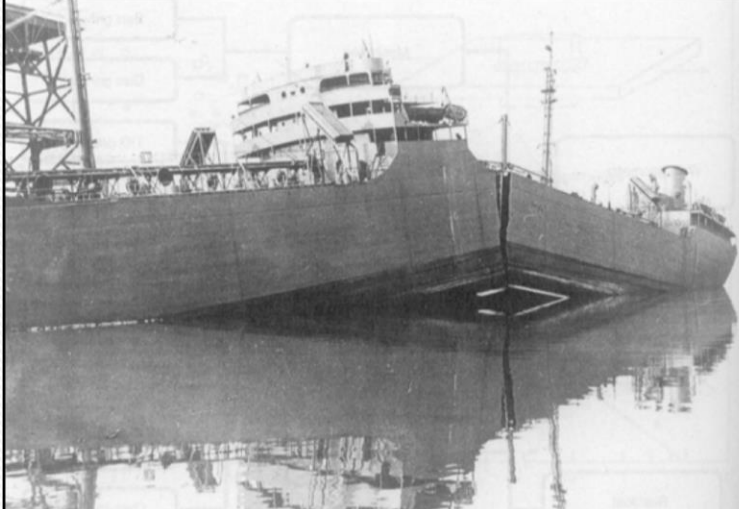


# SMM0330-PRINCÍPIOS DE ANÁLISE DE FALHAS EM COMPONENTES



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

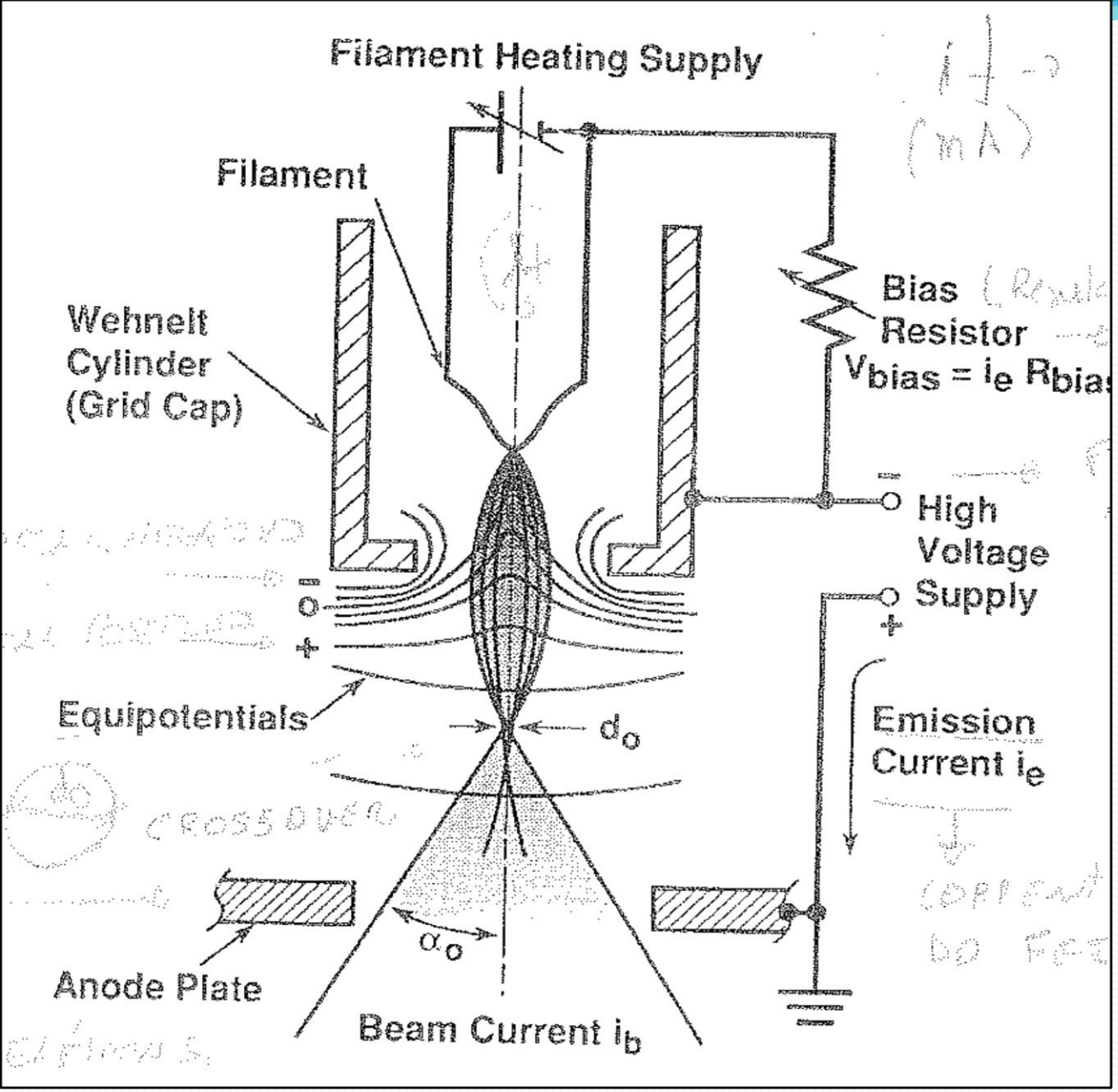
## TÉCNICAS DE ANÁLISE

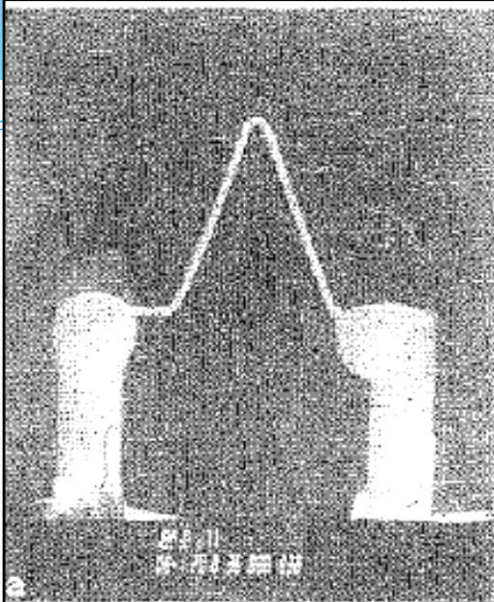
- ANÁLISE QUÍMICA;
- VISUAL-AUMENTO MÉDIO DE 10 X;
- ESTEREOSCÓPIO;
- MICROSCOPIA ÓPTICA;
- MICROSCOPIA ELETRÔNICA – MEV-FEG-FIB - MET;
- DIFRAÇÃO DE RAIOS-X;
- FRACTOGRAFIA QUANTITATIVA: MICROSCOPIA CONFOCAL E MEV COM SUPERPOSIÇÃO DE IMAGENS.

**HISTÓRICO:**

- **Início - M. Knoll (1935), descrevendo a concepção do MEV;**
- **1938 - Von Ardenne construiu o 1º “MEV”, adaptando bobinas de varredura ao MET: amostras não podiam ser espessas, aumento máximo de 8k;**
- **1942 nos laboratórios da RCA, 1ºMEV – amostras espessas mas a resolução era de 1,0µm (ótico: 0,5µm);**
- **Modificações: substituição das lentes eletrostáticas por lentes eletromagnéticas, melhorias nos detectores (ex: cintilador e fotomultiplicadora);**
- **1965: primeiro MEV comercial pela Cambridge Scientific Instrument.**

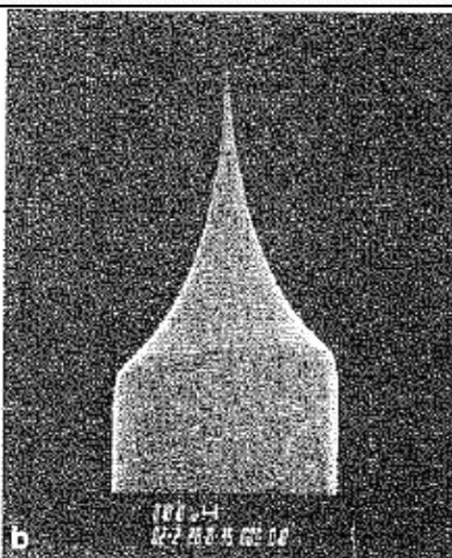
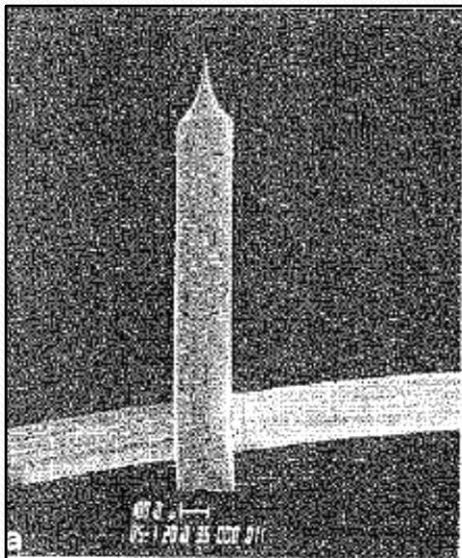
# ANÁLISE DE FALHAS-MEV





Filamento de W

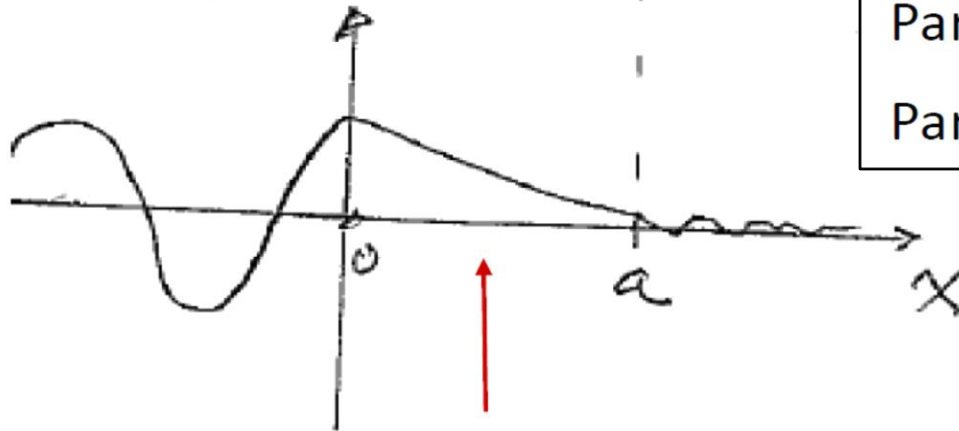
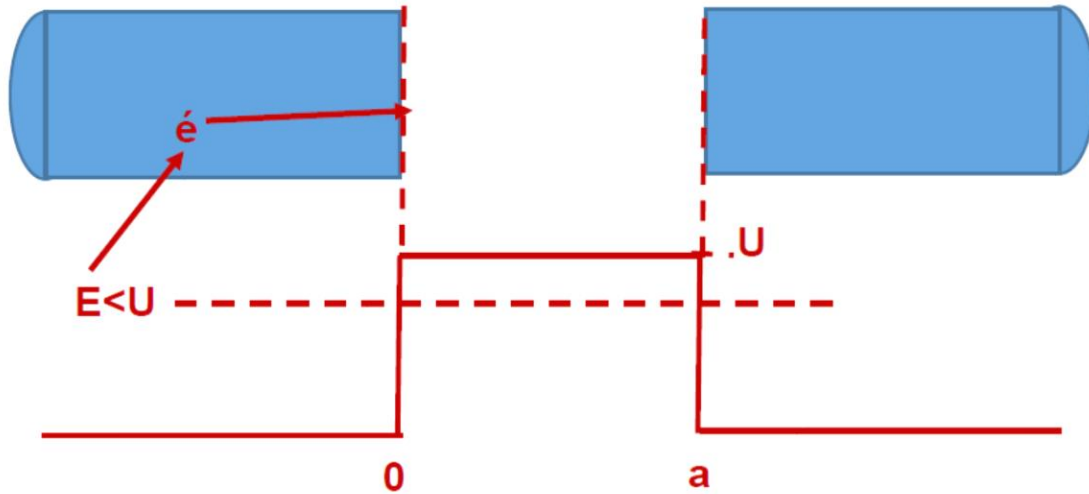
**MEV**



Filamento de monocristal de W

**MEV - FEG  
FIELD  
EMISSION GUN**

# EFEITO DE TUNELAMENTO QUÂNTICO



Para  $x=0$ :  $\psi(x) = A$

Para  $x=a$ :  $\psi(x) = A \cdot e^{-\alpha a}$

$$\alpha^2 = \frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}$$

$\psi(x) = A \cdot e^{-\alpha x}$  (função de onda exponencial)

## EFEITO DE TUNELAMENTO QUÂNTICO

A DENSIDADE DA PROBABILIDADE É O QUADRADO DO MÓDULO DA FUNÇÃO DE ONDA.

A probabilidade de que o elétron atravessasse de um cabo para outro é a relação entre as densidades de probabilidades do lado direito e do lado esquerdo.

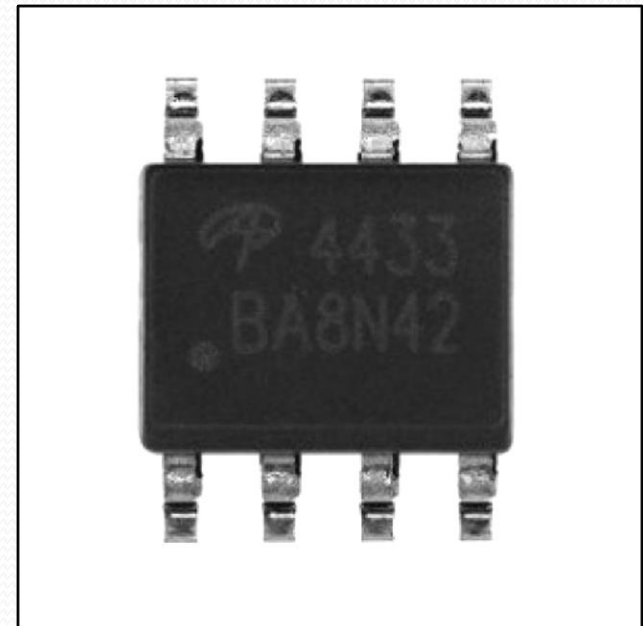
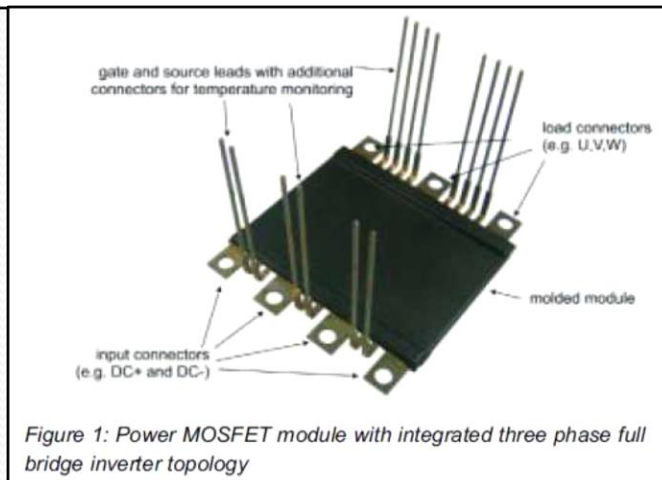
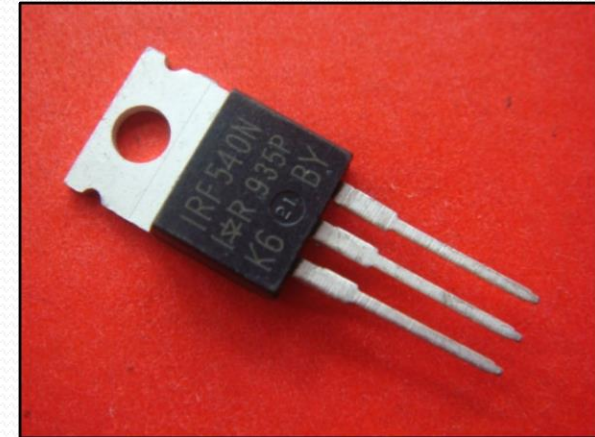
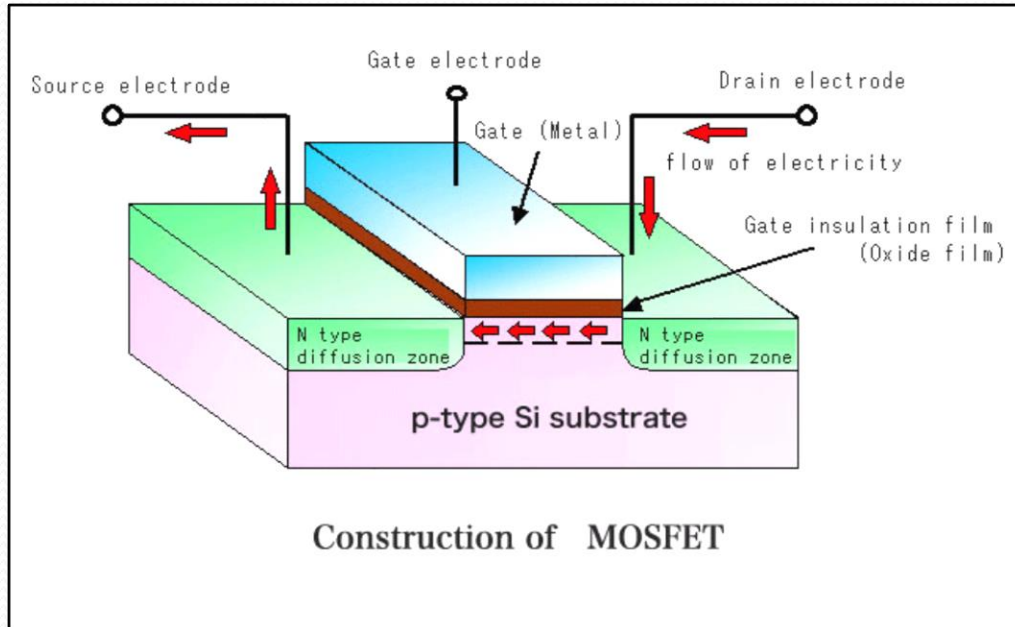
FUNÇÃO DE ONDA EM  $X=a$

$$P = \left| \frac{A \cdot e^{-\alpha a}}{A} \right|^2 = e^{-2\alpha a} \neq 0$$

FUNÇÃO DE ONDA EM  $X=0$

# EFEITO DE TUNELAMENTO QUÂNTICO

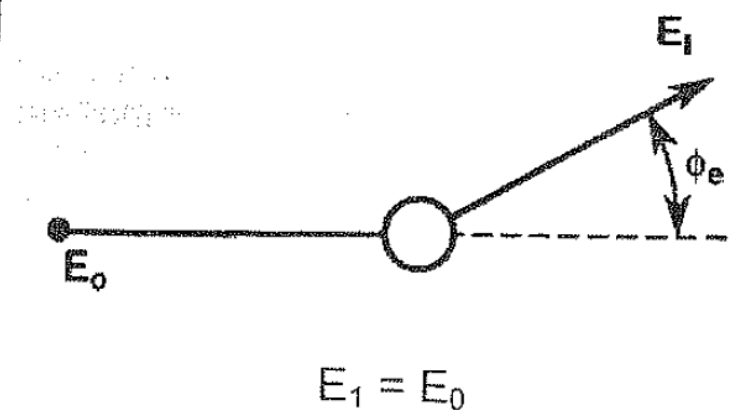
## MOSFET (METAL OXIDE SEMICONDUCTOR FIELD EFFECT TRANSISTOR)





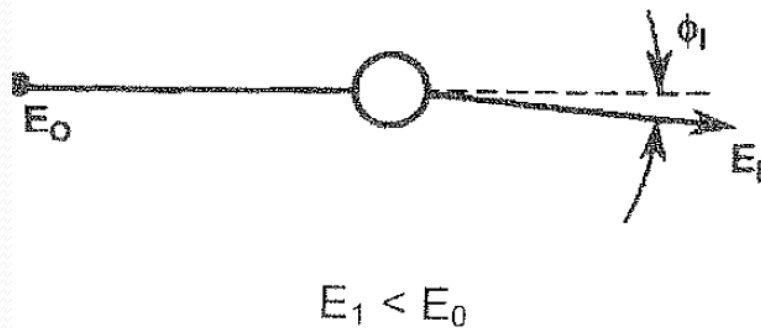
**TÉCNICA DE ANÁLISE POR MEV**

**Elétrons secundários: detector Everhard – Thornley, polarizado positivamente (capturar os elétrons secundários, energia  $<50$  eV) pois, também são detectados elétrons retroespalhados (“backscattered electrons”: energia próxima a do feixe incidente-20/30keV -elasticamente espalhados);**



### ESPALHAMENTO ELÁSTICO:

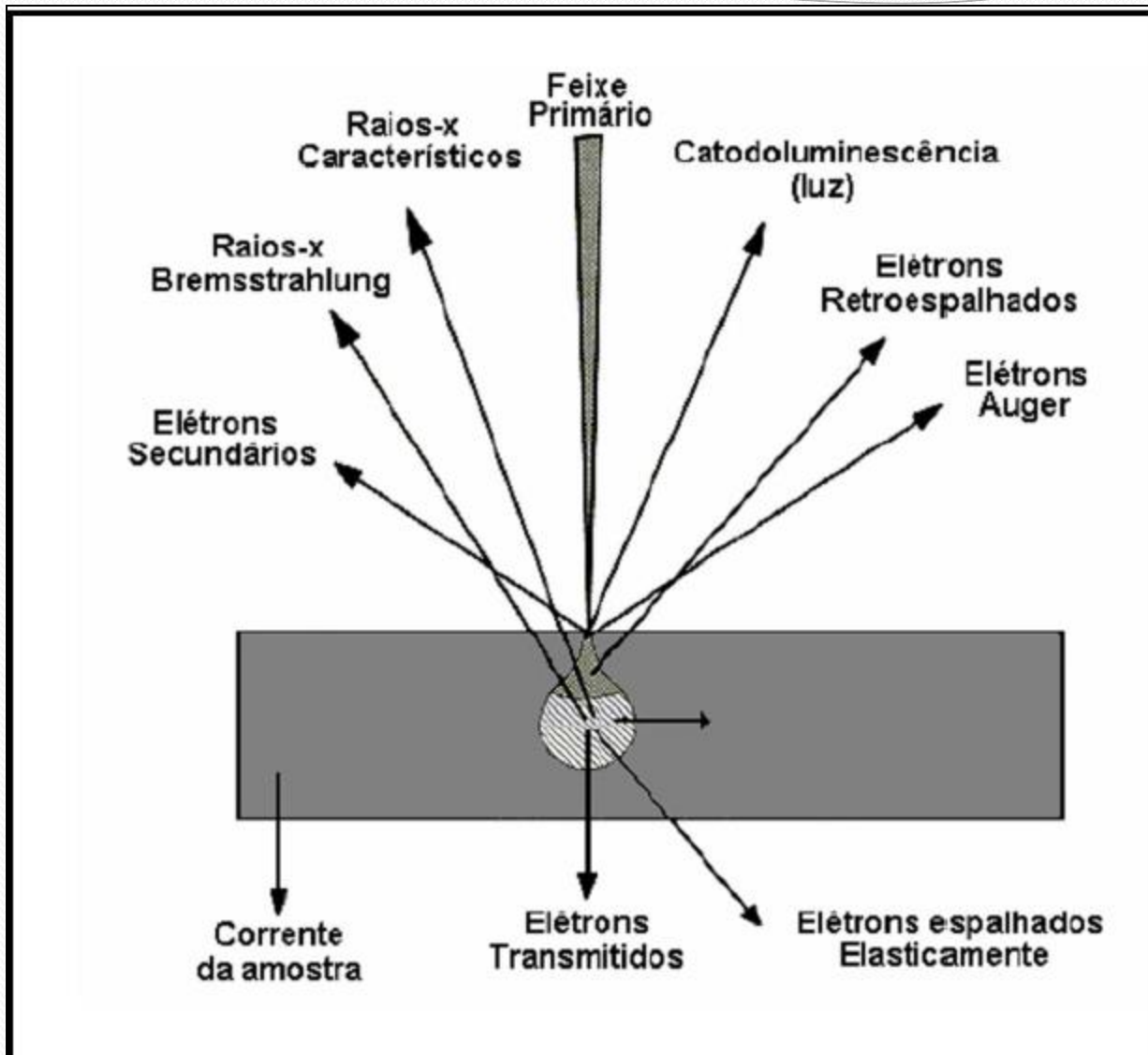
Mudança de direção (0 a 180°) sem mudança na energia dos elétrons. O espalhamento elástico é responsável pelo fenômeno de retroespalhamento de elétrons (sinal importante no MEV).



