

# SMM0330-PRINCÍPIOS DE ANÁLISE DE FALHAS EM COMPONENTES



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

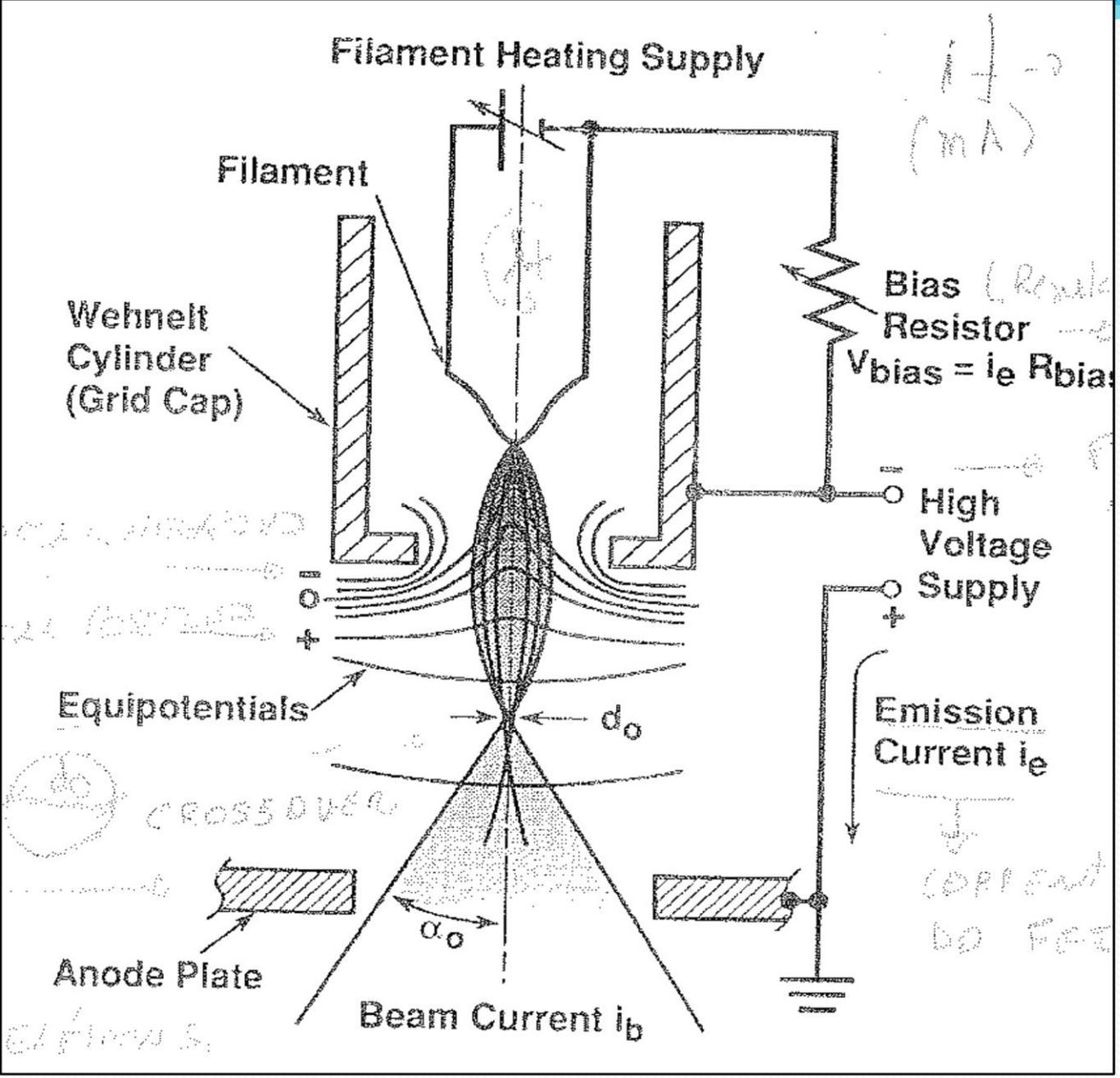
## TÉCNICAS DE ANÁLISE

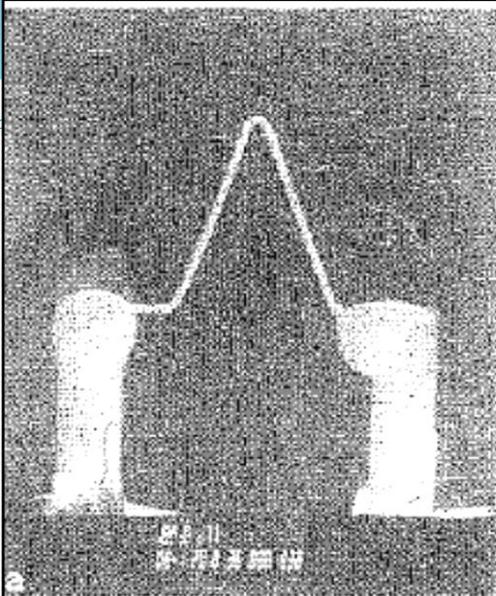
- ANÁLISE QUÍMICA;
- VISUAL-AUMENTO MÉDIO DE 10 X;
- ESTEREOSCÓPIO;
- MICROSCOPIA ÓPTICA;
- MICROSCOPIA ELETRÔNICA – MEV-FEG-FIB - MET;
- DIFRAÇÃO DE RAIOS-X;
- FRACTOGRAFIA QUANTITATIVA: MICROSCOPIA CONFOCAL E MEV COM SUPERPOSIÇÃO DE IMAGENS.

**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.**

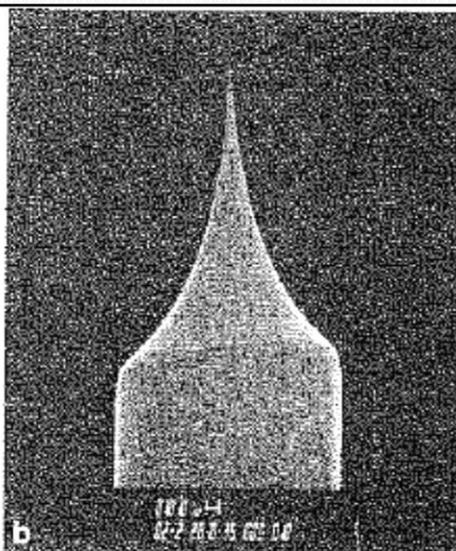
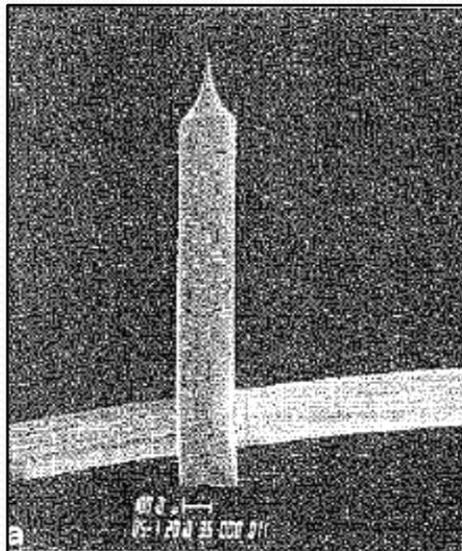
# ANÁLISE DE FALHAS-MEV





Filamento de W

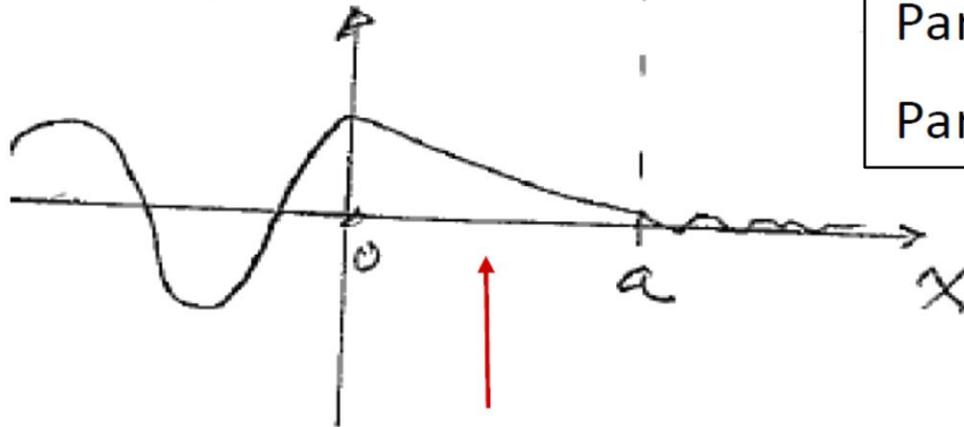
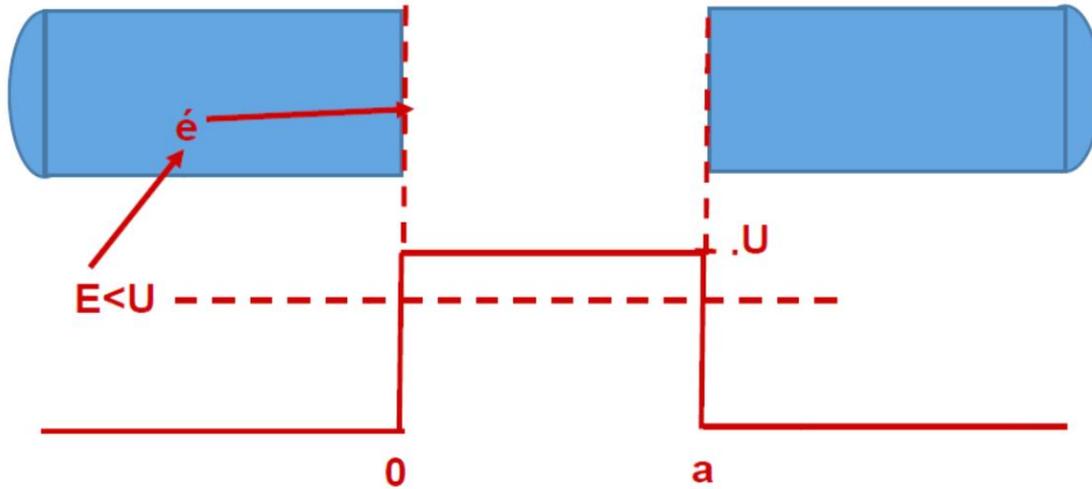
**MEV**



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.

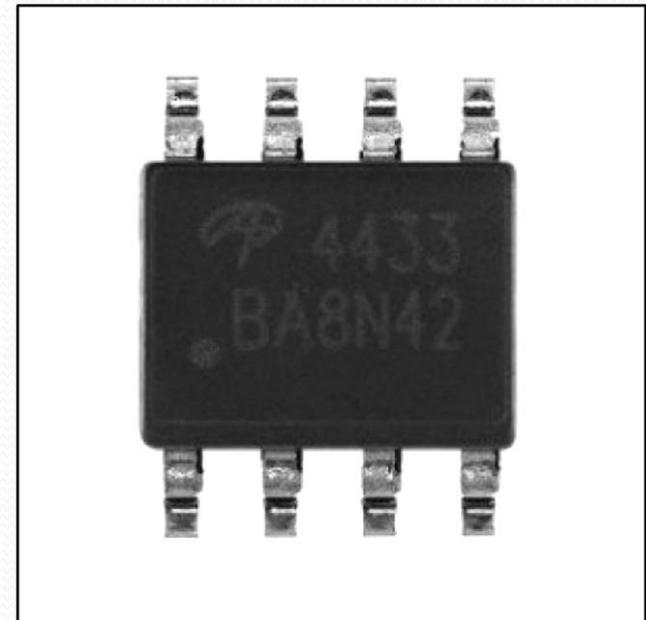
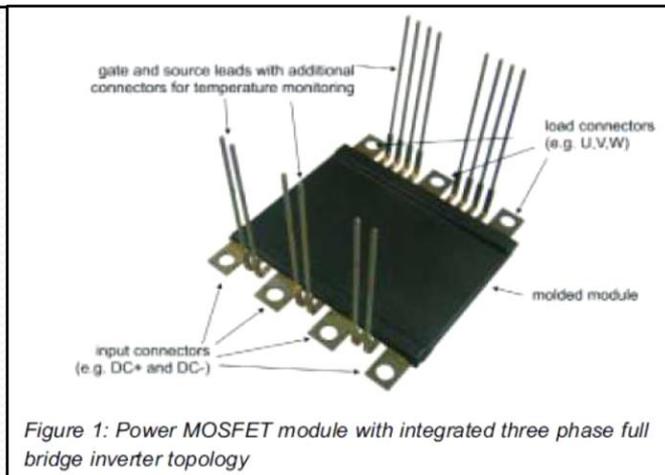
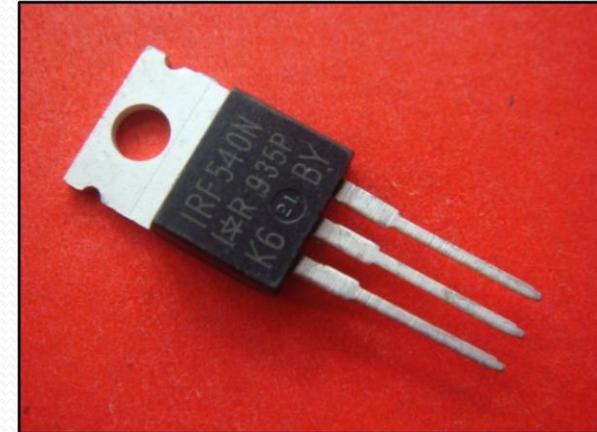
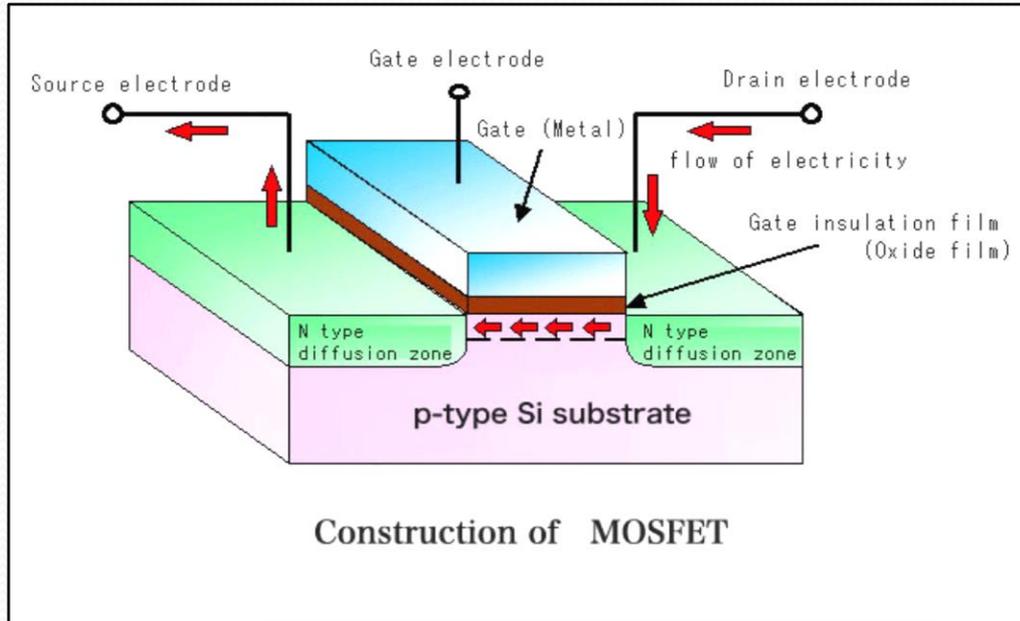
FUNÇÃO DE ONDA EM X=a

