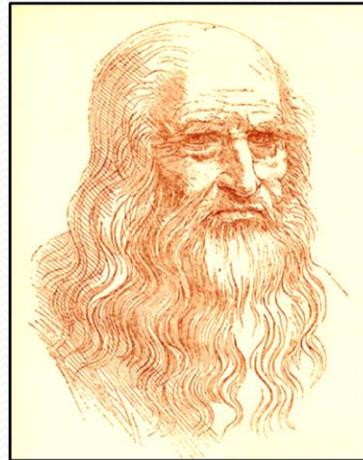


IMPRESSÃO DA PARTE POSTERIOR DE UM SIGLOS PÉRSA - SÉC.V D.C. –MARCA DO PUNÇÃO DE BRONZE FRATURADO

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

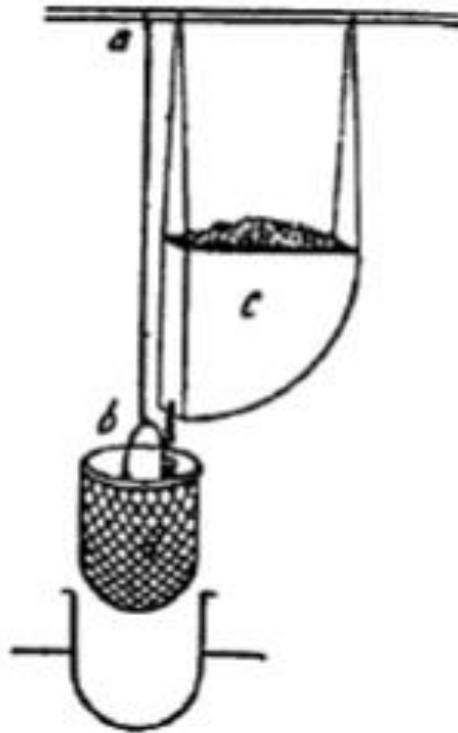
<https://www.flickr.com>



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

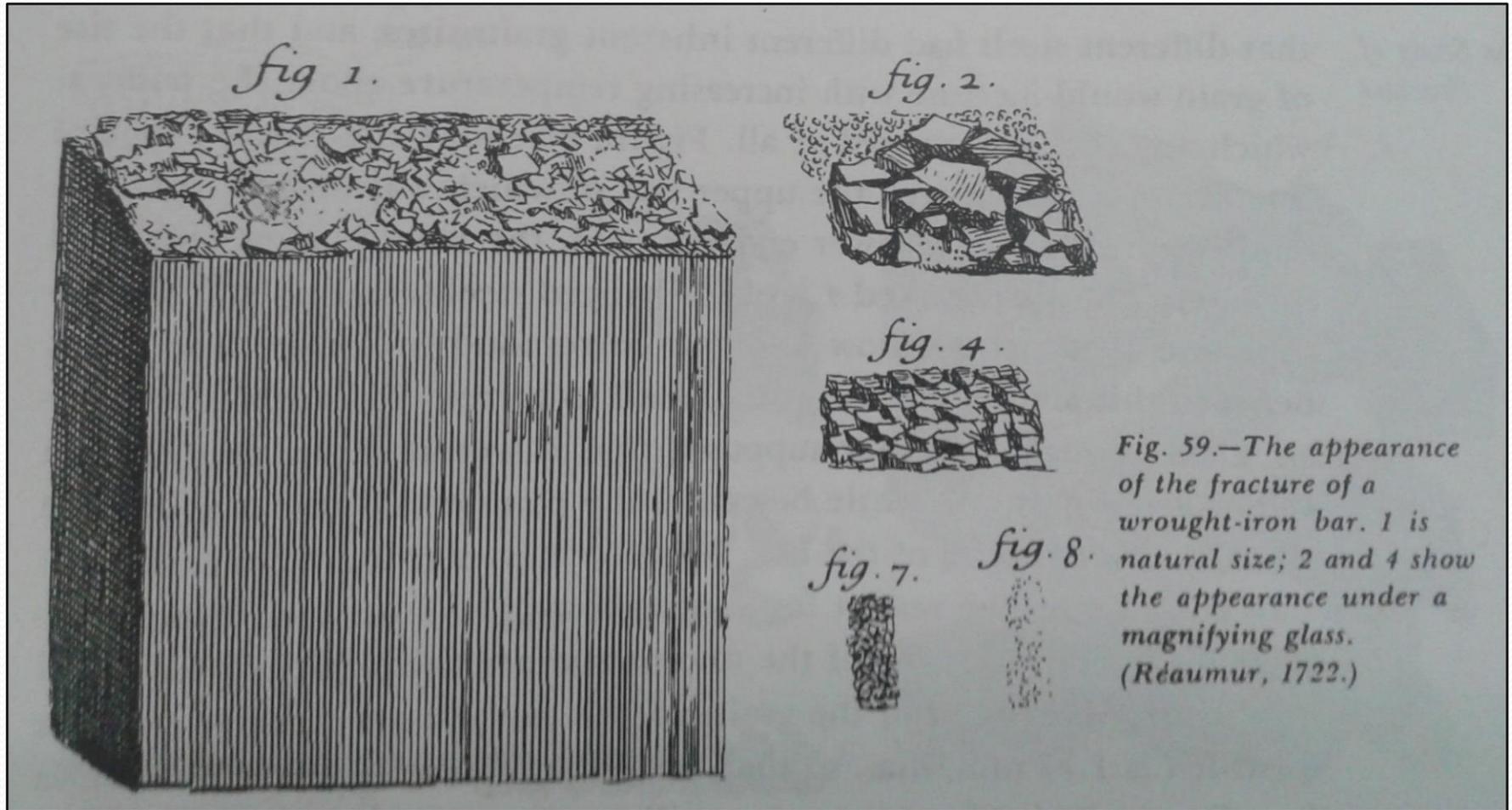
Esquema do ensaio de tração idealizado por Leonardo Da Vinci.

- **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”*

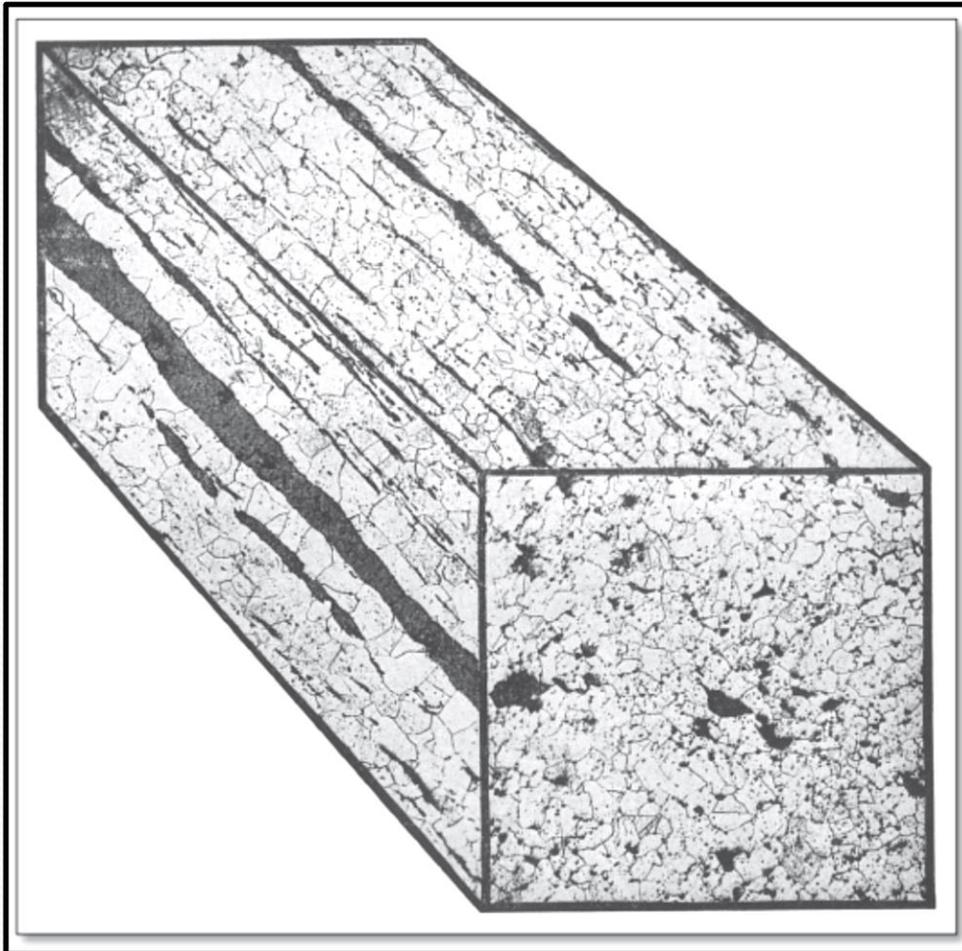
Réaumur foi o primeiro a reconhecer a estrutura de grãos do ferro pudlado através da fratura intergranular;



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

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

Produto: Ferro pudlado (escórias, inclusões).



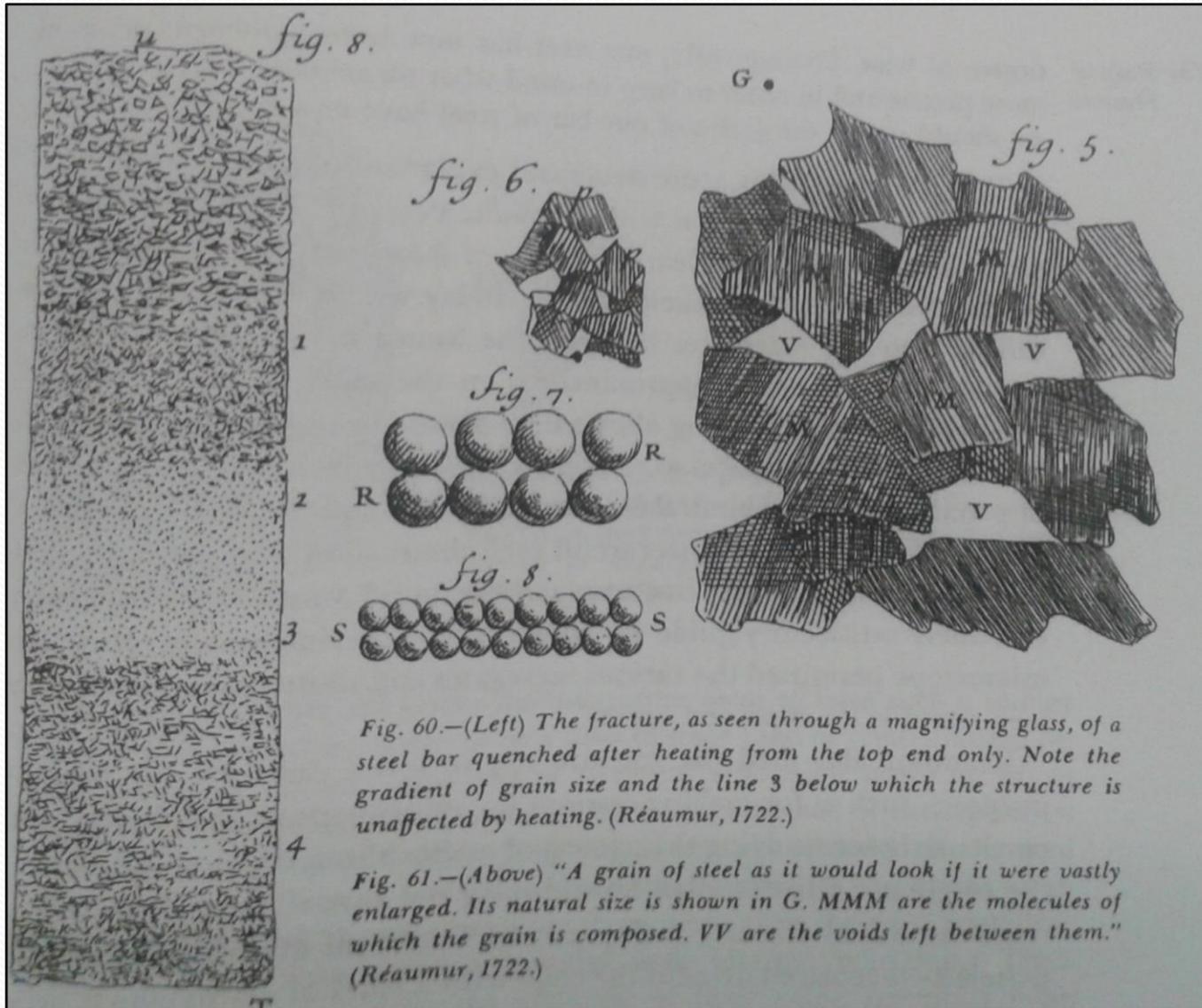
FERRO “PUDLADO”