### ESPALHAMENTO NÃO ELÁSTICO:

A direção não muda ( $\pm 0,1^\circ$ ), e sim a energia dos elétrons. A energia dos elétrons do feixe incidente é transferida para os átomos levando à emissão de elétrons secundários, raios-X, catodoluminiscência, elétrons Auger, etc.

# ANÁLISE DE FALHAS-MEV

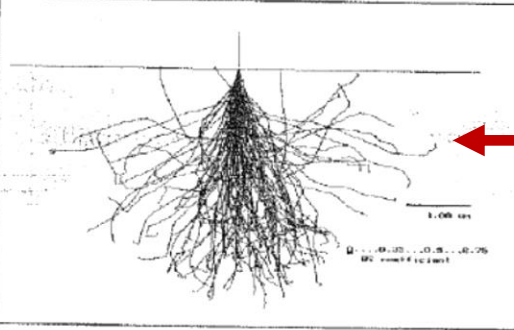


## ELÉTRONS SECUNDÁRIOS -

### ONDE SÃO GERADOS?

Praticamente todos os elétrons, mesmo aqueles que perderam quase toda a sua energia, são capazes de gerar elétrons secundários.

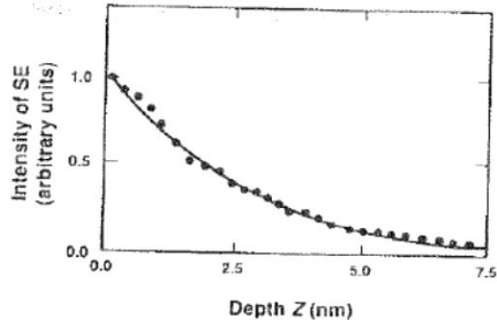
EM QUALQUER LUGAR



**SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.**

## ELÉTRONS SECUNDÁRIOS -

### DE ONDE VÊM?



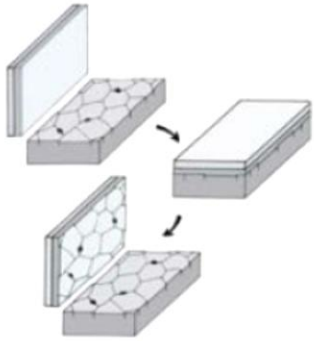
Por causa de sua baixa energia os SE's têm trajeto muito pequeno.

Somente os elétrons secundários gerados até cerca de **10 nm** da superfície apresentam alguma chance de sair da amostra.

DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA

**ELÉTRONS SECUNDÁRIOS PODEM SER GERADOS EM QUALQUER LUGAR MAS, DEVIDO A SUA BAIXA ENERGIA, A PROBABILIDADE DE SAIR É DAQUELES FORMADOS A 10 nm DA SUPERFÍCIE.**

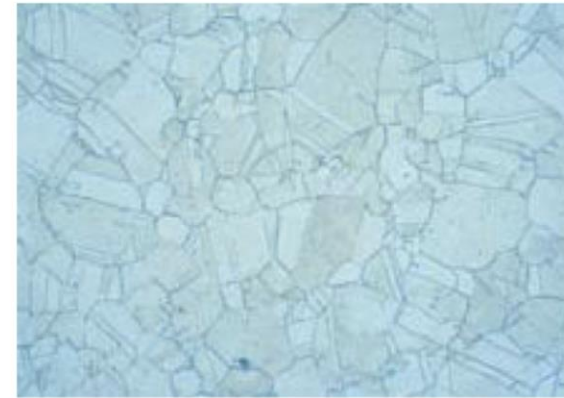
# ANÁLISE DE FALHAS- RÉPLICA METALOGRÁFICA



Método Tradicional



Amostra



Réplica



Replicating Set

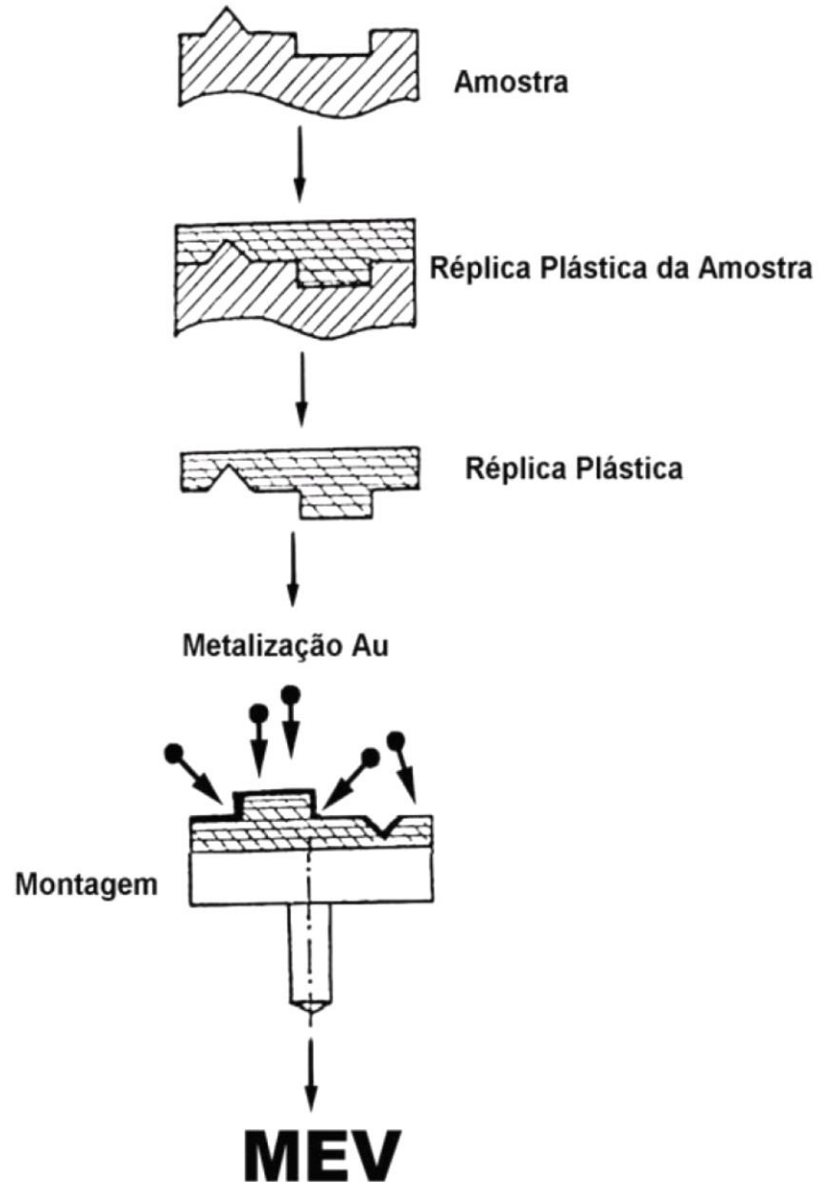


Amostras copiadas.

**BUEHLER**

# ANÁLISE DE FALHAS- RÉPLICA METALOGRÁFICA

## Método de Réplica Direto (Negativo)



**RÉPLICA PARA O MEV**

**1935**

**O ponto de partida para o matemático Benoît Mandelbrot (1924 – 2010) foi precisamente a falha de Euclides. Preocupado com a forma, esqueceu-se de considerar a “dimensão”, na geometria da natureza: aproximação.**

**Mandelbrot descreveu matematicamente a ideia original de Euclides, acrescentando a essa ideia a questão da dimensão e, foi deste modo que surgiu a Geometria dos Fractais.**

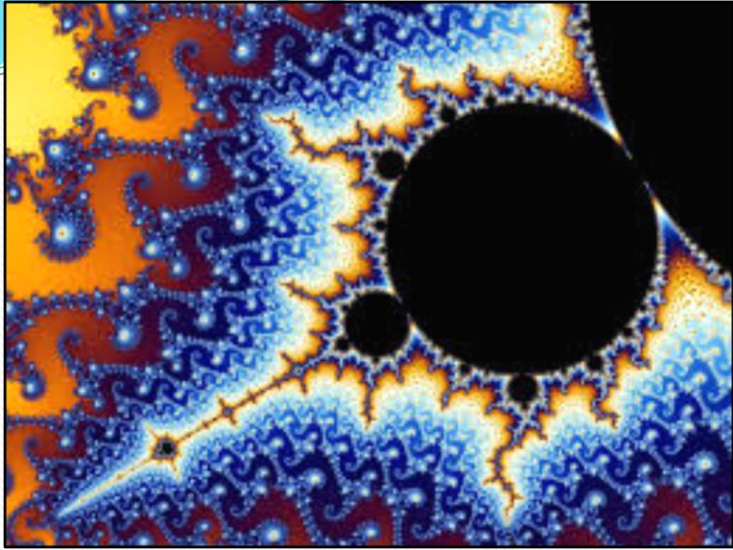


**1958**

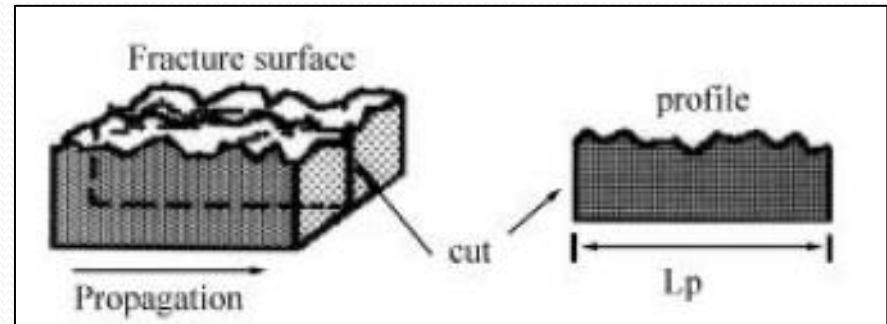
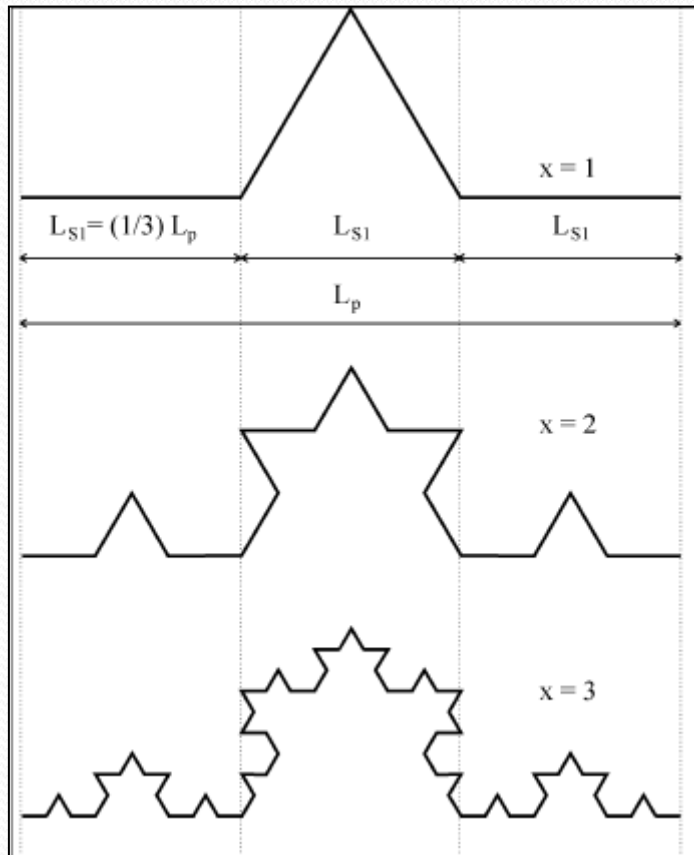
- **Colaboração com a IBM. Dedicou-se a um problema: erros de informação nas comunicações por computador causadas pelo ruído;**
- **Fractal é uma solução de uma equação não linear: teoria do Caos;**
- **Mais tarde virou-se para o problema seguinte: “ Quanto mede afinal a costa da Bretanha? “**
- **Até 1970 a ideia não foi muito bem aceita;**



# CONJUNTO DE MANDELBROT



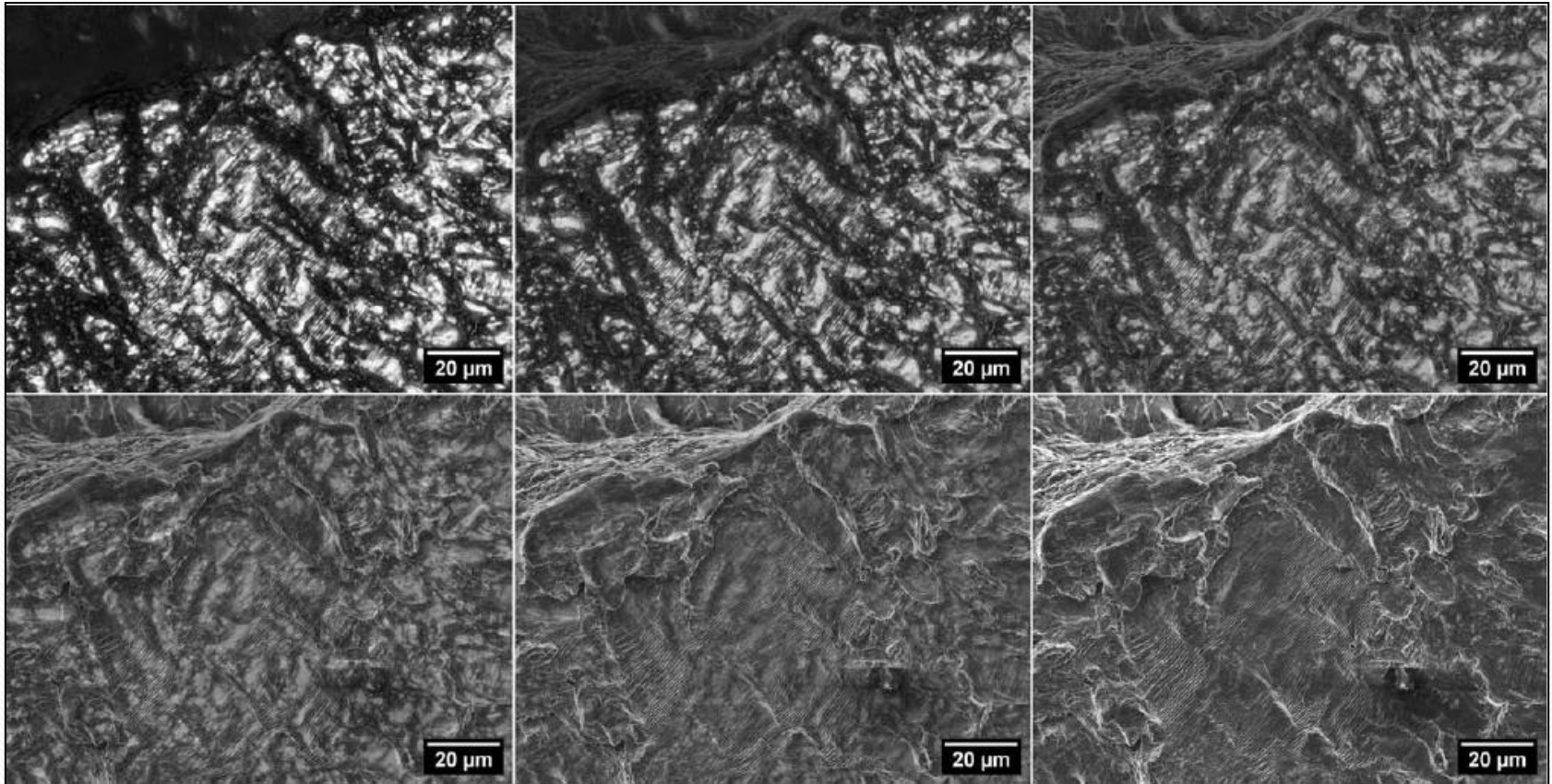
# Fractal-Fracture Behaviour Relationship



# AVANÇO NA TÉCNICA DE FRACTOGRAFIA

## FRACTOGRAFIA QUANTITATIVA

**SÃO FEITAS VÁRIAS IMAGENS EM UM MICROSCÓPIO CONFOCAL, EM DIFERENTES ALTURAS. AS IMAGENS SÃO SOBREPOSTAS POR UM SOFTWARE, INCLUSIVE COM AS IMAGENS DE MEV.**



# AVANÇO NA TÉCNICA DE FRACTOGRAFIA

## FRACTOGRAFIA QUANTITATIVA

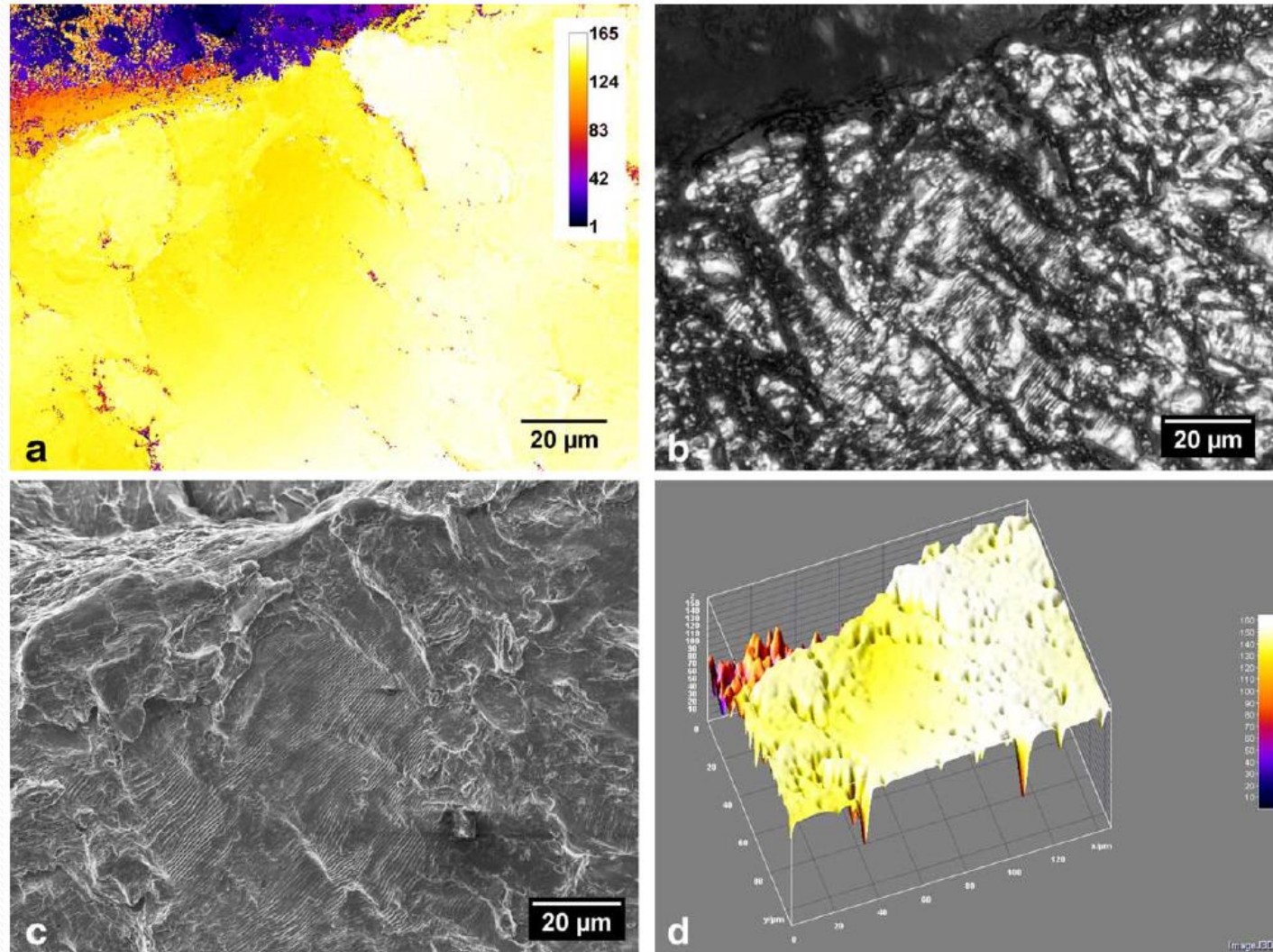


Fig. 1. Examples of correlative fractography results: (a) height map; (b) reconstructed image from light microscope images stack; (c) matched SEM image; (d) 3-D representation of elevations map (Z axis in  $\mu\text{m}$ ). [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com).]