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

FUNÇÃO DE ONDA EM X=0

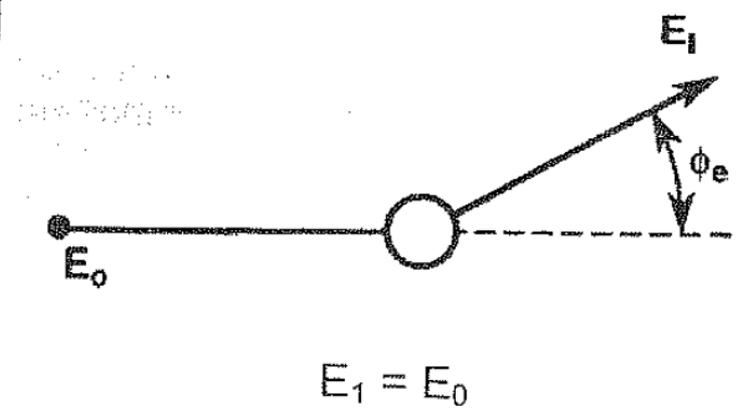
# EFEITO DE TUNELAMENTO QUÂNTICO

## MOSFET (METAL OXIDE SEMICONDUCTOR FIELD EFFECT TRANSISTOR)



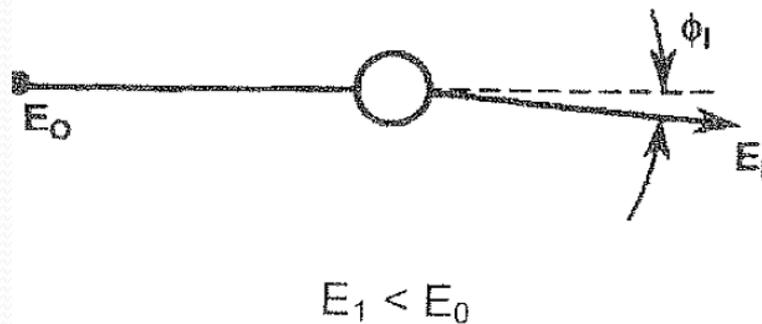
**TÉCNICA DE ANÁLISE POR MEV**

**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:

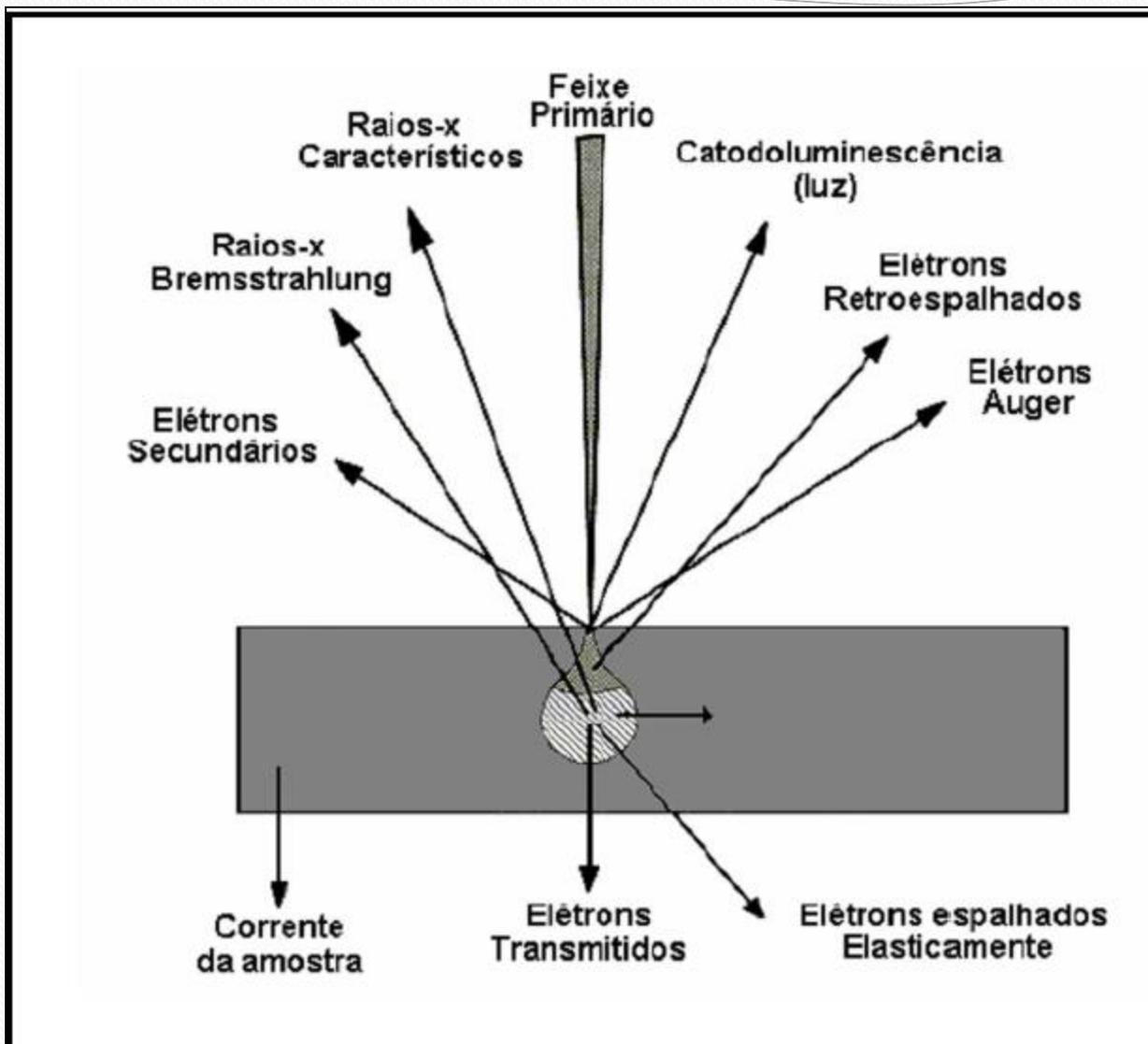
Mudança de direção (0 a 180°) sem mudança na energia dos elétrons. O espalhamento elástico é responsável pelo fenômeno de retroespalhamento de elétrons (sinal importante no MEV).



### 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

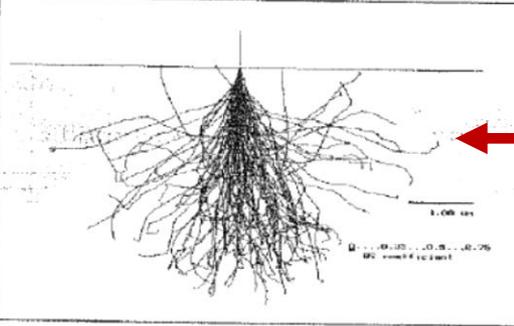


## ELÉTRONS SECUNDÁRIOS -

### ONDE SÃO GERADOS?

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

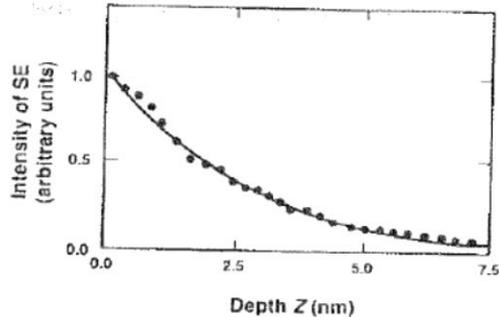
EM QUALQUER LUGAR



**SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.**

## ELÉTRONS SECUNDÁRIOS -

### DE ONDE VÊM?



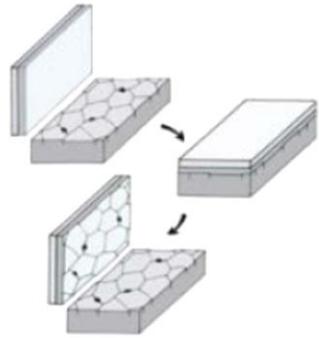
Por causa de sua baixa energia os SE's têm trajeto muito pequeno.

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.**

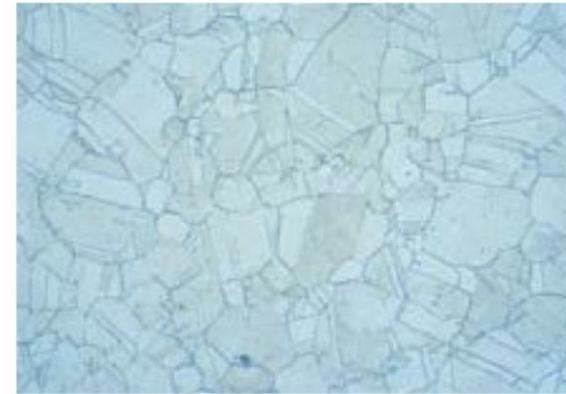
# ANÁLISE DE FALHAS- RÉPLICA METALOGRÁFICA



Método Tradicional



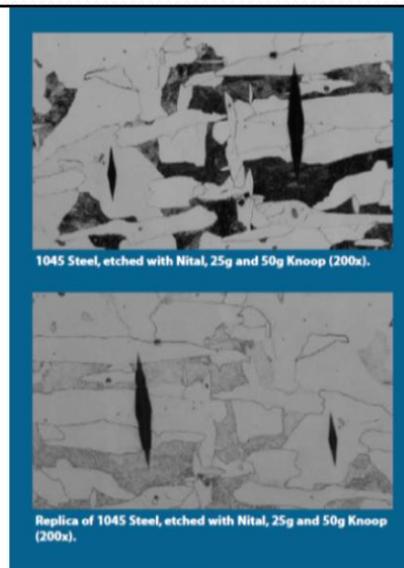
Amostra



Réplica



Replicating Set



1045 Steel, etched with Nital, 25g and 50g Knoop (200x).

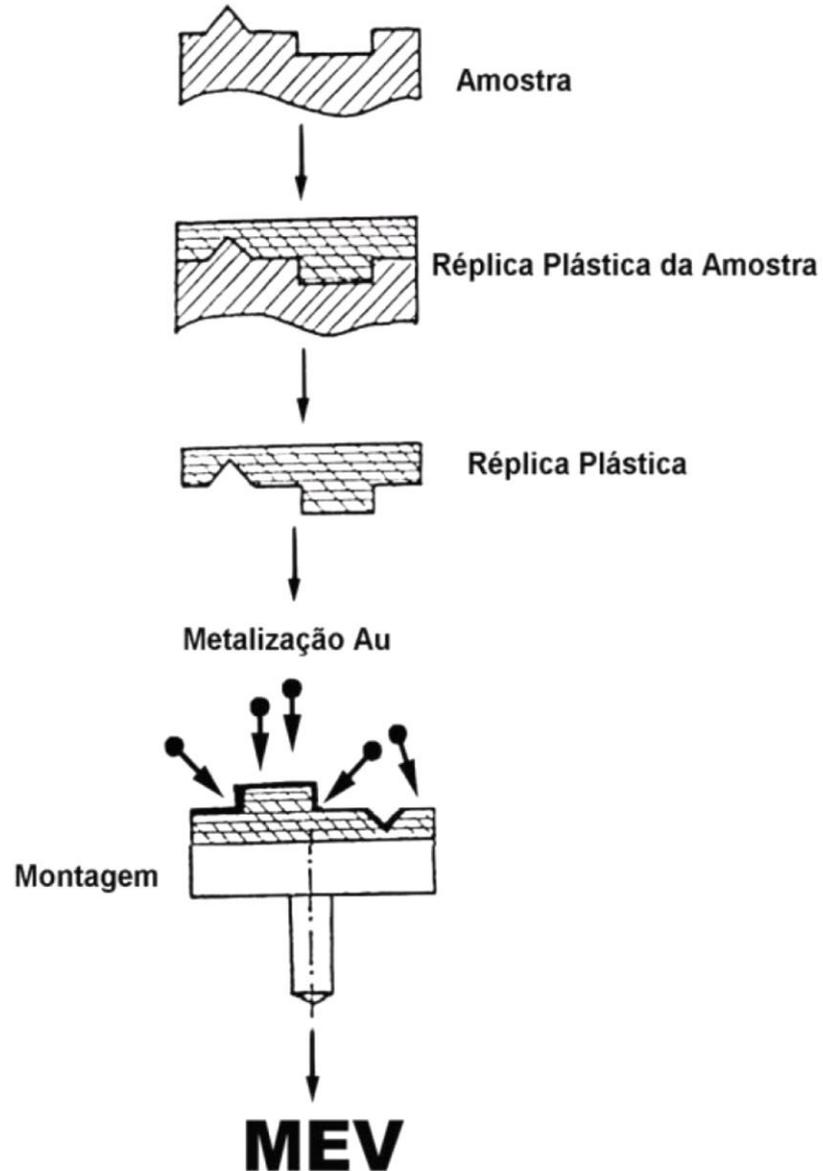
Replica of 1045 Steel, etched with Nital, 25g and 50g Knoop (200x).

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.**

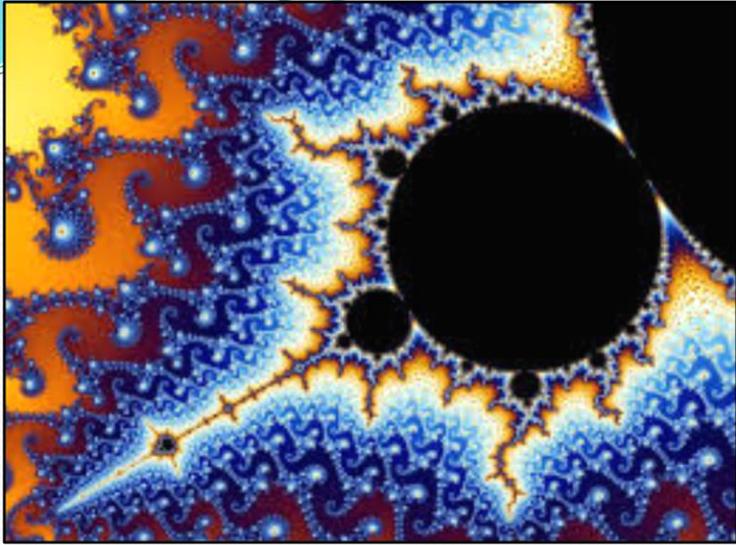
**Mandelbrot descreveu matematicamente a ideia original de Euclides, acrescentando a essa ideia a questão da dimensão e, foi deste modo que surgiu a Geometria dos Fractais.**



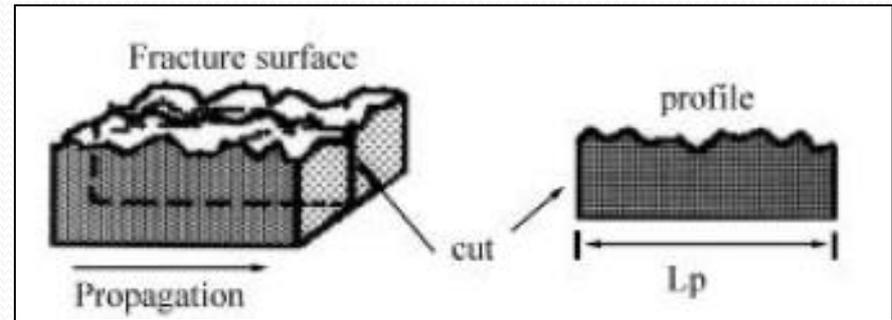
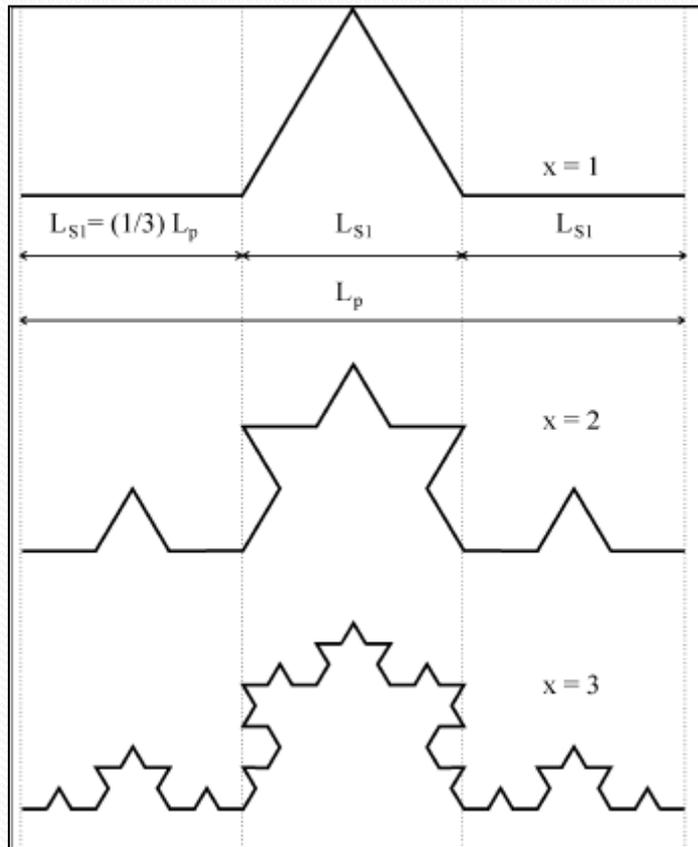
**1958**

- **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



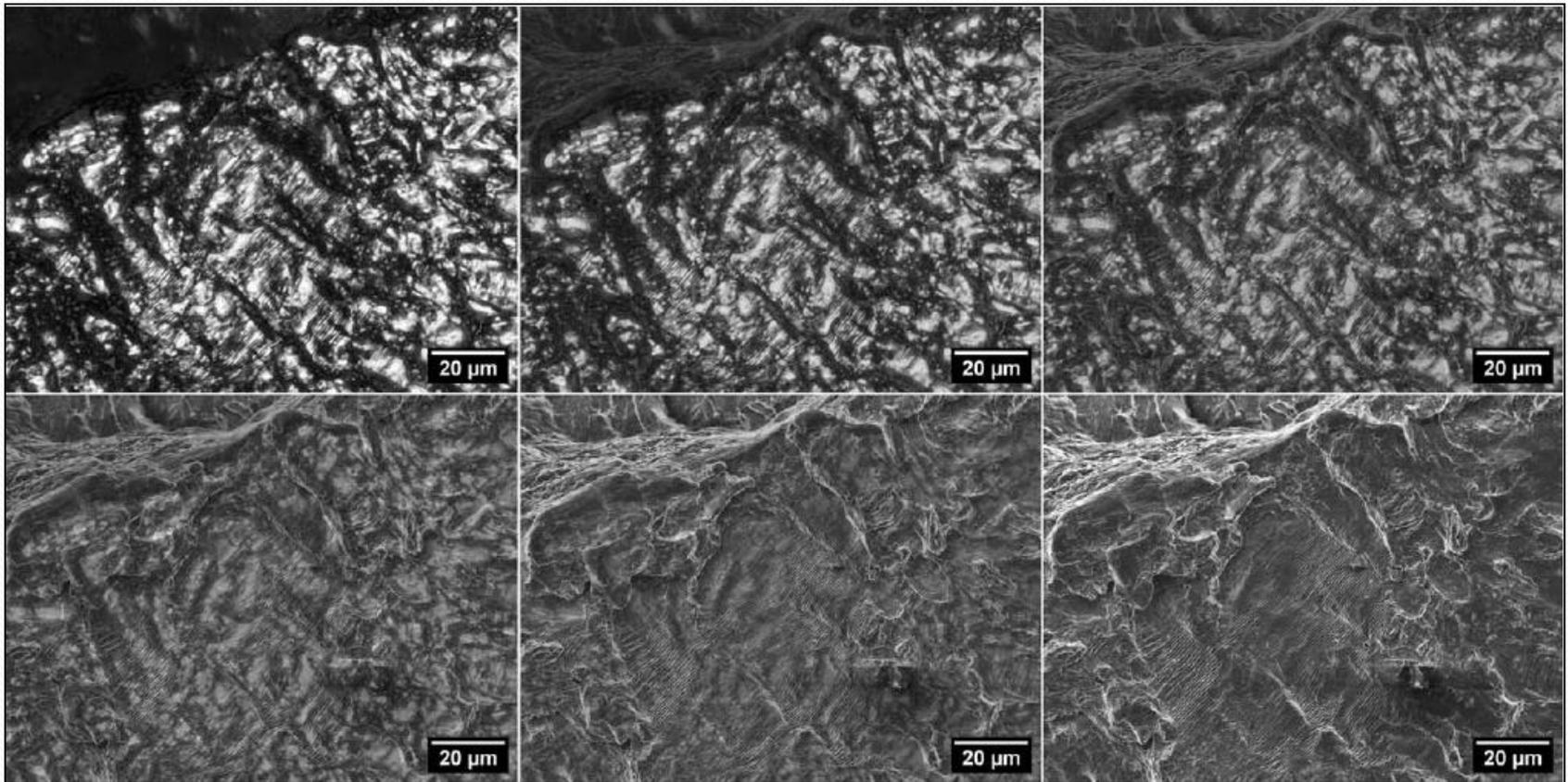
# Fractal-Fracture Behaviour Relationship