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)

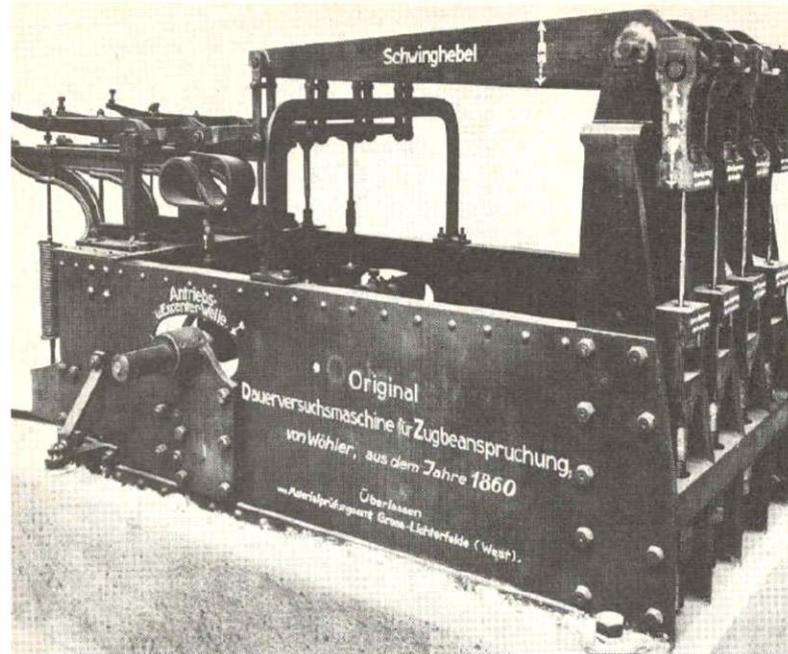
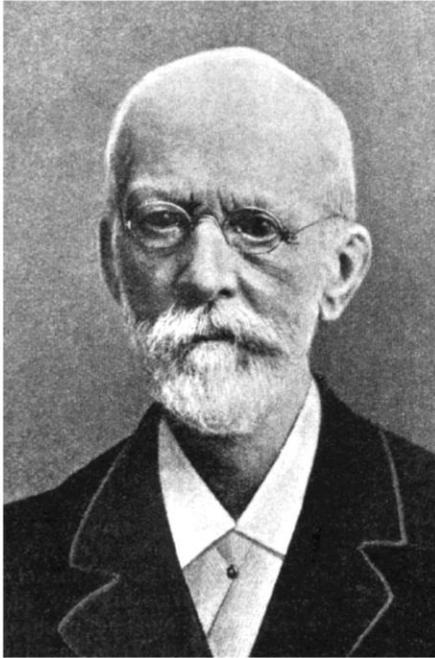
- **Wilhelm August Julius Albert** (1787 – 1846):
Engenheiro de Minas -1º estudo de fadiga de metais em 1829-
testou uma corrente de ferro do guidaste carregando e descarregando a
mesma.

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)



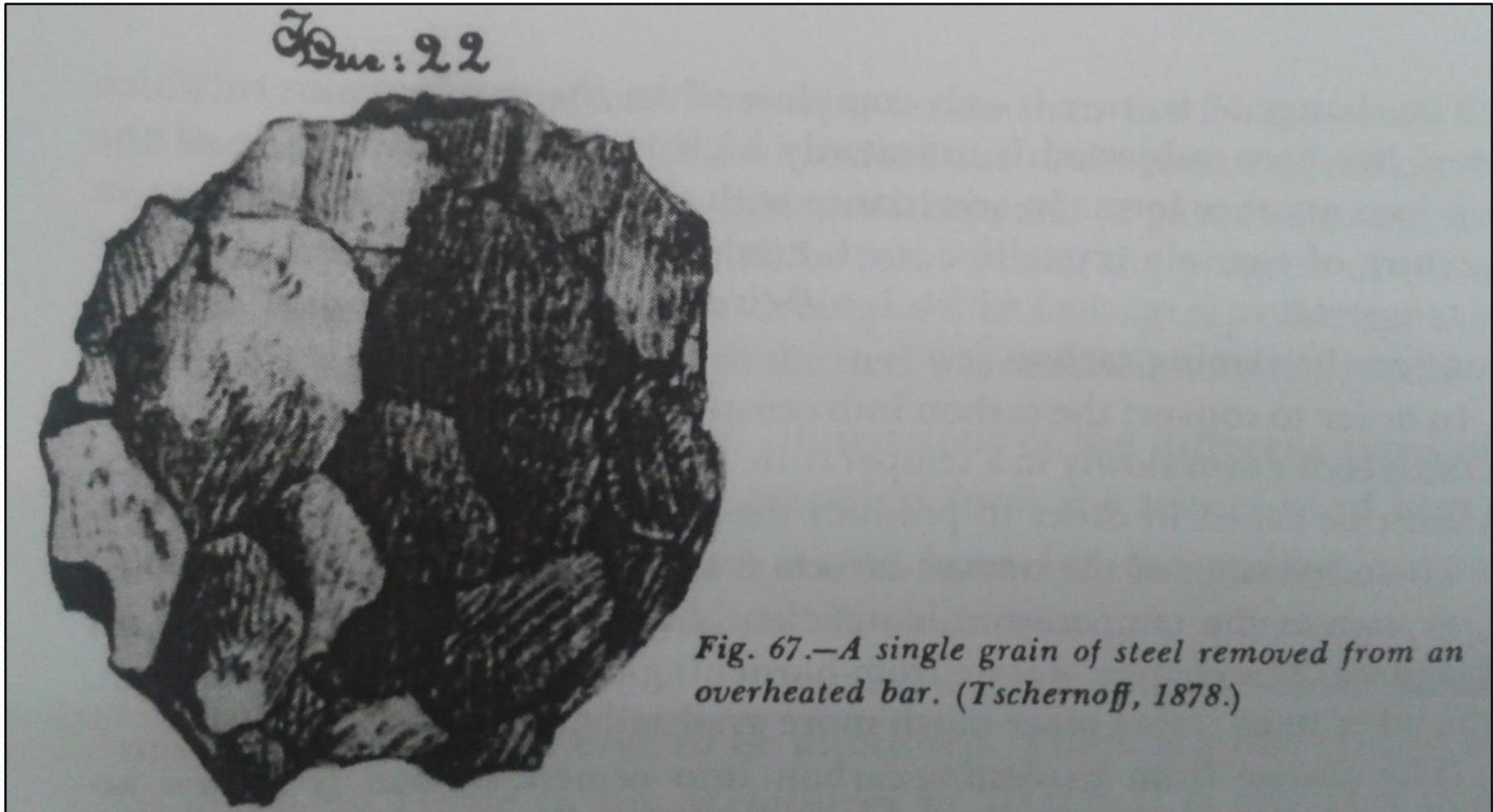
JOHN BRAITHWAITE, Builder of the "Novelty."
(From an engraving in the *Mechanics' Magazine*.)

(wikipedia)

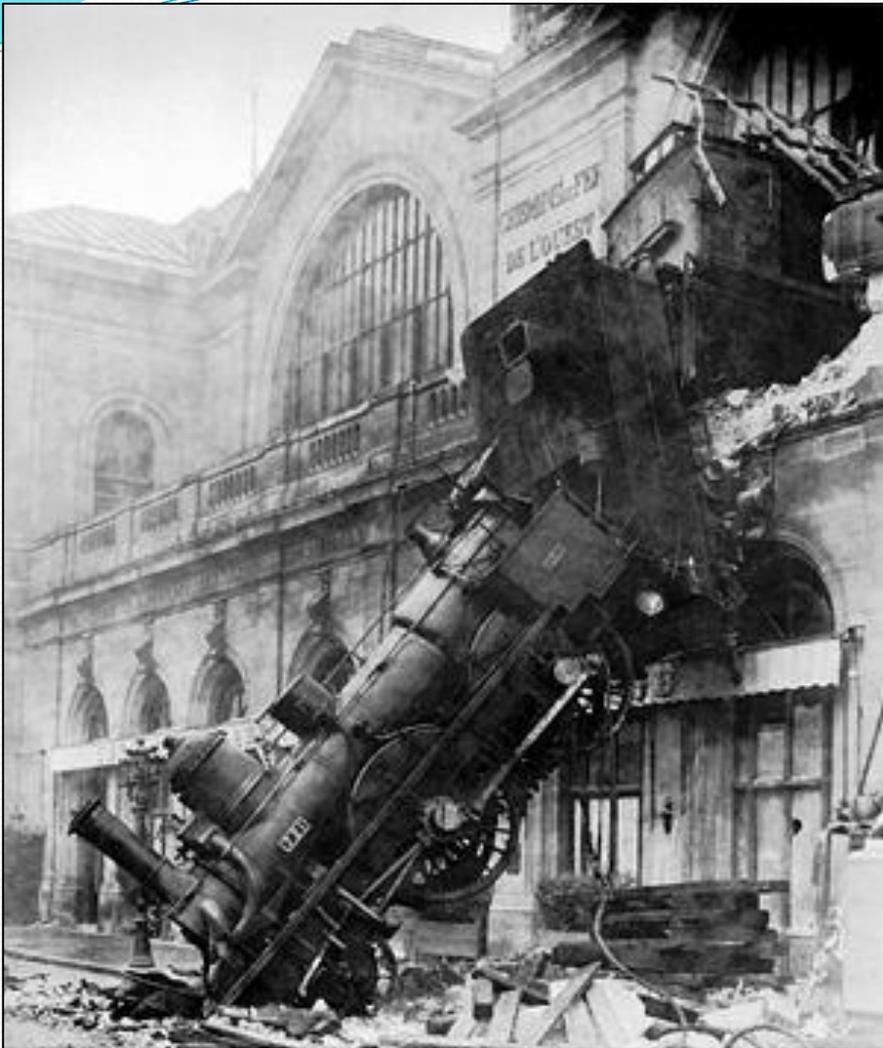
August Wöhler desenvolveu estudos em fadiga entre 1852 e 1869