# AVANÇO NA TÉCNICA DE FRACTOGRAFIA

## FRACTOGRAFIA QUANTITATIVA

### VANTAGENS:

- MELHOR VISUALIZAÇÃO DE PONTOS COM DIFERENTES PROFUNDIDADES;
- ATRAVÉS DE UM CÁLCULO ESTATÍSTICO É POSSÍVEL RELACIONAR COM O FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES/ TENACIDADE À FRATURA;
- CONSEGUE-SE DETERMINAR COM MAIS PRECISÃO A QUANTIDADE DE CADA MICROMECHANISMO DE FRATURA E RECONHECER A MUDANÇA DOS MESMOS.



# **ASPECTOS METALÚRGICOS DA FADIGA**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

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



(wikipedia)

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

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

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



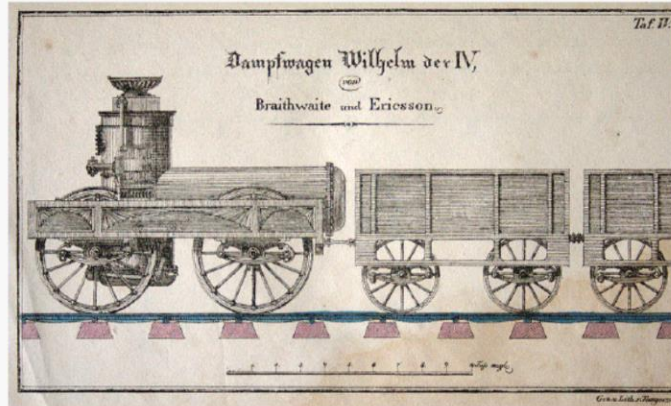
# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

## OS PIONEIROS

John Braithwaite (1797-1870)



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



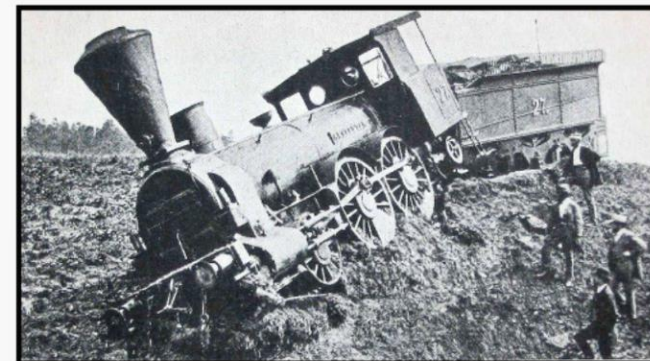
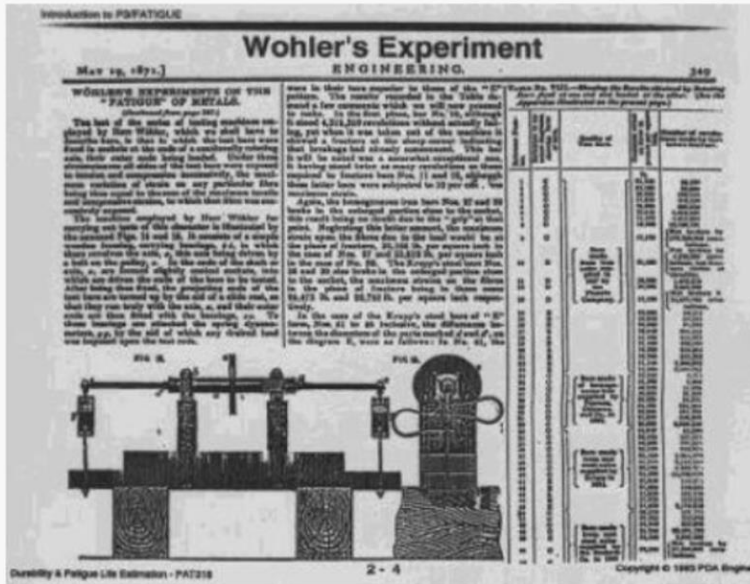
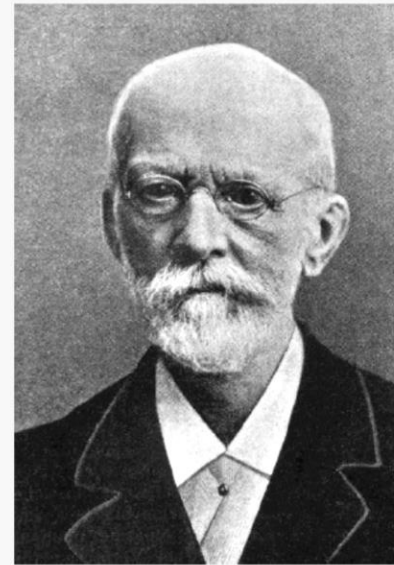
- **Obs: Poncelet (1788-1867), Matemático e Engenheiro Francês, já havia utilizado este termo genericamente para fratura de metais.**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

## OS PIONEIROS

August Wöhler (1819-1914)



August Wöhler desenvolveu estudos em fadiga entre 1852 a 1869

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

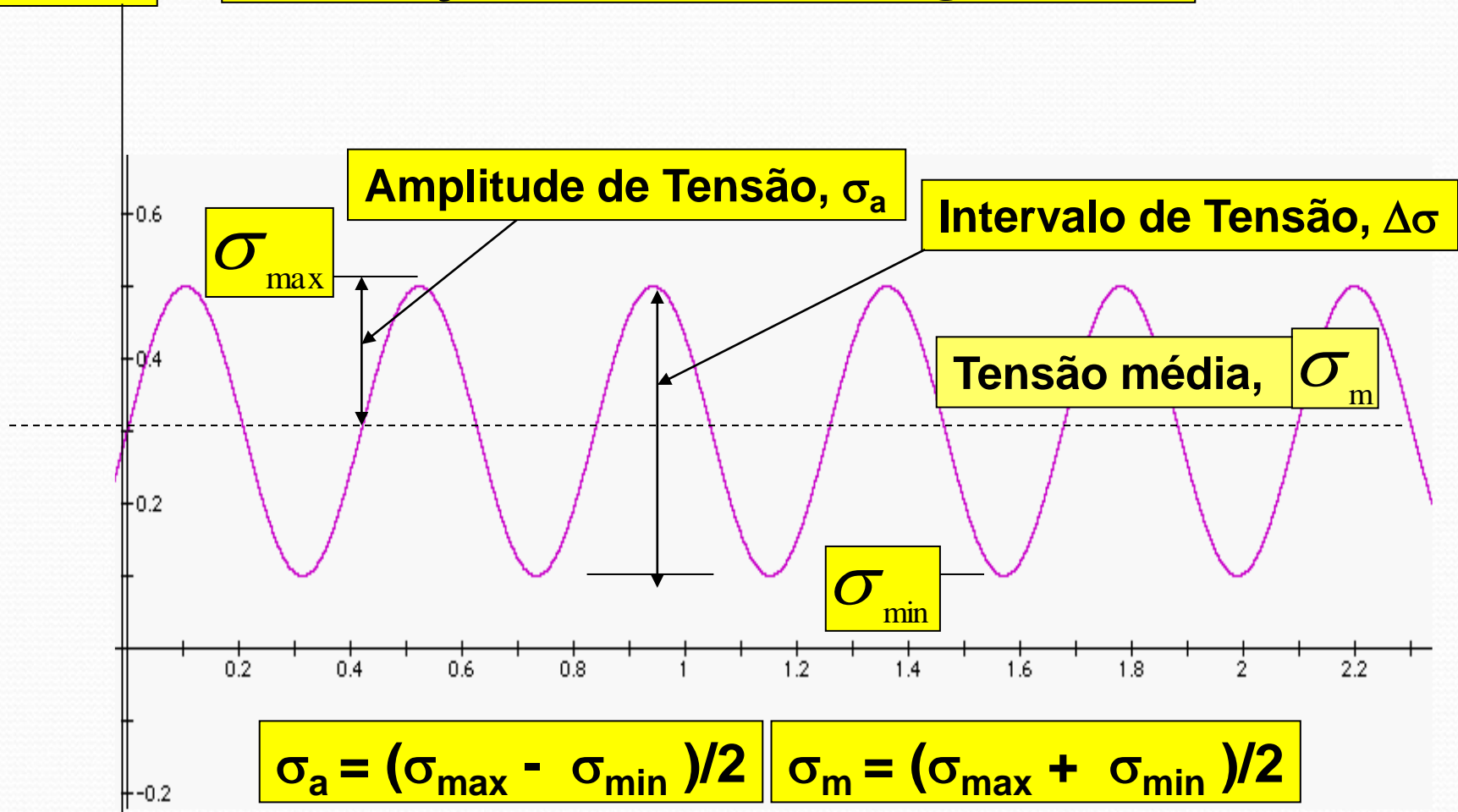
# O FENÔMENO DA FADIGA

- **“Fadiga de material”** pode ser entendido como o conjunto de fenômenos que resultam na falha de componentes por ruptura progressiva, normalmente associada à flutuação de tensões. É a causa mais comum e importante de falha em serviço de estruturas e componentes mecânicos;
- Envolve a **nucleação e crescimento lento** de uma trinca;
- Peças submetidas a **tensões flutuantes ou alternadas**, mesmo que **abaixo do limite de escoamento**, podem manifestar alterações em suas propriedades mecânicas e **perda de resistência**;
- A **Metalurgia Física** explica os eventos **microestruturais** relacionados com a progressão da fratura, a **Mecânica dos Sólidos/Mecânica da Fratura** estabelece **critérios de falha** a partir dos resultados de ensaios;
- Fenômenos/Ensaio: Fadiga de **alto ciclo (controlada pela tensão)**, fadiga de **baixo ciclo (controlada pela deformação)**, **crescimento da trinca** por fadiga, avaliação da **sensibilidade ao entalhe**, fadiga por **fretting**, fadiga **multiaxial**, fadiga **térmica, isotérmica e termomecânica** e interação **fadiga-fluência**.

# DEFINIÇÕES E CONCEITOS

## Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão,  $\sigma$



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

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

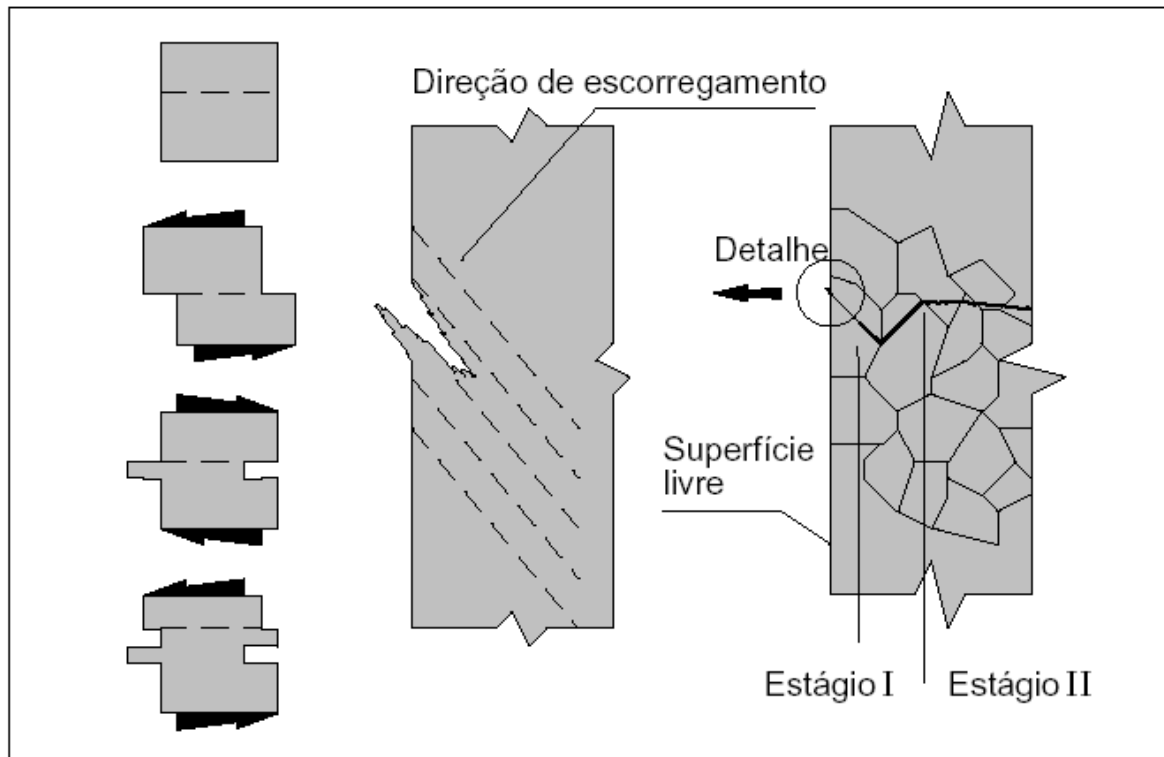
RAZÃO DE AMPLITUDE

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$

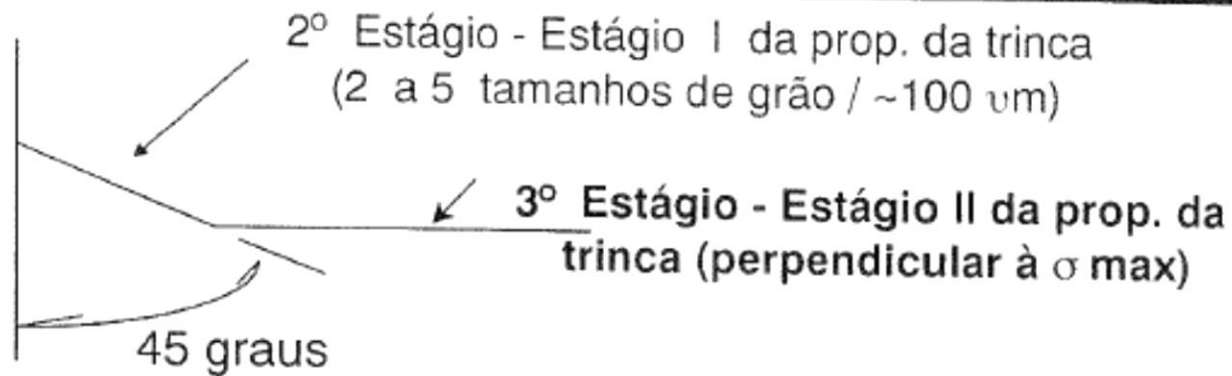
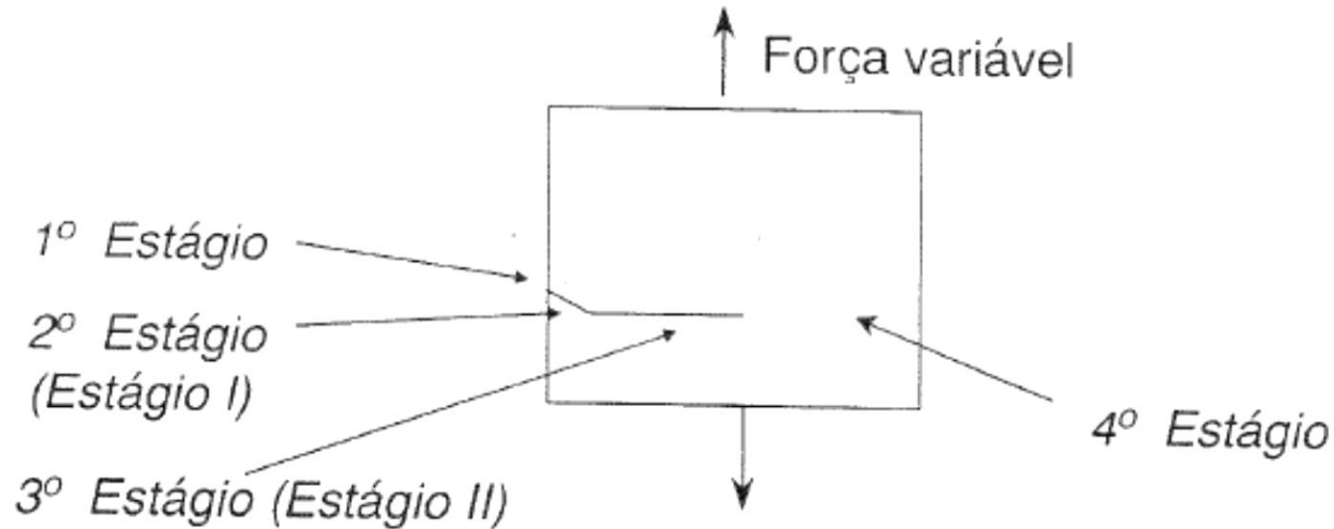
# Mecanismos de Fadiga e Características Microscópicas

## NUCLEAÇÃO DE TRINCAS

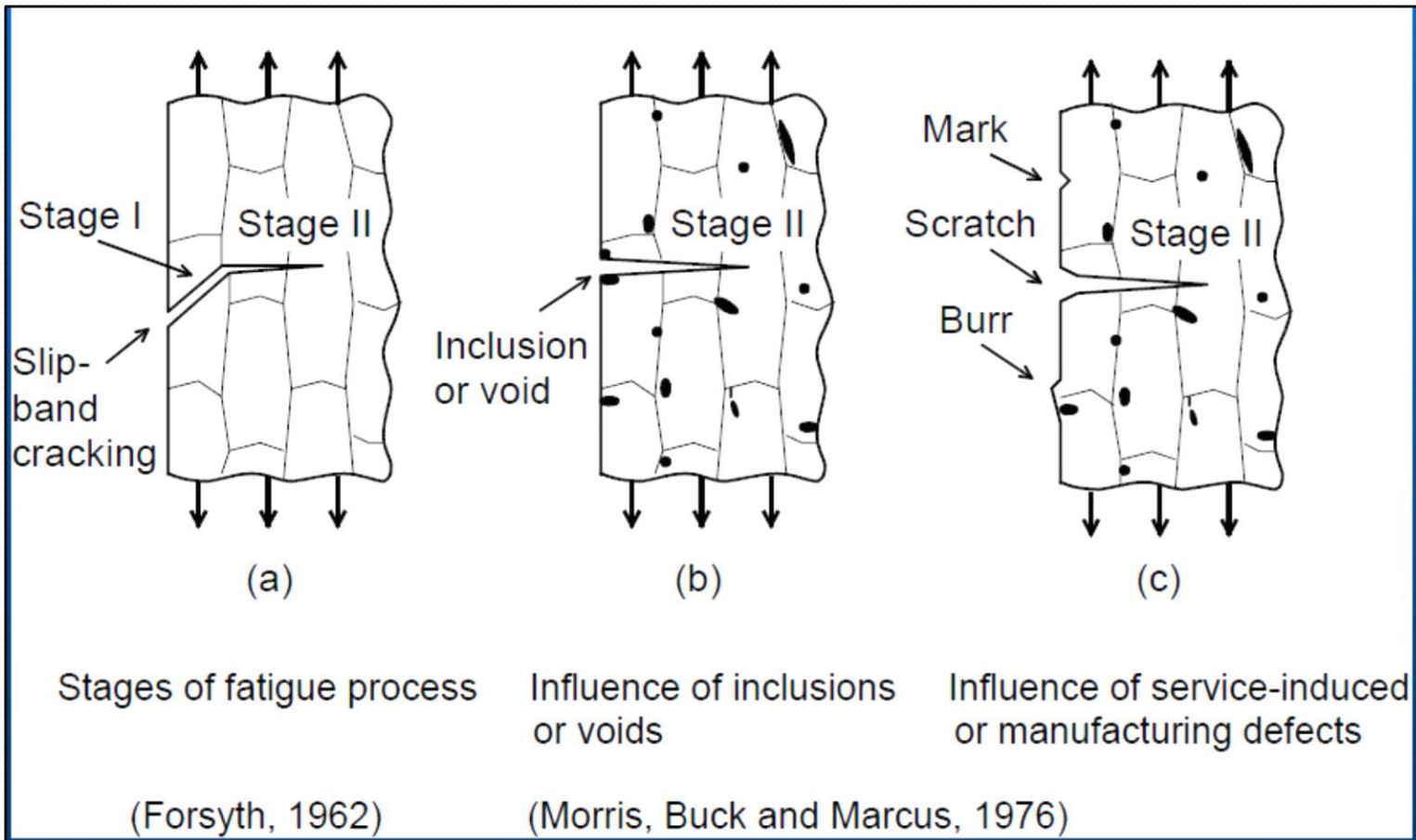
- A falha por fadiga está geralmente ligada a **deformações plásticas localizadas** e, estas, associadas com tensões cisalhantes.
- No caso dos **materiais dúteis**, a nucleação de trincas ocorre pela formação bandas de cisalhamento (**Persistent Shear Bands-PSB**). Ocorre já nos primeiros ciclos do carregamento.