# 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

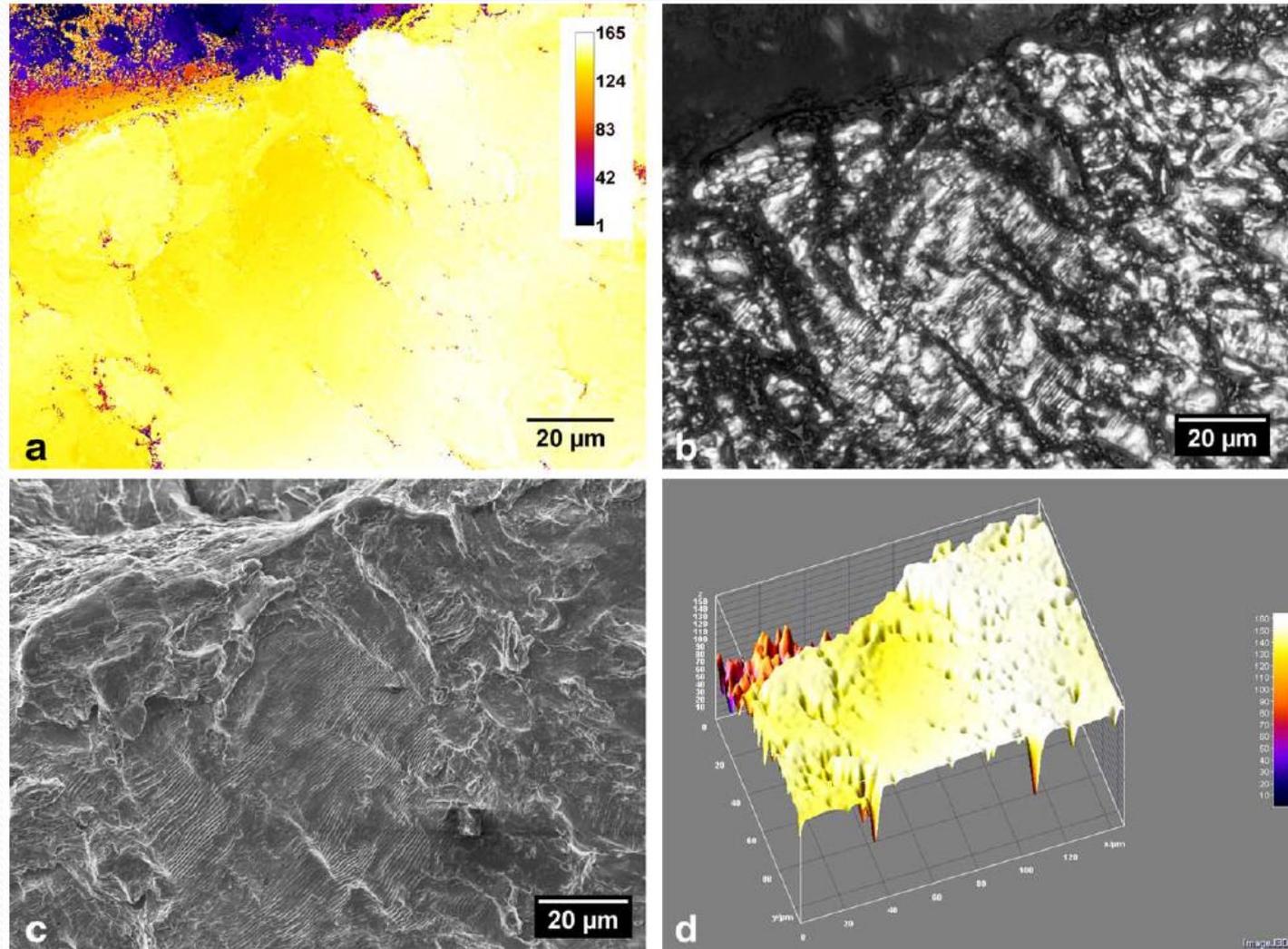


Fig. 1. Examples of correlative fractography results: (a) height map; (b) reconstructed image from light microscope images stack; (c) matched SEM image; (d) 3-D representation of elevations map (Z axis in  $\mu\text{m}$ ). [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com).]

# 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**

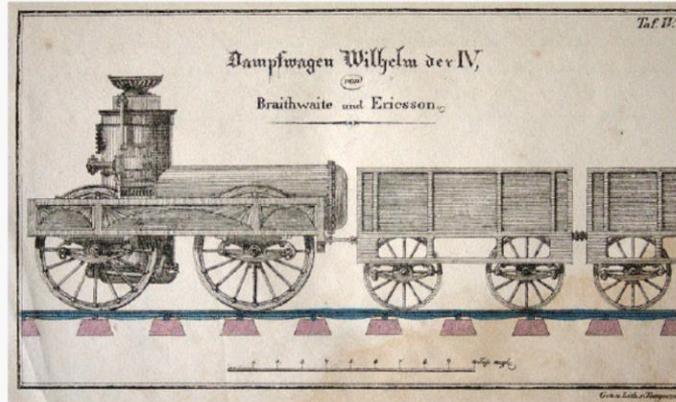
# HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

## OS PIONEIROS

John Braithwaite (1797-1870)



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



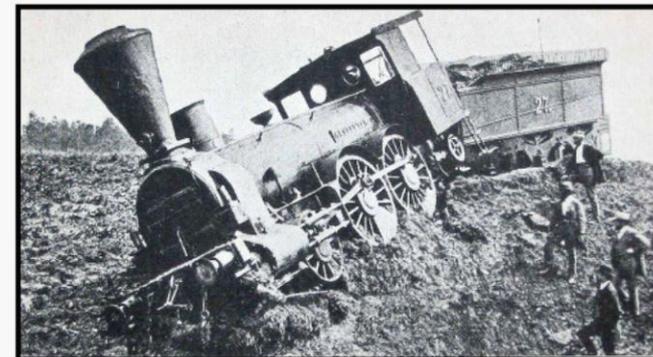
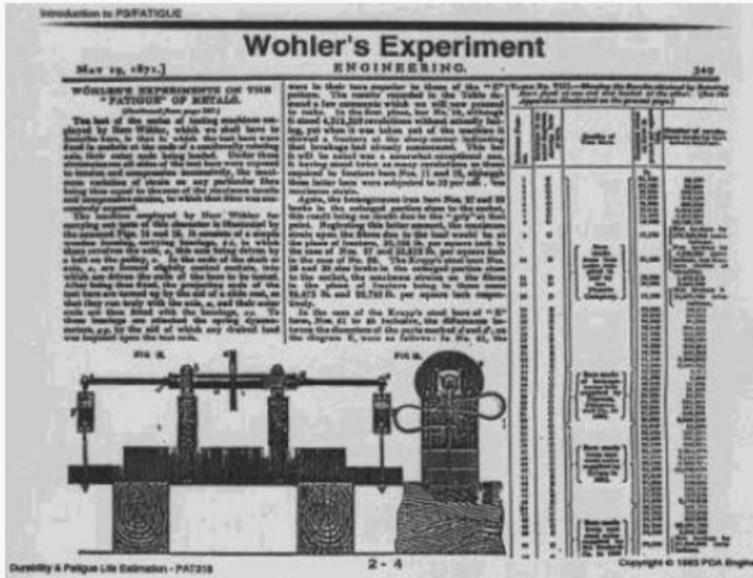
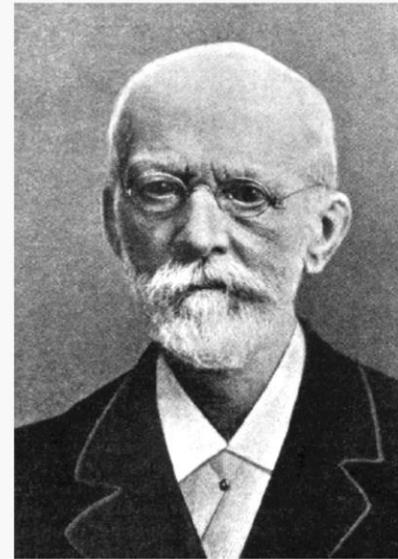
- Obs: Poncelet (1788-1867), Matemático e Engenheiro Francês, já havia utilizado este termo genericamente para fratura de metais.

**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

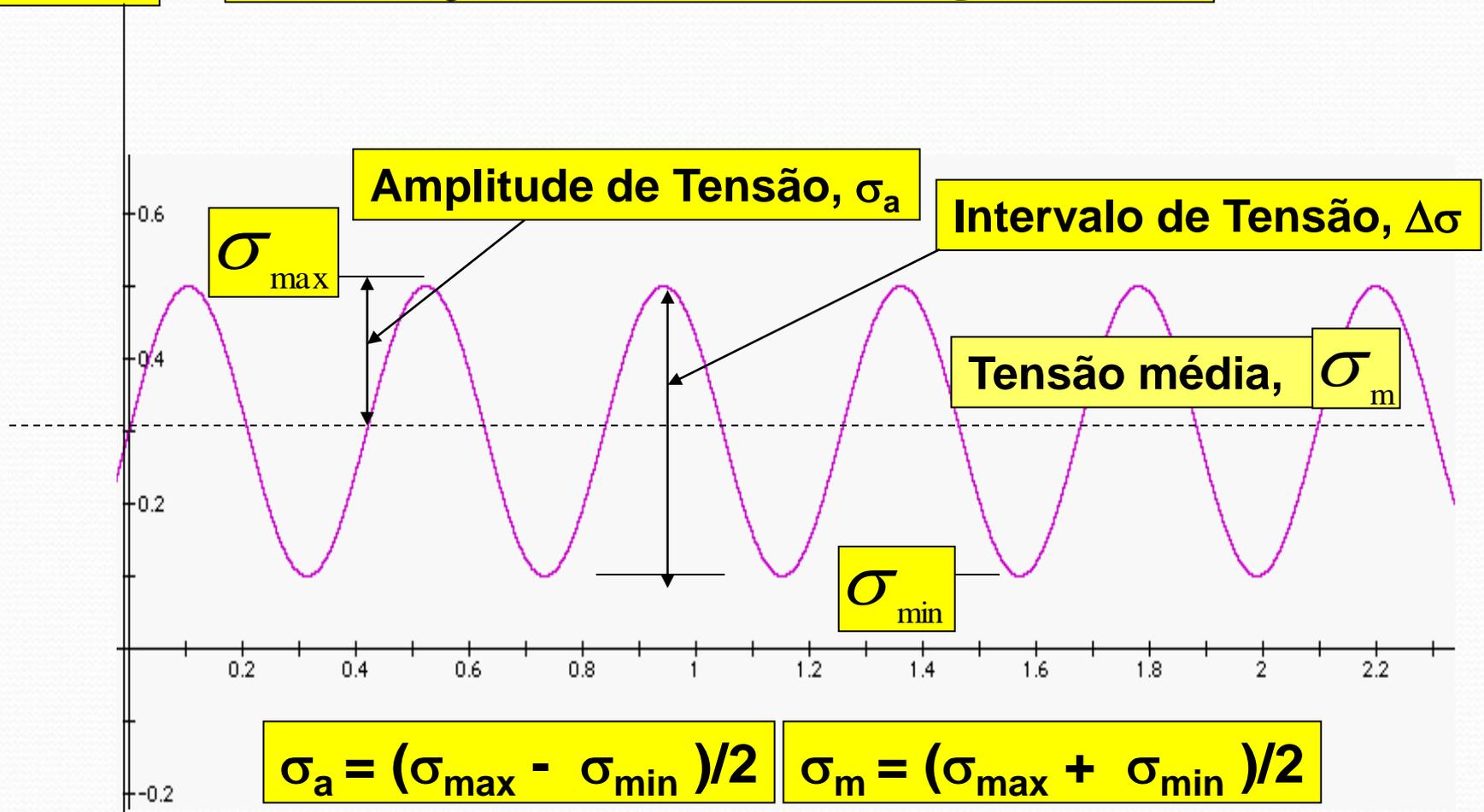
# O FENÔMENO DA FADIGA

- **“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,  $\sigma$



$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$$

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$$

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

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

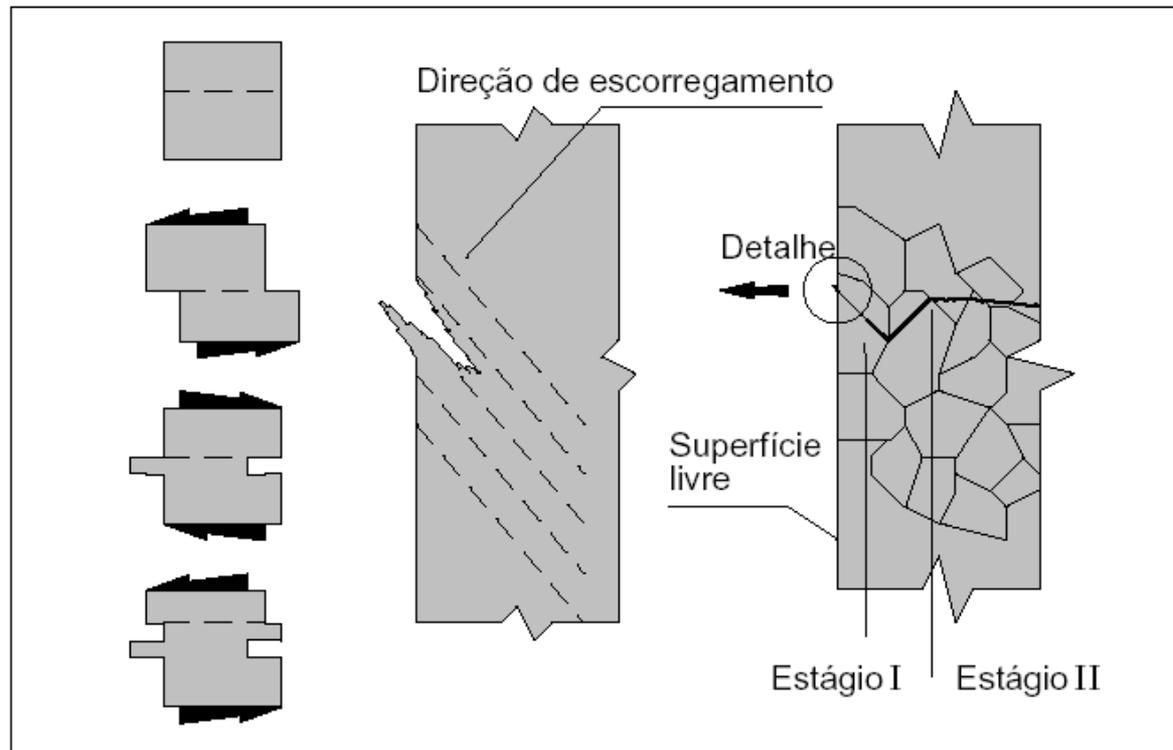
RAZÃO DE AMPLITUDE

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$

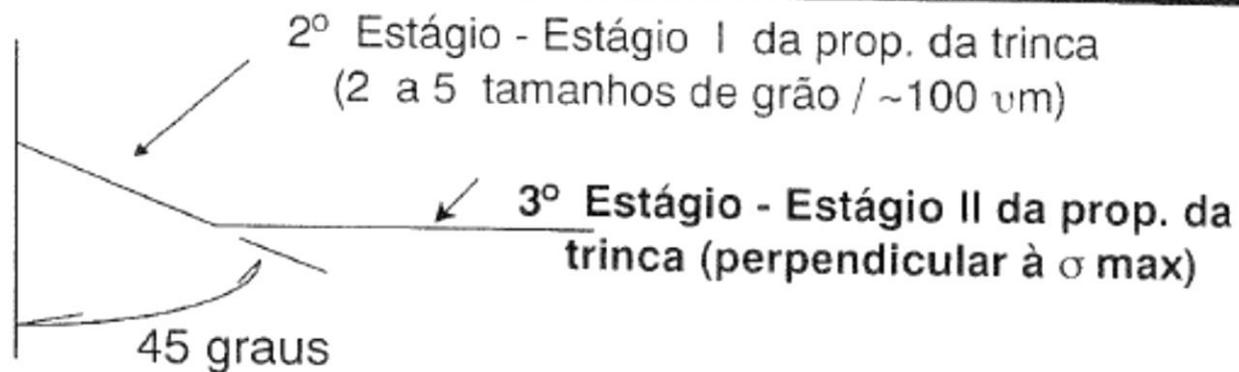
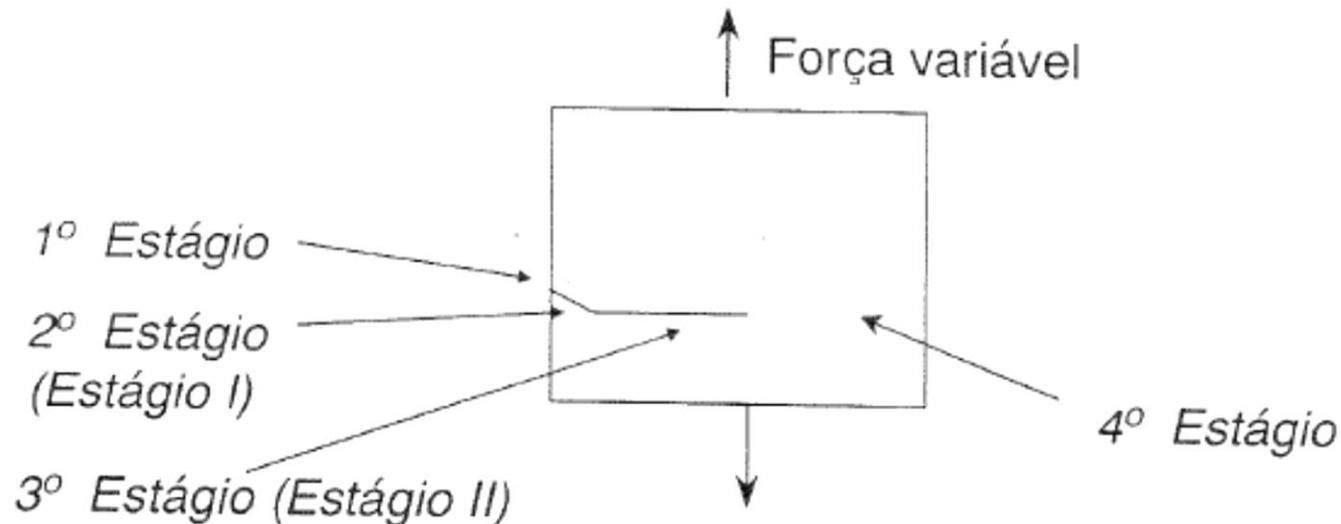
# Mecanismos de Fadiga e Características Microscópicas