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

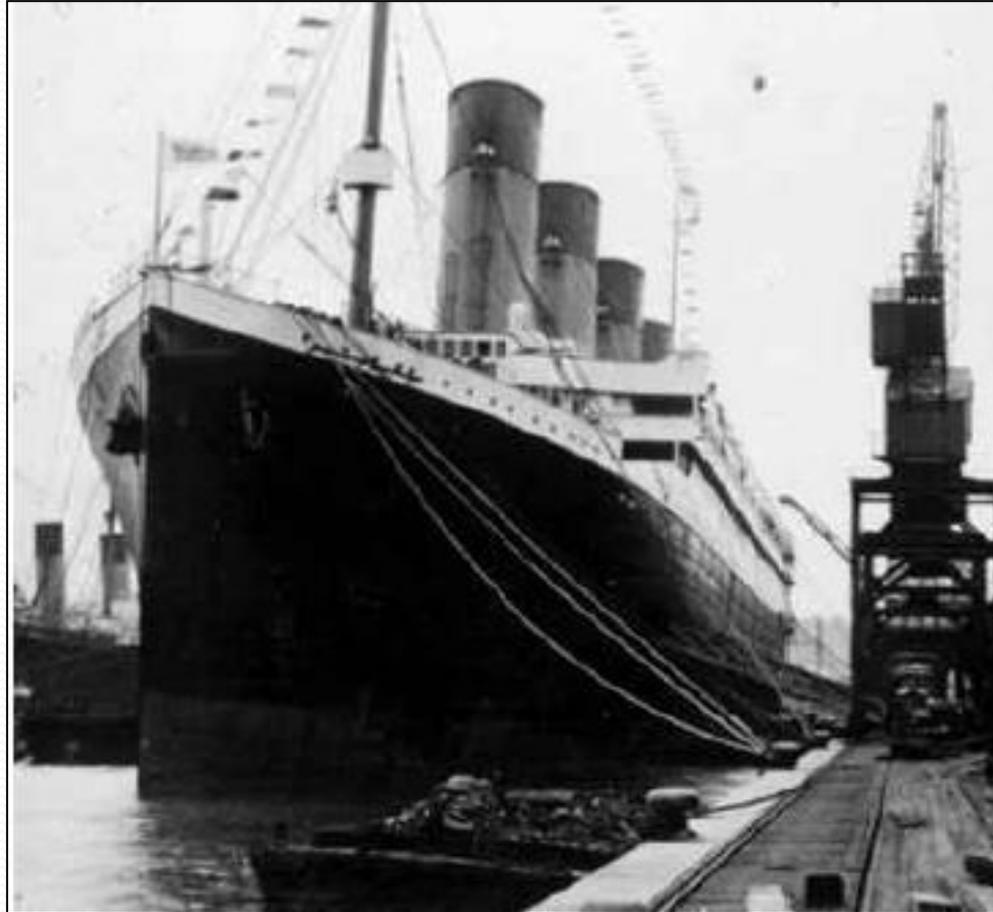


**Acidente de Monteparnasse-
França-1895-falha de freio.
Réplica no museu em
Canela(RS).**

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

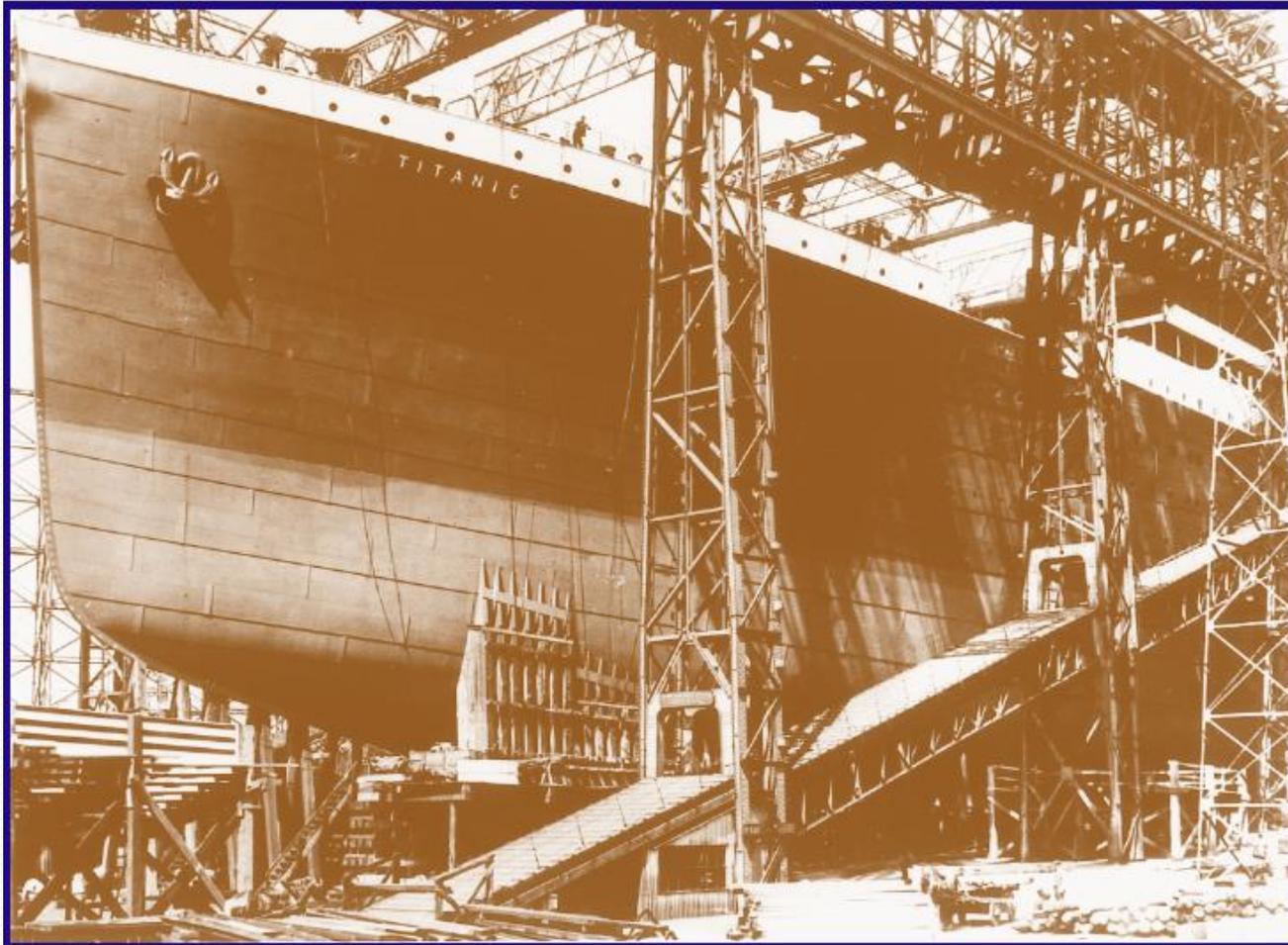
HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

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.

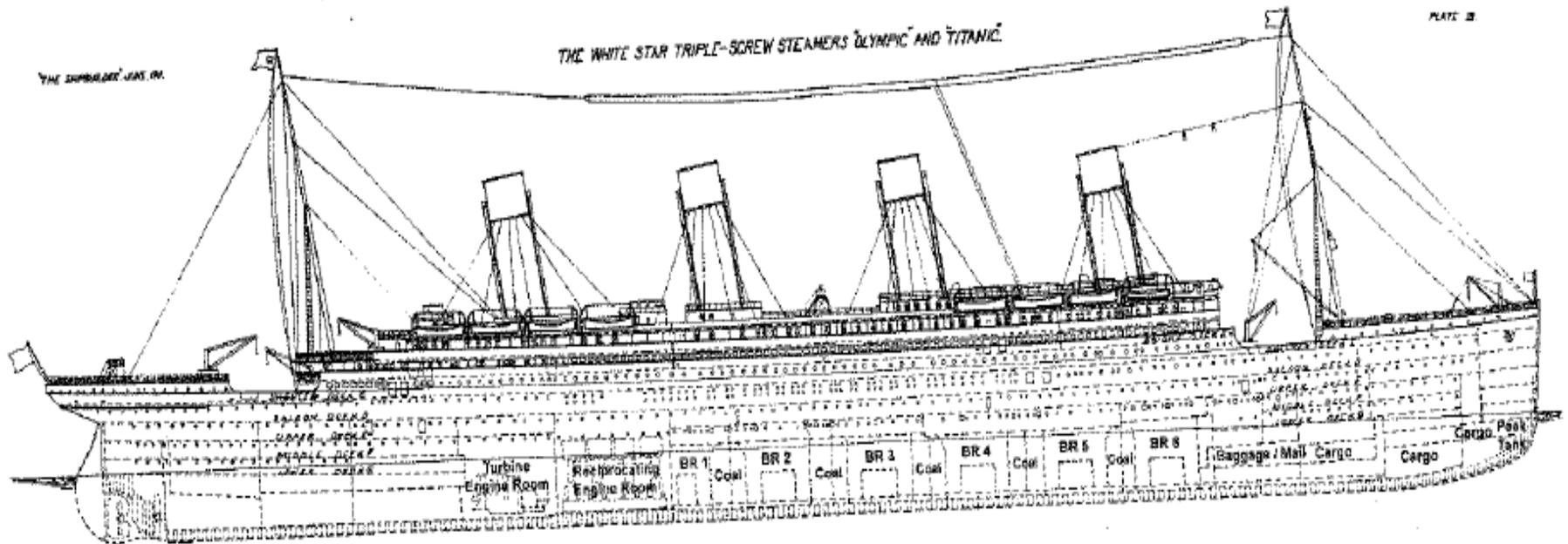
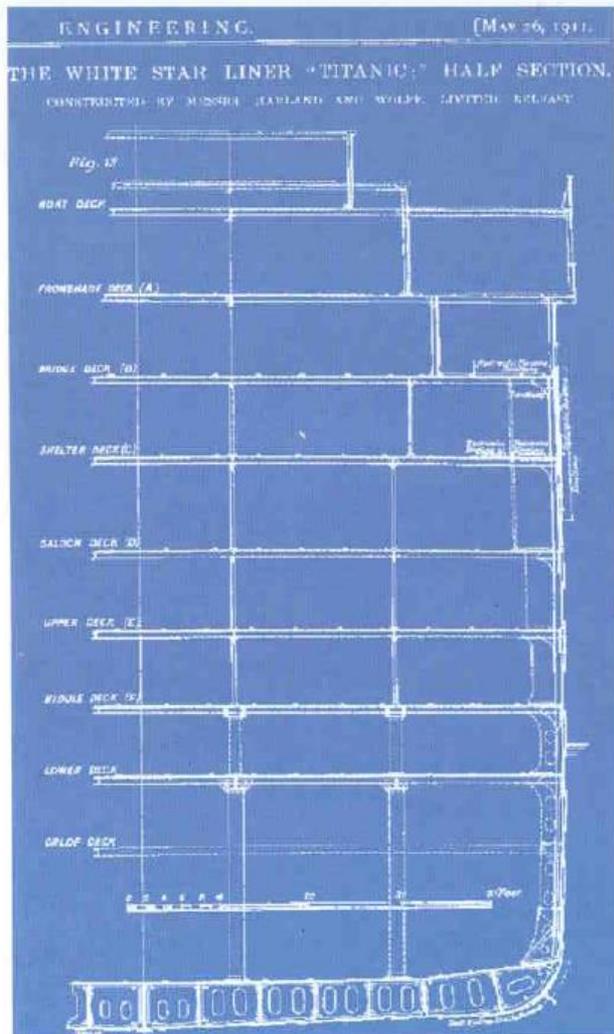


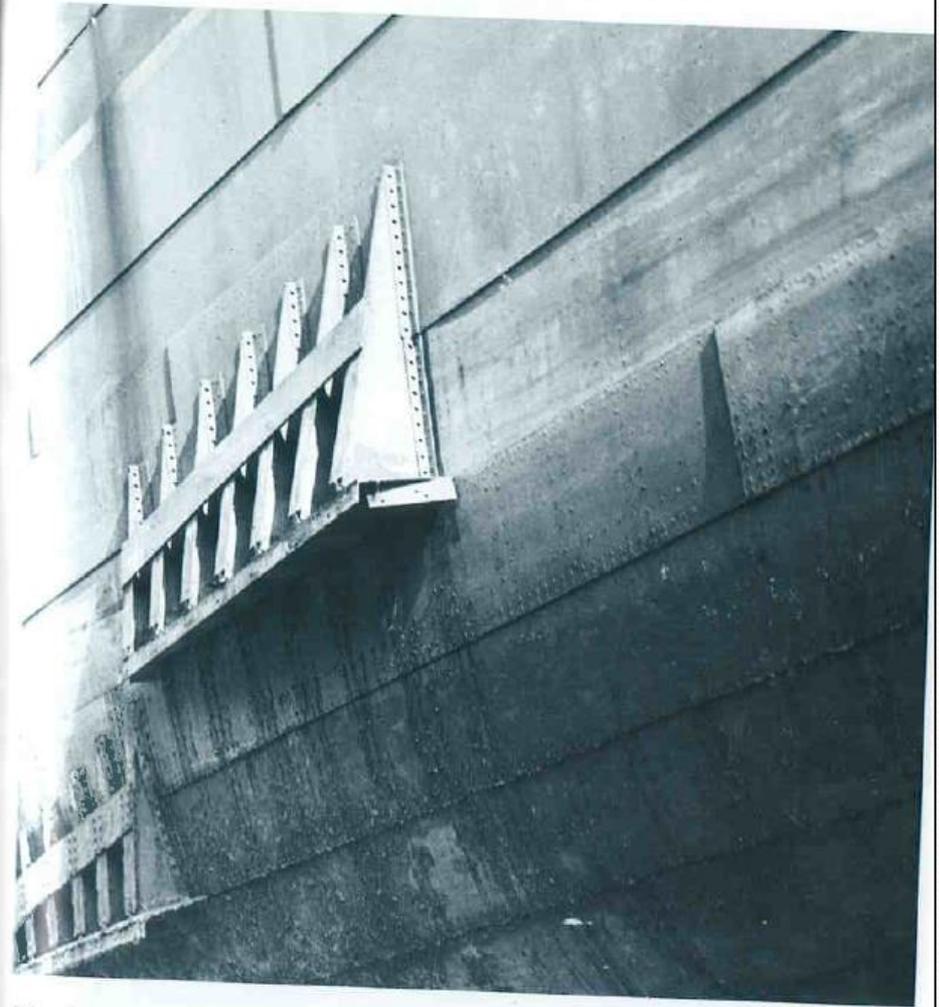
Figure 1.