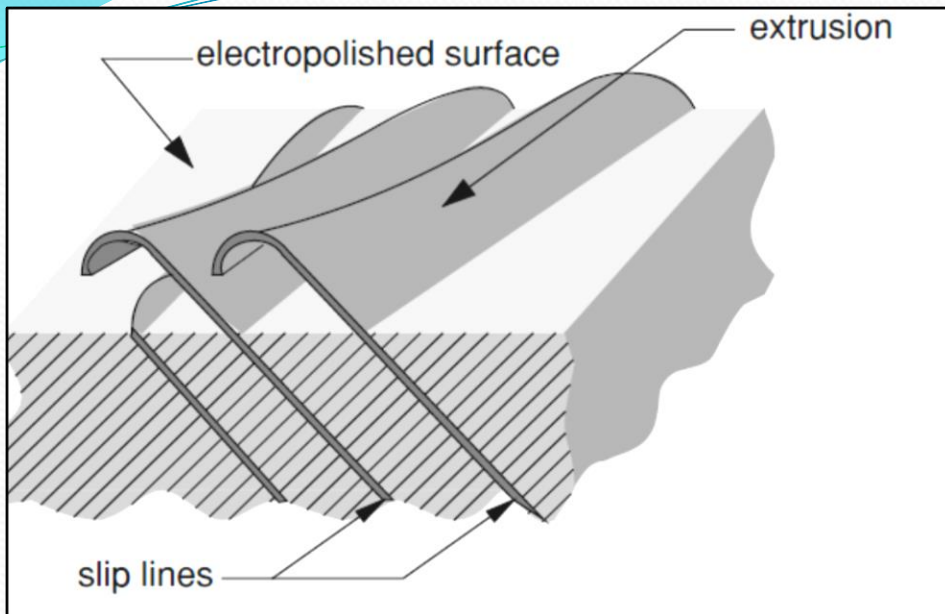


## Esquema dos quatro estágios da fadiga

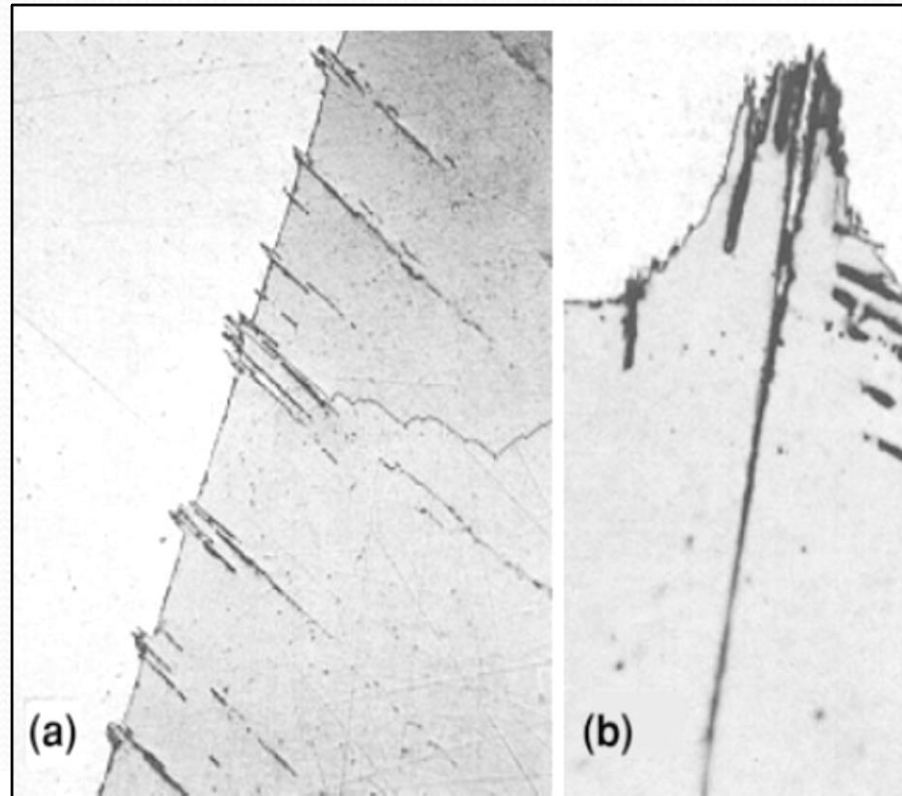


Fadiga / Prof. Itamar





**INTRUSÕES E EXTRUSÕES,  
SEGUNDO FORSYTH  
(1956-1958)**

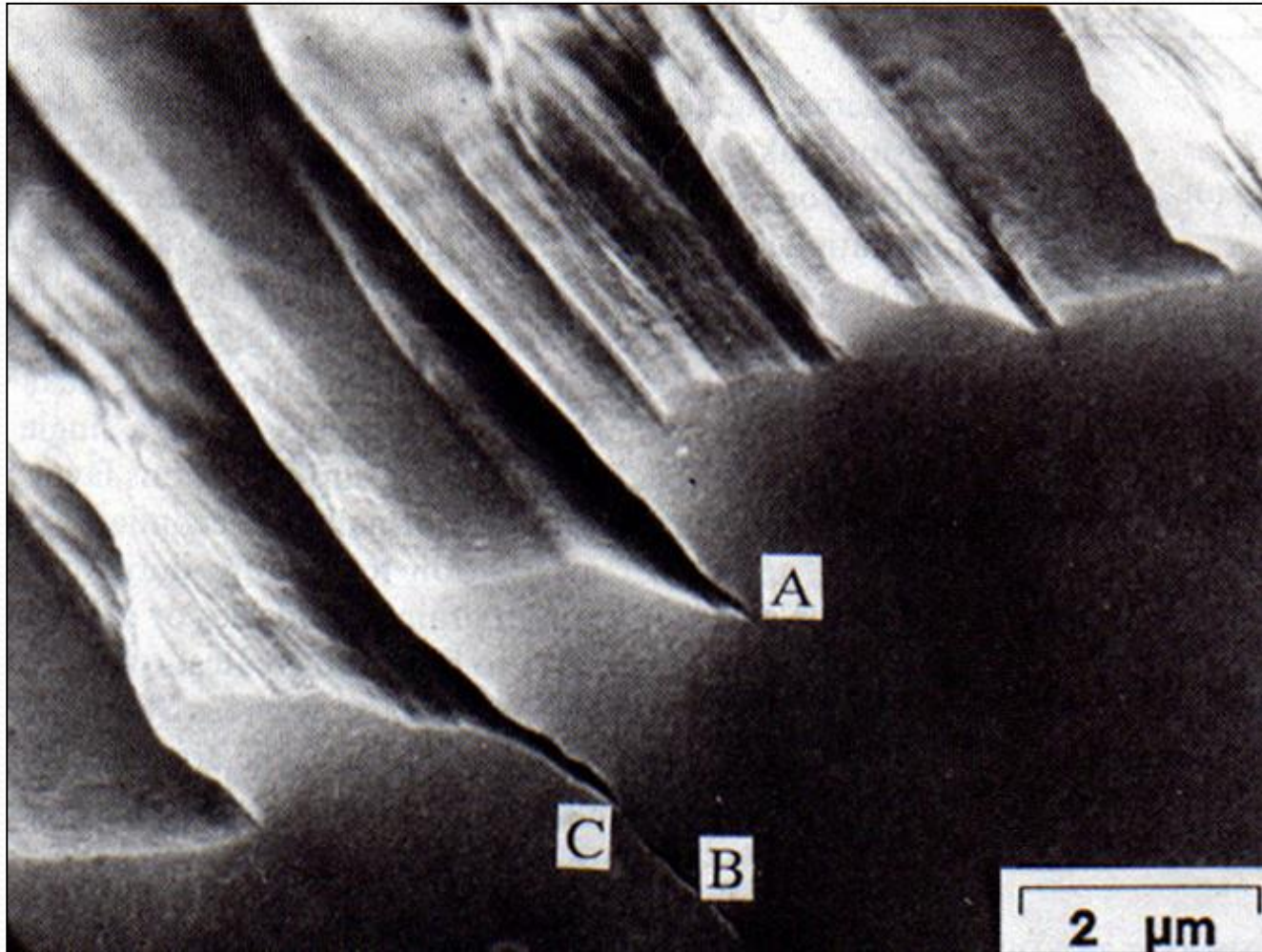


Extrusions observed in a a copper specimen and in b Fe-3 Si



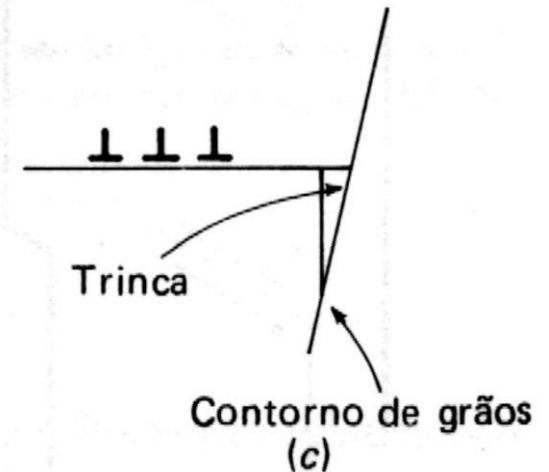
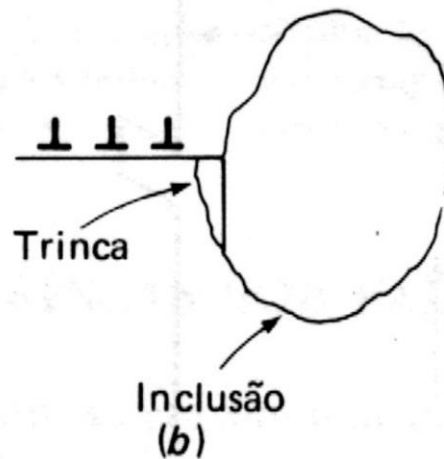
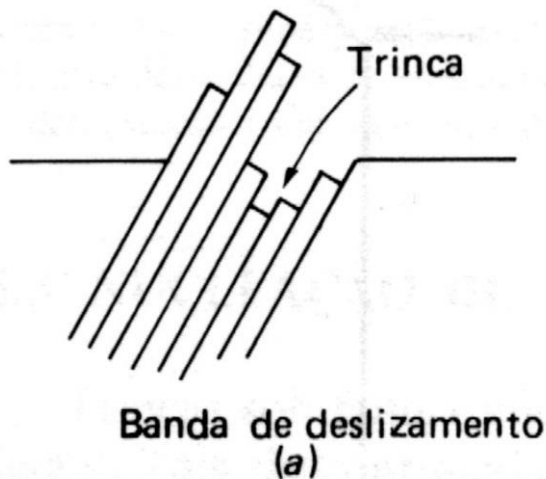


Typical ladder-like structure of PSBs  
(Metals Handbook, vol. 19)



INTRUSÕES E EXTRUSÕES

- No caso de materiais frágeis ou duros, como as ligas de alta resistência de alumínio e os aços tratados para uma alta dureza, a nucleação das trincas inicia na interface entre a matriz e as inclusões existentes, já que a matriz não chega a ser deformada plasticamente.
- Desta forma não surgem as bandas de deslizamento na superfície livre, com a nucleação iniciando mais no interior do material: trinca subsuperficial.



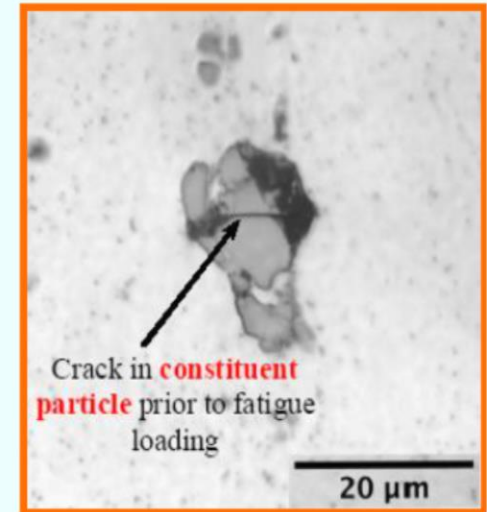
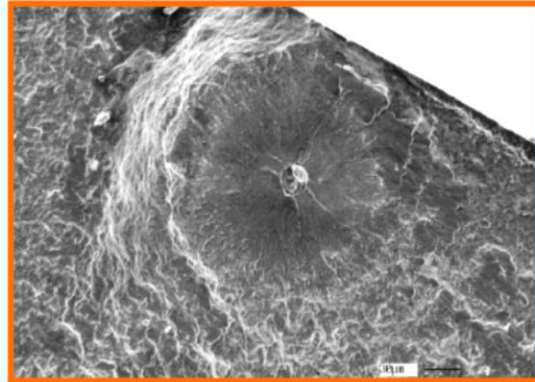
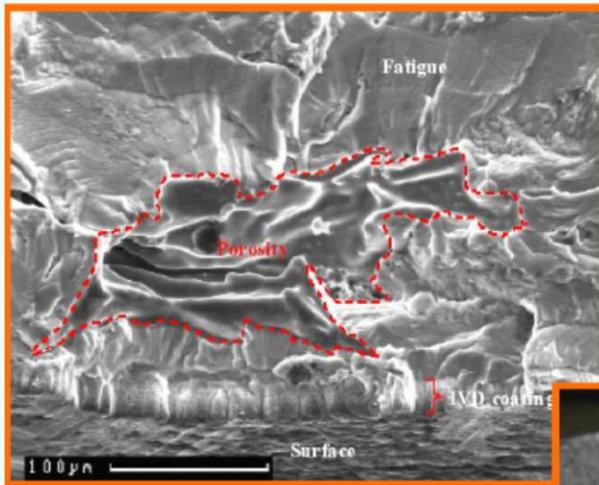
# INICIAÇÃO DA TRINCA

Trincas iniciando a partir de descontinuidades

- Diferença entre componentes e testes de laboratório

*Inclusão sub-superficial*

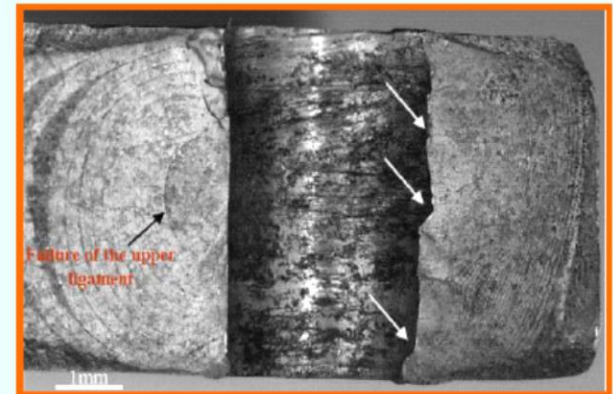
*Trinca iniciando em poro*



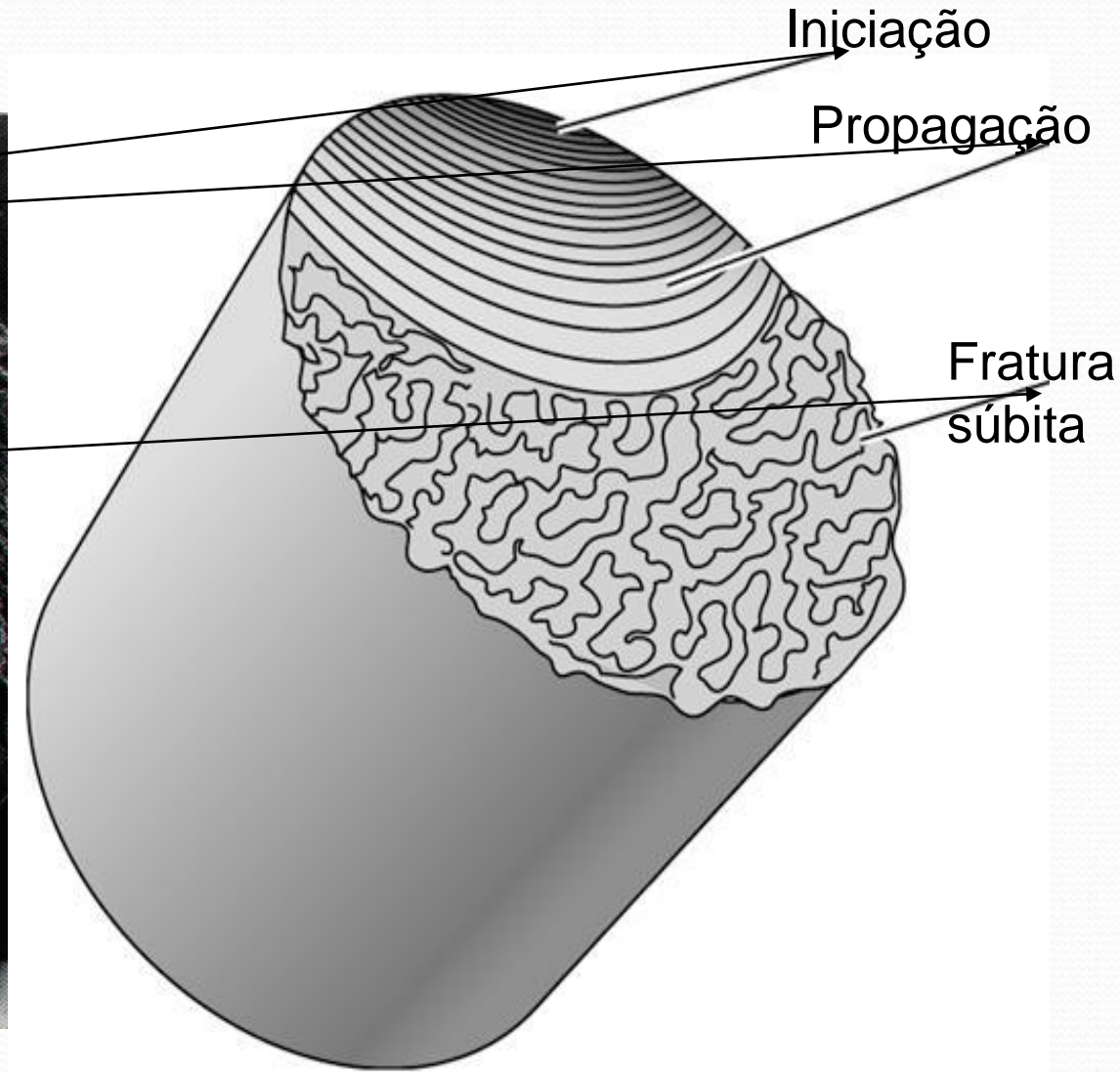
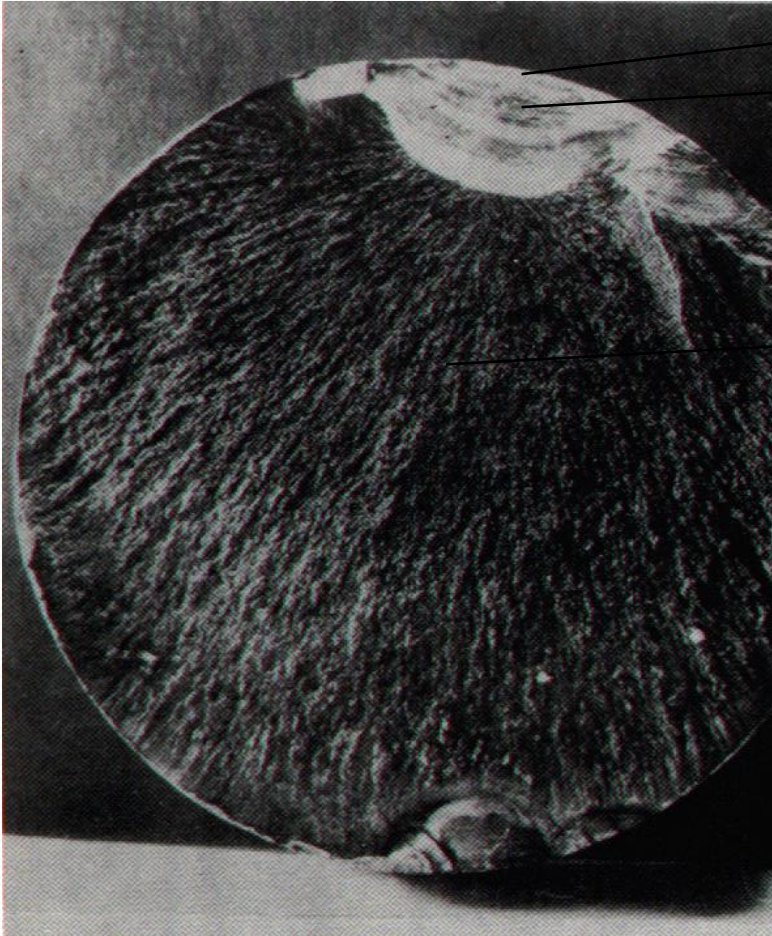
*Partícula fraturada*