## NUCLEAÇÃO DE TRINCAS

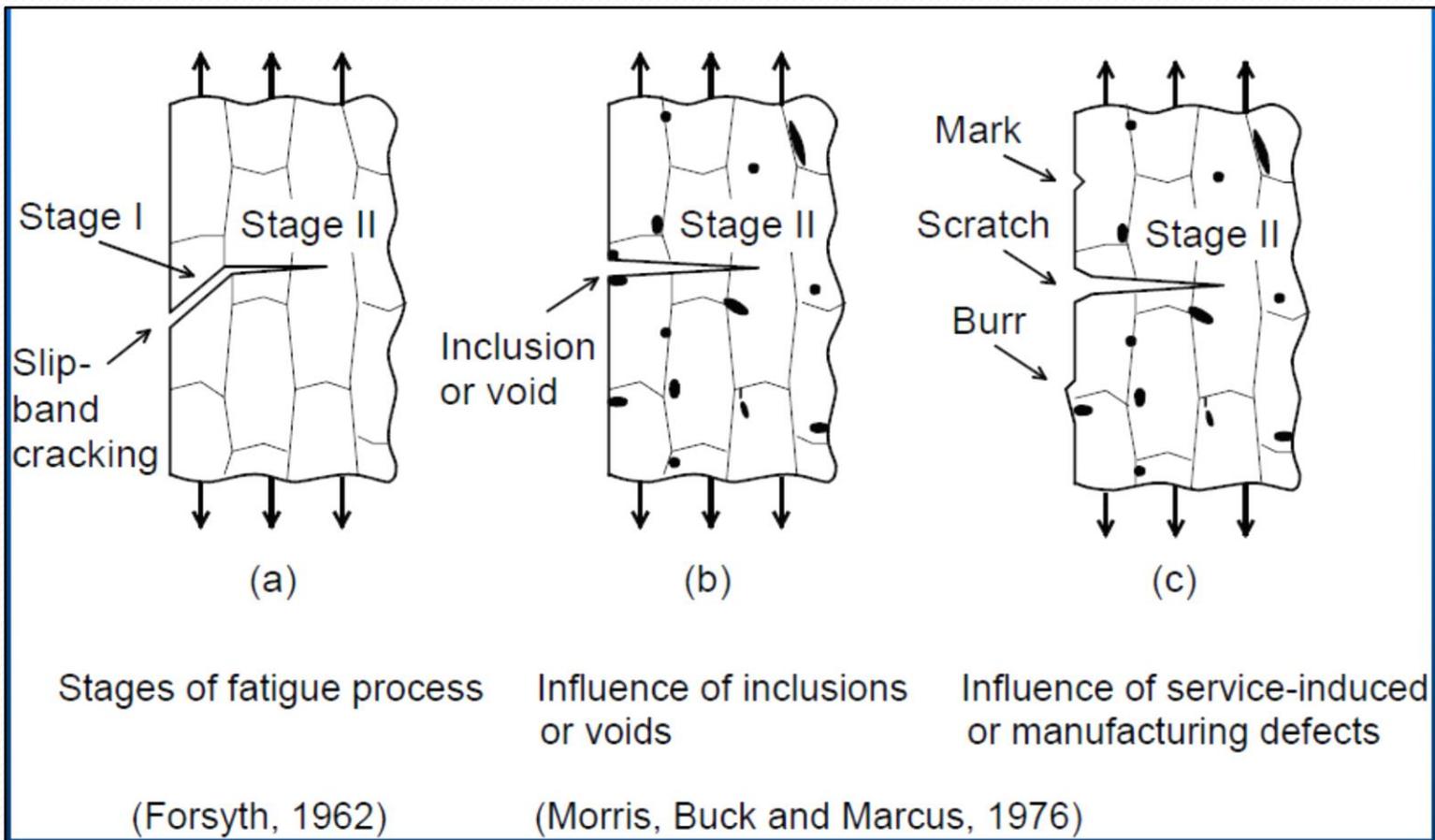
- A falha por fadiga está geralmente ligada a **deformações plásticas localizadas** e, estas, associadas com tensões cisalhantes.
- No caso dos **materiais dúteis**, a nucleação de trincas ocorre pela formação bandas de cisalhamento (**Persistent Shear Bands-PSB**). Ocorre já nos primeiros ciclos do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

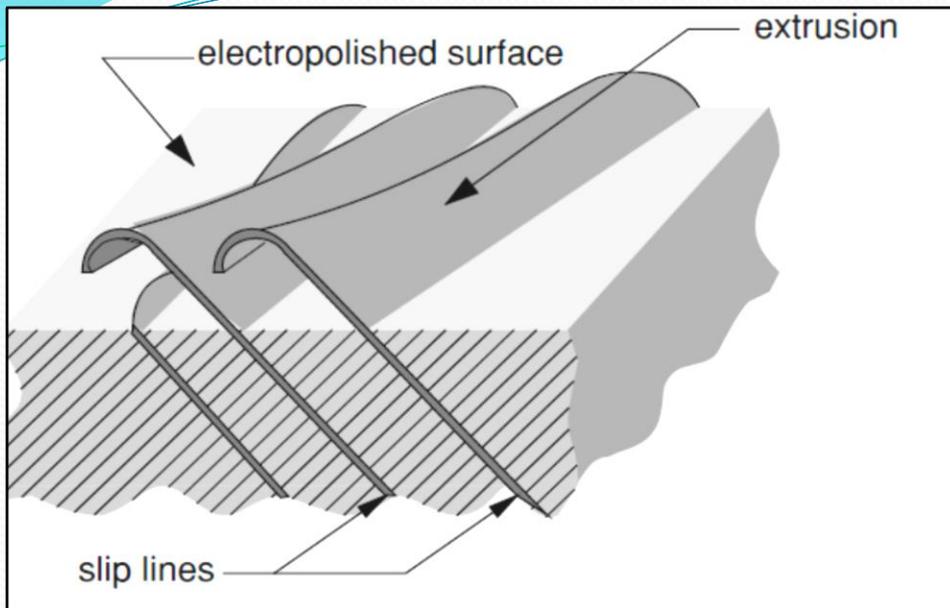


## Esquema dos quatro estágios da fadiga

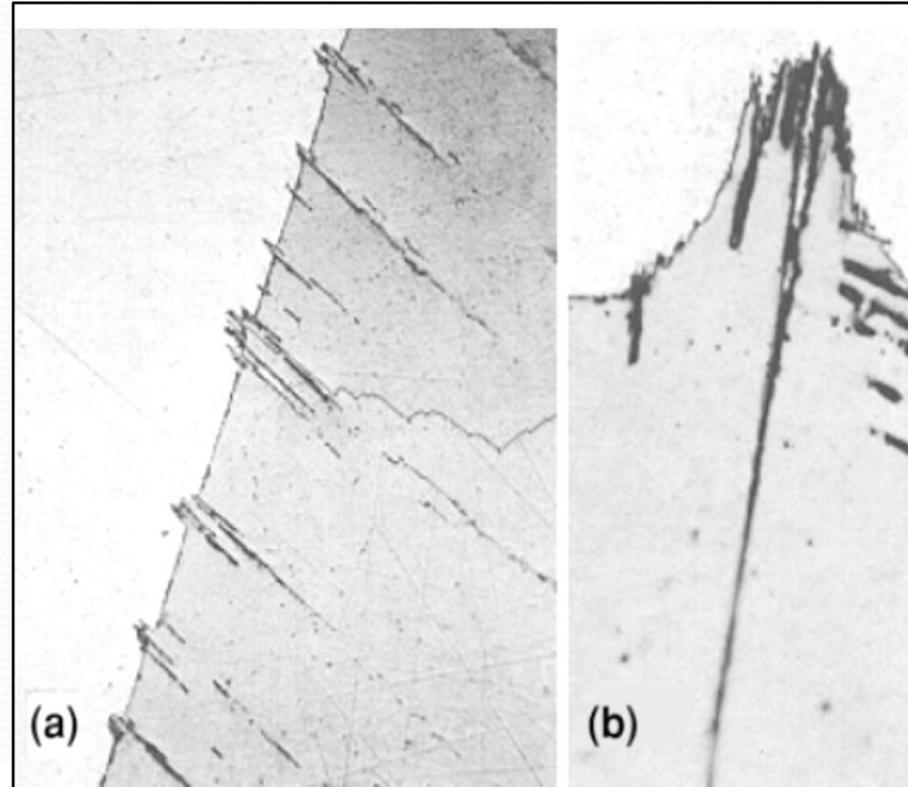


Fadiga / Prof. Itamar





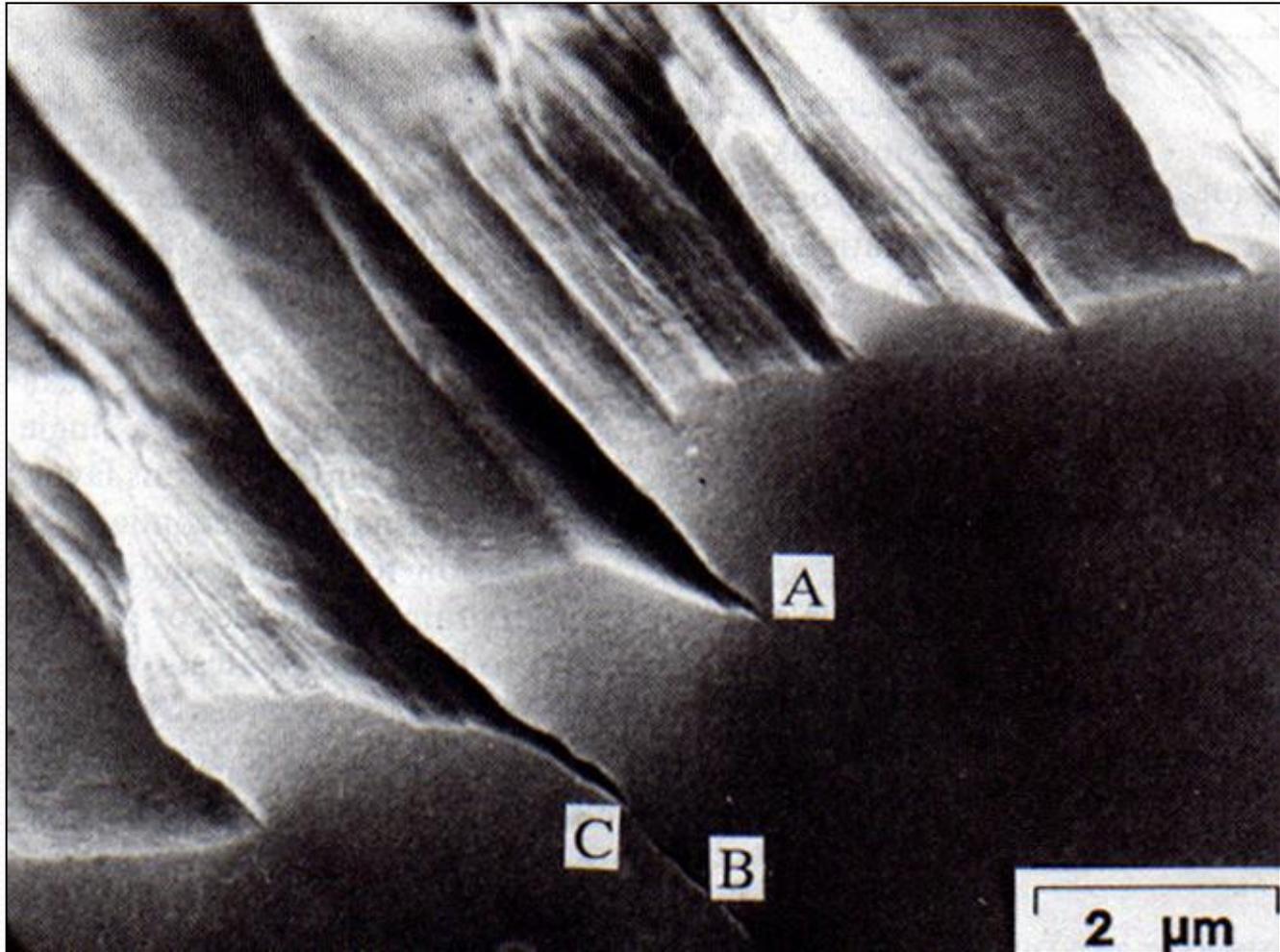
**INTRUSÕES E EXTRUSÕES,  
SEGUNDO FORSYTH  
(1956-1958)**



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

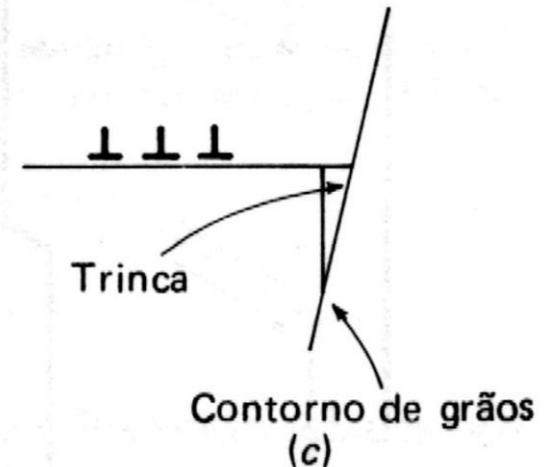
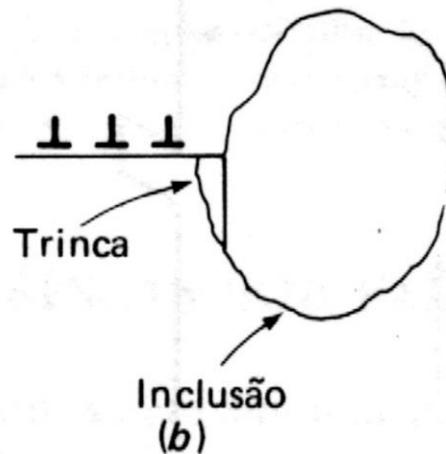
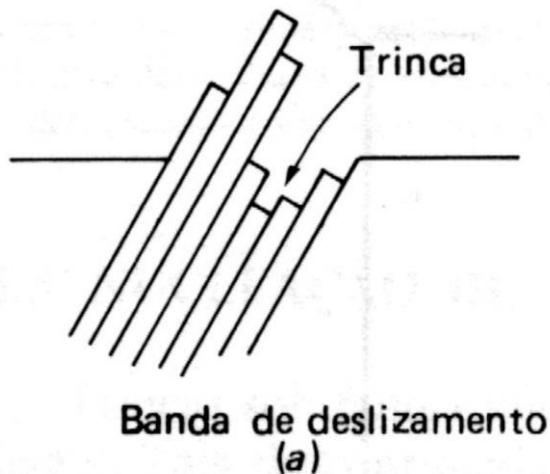


Typical ladder-like structure of PSBs  
(Metals Handbook, vol. 19)



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.