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*

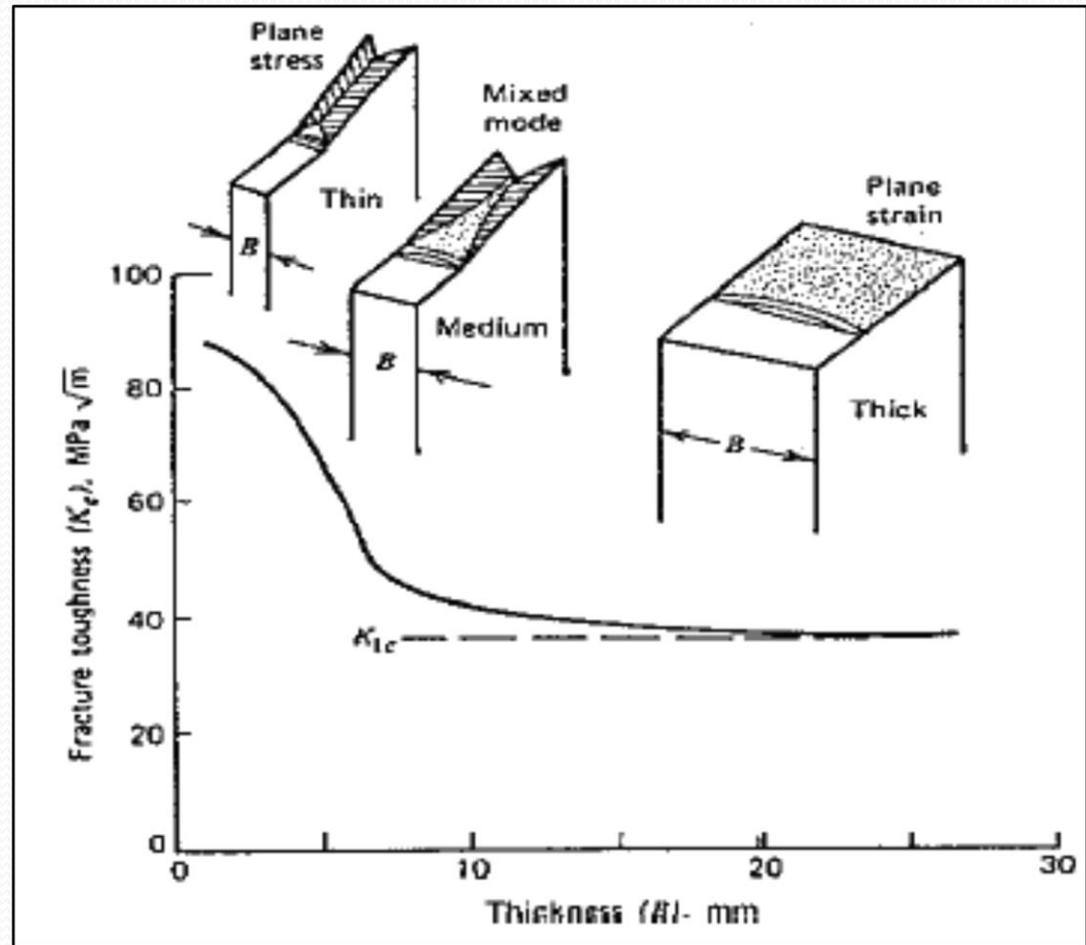
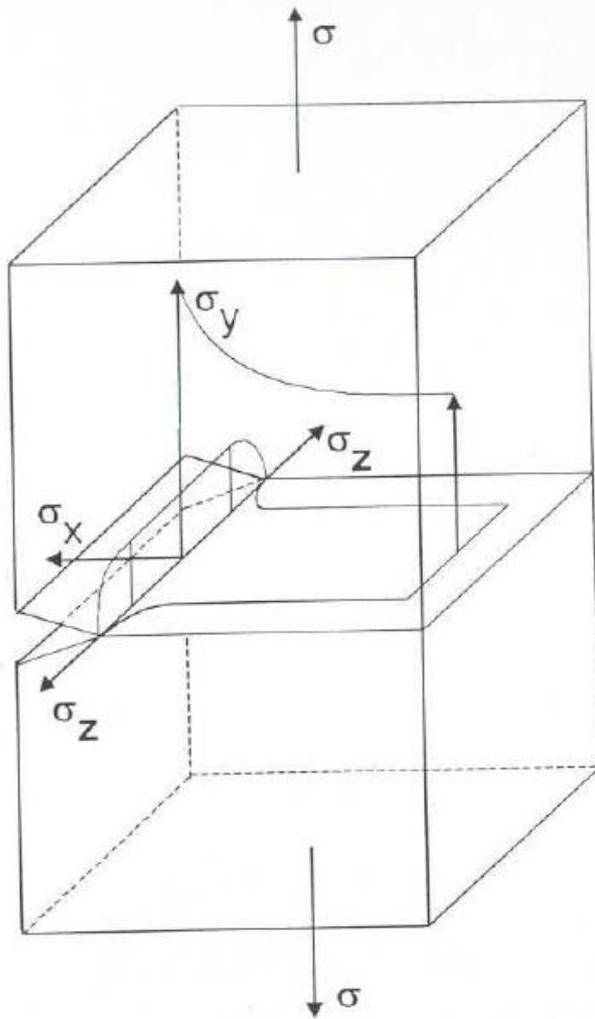


TITANIC- ABRIL, 1912

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



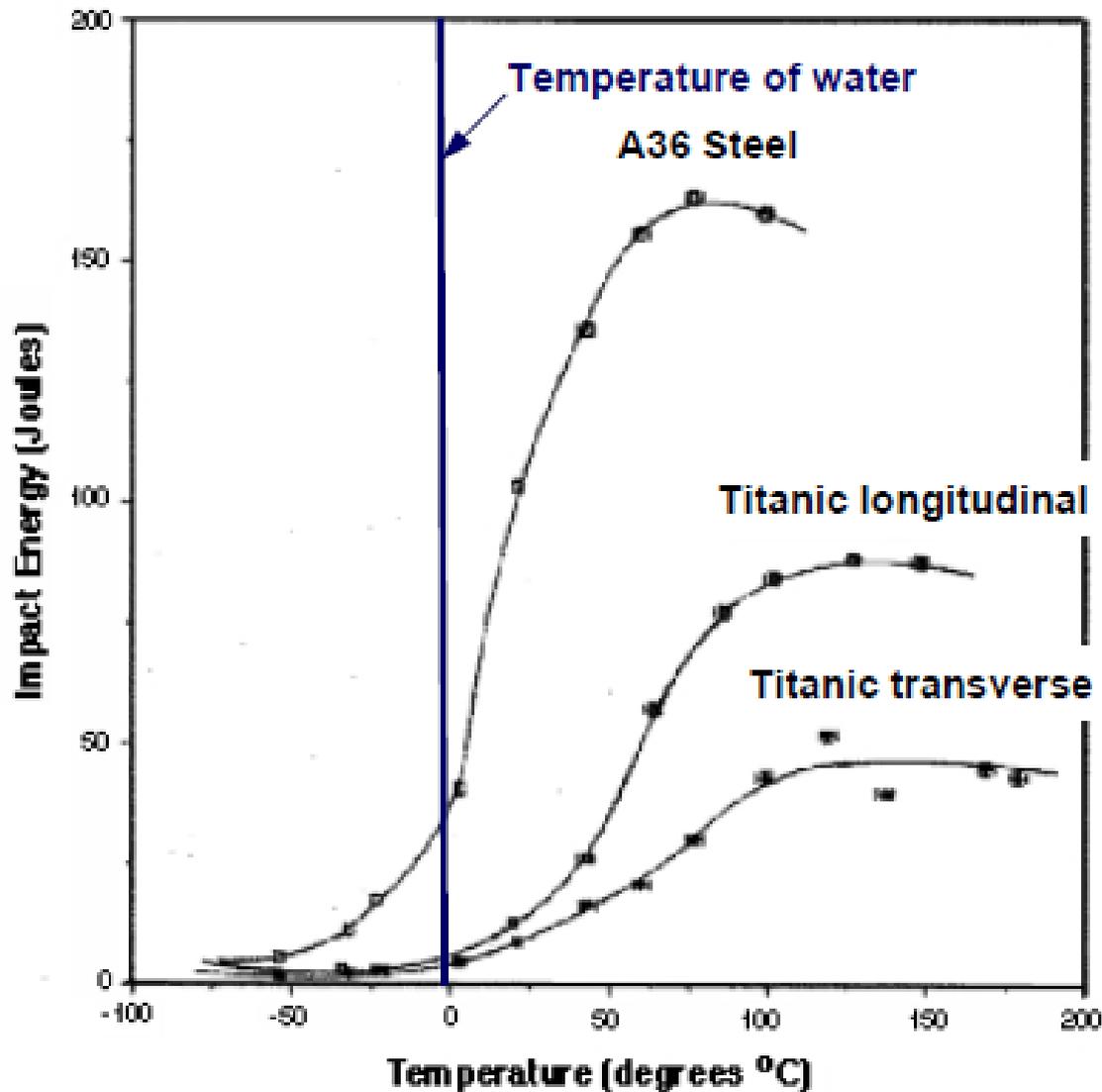
Prof.Dr. José Benedito Marcomini

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

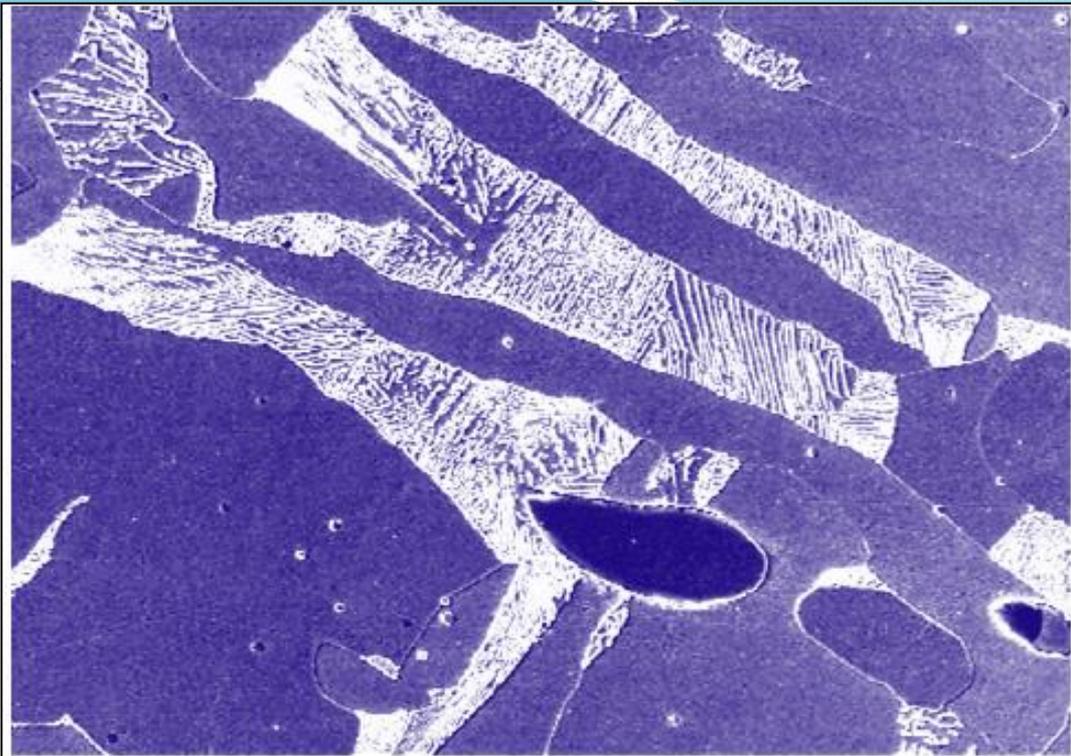
Prof.Dr. José Benedito Marcomini



Temperature of the water was -2°C !!