*Furo mal-executado*

*Defeitos em cordão de solda*



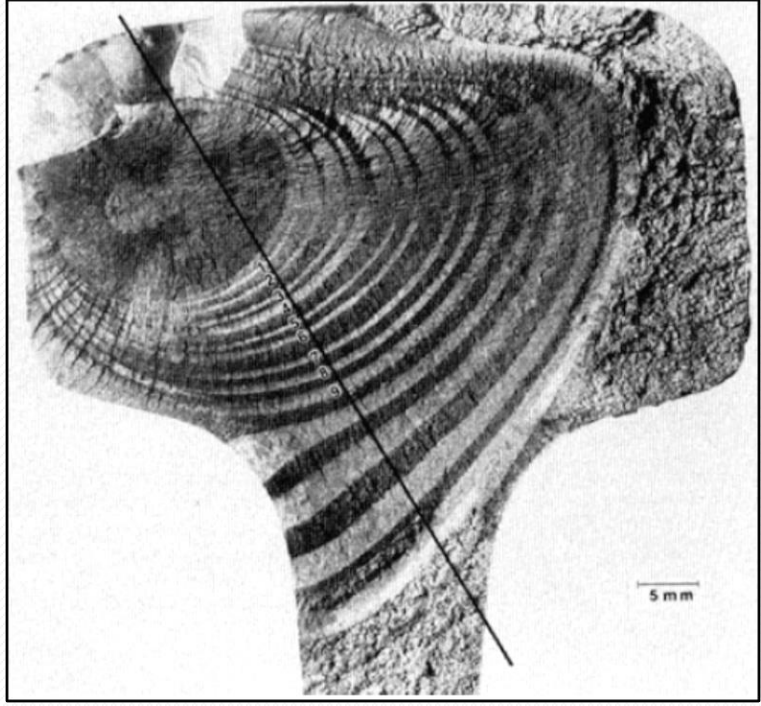
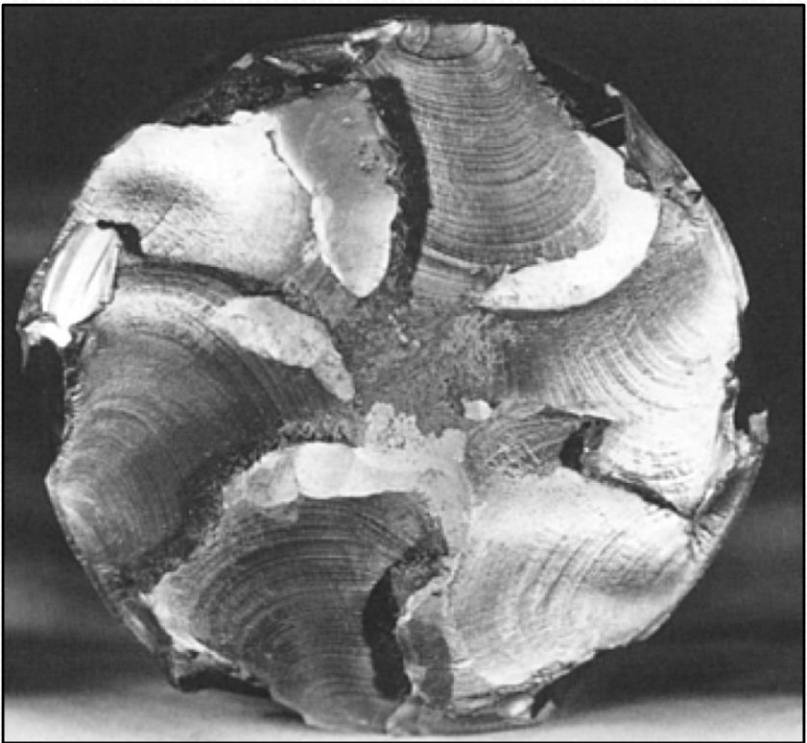
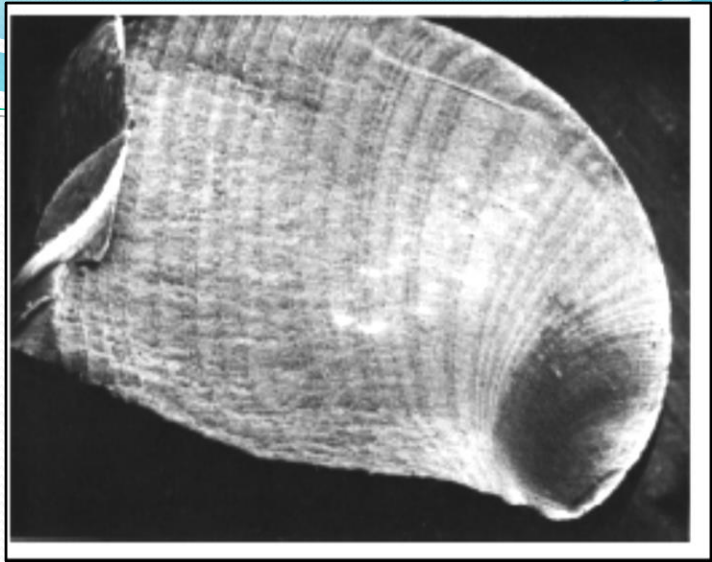
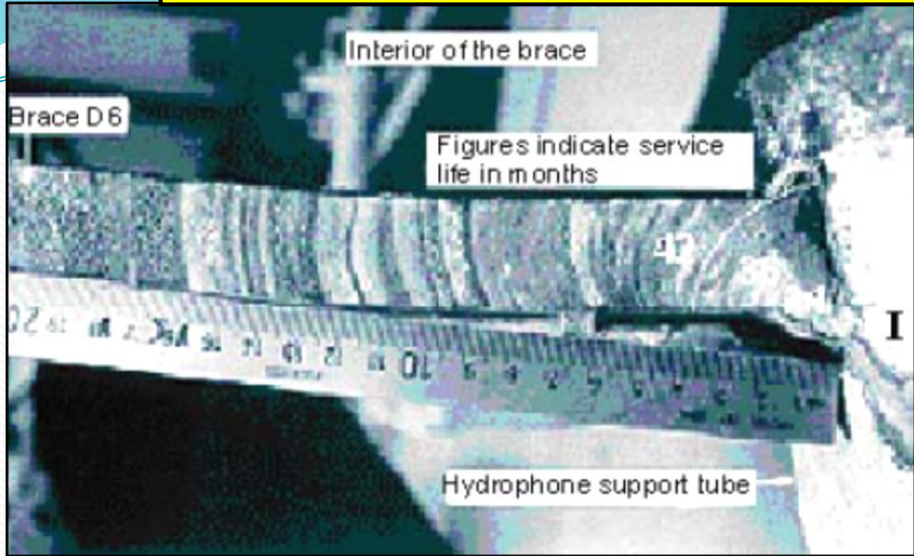
# Fraturas de Fadiga e Características Macroscópicas




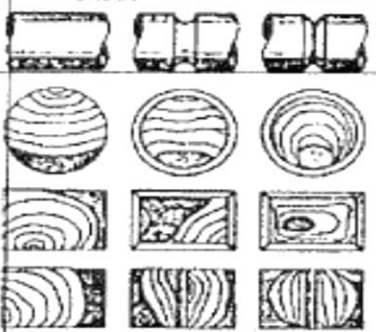

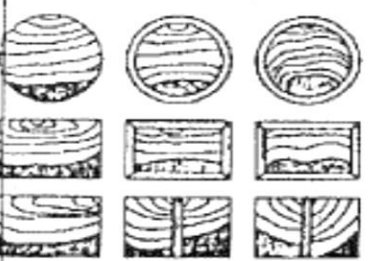
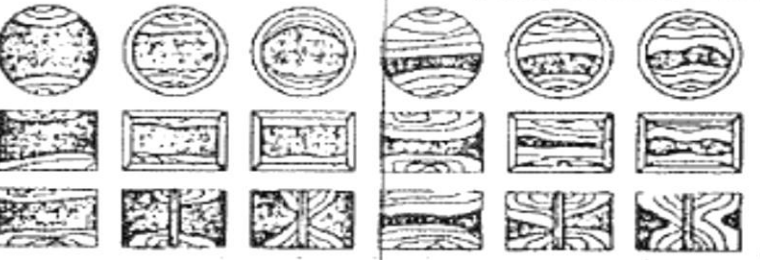
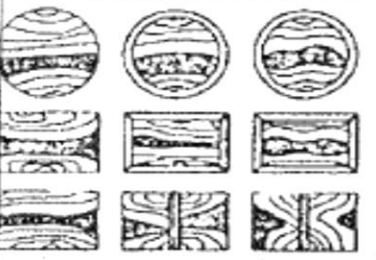


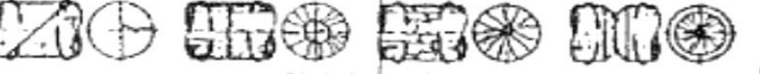

## FADIGA- MARCAS DE PRAIA

- **Marcas de praia (beach marks) são macroscópicas;**
- **Marcas de praia são produzidas sempre que ocorre uma alteração “significativa” no ciclo de carregamento, seja na amplitude de tensões, na frequência de solicitação, na tensão média (oxidação);**
- **É possível existir fratura de fadiga sem “marcas de praia”, embora, na prática, isto seja raro pois a maioria dos componentes não estão sujeitos, em serviço, a ciclos uniformes, a não ser em ensaios controlados;**

# FADIGA- MARCAS DE PRAIA



# FADIGA- MARCAS DE PRAIA- CARACTERIZAÇÃO

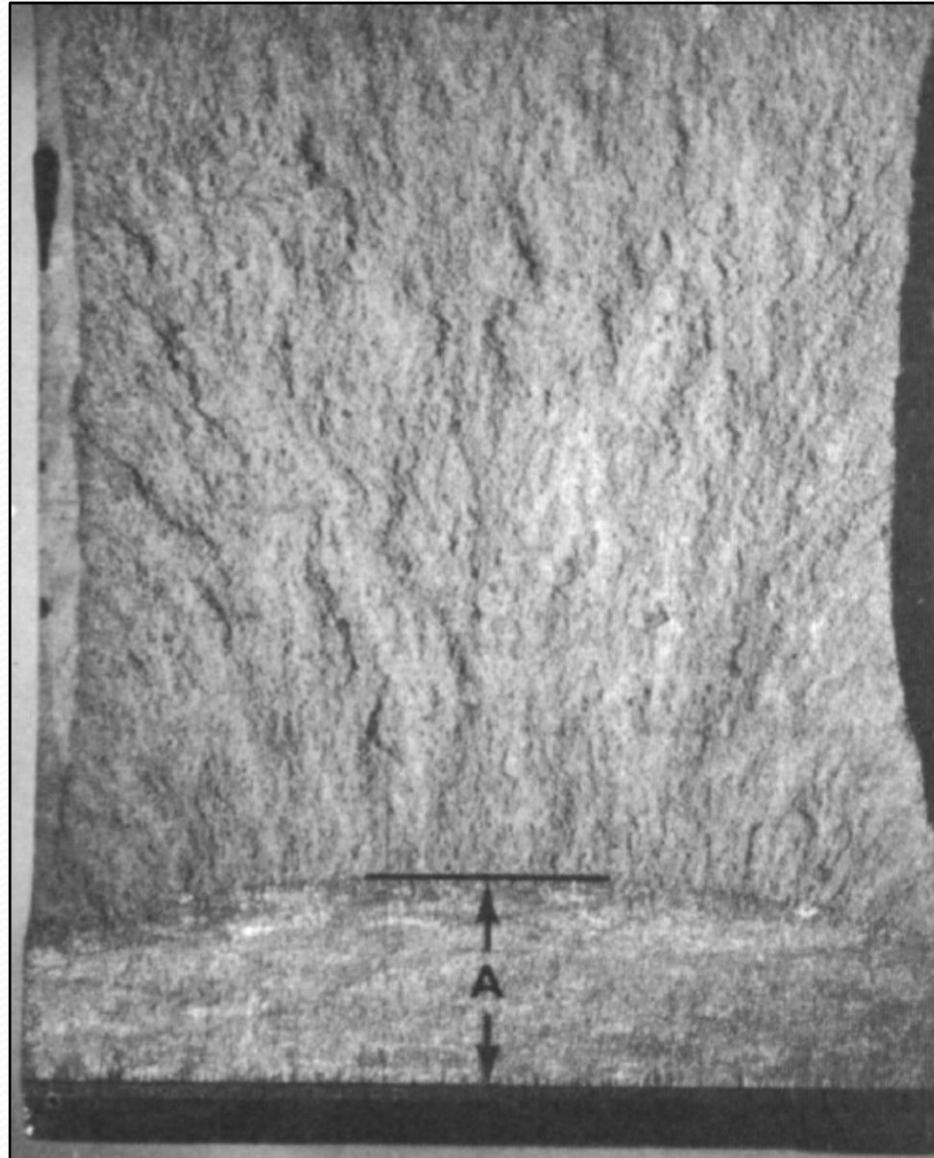
Alto nível de tensão AUMENTO da concentração de tensão →	Baixo nível de tensão AUMENTO da concentração de tensão →	
		Tração- tração ou tração- compressão
		Flexão unidireci- onal
		Flexão reversa
		Flexão rotativa
		Torção cíclica

Quanto maior a área de ruptura final, maiores as tensões ( ou menor a tenacidade).

No caso de tensões baixas e alta concentração de tensões (entalhe severo), a fratura pode inverter a sua concavidade (mais notado em retangulares).



**CORPO DE PROVA DE ENSAIO DE TENACIDADE À FRATURA, COM TRINCA POR FADIGA NUCELADA COM CICLO CONTRADO-NÃO HÁ MARCAS-DE PRAIA**



**SEM MARCAS  
DE PRAIA**

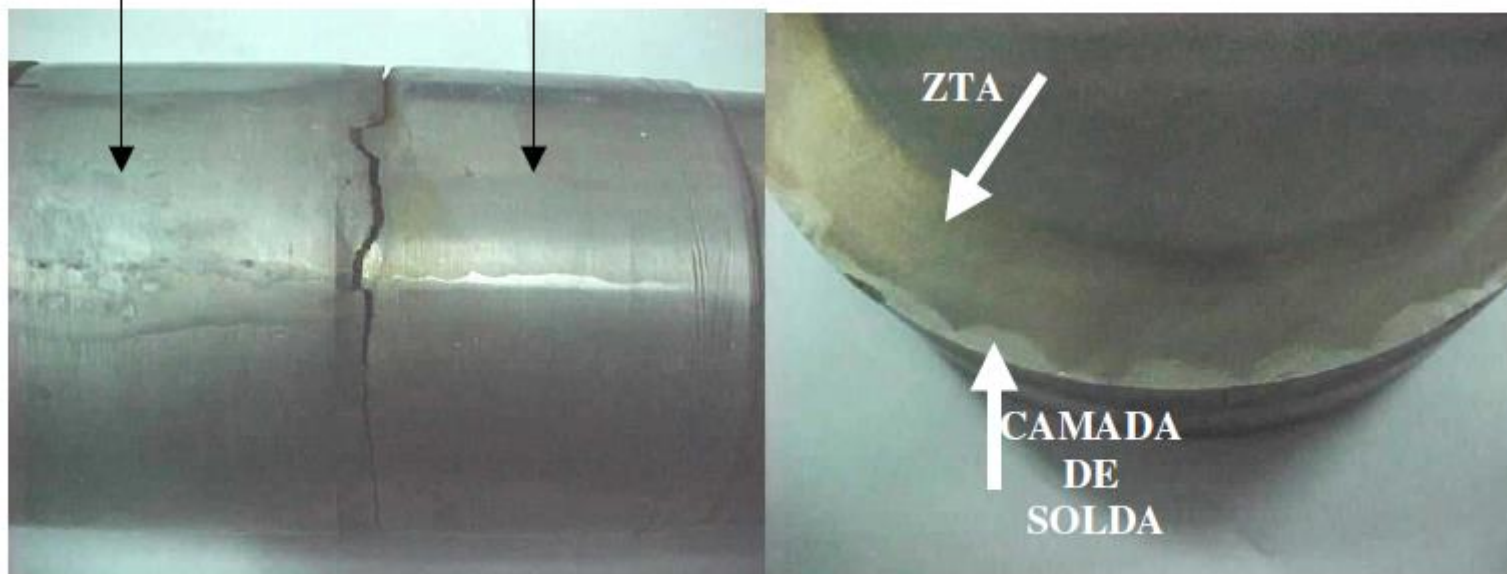


# FADIGA- MARCAS DE PRAIA –CASO I – 2005 - JBM

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

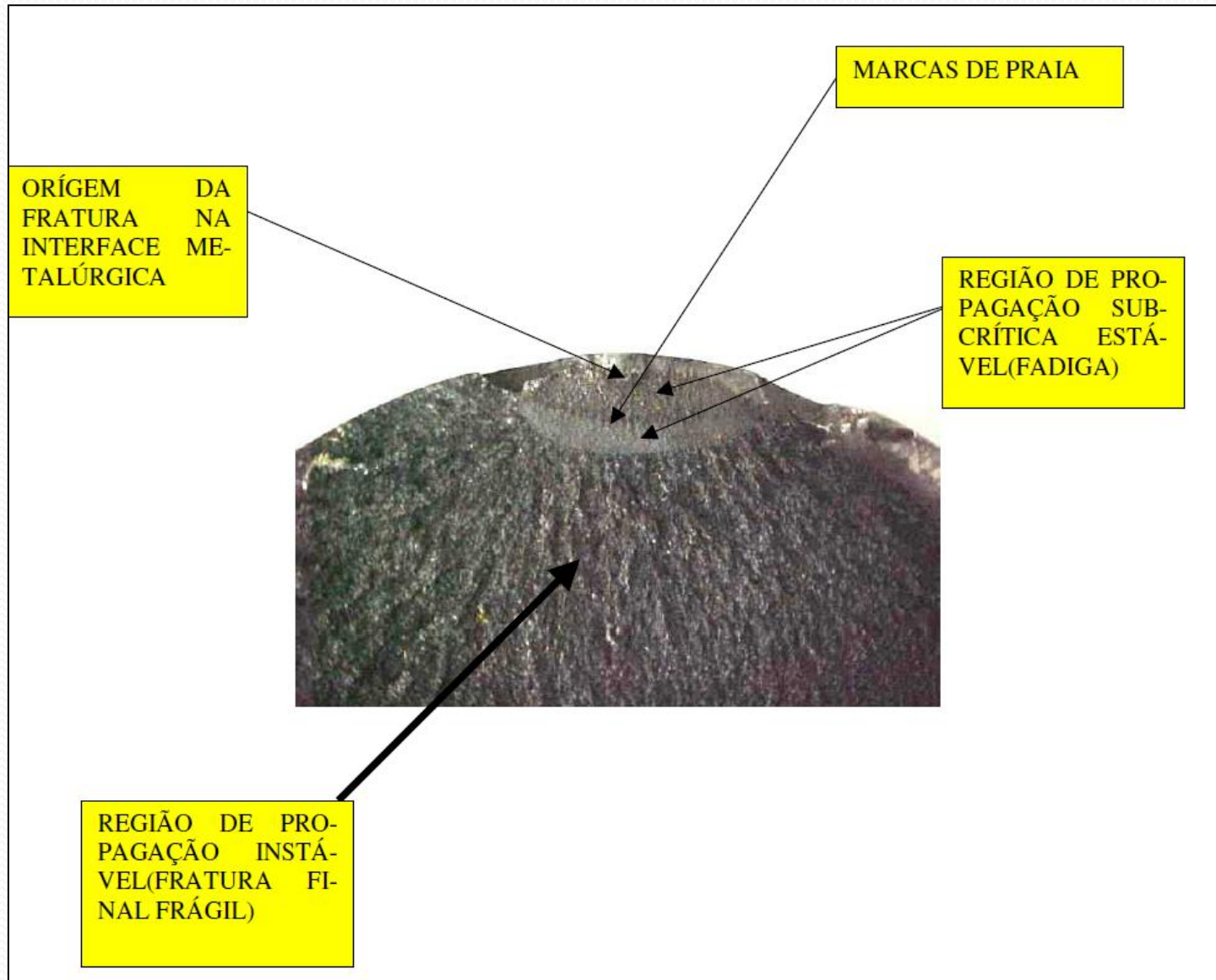
CAMADA DE  
SOLDA

SOLDA REVELADA POR NITAL  
(MATOU A PEÇA E TENTOU CONSERTAR  
COM SOLDA SEM TT)

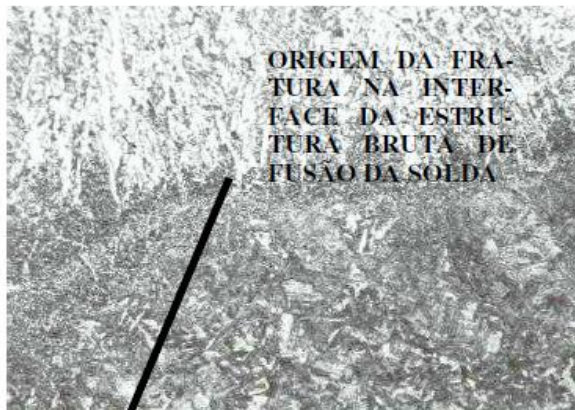


ANÁLISE DE FALHAS – EIXO – AÇO SAE4140 – T+R - 2005.

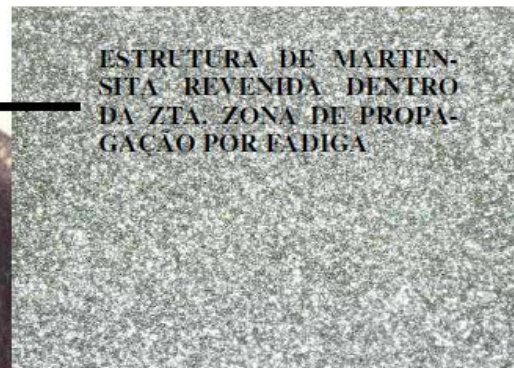
# A TRINCA POR FADIGA É NUCLEADA NA SUPERFÍCIE, A NÃO SER QUE OCORRA UMA DESCONTINUIDADE SUBSUPERFICIAL.



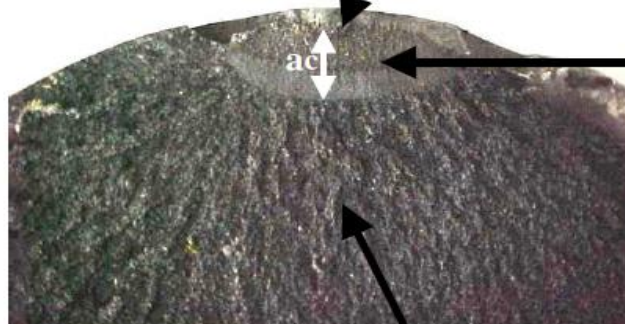
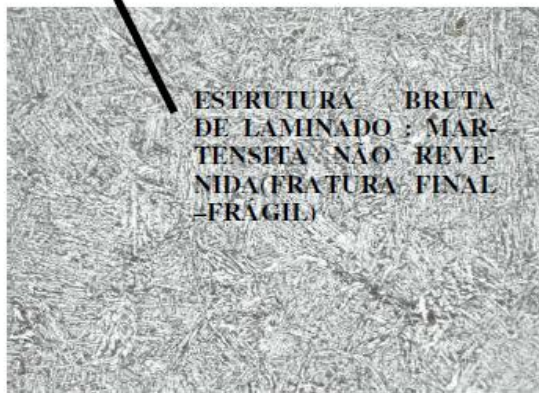
ORIGEM DA FRA-  
TURA NA INTER-  
FACE DA ESTRU-  
TURA BRUTA DE  
FUSÃO DA SOLDA



ESTRUTURA DE MARTEN-  
SITA REVENIDA DENTRO  
DA ZTA. ZONA DE PROPAGA-  
ÇÃO POR FADIGA



ESTRUTURA BRUTA  
DE LAMINADO : MAR-  
TENSITA NÃO REVE-  
NIDA (FRATURA FINAL  
-FRÁGIL)

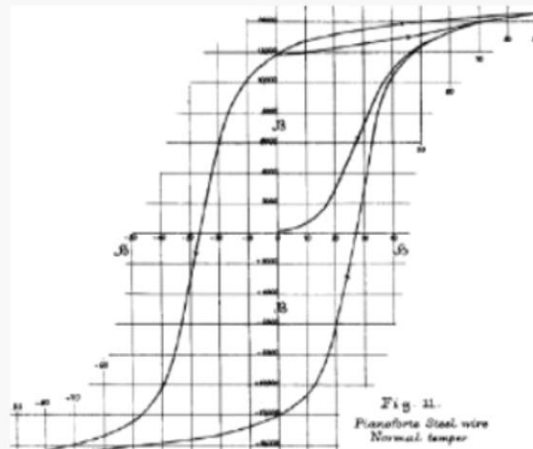
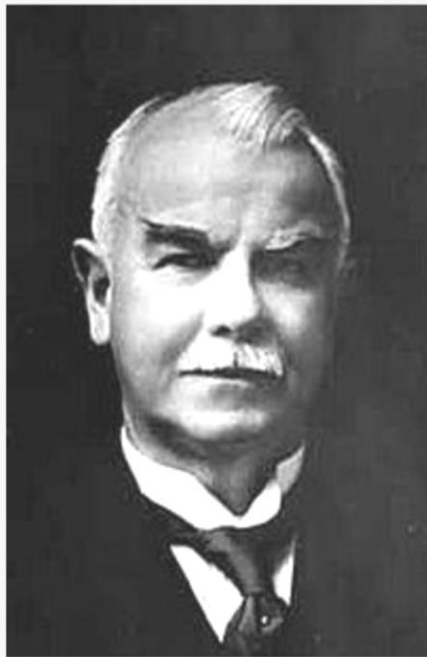


## FADIGA - ESTRIAS

- São microscópicas;
- Existem independentemente do ciclo ser variável ou uniforme e constituem uma verdadeira “assinatura” do mecanismo de fadiga;
- Cada estria é provocada num único ciclo de tensões, mas nem todo ciclo produz uma estria - a frente da trinca pode permanecer parada durante centenas de ciclos ou avançar;
- A menor distância entre estrias é de 0,5 a 1  $\mu\text{m}$ , dependendo do material.
- Não se cruzam – não confundir com “linhas de Wallner”;
- Linhas de Wallner ocorrem na fratura por clivagem em materiais extremamente frágeis, como cerâmicas;
- Às vezes são de difícil visualização. Ocorrem mais facilmente em materiais dúteis;

# OS PIONEIROS

## James Alfred Ewing (1855-1935)



*J. A. Ewing and J. C. W. Hasselberg*

*Phil. Trans., A, vol. 200, Plate 2.*

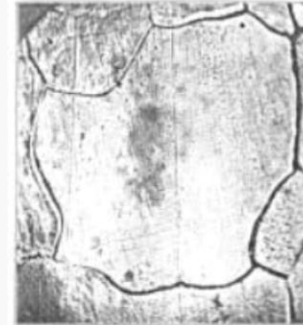


Fig. 9. Specimen after 1000 revolutions of a stress of 12.4 tons per sq. inch.  $\times 4000$ .