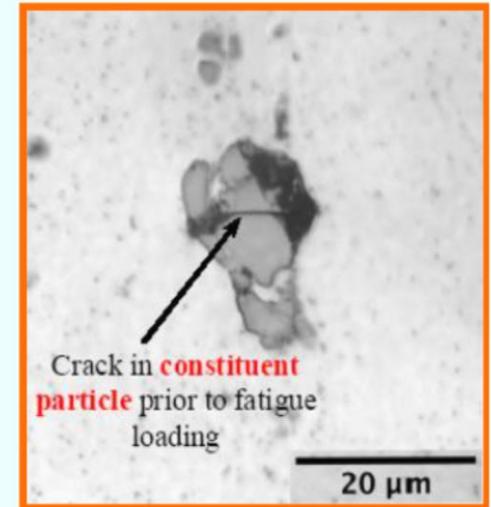
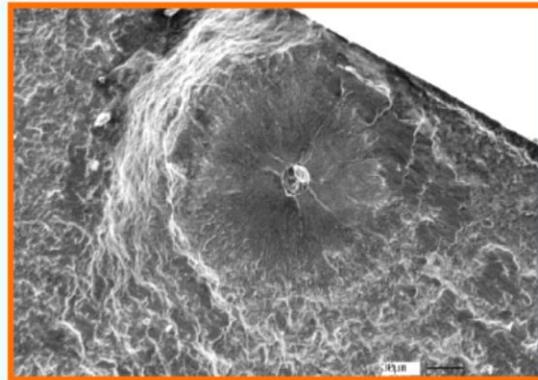
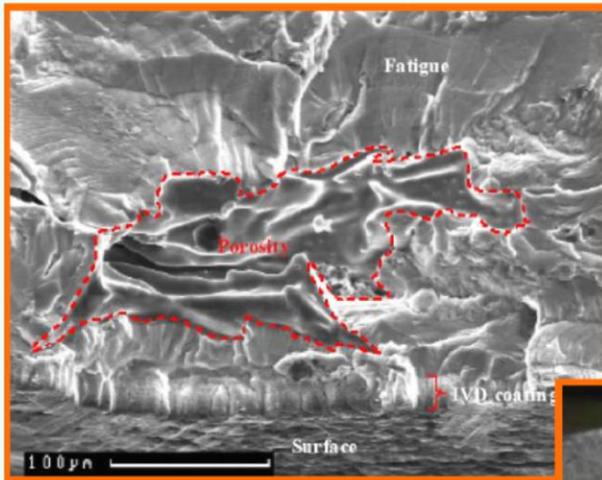
## INICIAÇÃO DA TRINCA

Trincas iniciando a partir de descontinuidades

- Diferença entre componentes e testes de laboratório

*Inclusão sub-superficial*

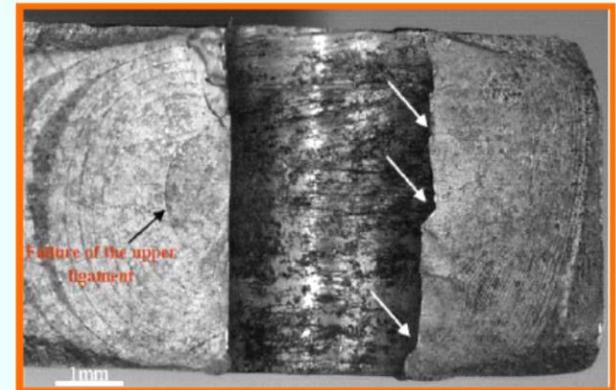
*Trinca iniciando em poro*



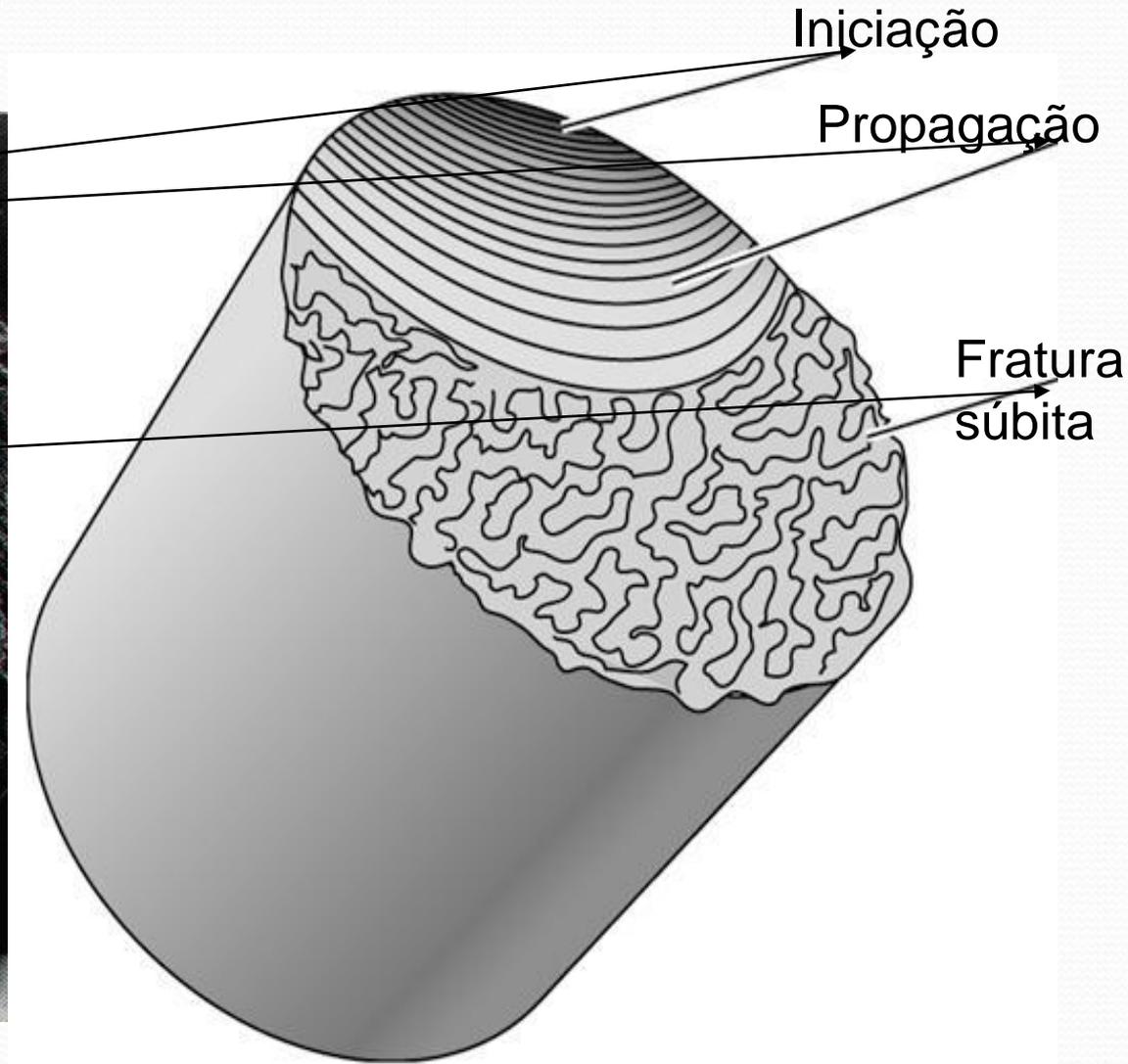
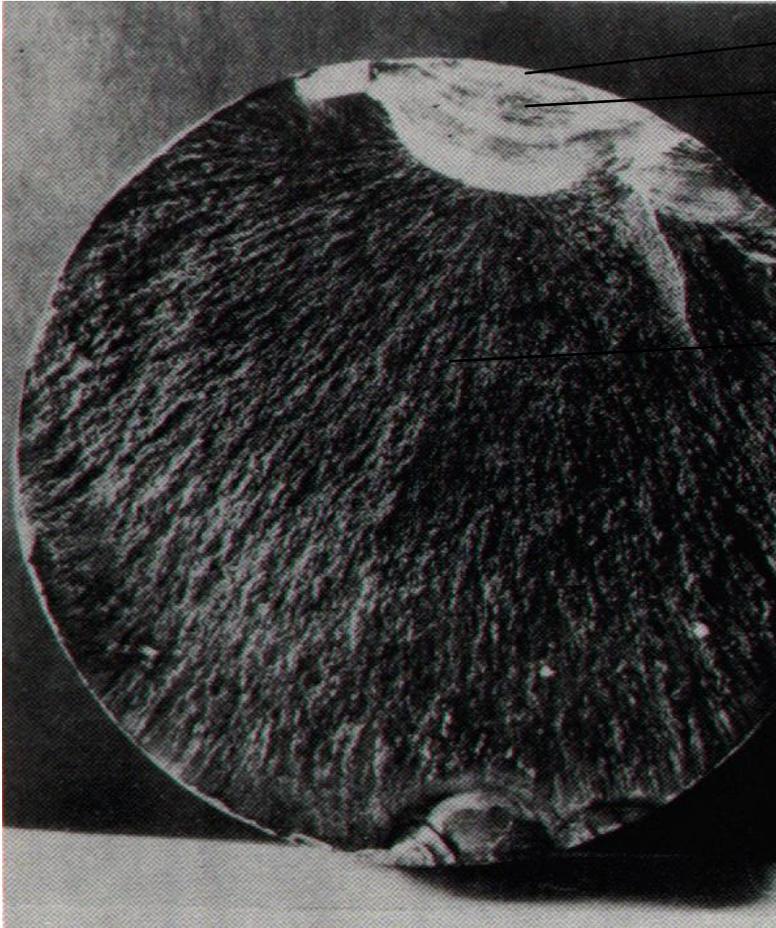
*Partícula fraturada*

*Furo mal-executado*

*Defeitos em cordão de solda*



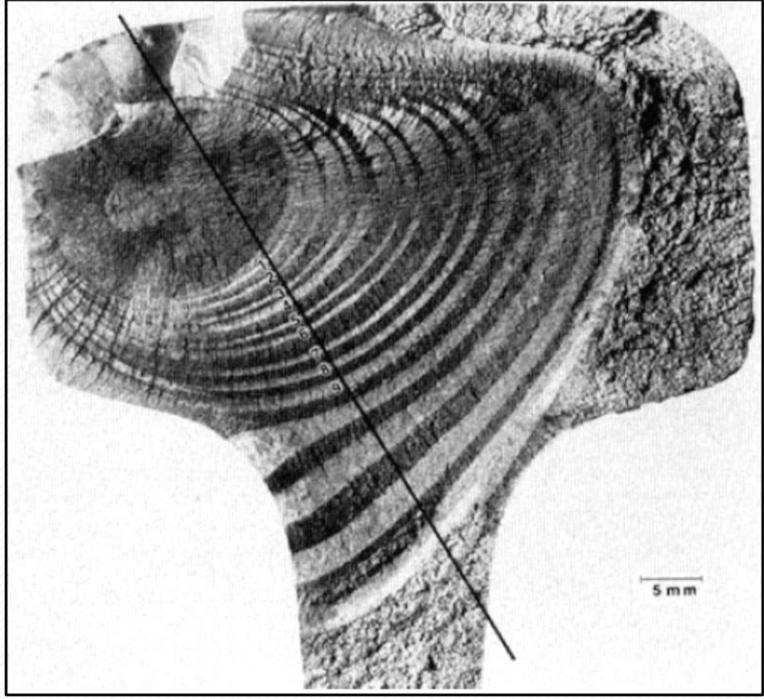
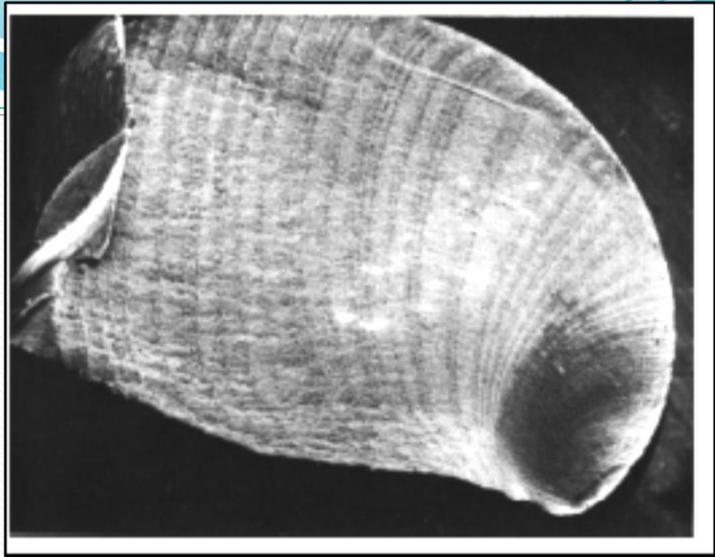
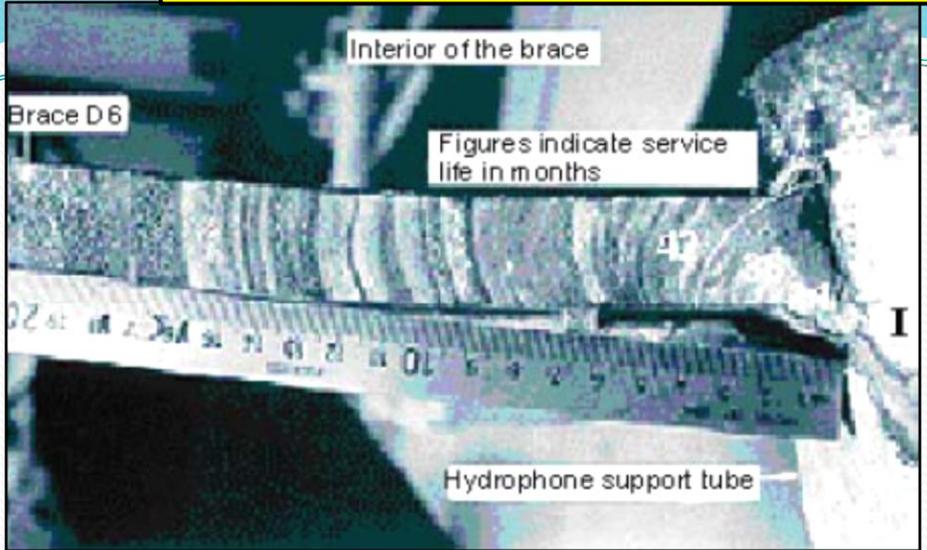
# Fraturas de Fadiga e Características Macroscópicas