TITANIC- ABRIL, 1912

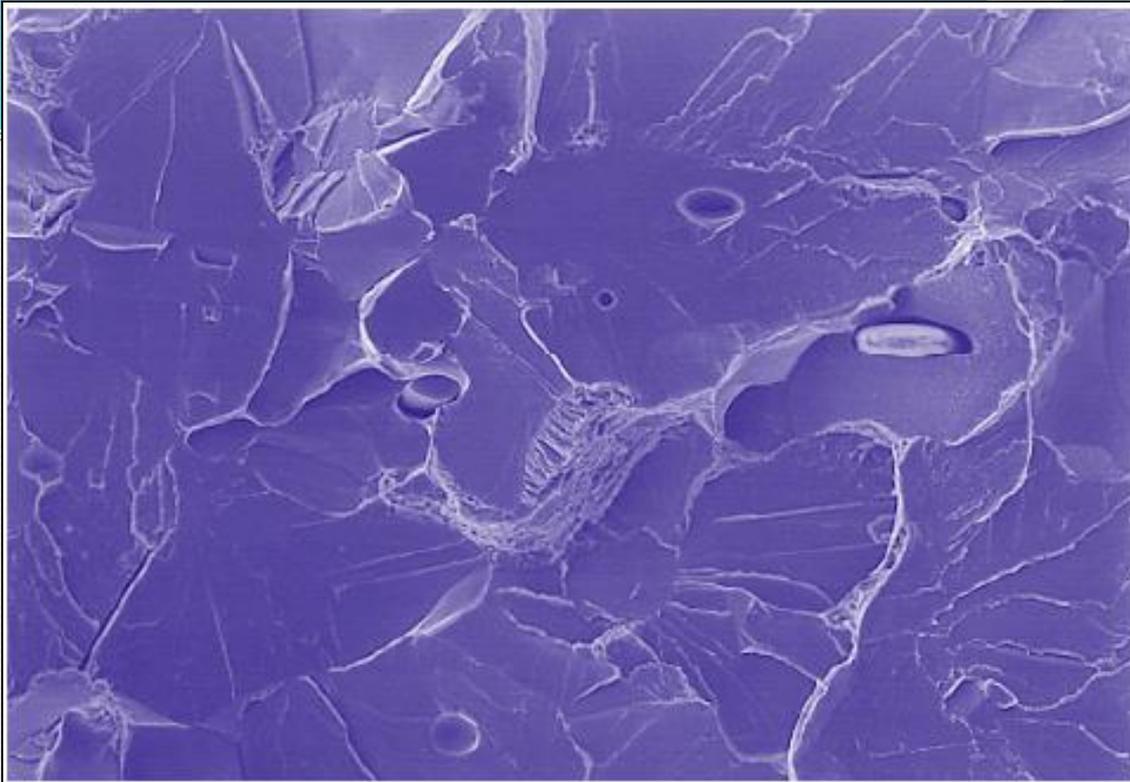
- **Pela composição química, a baixa relação Mn/S leva a formação de mais MnS, o que aumenta a fragilidade e aumenta a temperatura de transição frágil-dúctil;**
- **O aço do Titanic era semi- acalmado, baixa desoxidação, o que fragiliza o aço;**
- **Foram encontrados sulfetos tanto na micrografia da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



10 μm

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

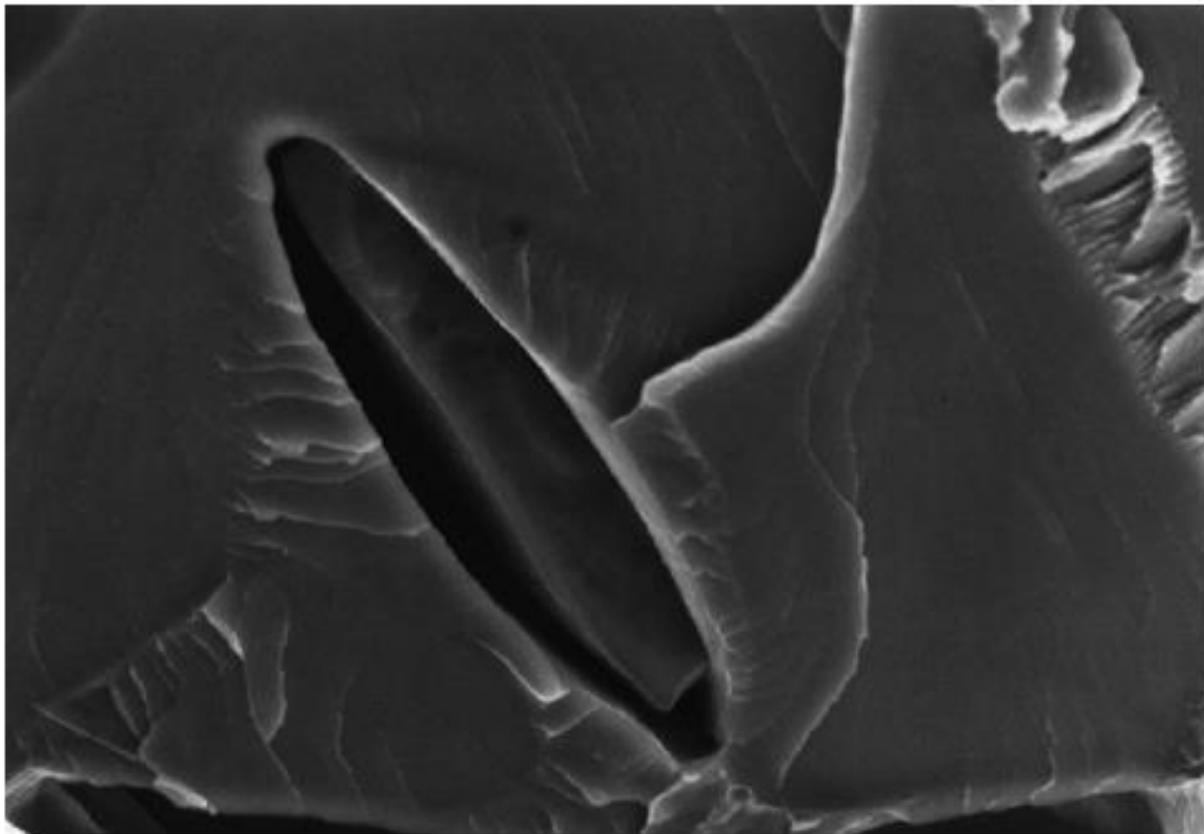


20 μm

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 μm

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

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TITANIC- ABRIL, 1912

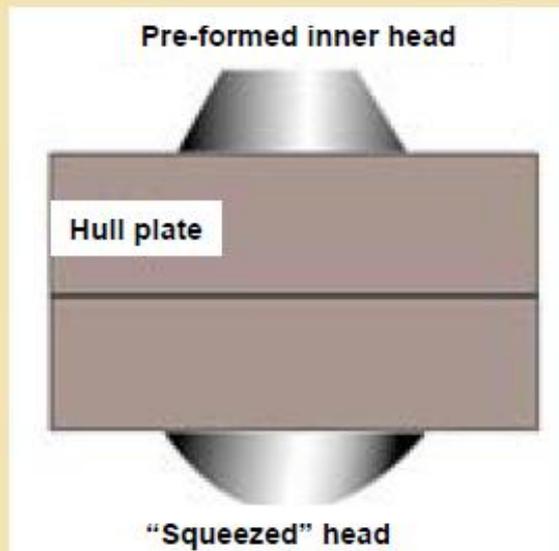
Conclusion #1: The brittle steel theory is wrong.

- **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

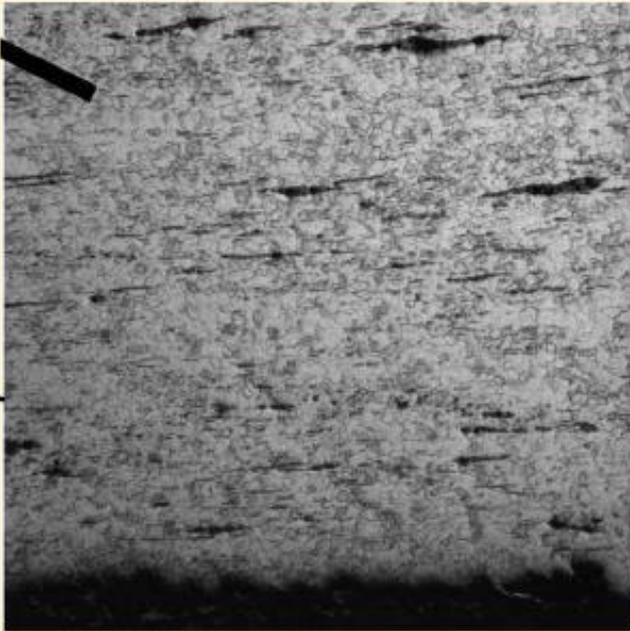
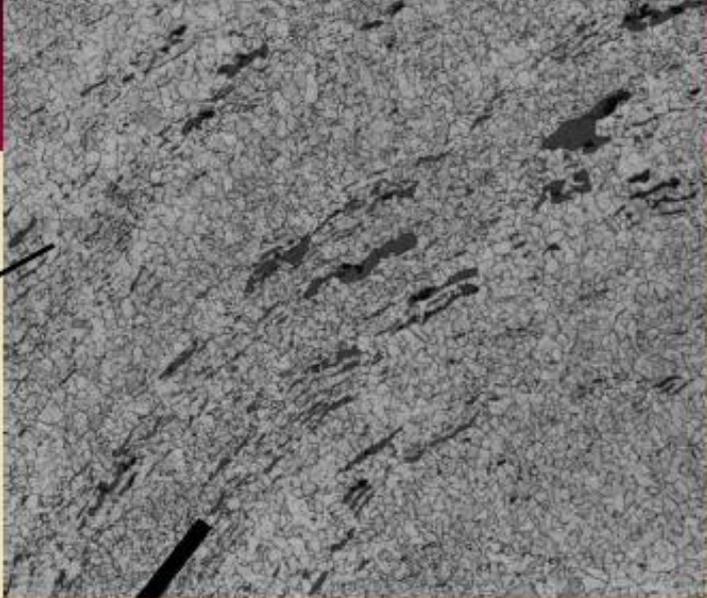
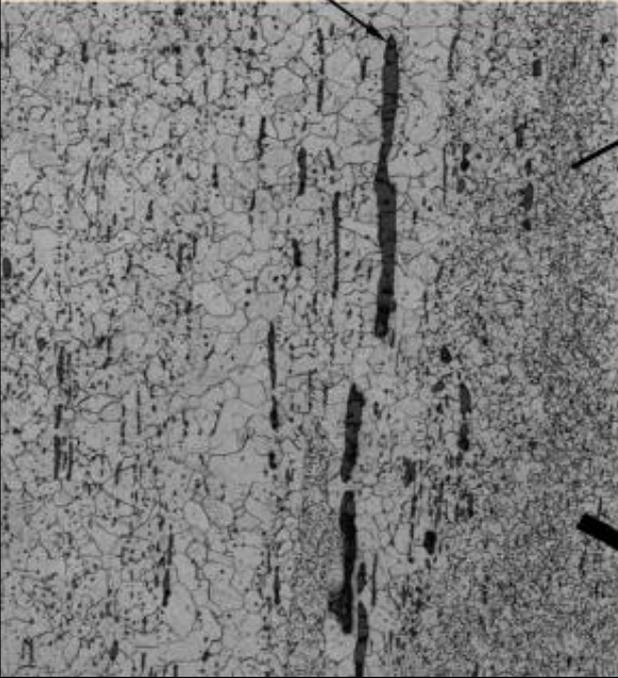
ANÁLISE DOS REBITES