Fig. 10. Specimen after 500 revolutions.  $\times 1000$ .



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



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

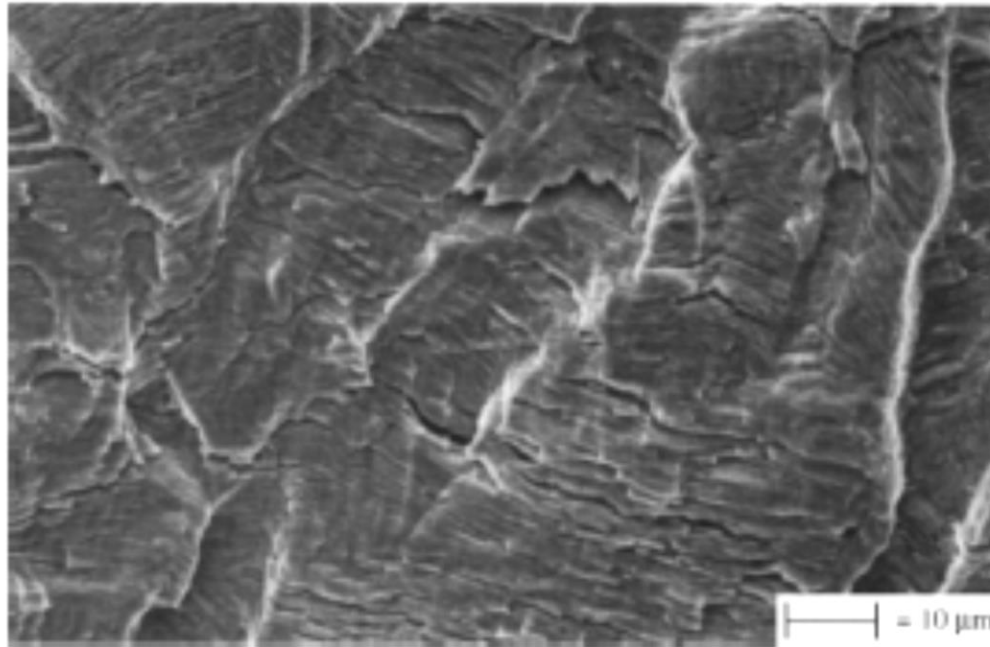
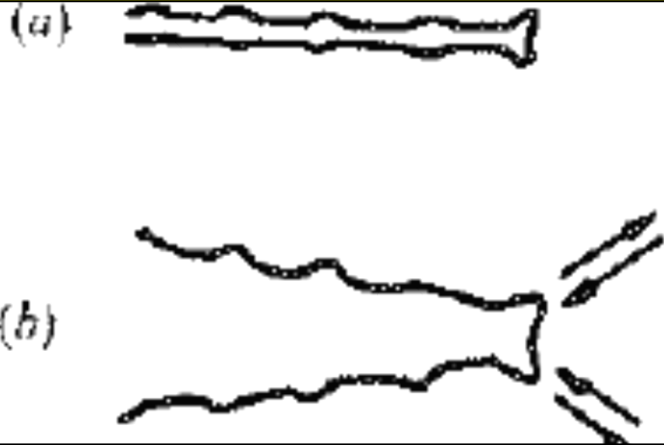


Fig. 6.11. – Estrias em aço temperado e revenido

## FADIGA - ESTRIAS

(a) e (b) Com o aumento da carga trativa, ocorre a formação de entalhes duplos na ponta da trinca, devido a indução da tensão cisalhante na direção de  $45^\circ$



(c) Na máxima tensão, ocorre o fechamento completo



Existem diversas teorias para a formação das estrias, nenhuma totalmente satisfatória;

Laird (1967) – fechamento plástico provocando um “arredondamento” da ponta da trinca e posterior propagação. Propagação por cisalhamento;

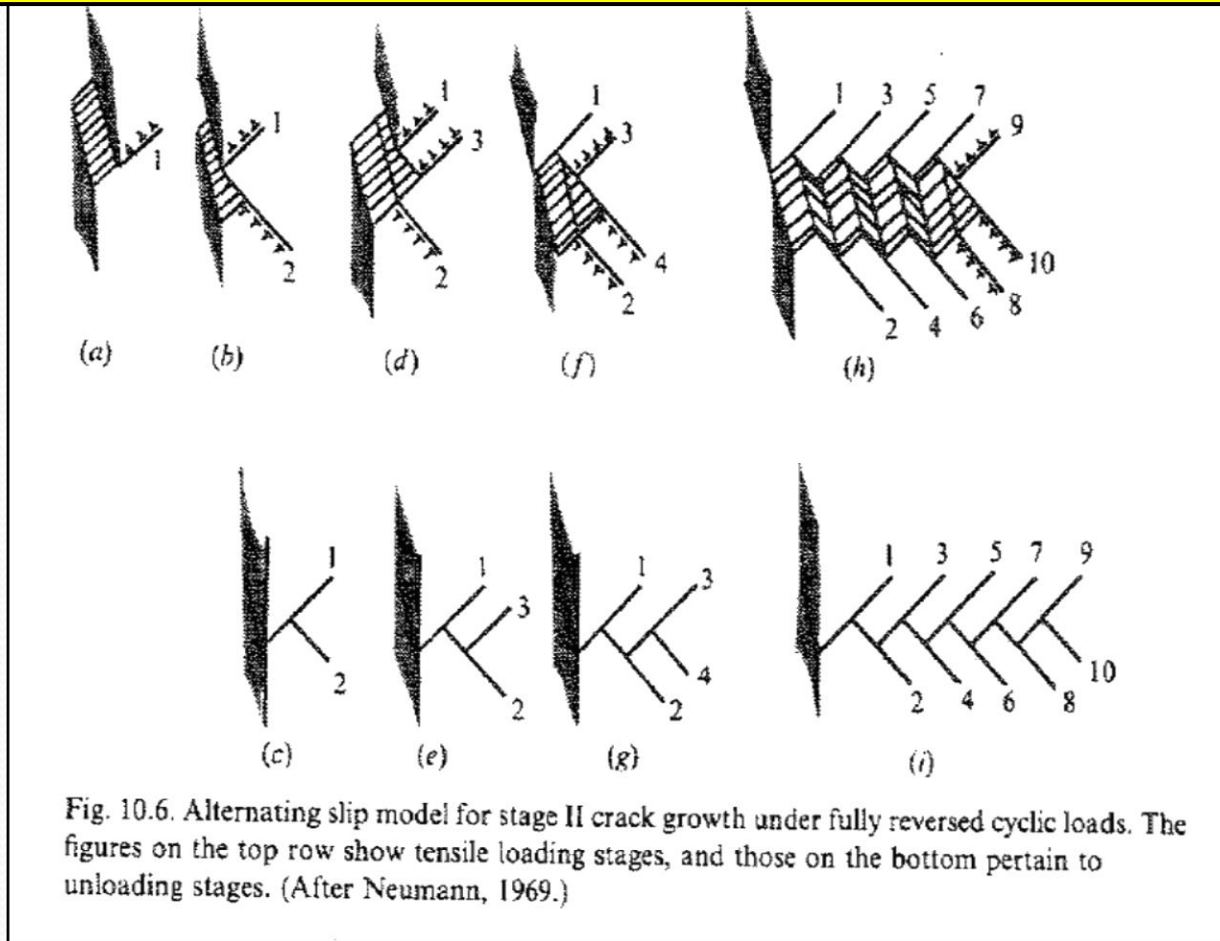
A teoria é aceitável mas provavelmente é muito mais complexa: necessidade da presença de  $O_2$  para formação das estrias. As moléculas auxiliam o mecanismo de formação.

O cisalhamento se inverte e provoca o os entalhaes duplos novamente.

IDEALIZAÇÃO DO FECHAMENTO PLÁSTICO DA TRINCA GERANDO AS ESTRIAS.



# TEORIA DA FORMAÇÃO DE ESTRIAS DÚTEIS – ORIUNDAS DO DUPLO DESLIZAMENTO CRUZADO DE LINHAS DE DISCORDÂNCIA, ENVOLVENDO DOIS PLANOS CRISTALOGRÁFICOS.



# ESTRIAS DÚTEIS

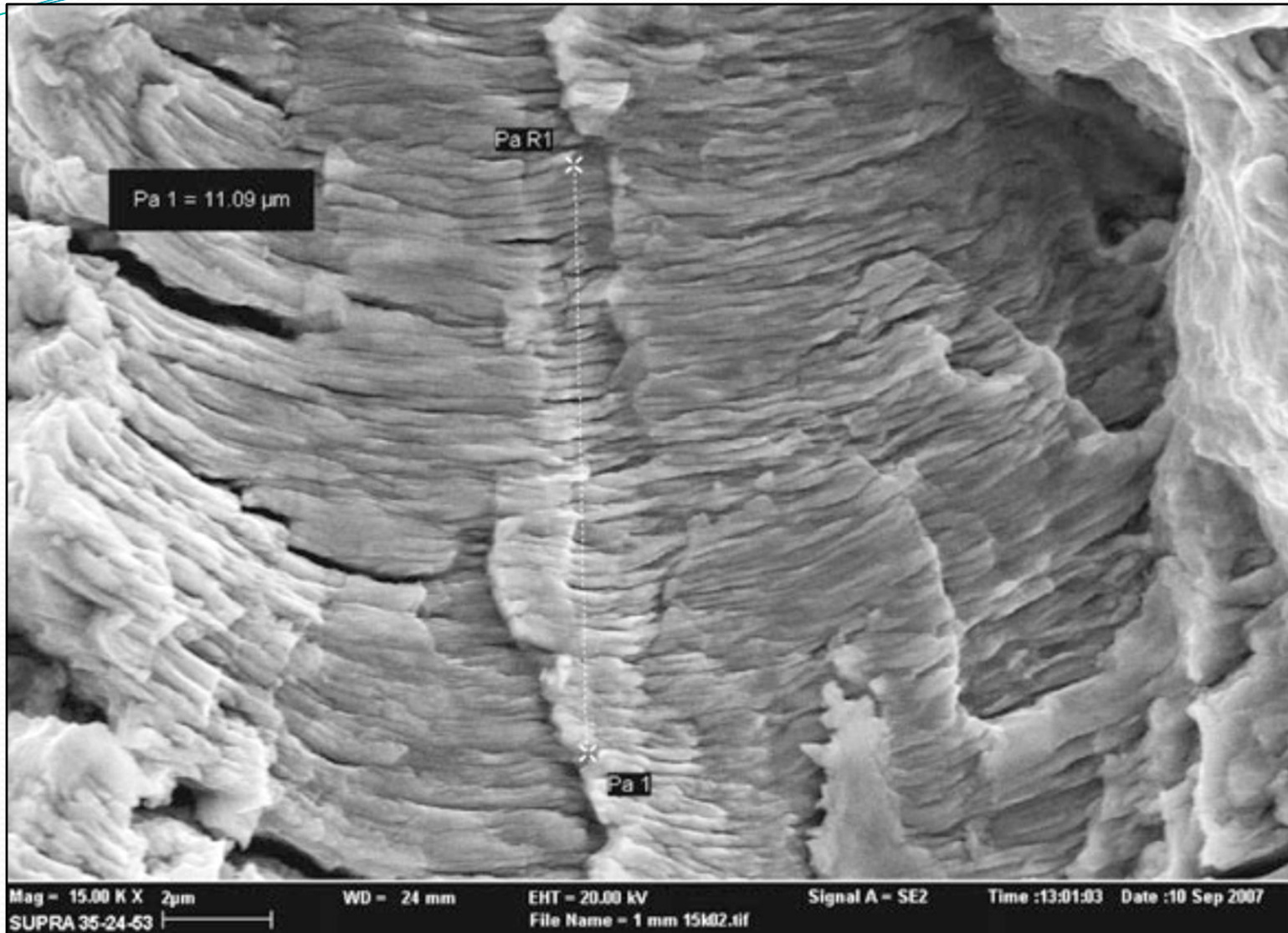
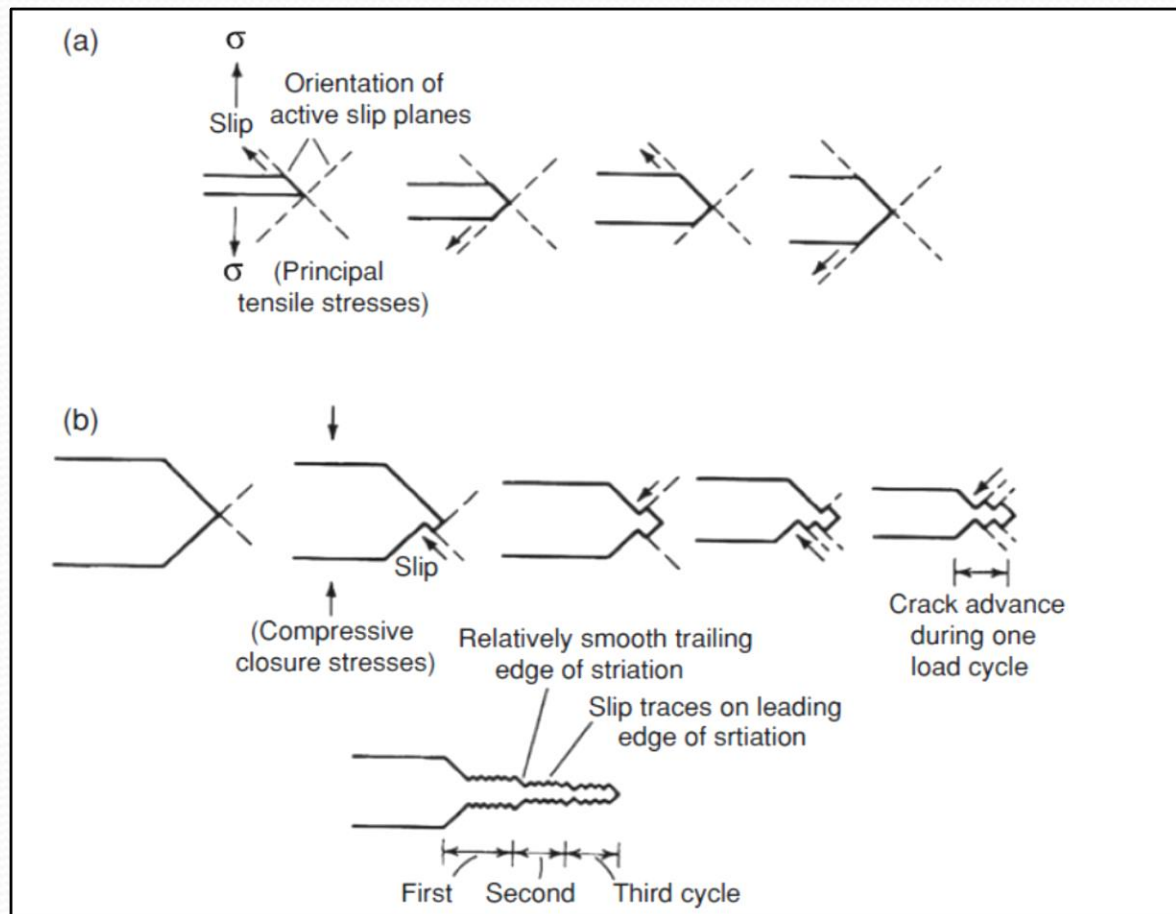
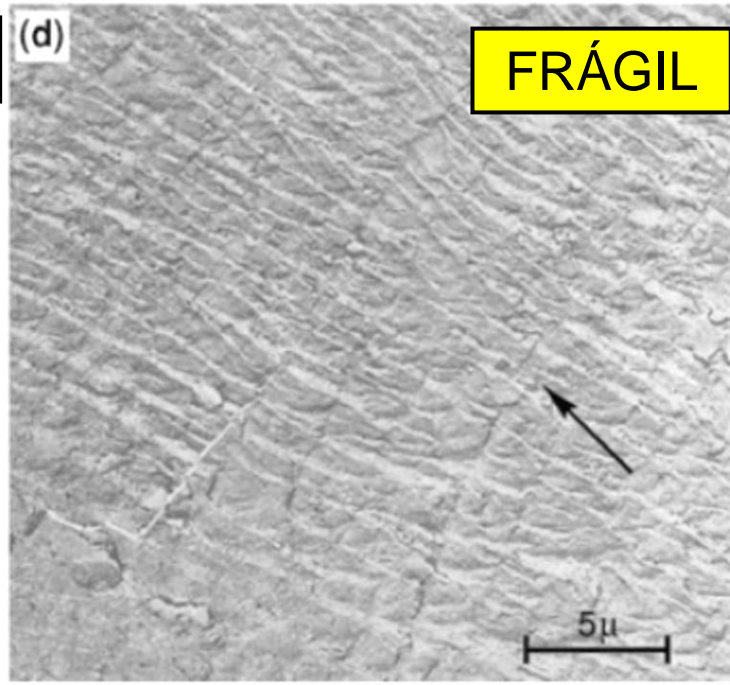
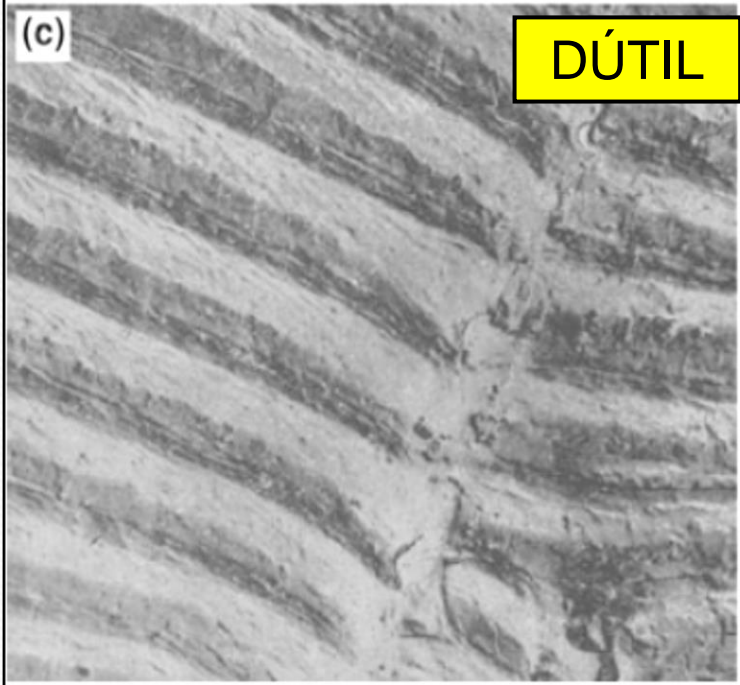
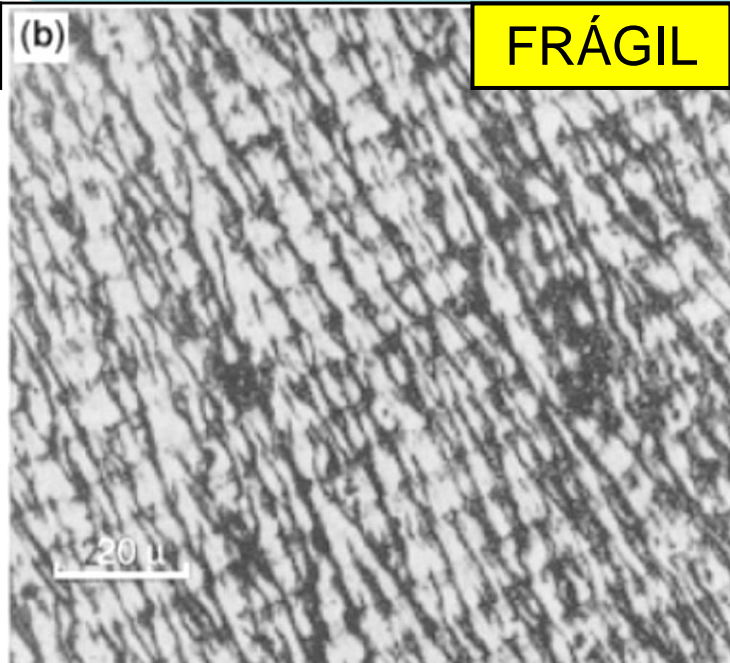
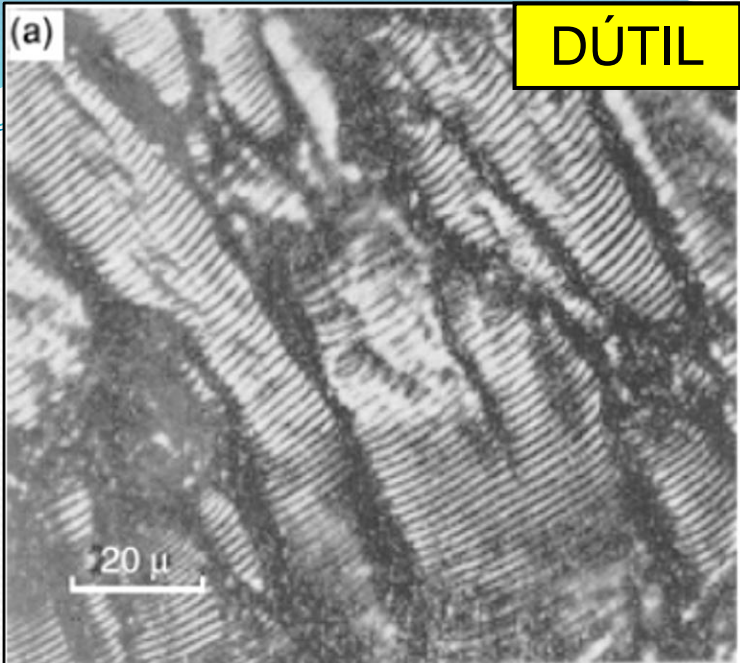