## 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



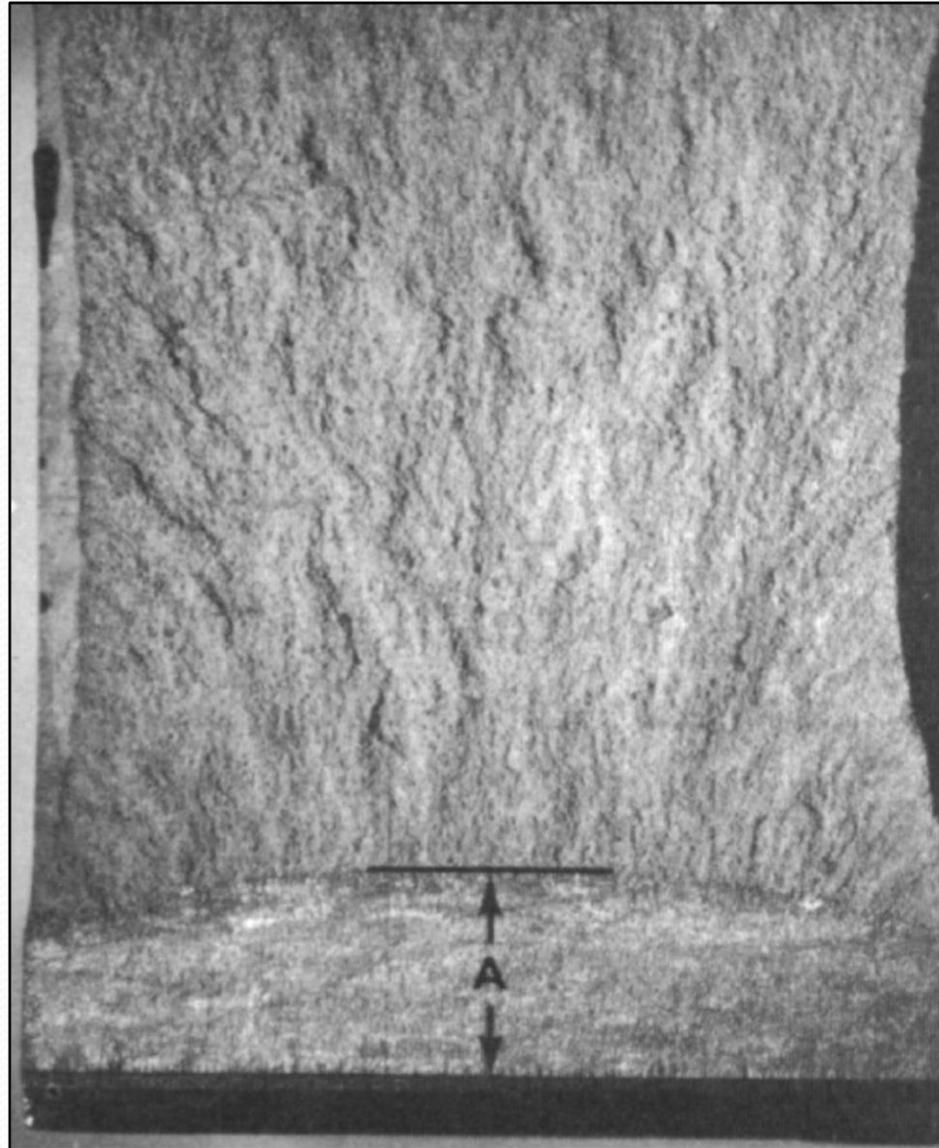
# FADIGA- MARCAS DE PRAIA- CARACTERIZAÇÃO

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**

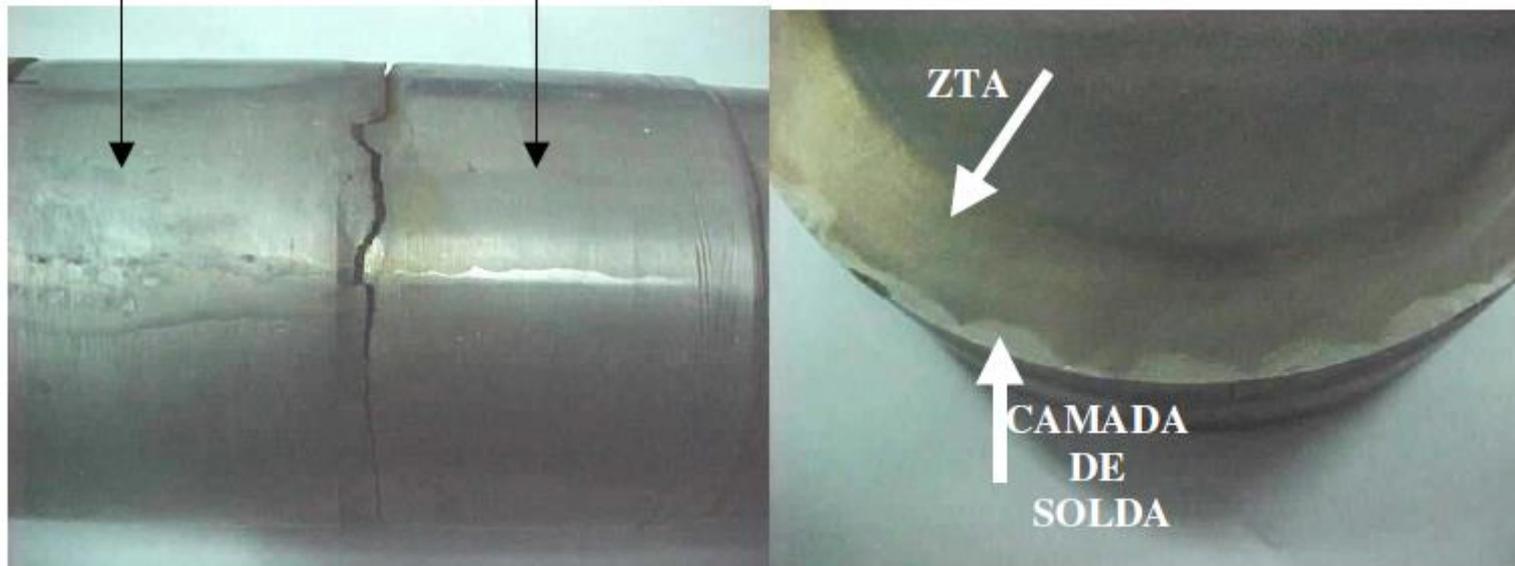


# FADIGA- MARCAS DE PRAIA –CASO I – 2005 - JBM

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

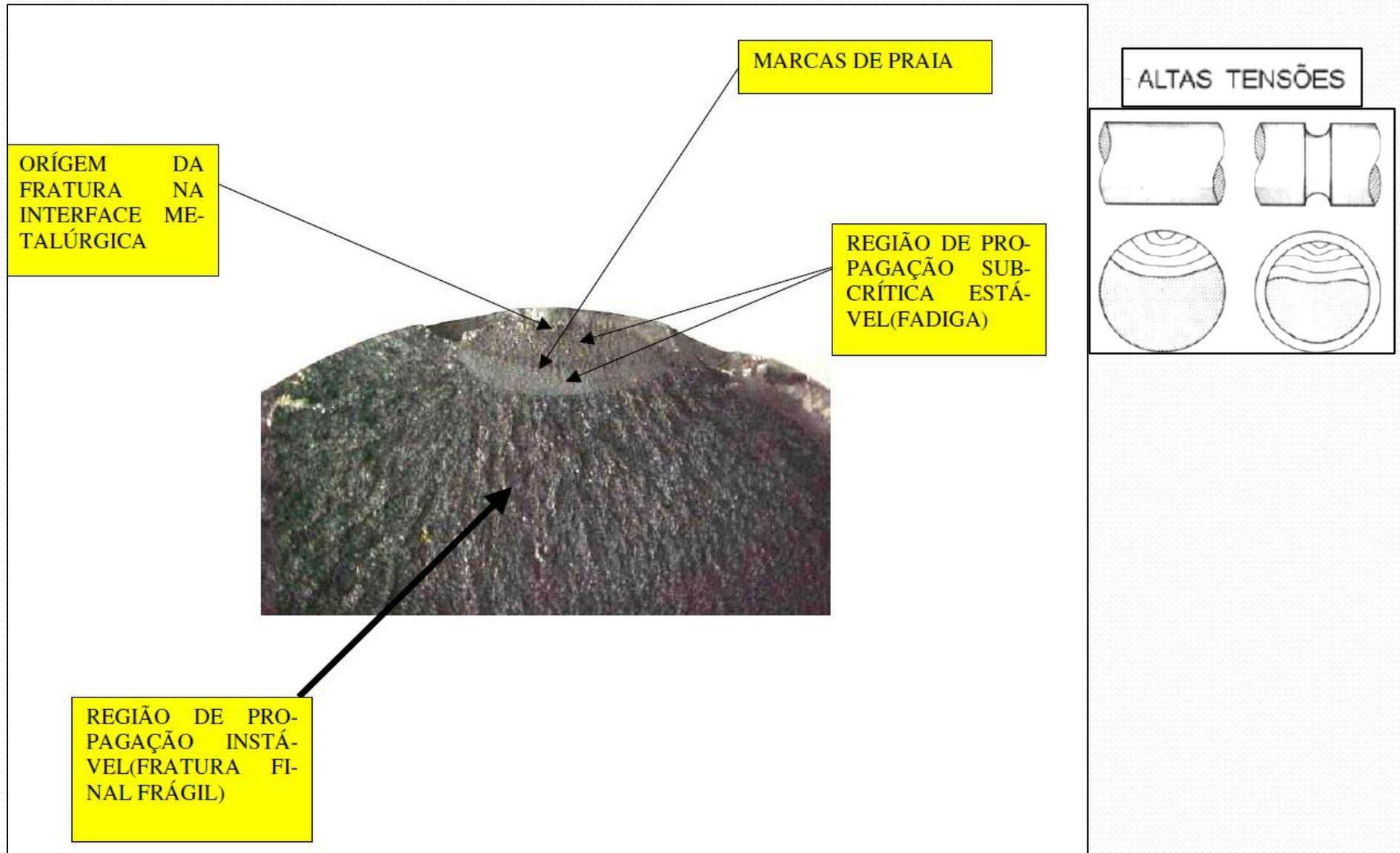
CAMADA DE  
SOLDA

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

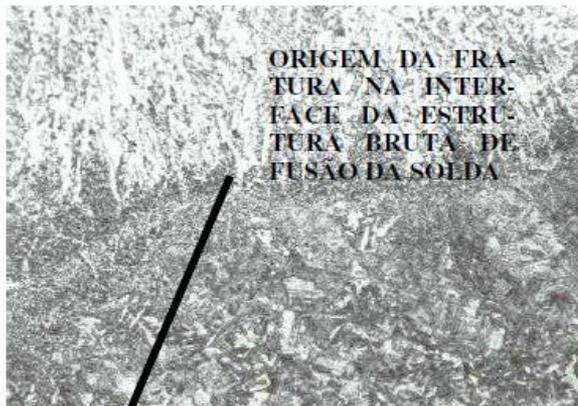


ANÁLISE DE FALHAS – EIXO – AÇO SAE4140 – T+R - 2005.

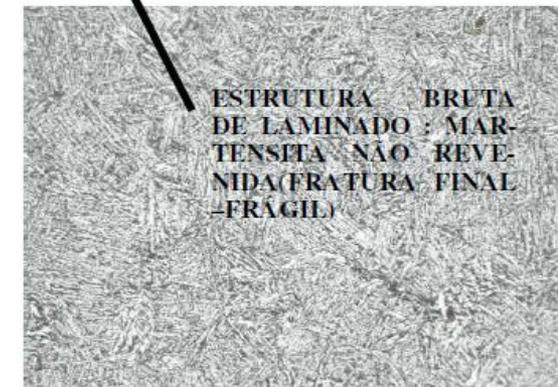
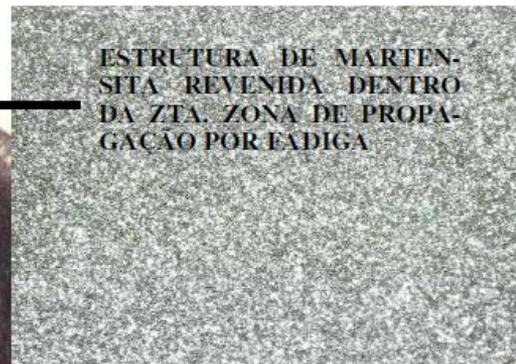
# A TRINCA POR FADIGA É NUCLEADA NA SUPERFÍCIE, A NÃO SER QUE OCORRA UMA DESCONTINUIDADE SUBSUPERFICIAL.



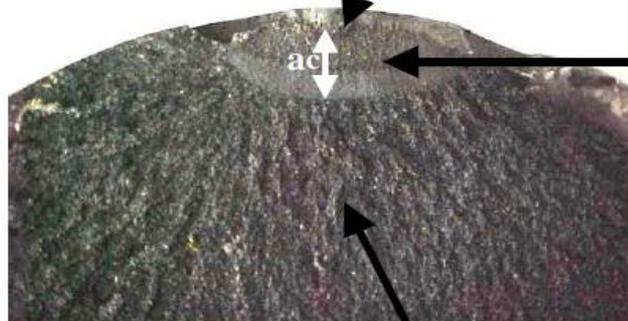
ORIGEM DA FRA-  
TURA NA INTER-  
FACE DA ESTRU-  
TURA BRUTA DE  
FUSÃO DA SOLDA



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)

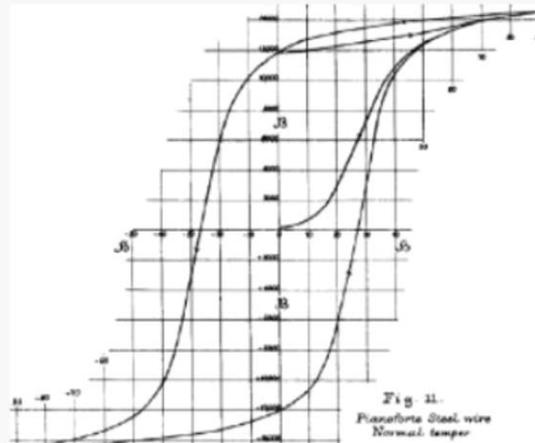
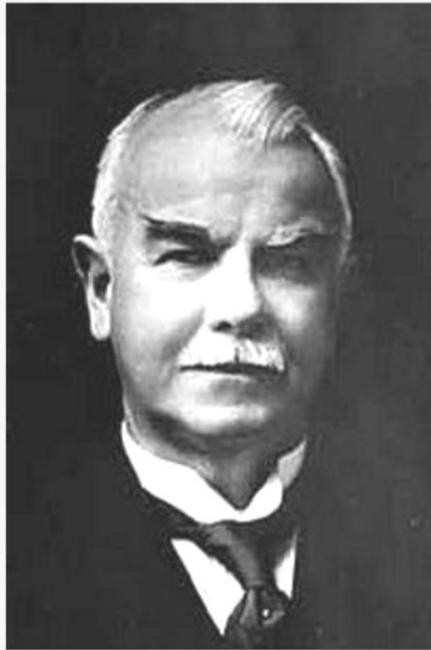


## FADIGA - ESTRIAS

- 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 I.*



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

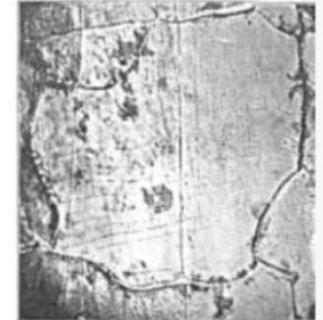


Fig. 10. Specimen after 5000 revolutions.  $\times 1000$ .

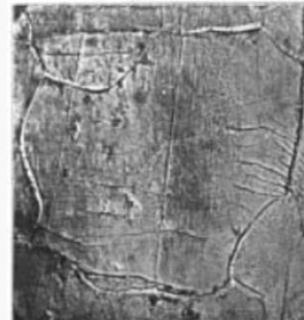
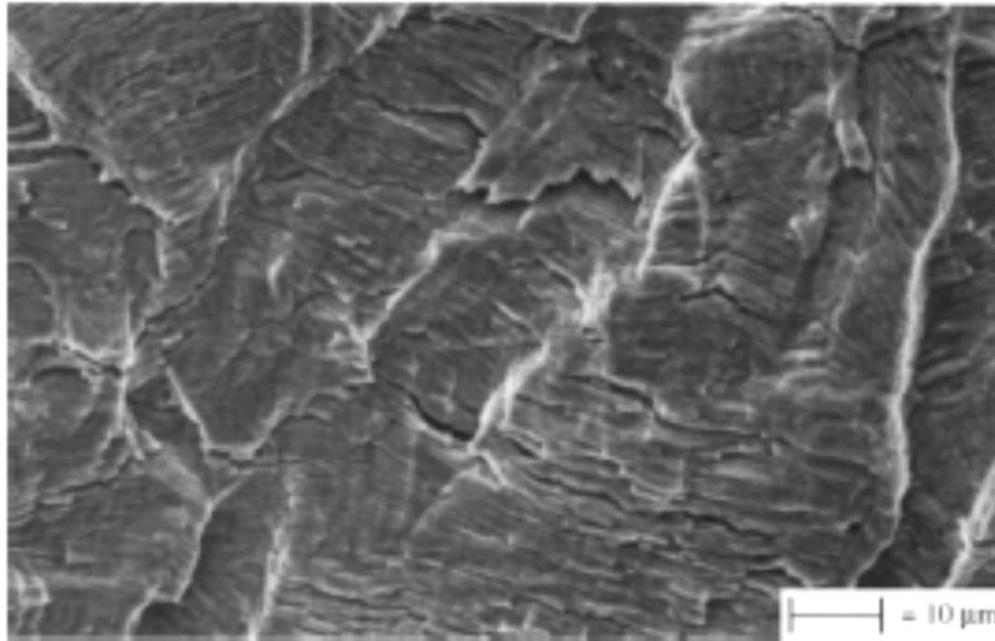


Fig. 11. Specimen after 10,000 revolutions.  $\times 1000$ .



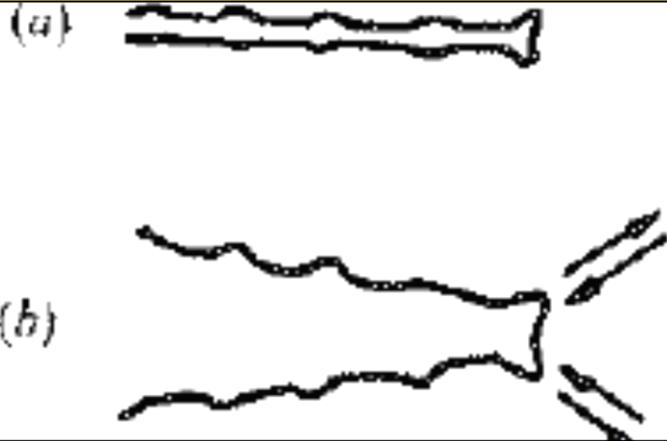
Fig. 12. Specimen after 40,000 revolutions.  $\times 1000$ .



**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;

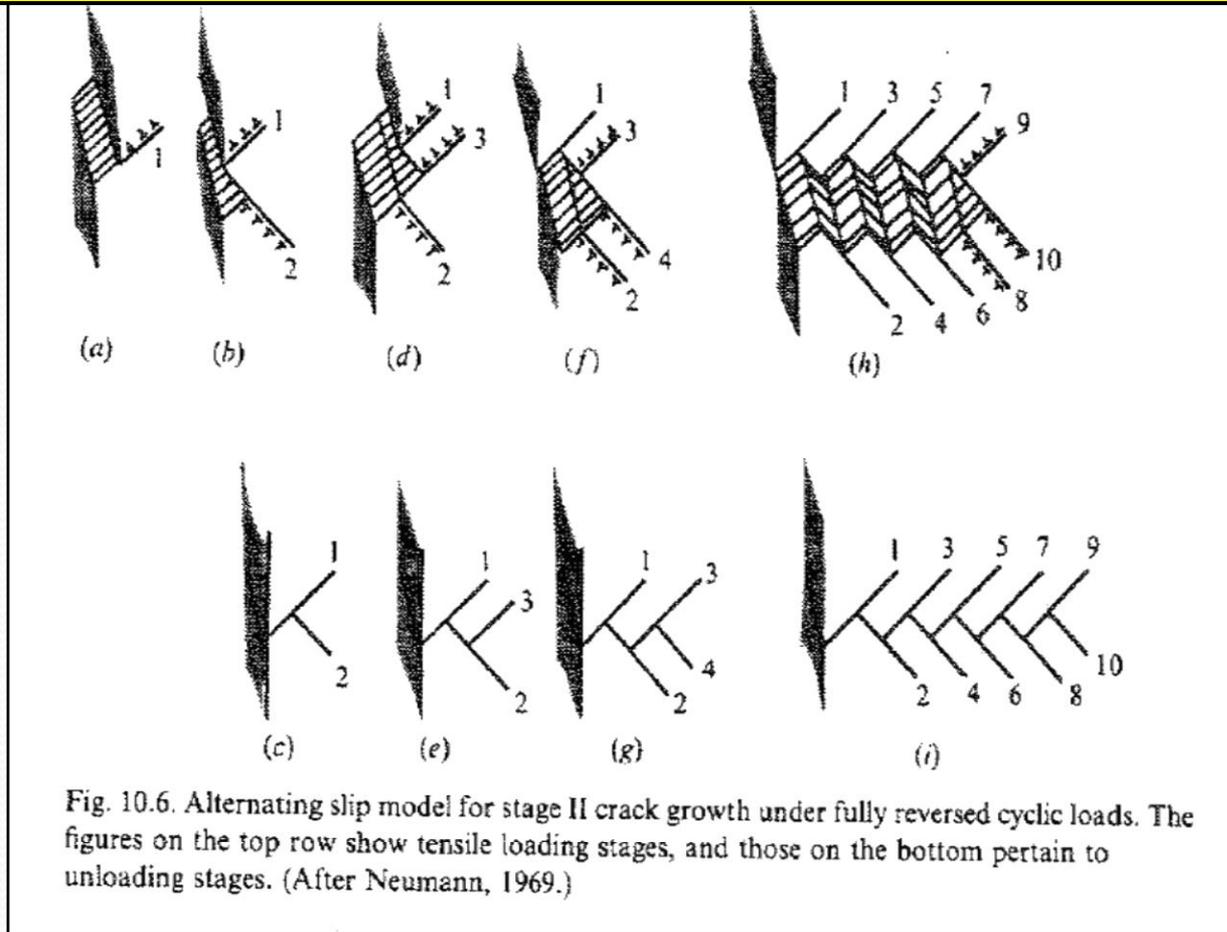
Laird (1967) – fechamento plástico provocando um “arredondamento” da ponta da trinca e posterior propagação. Propagação por cisalhamento;