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

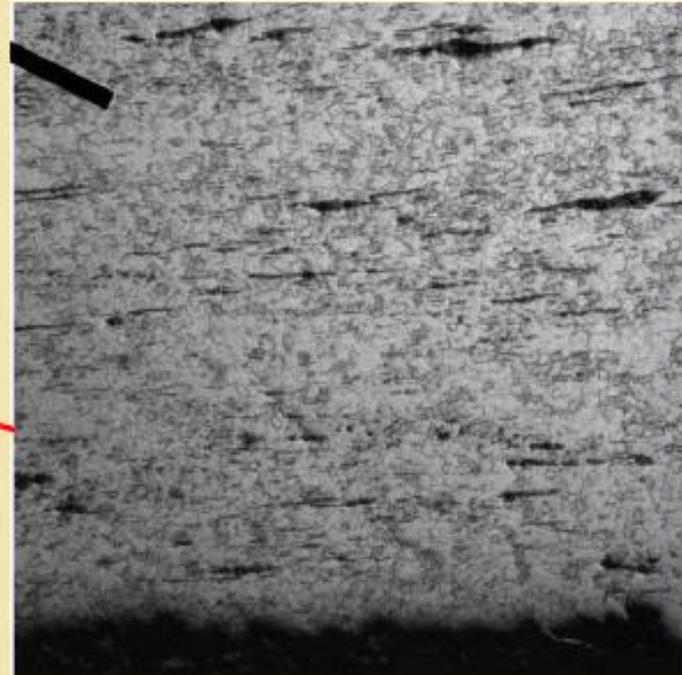
Microstructure of Titanic Rivet

Fe-silicate "stringers"



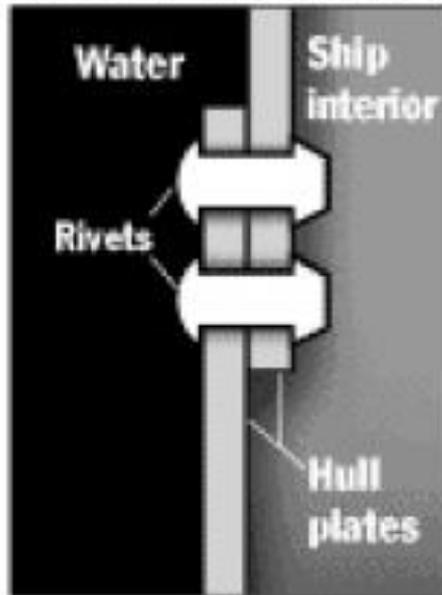
Microstructure of Titanic Rivet

- 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)



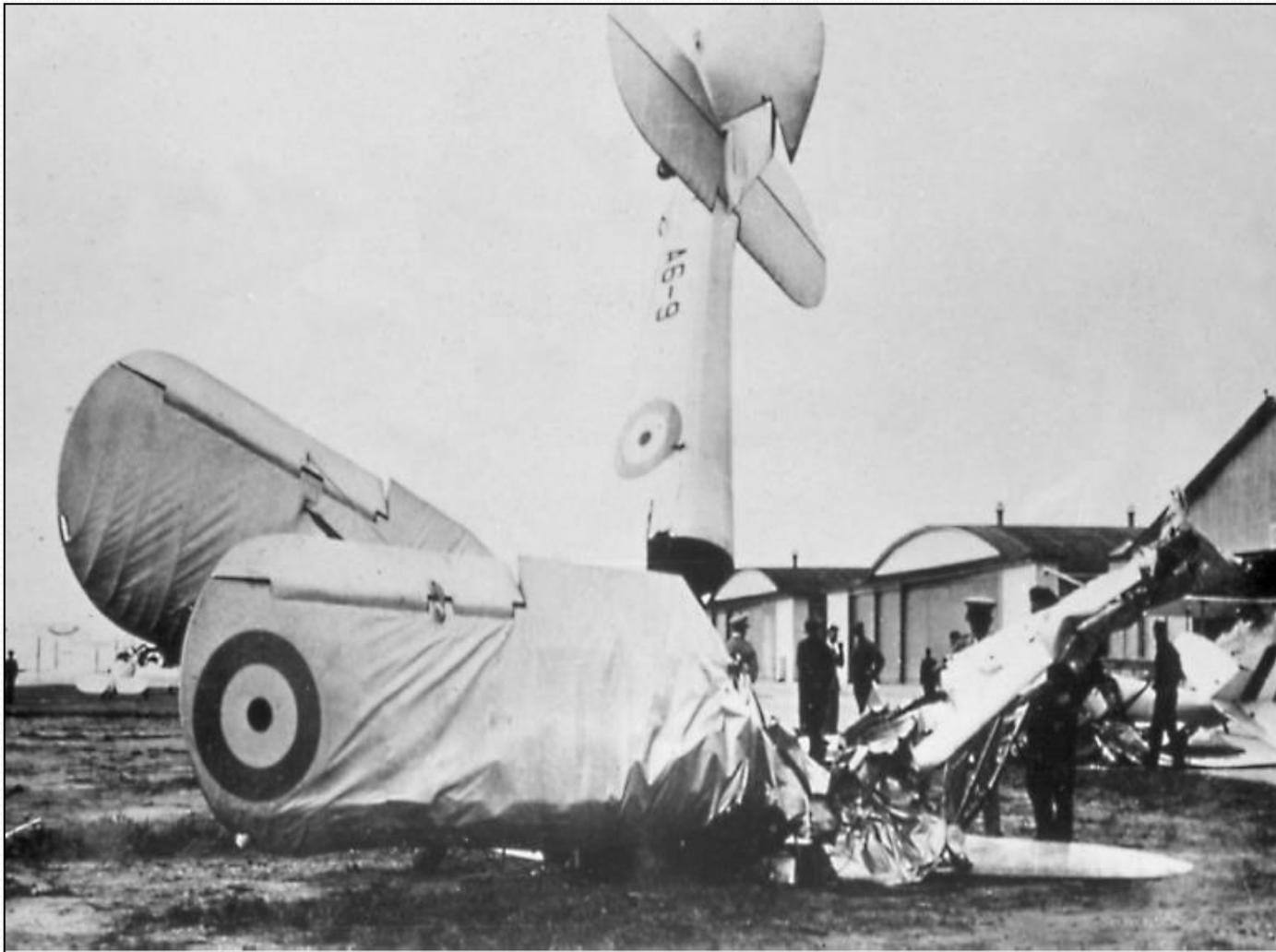
HISTÓRICO DA MECÂNICA DE FRATURA

- *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

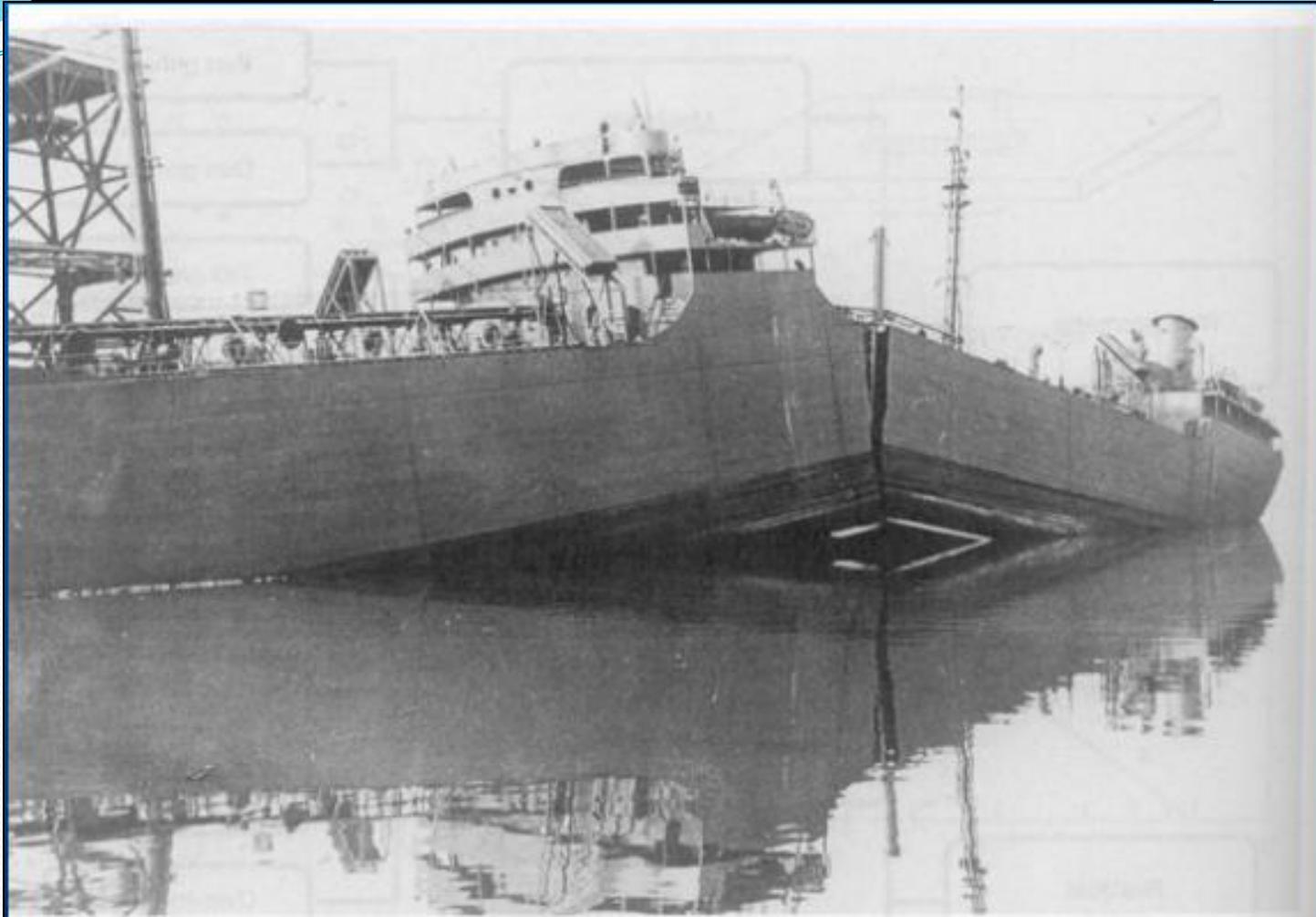
20 Navios com Falhas Catastróficas

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

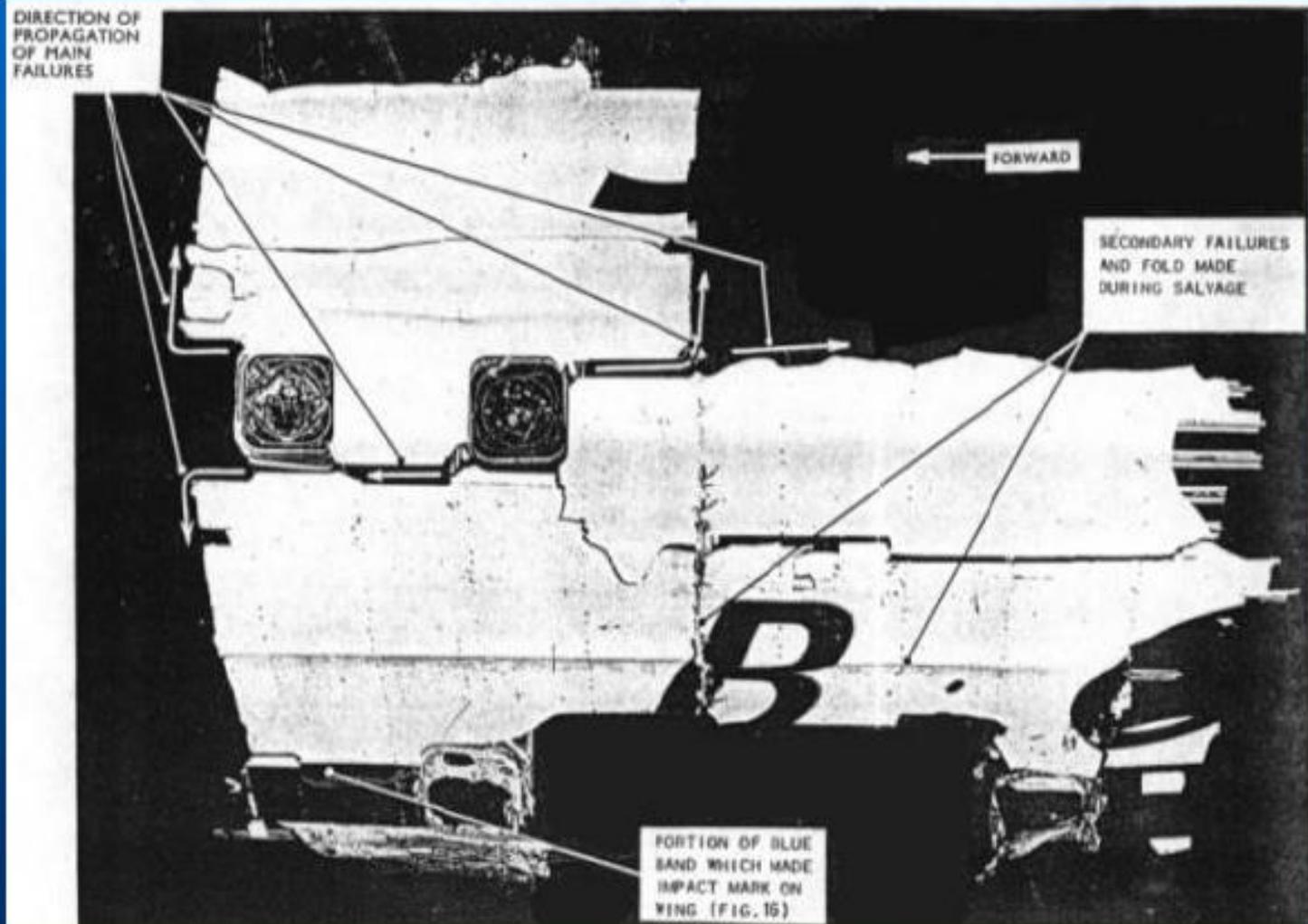
JATOS COMET (De Havilland)