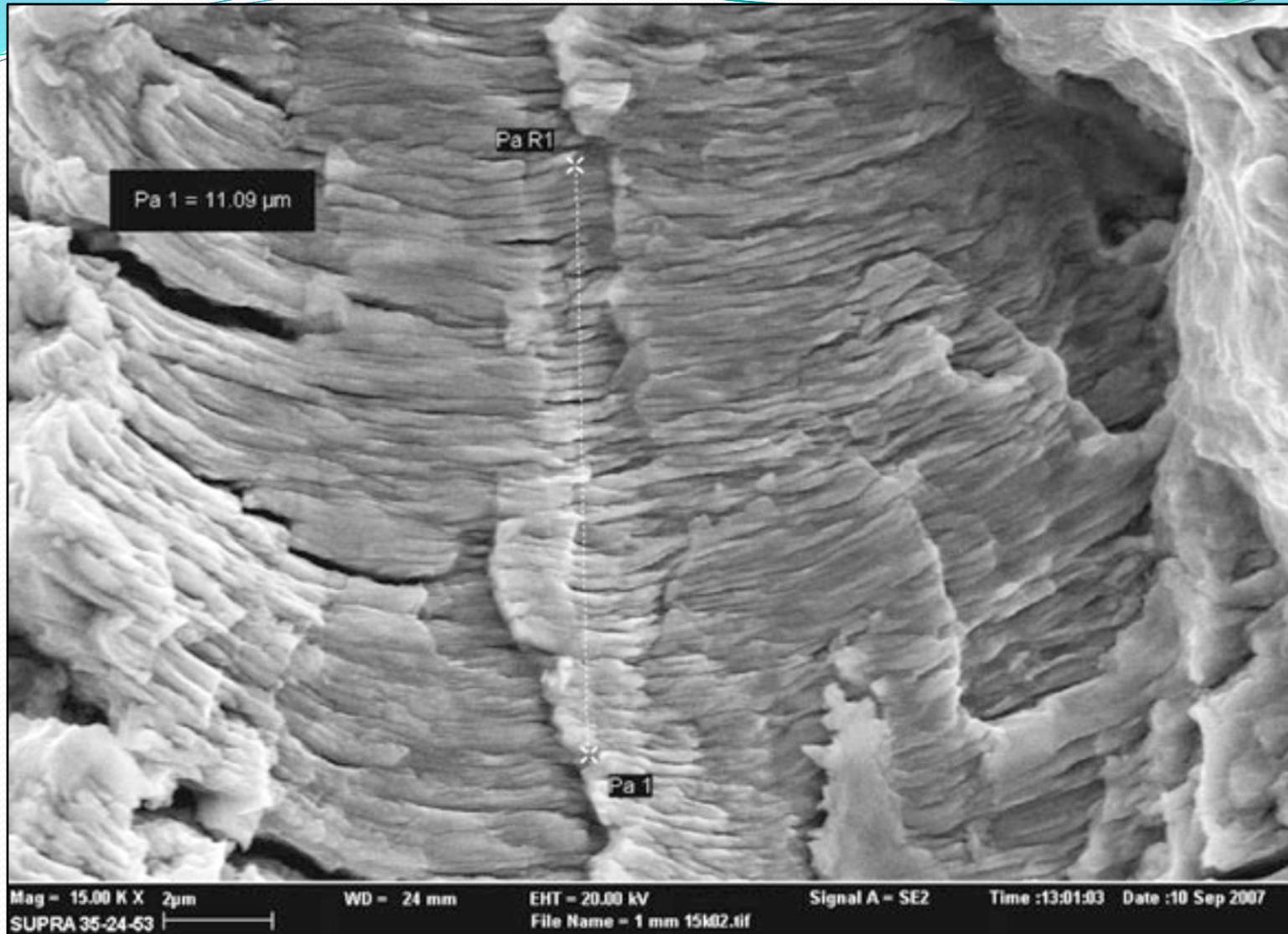
Imagem de MEV(Microscópio Eletrônico de Varredura)

TEORIA DA FORMAÇÃO DE ESTRIAS FRÁGEIS – RELACIONADA À  
**FRAGILIZAÇÃO**: PARTÍCULAS DURAS, HIDROGÊNIO E OUTROS.  
GERADAS POR **LINHAS DE DISCORDÂNCIAS** NOS PLANOS DE  
DESLIZAMENTO, GERALMENTE NOS **PLANOS BASAIS (100)**.  
APARÊNCIA **PLANA**, SEM DEFORMAÇÃO PLÁSTICA  
MACROSCÓPICA.

O mecanismo de formação de **estrias frágeis** pode ser considerado como **microclivagens**.

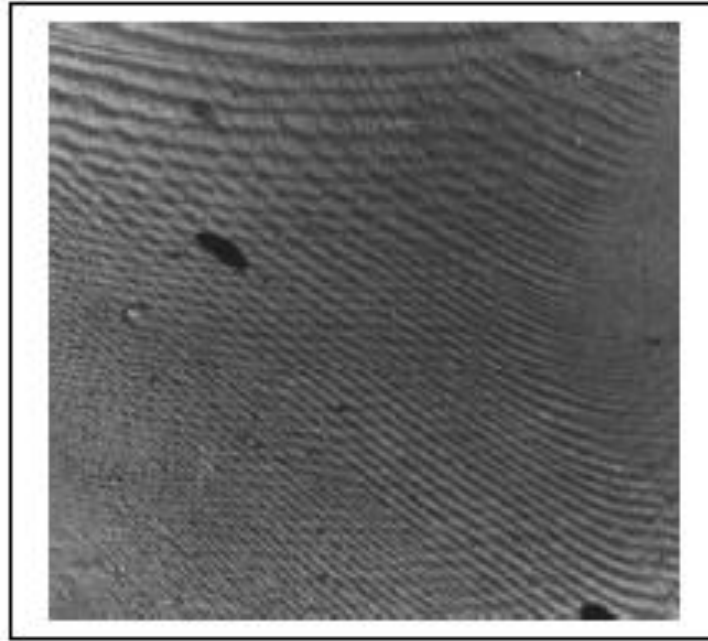






Prof.Dr. José Benedito Marcomini

## FADIGA – ESTRIAS X LINHAS DE WALLNER

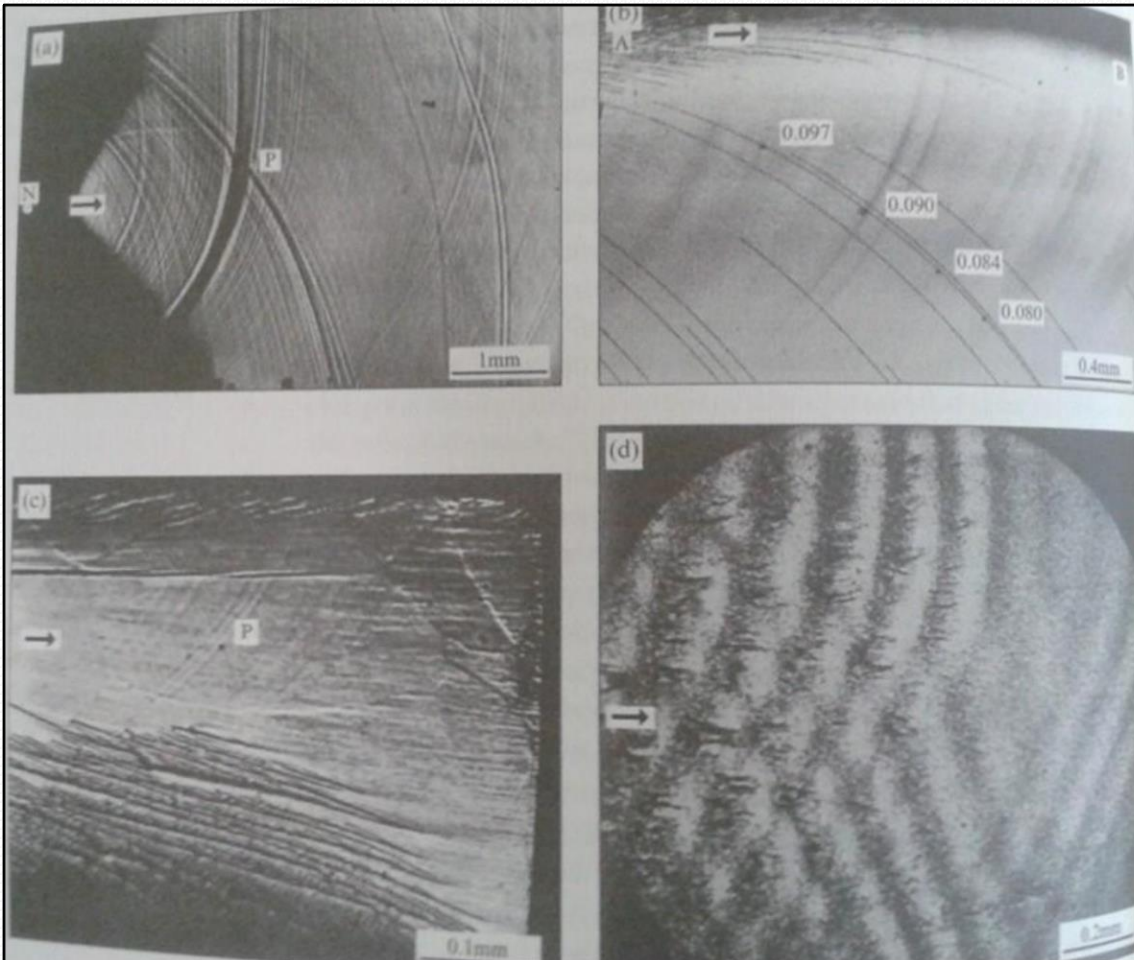


Linhas de Wallner

**Com a propagação da trinca, são geradas “ondas de tensão” ou ondas elásticas, que mudam o campo de tensões à frente da trinca, levando à propagação e provocam ondulações ou padrões como as linhas de Wallner. São utilizadas para calcular a velocidade local da propagação da trinca por um método chamado: fractografia de ondas de tensão.**

## FADIGA – ESTRIAS X LINHAS DE WALLNER

As ondas de tensão são difratadas por descontinuidades e tornam-se transversais, assim como ocorre com o método TOFD (Time of Flight Diffraction) em ensaio de ultrassom. Ondas ultrassônicas também provocam ondulações no material. A intersecção das ondulações de propagação da fratura com as ondulações das ondas de tensão difratadas formam as linhas de Wallner.



$$c_d = \left( \frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$c_s = \left( \frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{2(1 + \nu)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$C_d$  = ondas longitudinais

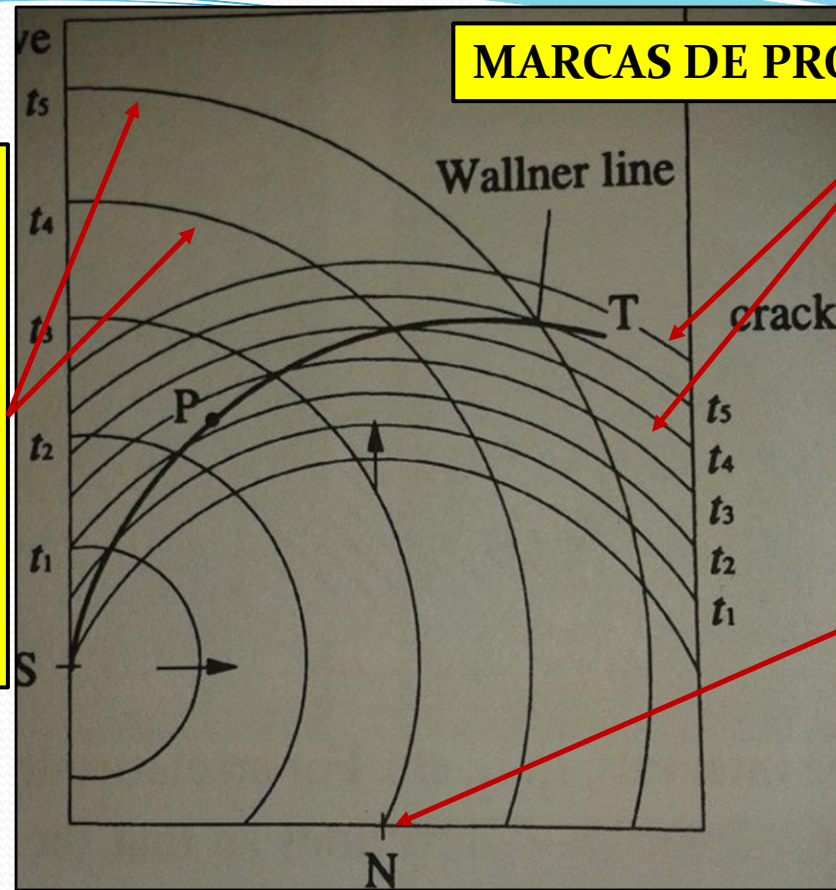
$C_s$  = ondas transversais

$$C_{d \text{ aço}} = 5.920 \text{ m/s}$$

$$C_s = 0,4 C_d$$

# LINHAS DE WALLNER: FRACTOGRAFIA DE ONDAS DE TENSÃO

ONDAS TRANSVERSAIS GERADAS PELO ENCONTRO DAS ONDAS ELÁSTICAS COM ALGUMA DESCONTINUIDADE  $\underline{S}$  (INCLUSÃO, SUPERFÍCIE, ETC)



N É A ORIGEM DA FRATURA E TEM QUE SER CONHECIDO

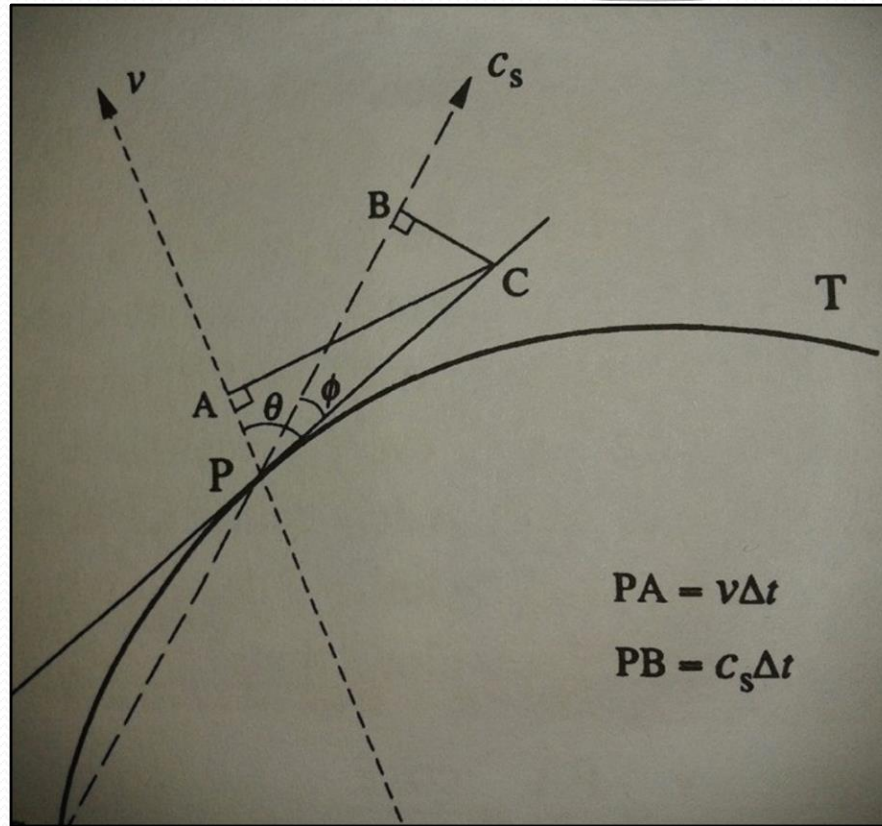
A forma das linhas de Wallner depende da velocidade propagação da fratura em relação à velocidade das ondas transversais de tensão:  $v/c_s$

Marcas de rio facilitam estas medidas.



# LINHAS DE WALLNER: FRACTOGRAFIA DE ONDAS DE TENSÃO

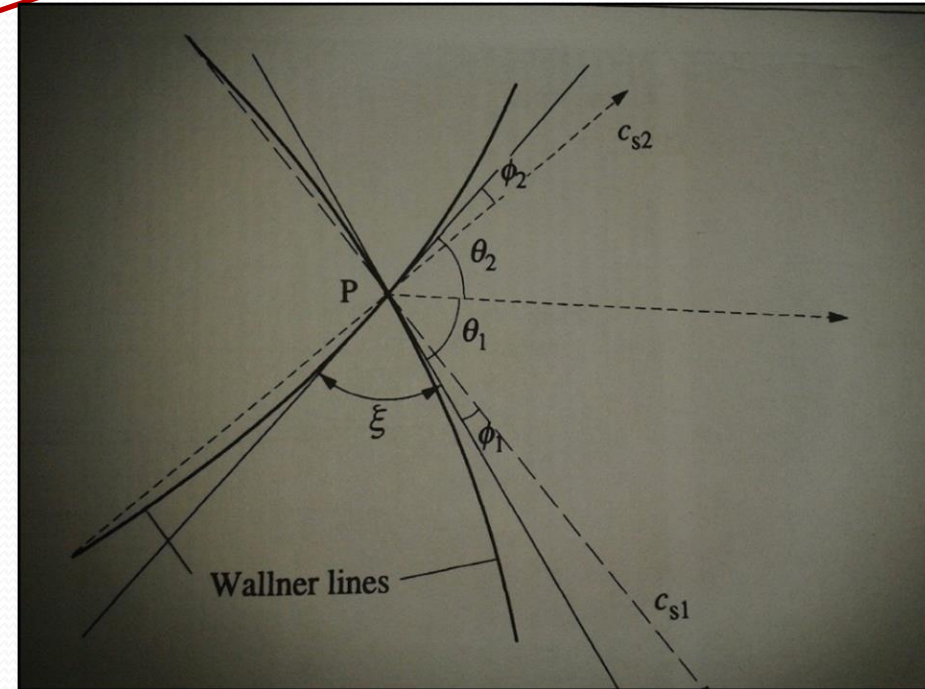
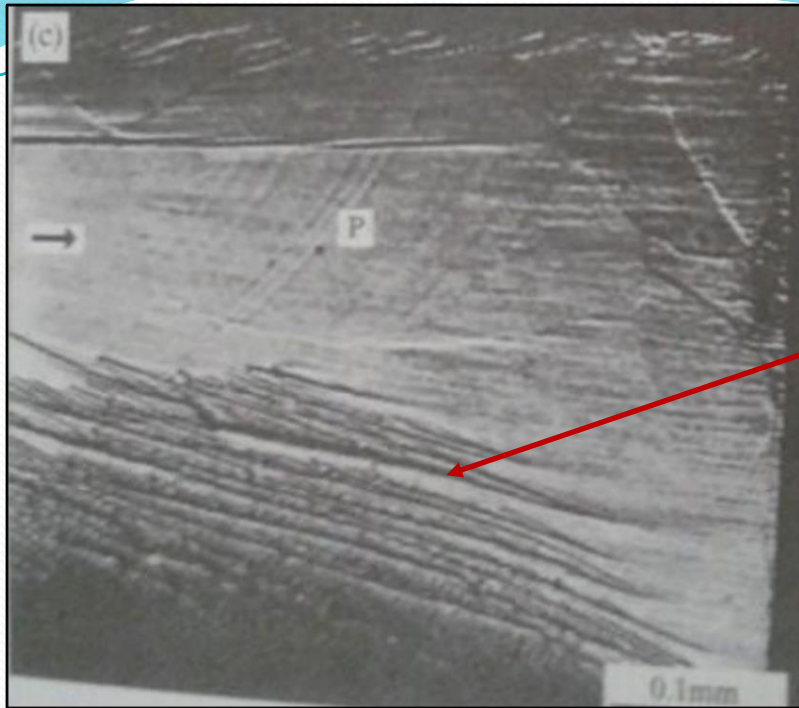
$$\frac{v}{c_s} = \frac{PA}{PB} = \frac{\cos \theta}{\cos \phi}$$