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

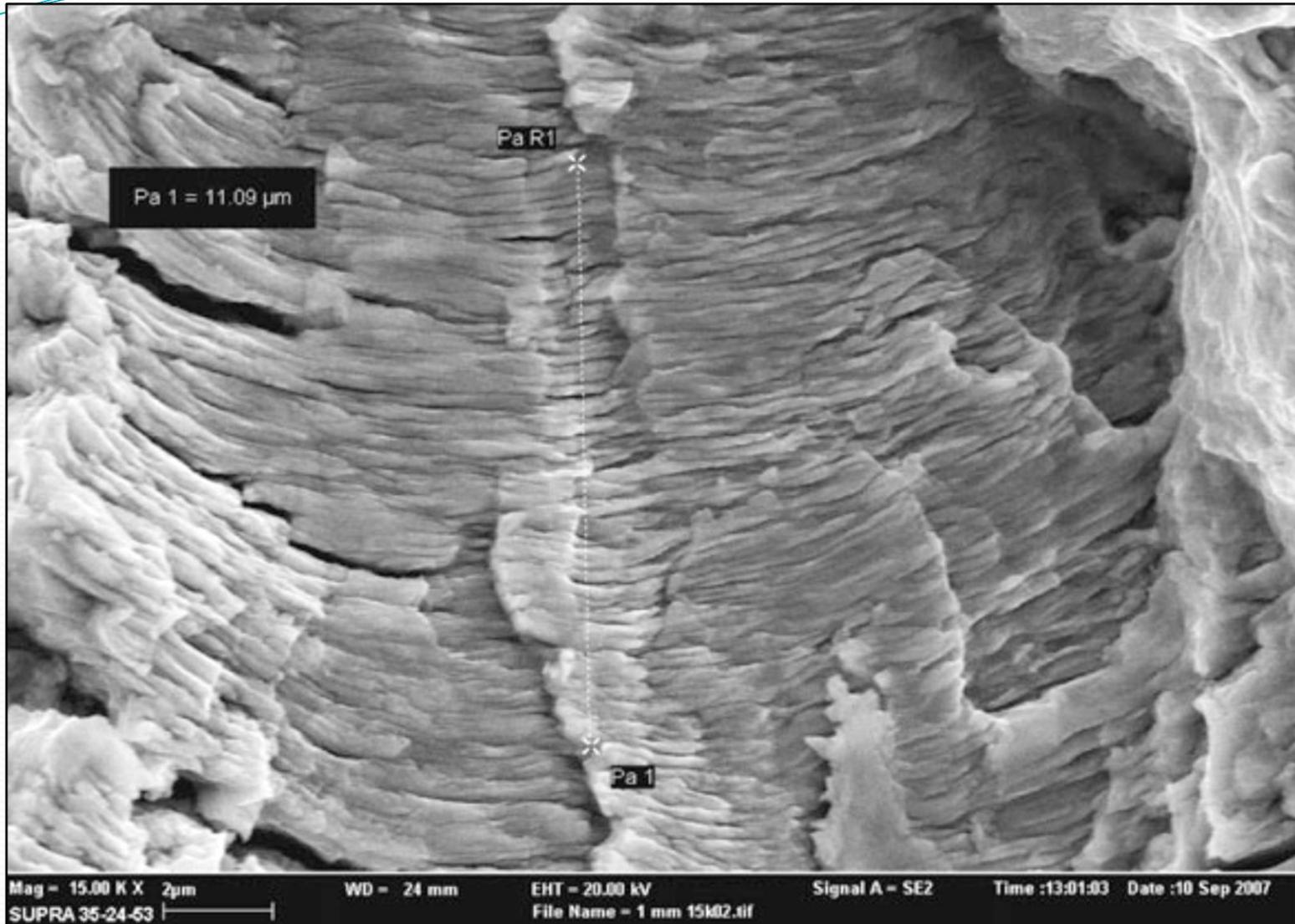
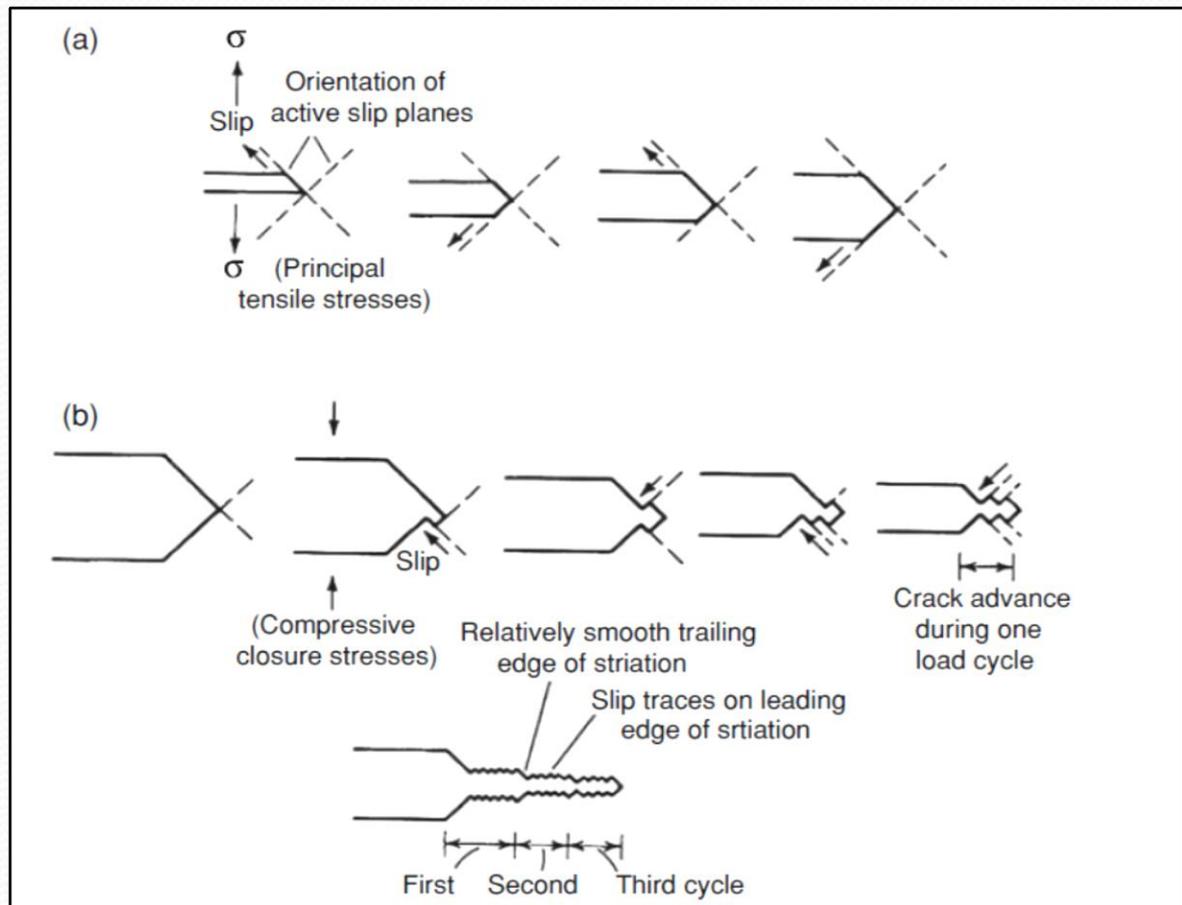
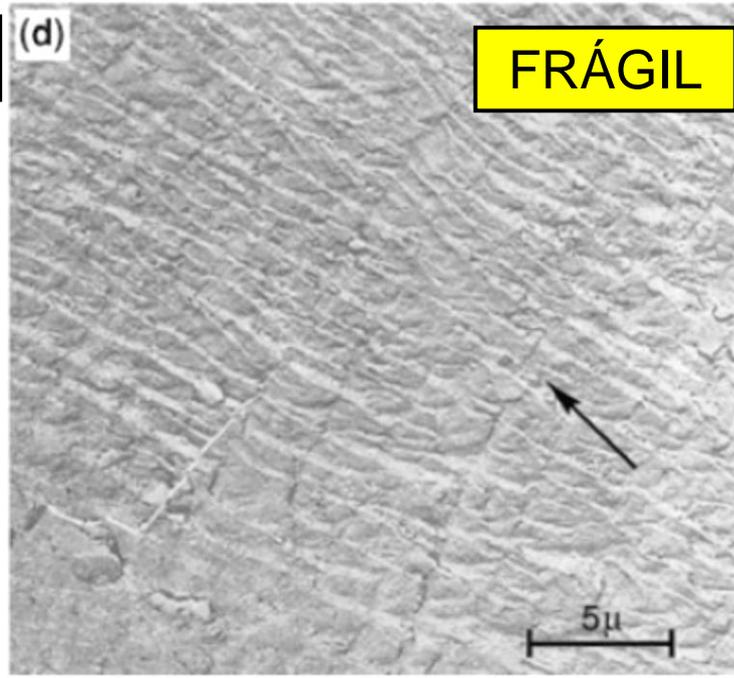
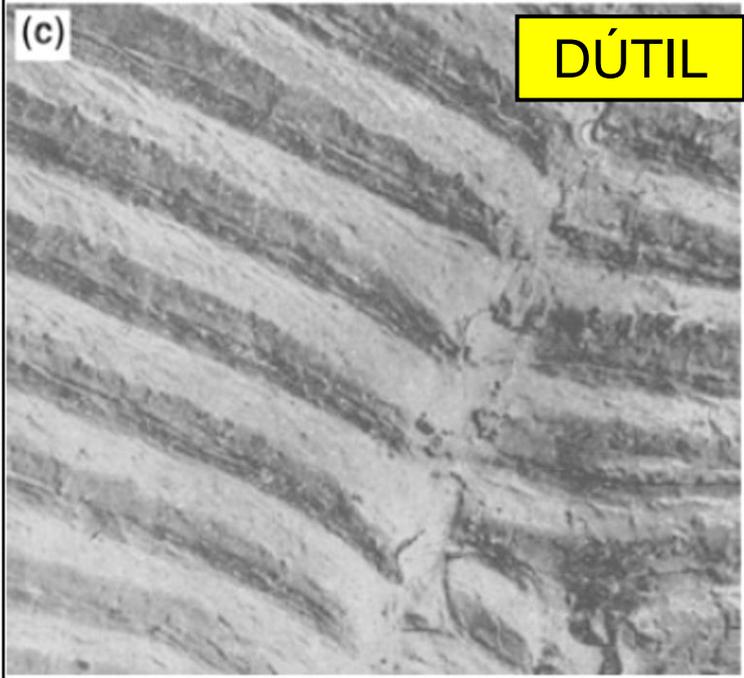
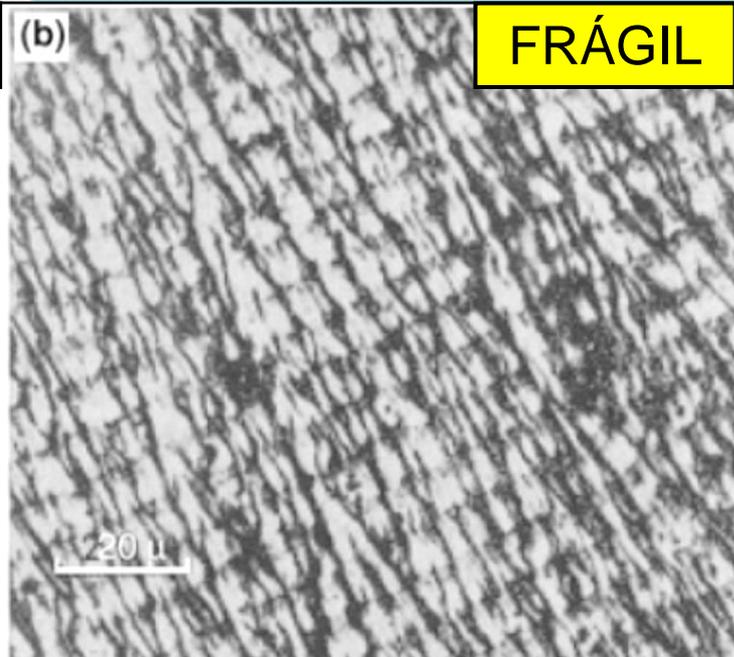
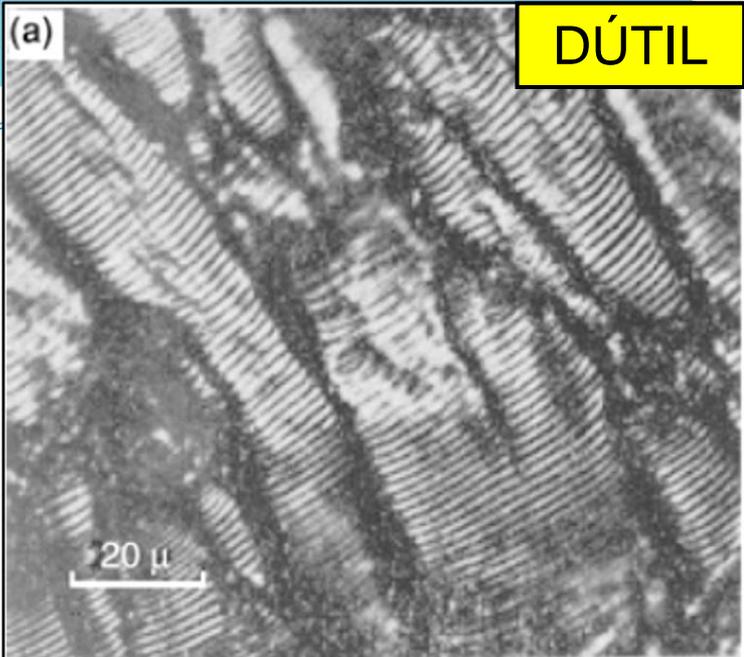


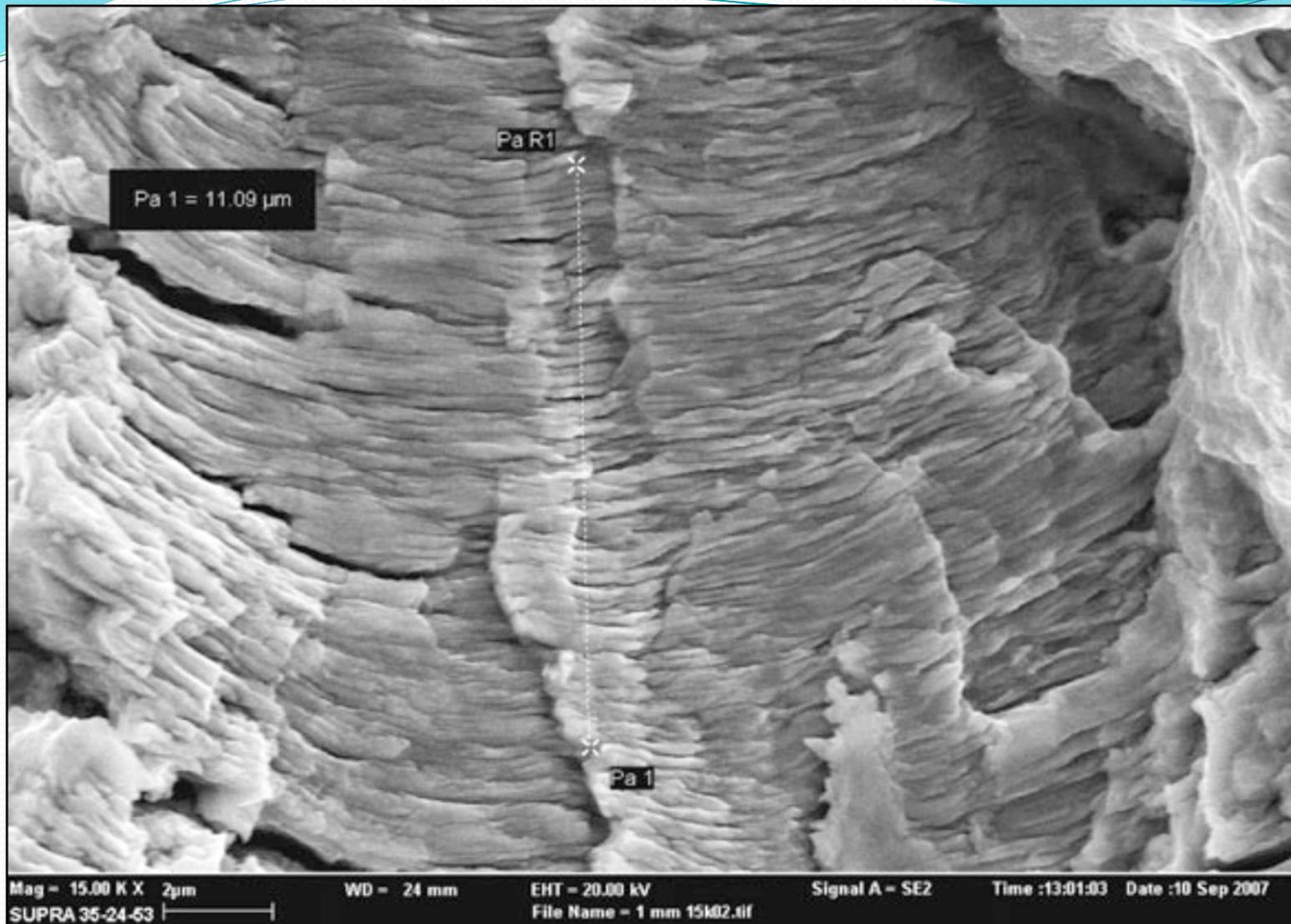
Imagem de MEV(Microscópio Eletrônico de Varredura)

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**.