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

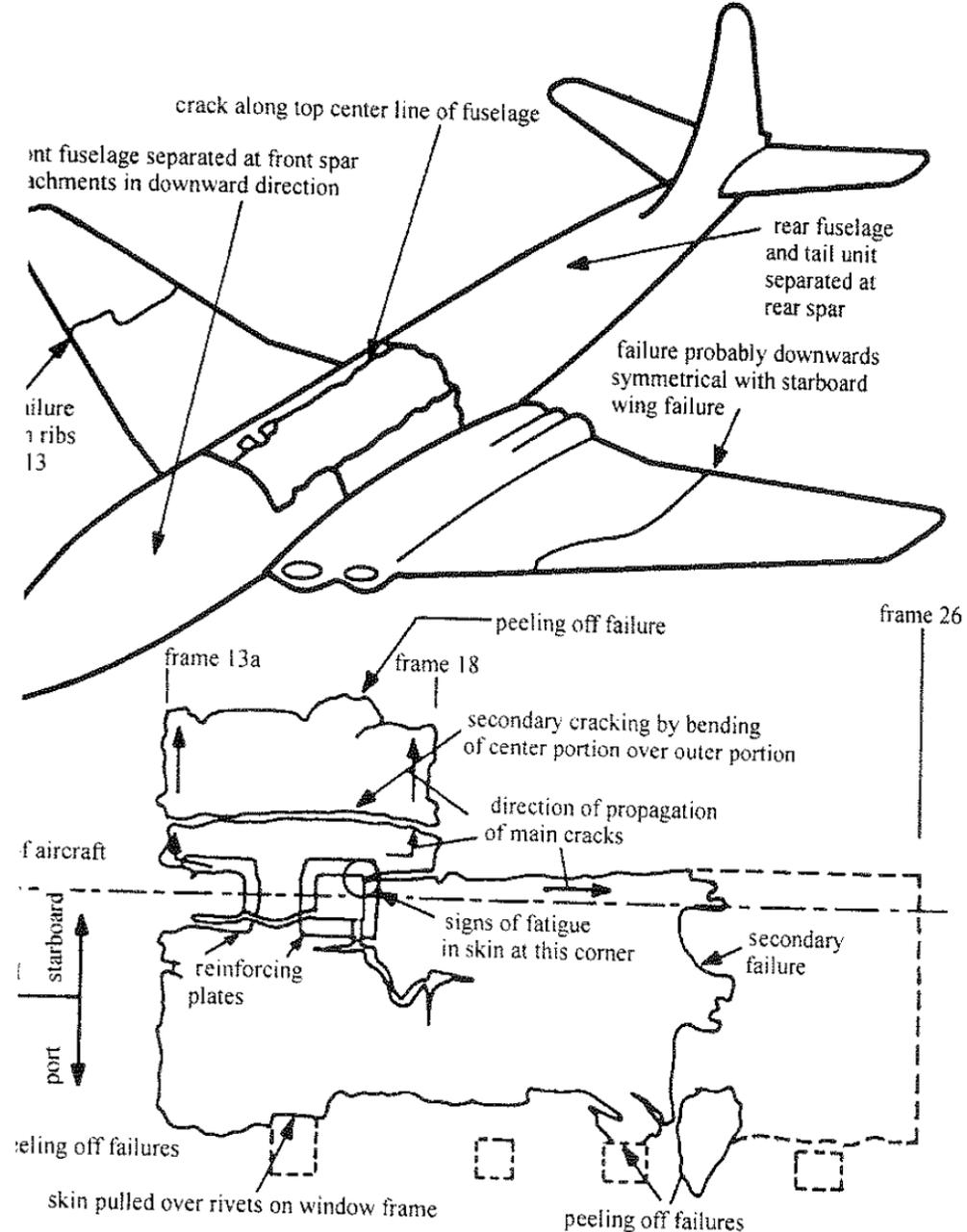


Fig. 1.1. Schematic diagram illustrating the location of fatigue cracks in a failed Comet airplane. (After Petroski, 1996.)

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.”^[1]

Havilland Comet aircraft.

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

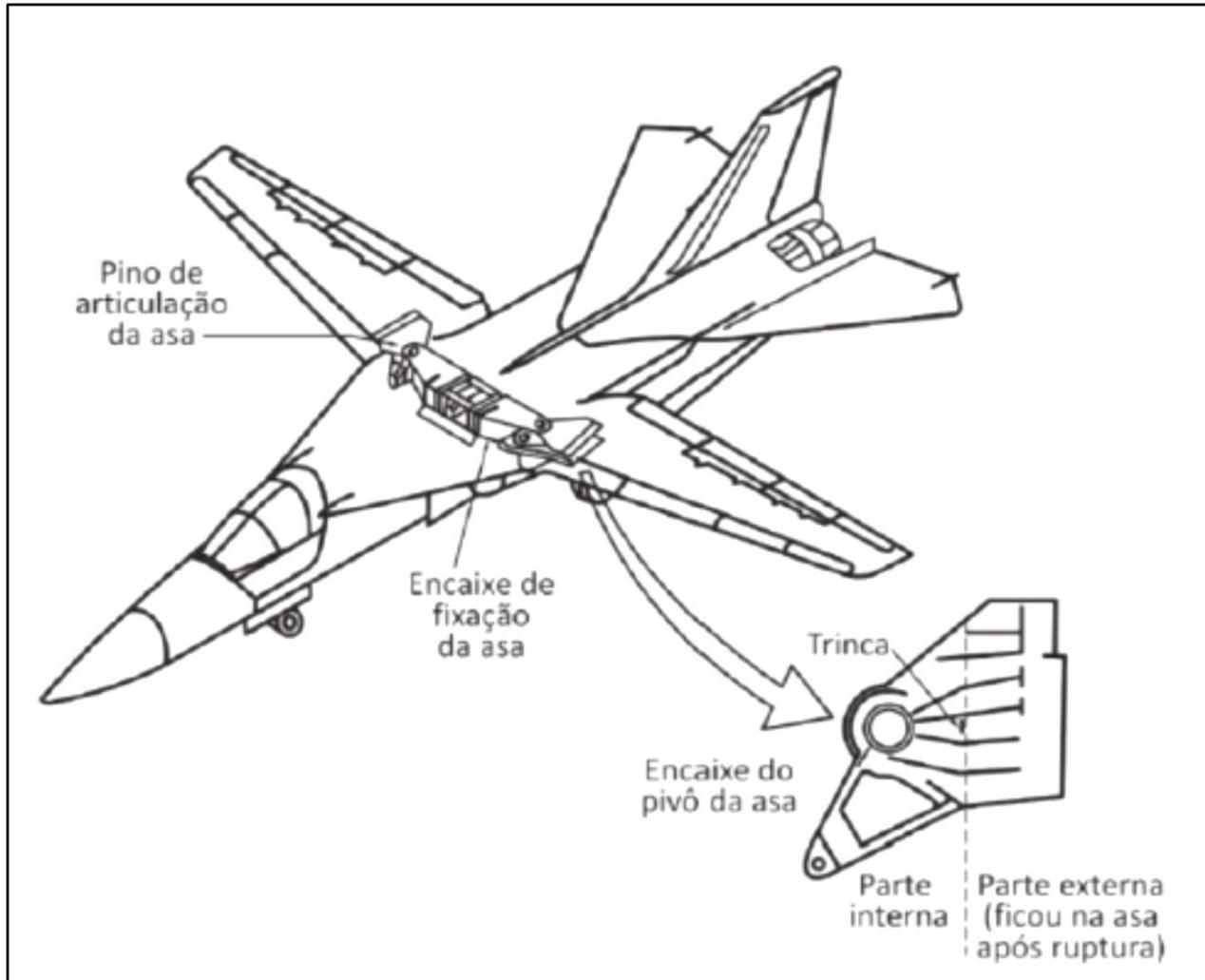
Prof.Dr. José Benedito Marcomini

HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

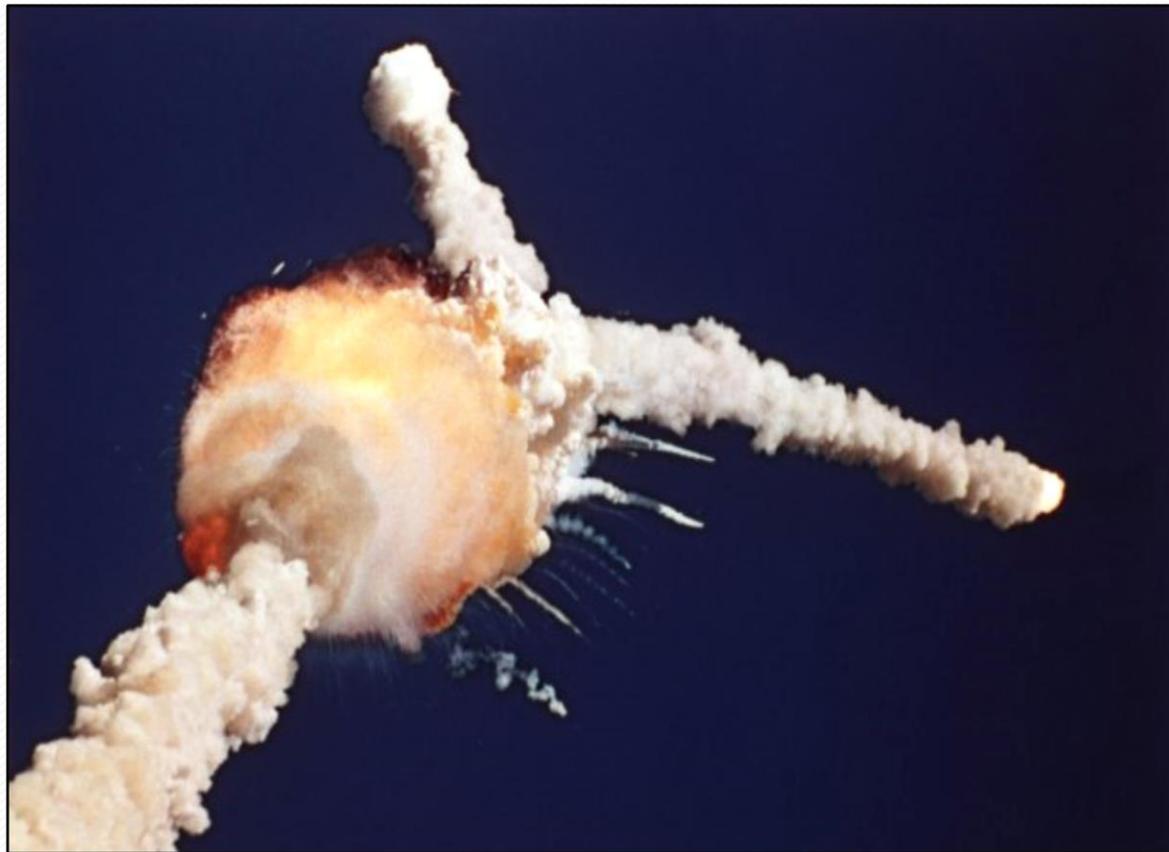
- **Fratura** de um rotor de turbina a vapor de um gerador de 165MW, operando a 3600 rpm , causando a **destruição da usina de Ridgeland, Chicago, (1954)**;
- **Explosão** de um rotor , produzido para a Arizona Public Service Co., durante testes;

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.