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

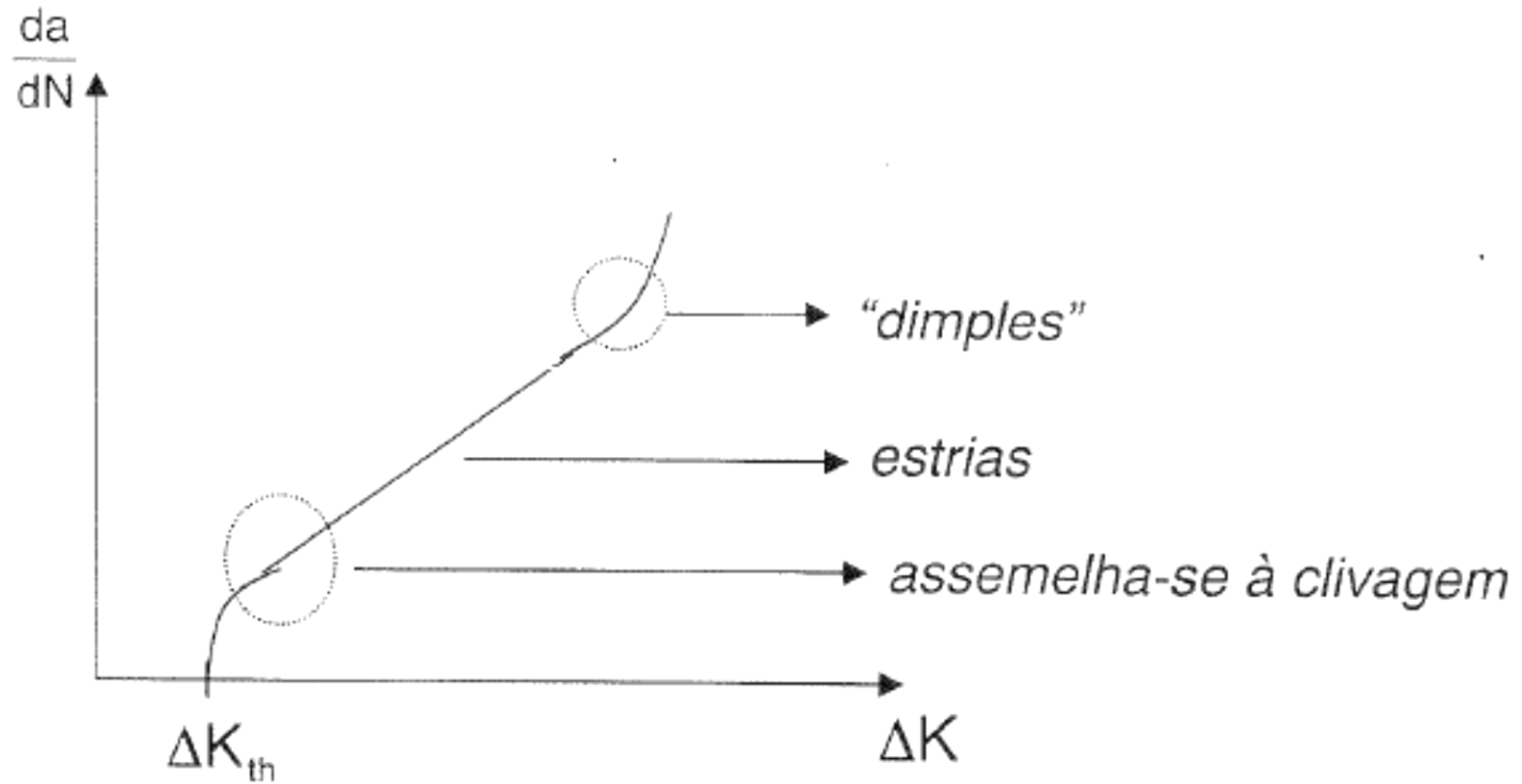
# LINHAS DE WALLNER: FRACTOGRAFIA DE ONDAS DE TENSÃO

OS DEGRAUS DAS MARCAS DE RIOS PODEM TER GERADO AS LINHAS DE WALLNER



$$\frac{v}{c_s} = \frac{\sin \xi}{(\cos^2 \phi_1 + \cos^2 \phi_2 + 2 \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos \xi)^{\frac{1}{2}}}$$

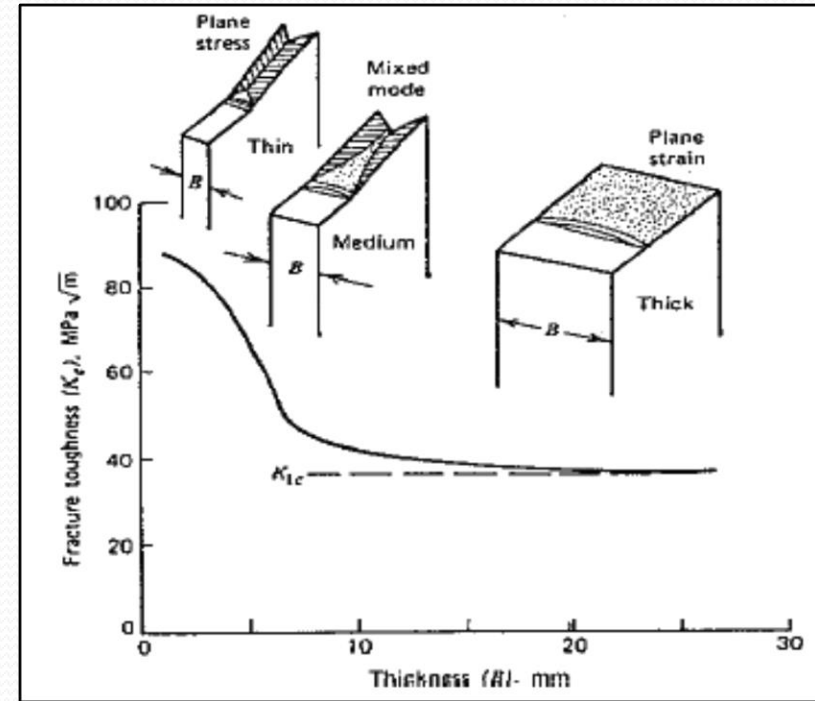
## Morfologia da superfície de fratura:



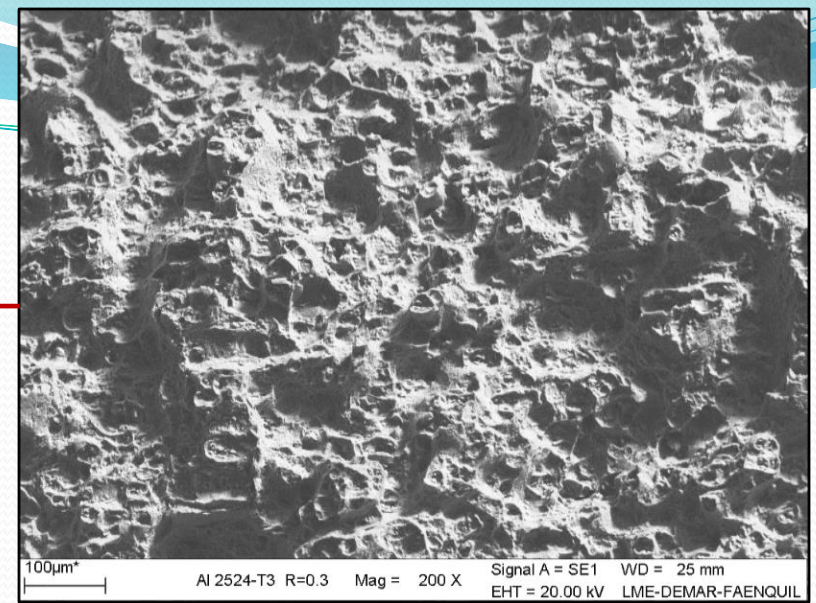
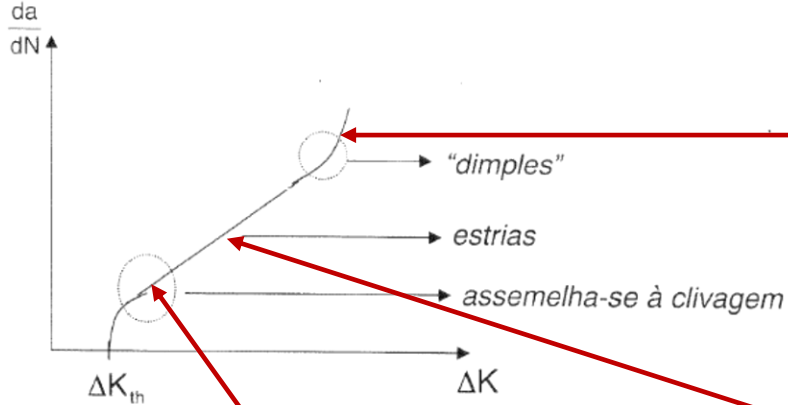
## Ensaio de Propagação da trinca por fadiga em Al 2524-T3

(Espessura do material recebido: 1/4 in).

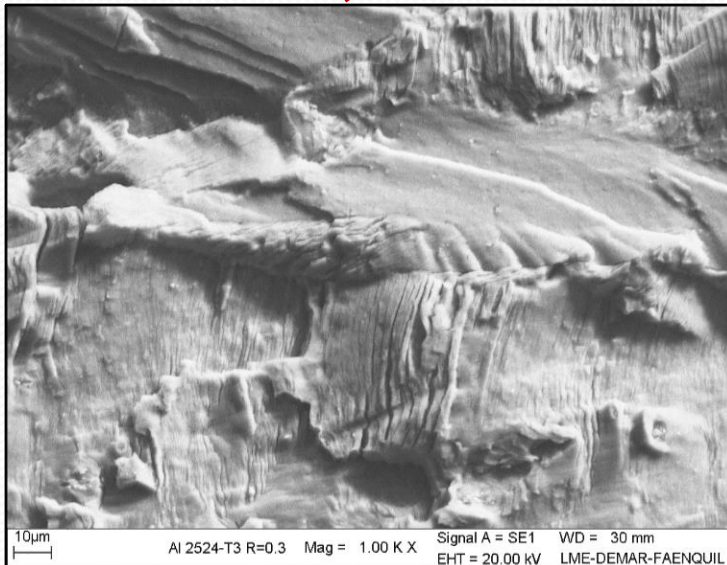
OBS.: Em todas as fotos a direção da propagação da trinca é da esquerda para a direita.



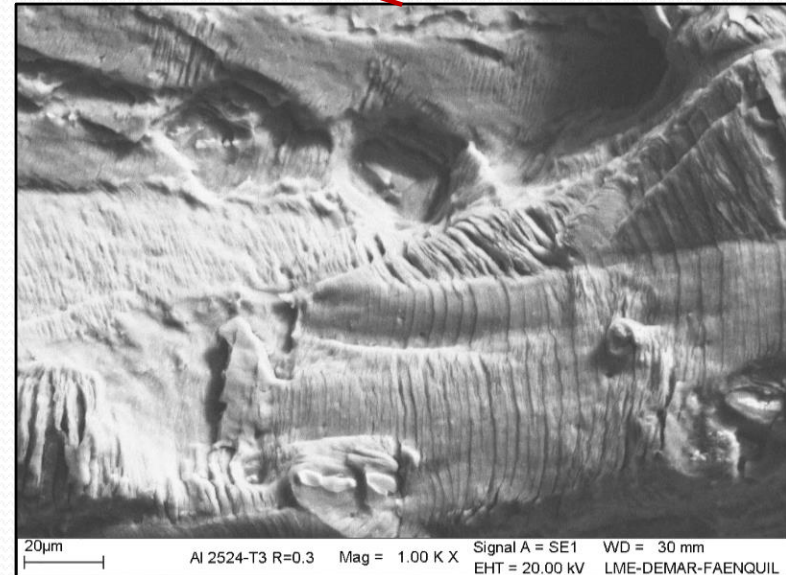
Morfologia da superfície de fratura:



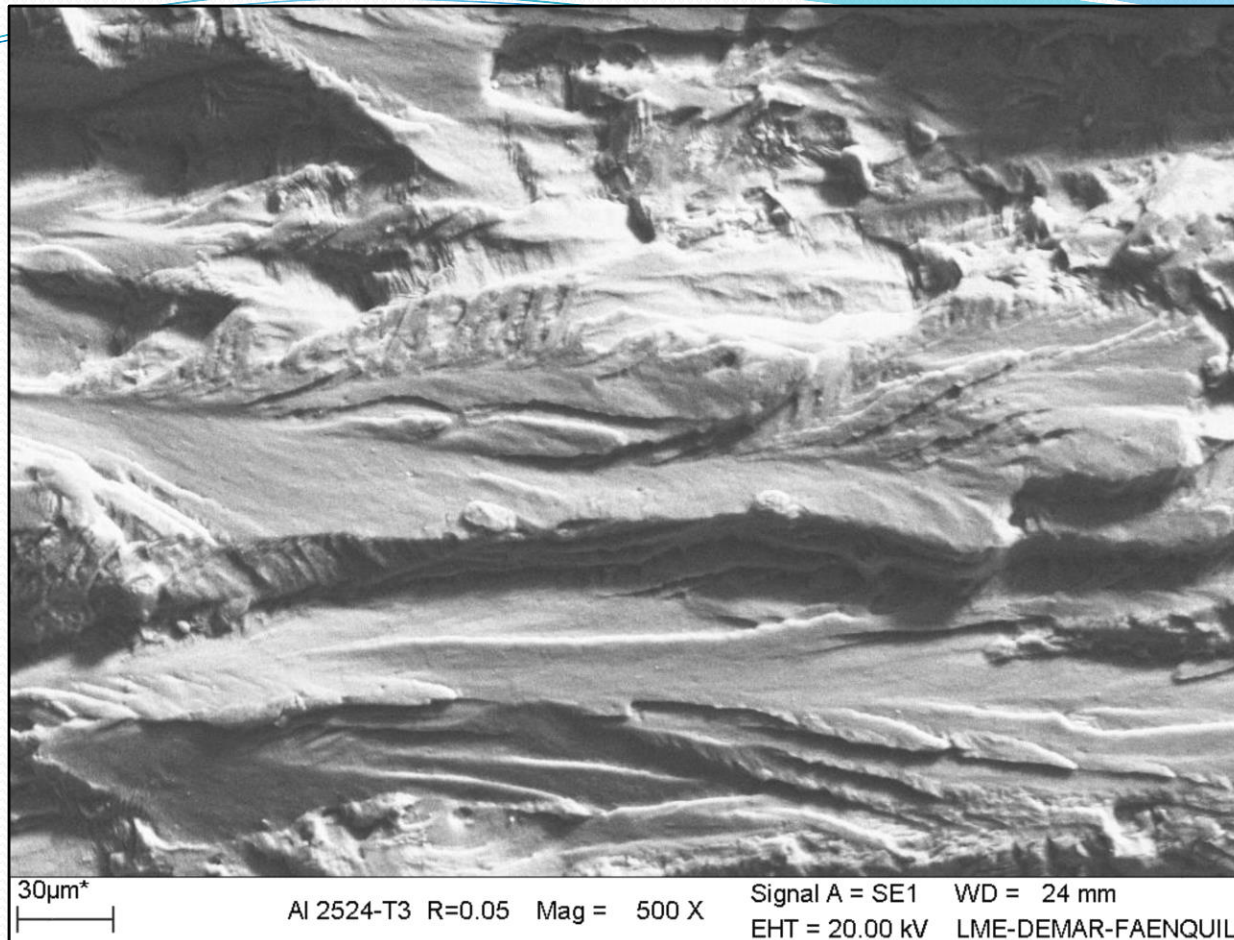
**Final do ensaio.**



**Início do ensaio.**



**Meio do ensaio.**

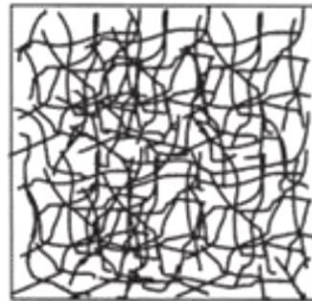


**Início do ensaio, com  $R=0,05$**

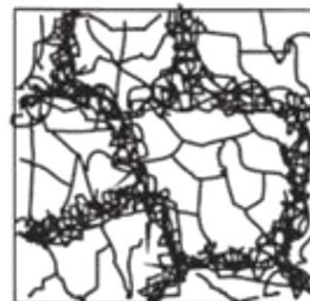
**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO

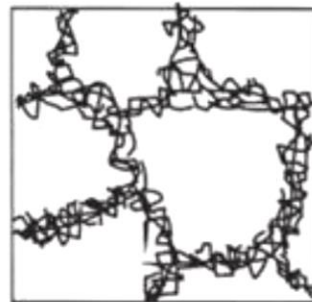
- O tamanho de grão normalmente controla a propagação da trinca por fadiga. Quanto menor mais resistente: a trinca perde mais energia com a mudança de direção;
- Metais CFC com alta EFE, forma subgrãos, quando submetidos a esforços cíclicos que então se sobrepõe ao efeito do TG;



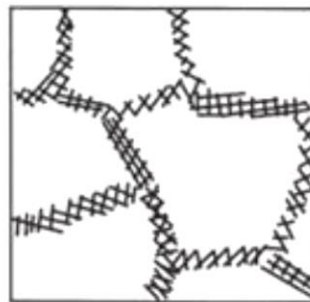
(a) Emaranhado de discordâncias



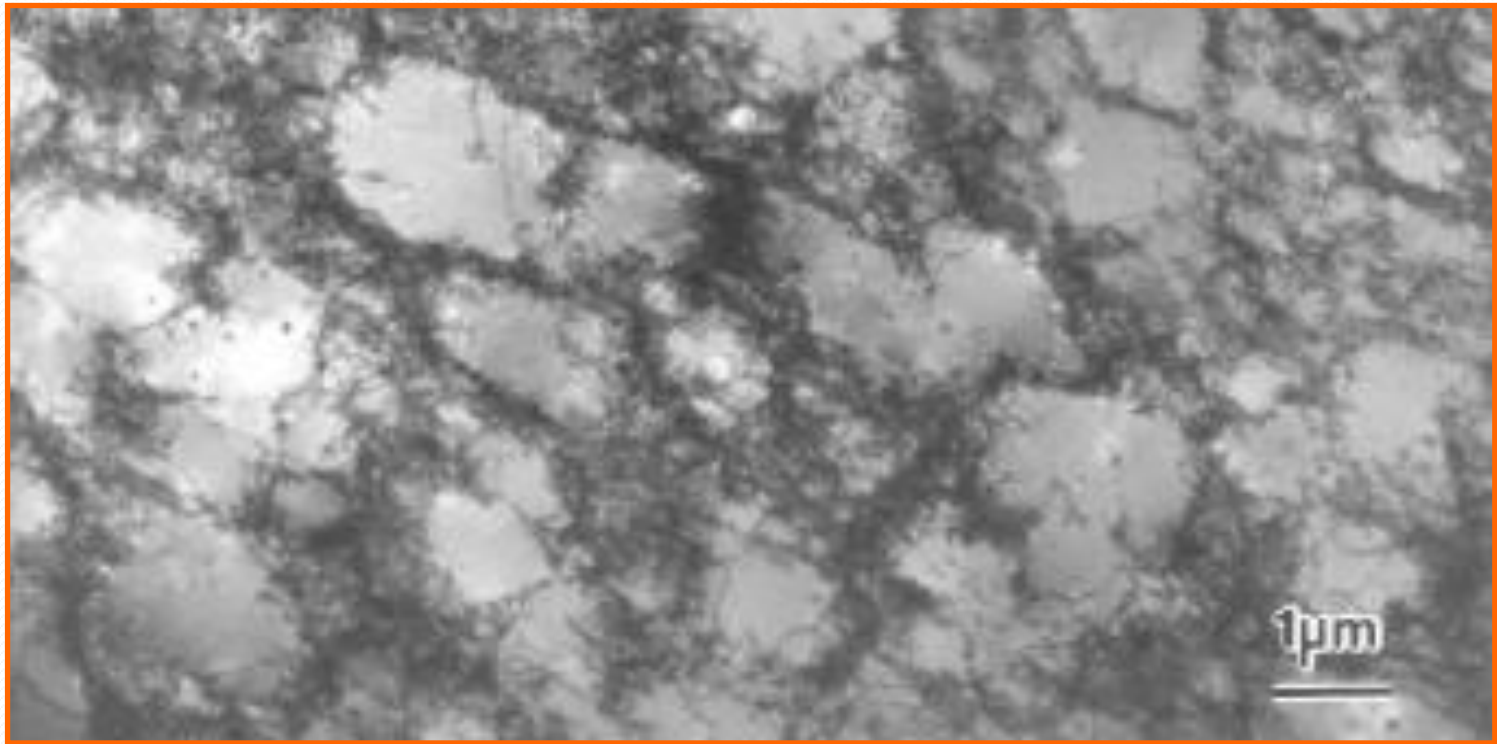
(b) Formação de células



(c) Aniquilação de discordâncias



(d) Formação de subgrãos



**Estrutura de discordâncias em cobre policristalino após 15.000 ciclos de carregamento em  $R = 0,5$ .**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



## EFEITO DA DUREZA

- **Aumentando a dureza**, especialmente a superficial, pode-se obter o efeito de **aumento da resistência à fadiga**, até o **limite da fragilização**;
- Normalmente, estruturas **bainíticas** apresentam **maior resistência à fadiga** que estruturas **martensítica**;
- A direção do cp também influencia: o limite de fadiga em cps retirados na **direção transversal** à direção de conformação apresentam **redução** do limite de fadiga de **60 a 70% em relação à direção longitudinal**.

## EFEITO DAS MICROINCLUSÕES

### *Influência de inclusões no limite de fadiga do aço SAE 4340*

	<i>Fusão em forno elétrico</i>	<i>Fusão a vácuo</i>
<i>Limite de fadiga longitudinal, MPa</i>	<i>800</i>	<i>958</i>
<i>Limite de fadiga transversal, MPa</i>	<i>545</i>	<i>827</i>
<i>Razão Trans./Long.</i>	<i>0,68</i>	<i>0,86</i>
<i>Dureza, HRC</i>	<i>27</i>	<i>29</i>

# FADIGA - ASPECTOS METALÚRGICOS

**MINÉRIO/SUCATA/CO  
QUE/REFRATÁRIO  
(S,P,Si)**

**CONVERSORES  
(O<sub>2</sub>)**

**TRATAMENTOS PARA  
ACALMAR  
(Ca,Al,Mn,Mg)**

**INCLUSÕES NÃO  
METÁLICAS: ENDÓGENAS E  
EXÓGENAS**

**TIPO A  
SULFETOS  
(Mn,Fe,Ca)**

**TIPO B  
ALUMINA  
(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

**TIPO C  
SILICATOS  
(SiO<sub>2</sub>)**

**TIPO D  
ÓXIDOS  
GLOBULARES  
(Mn,Fe,Ca)**



**FIM**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**