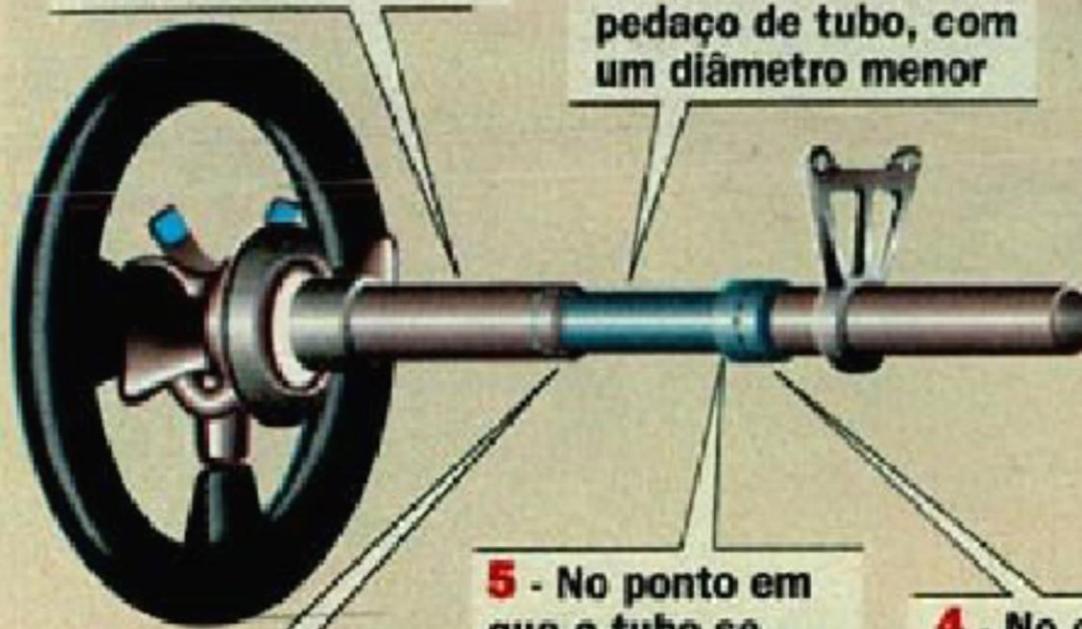


Acidente com Ayrton Senna na fórmula 1, em 1994, causado, ao que tudo indica, pela fratura por fadiga de uma emenda soldada da barra de direção.

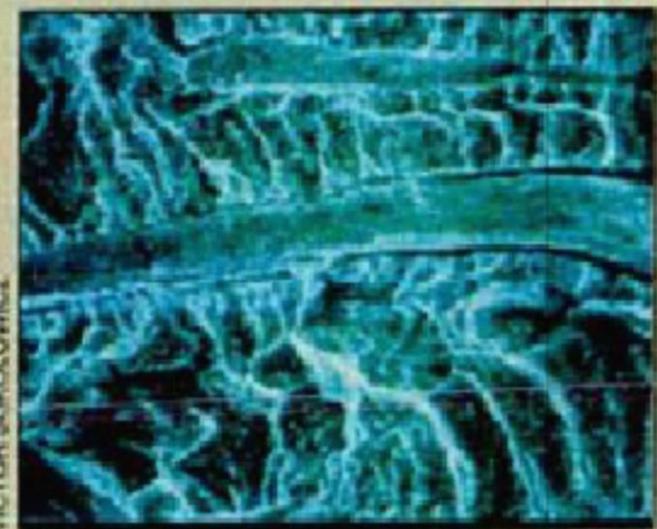


1 - A pedido de Senna, a coluna de direção foi aumentada em cerca de 5 centímetros

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

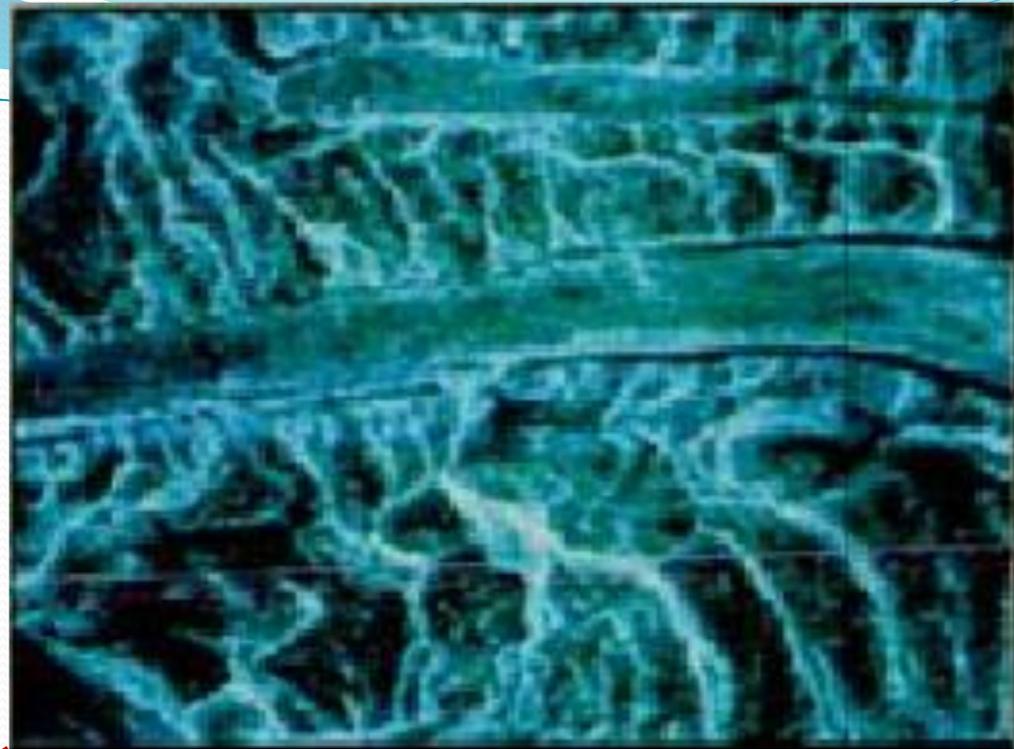
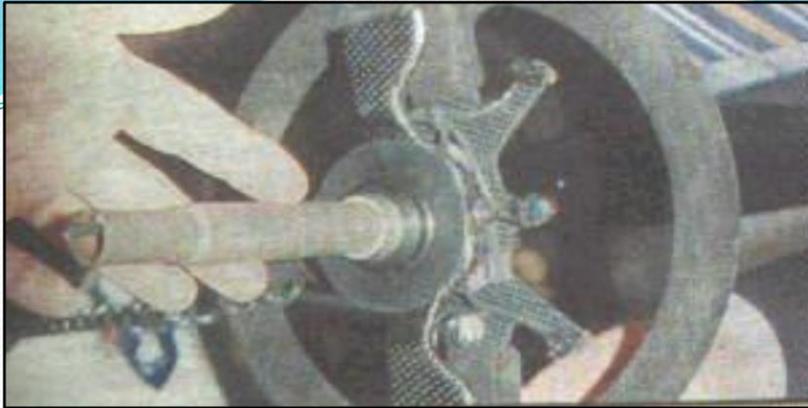


3 - Em um dos lados da emenda o tubo é soldado por dentro da coluna

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

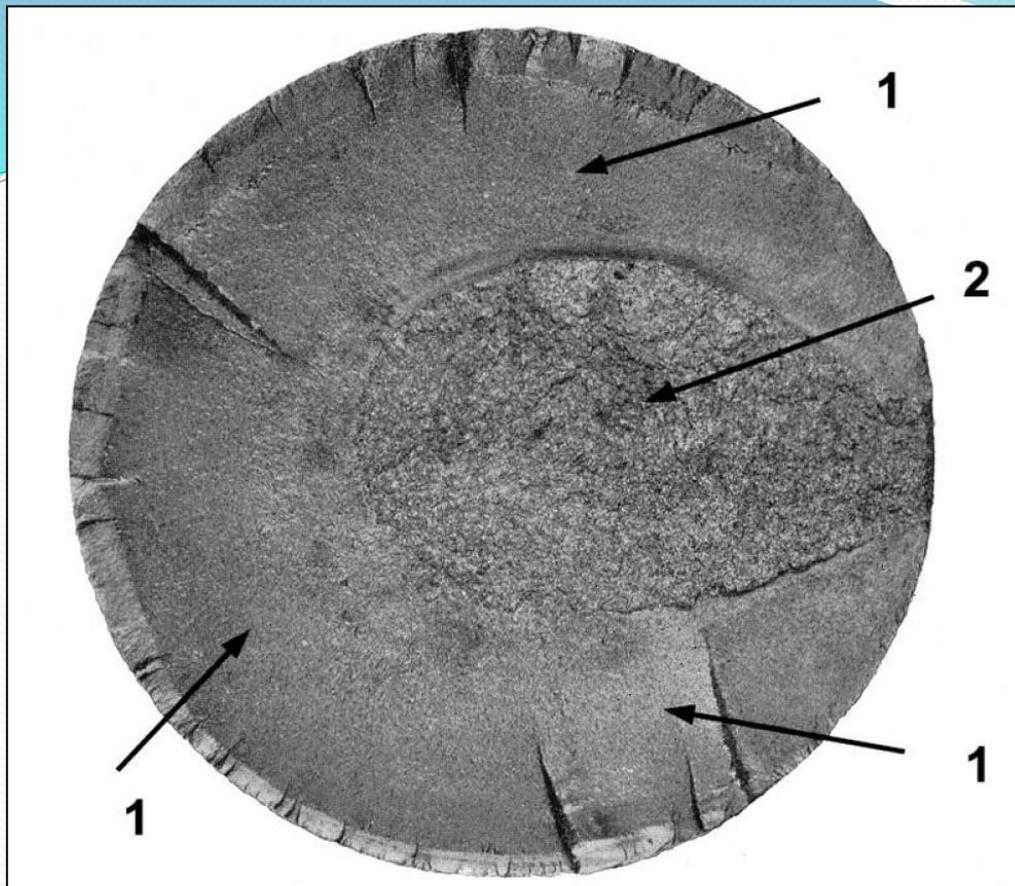


Figura 1. Aspecto da fratura do eixo de t tender. Setas 1 apresentam região lisa, de fratura estável, e seta 2 a região de fratura instável.

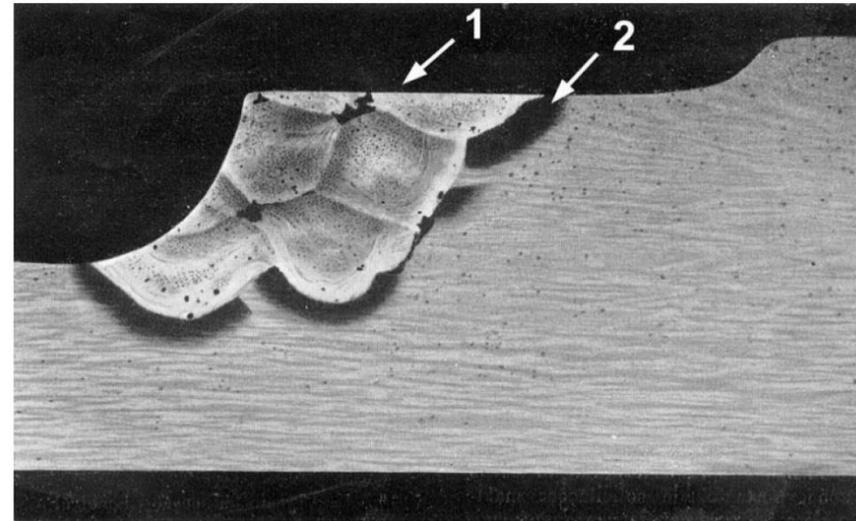


Figura 4. Zona restaurada do eixo – orlas restauradas pela solda (seta 1). Halo cinzento (seta 2) mostra a zona afetada termicamente no metal base. Reativo de iodo.

Aliás, em caso análogo estudado em laboratório estrangeiro, a solda foi dada como causa de ruptura por fadiga¹. Posteriormente aos estudos feitos no

Prof.Dr. José Benedito Marcomini



FIM

Prof.Dr. José Benedito Marcomini