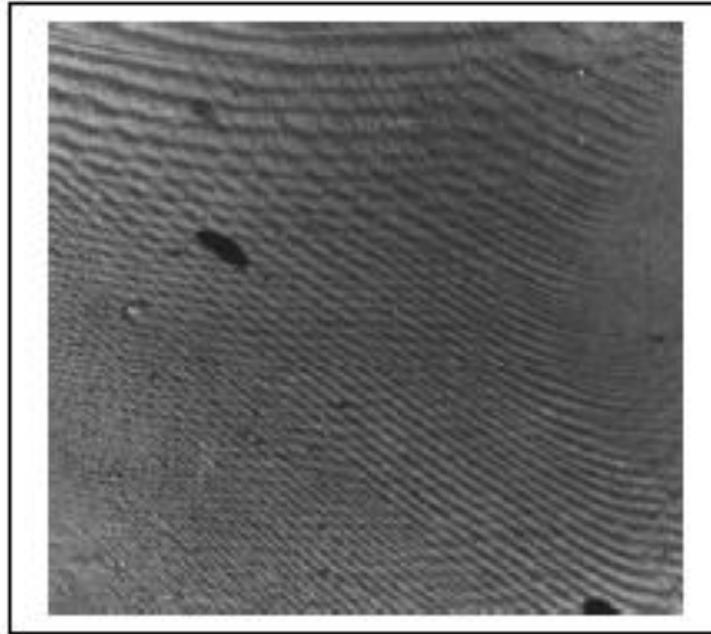






Prof.Dr. José Benedito Marcomini

## FADIGA – ESTRIAS X LINHAS DE WALLNER

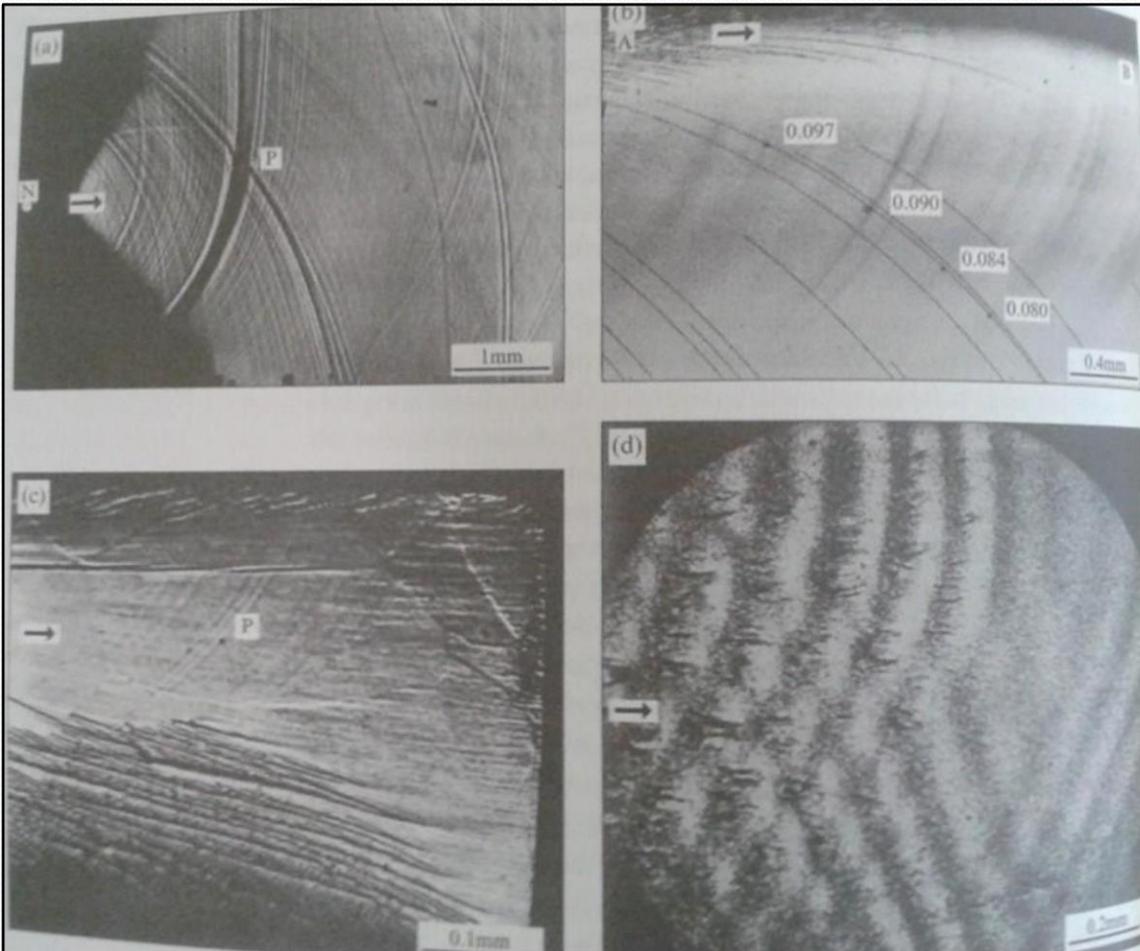


Linhas de Wallner

**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

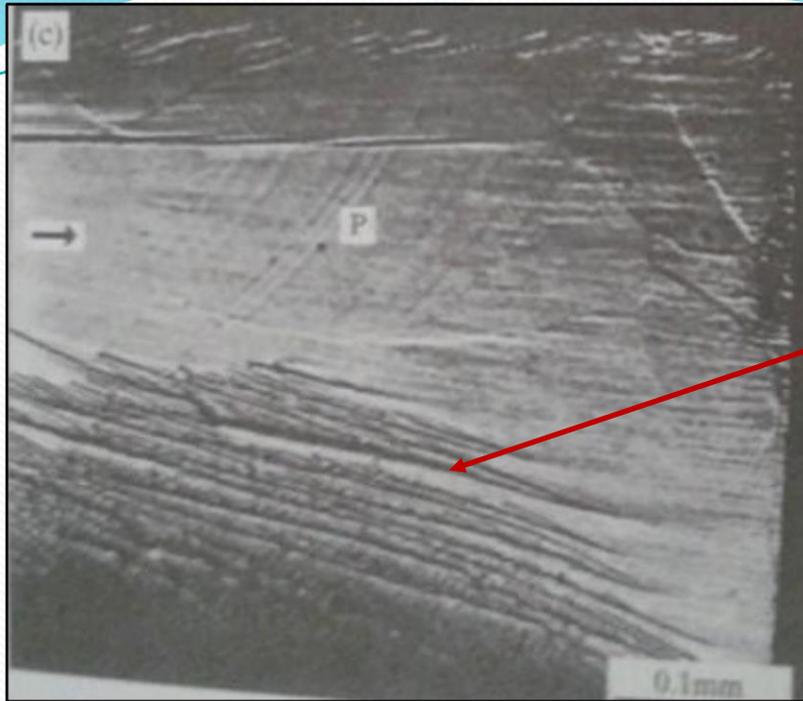
$$C_{d \text{ aço}} = 5.920 \text{ m/s}$$

$$C_s = 0,4 C_d$$

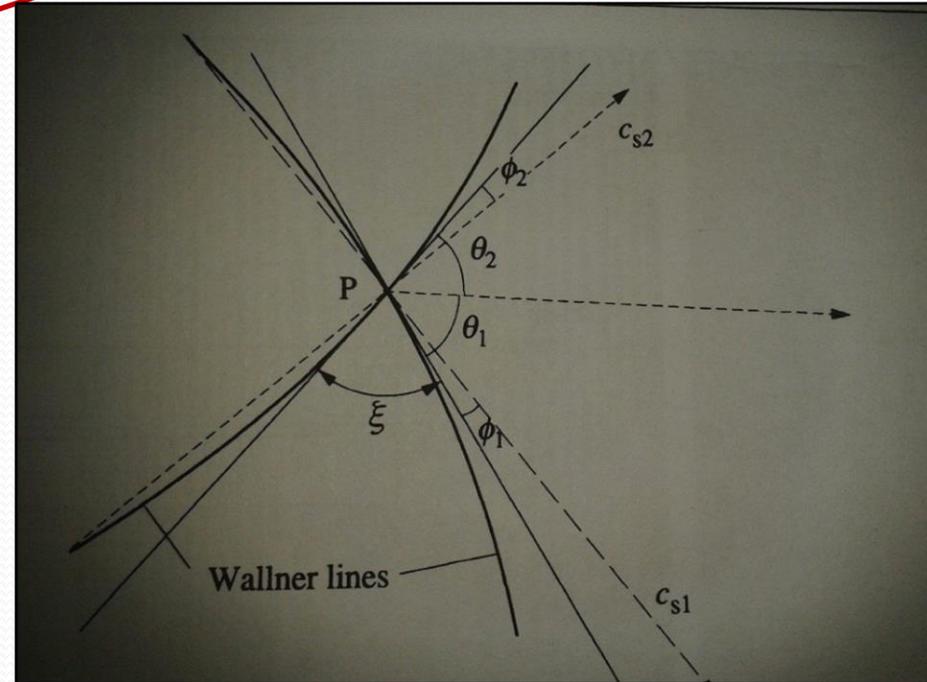




# LINHAS DE WALLNER: FRACTOGRAFIA DE ONDAS DE TENSÃO

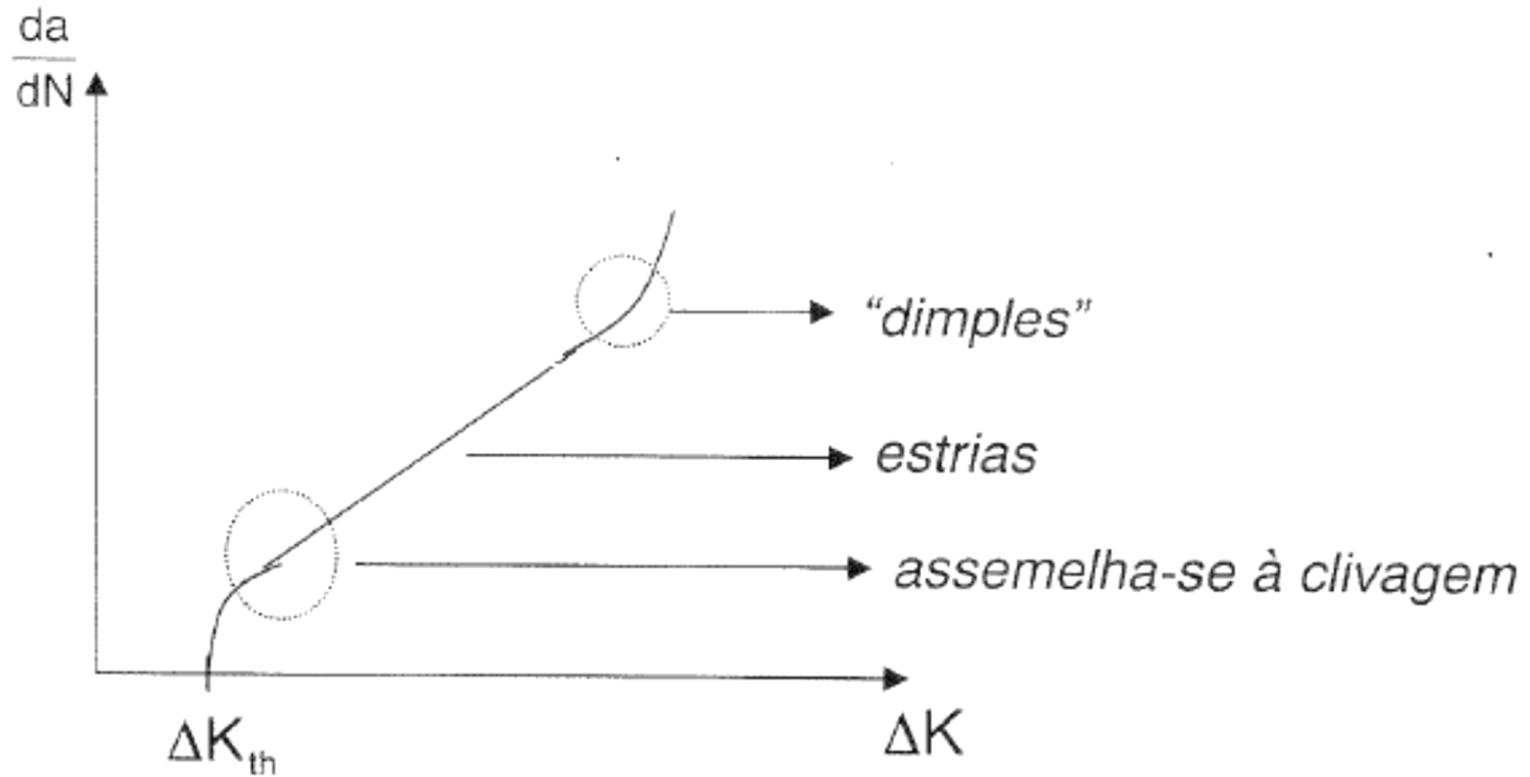


OS DEGRAUS DAS MARCAS DE RIOS PODEM TER GERADO AS LINHAS DE WALLNER



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

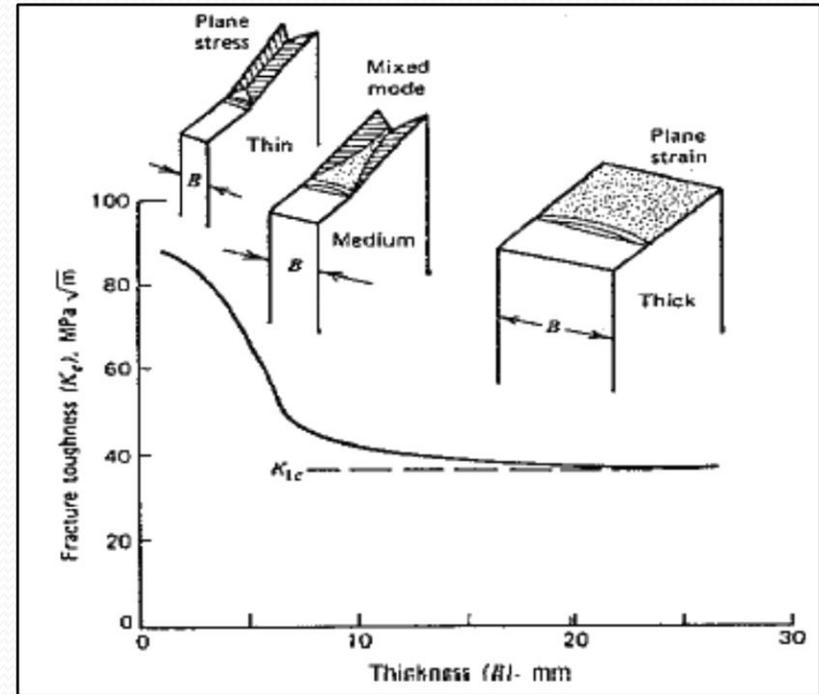
## Morfologia da superfície de fratura:



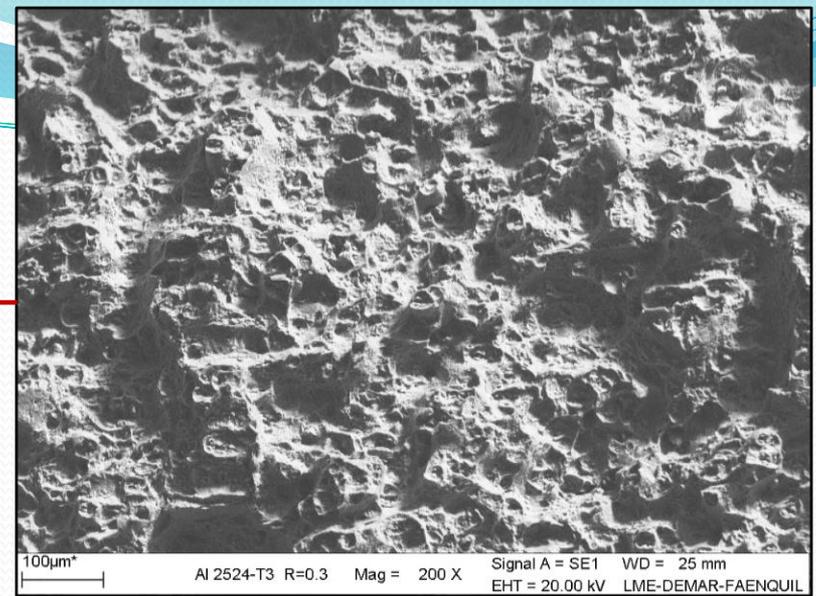
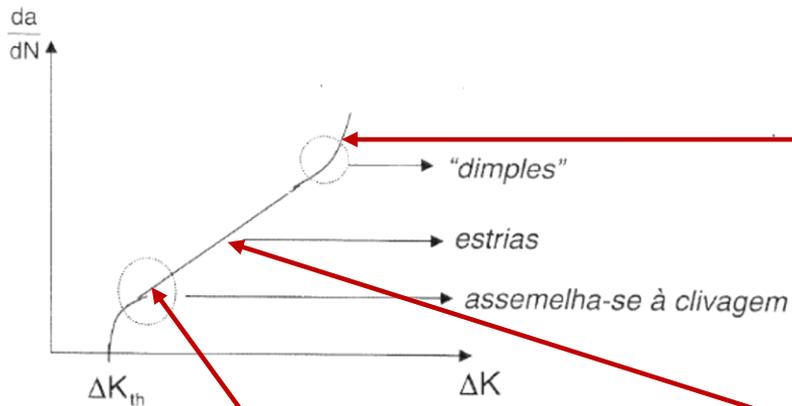
## Ensaio de Propagação da trinca por fadiga em Al 2524-T3

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

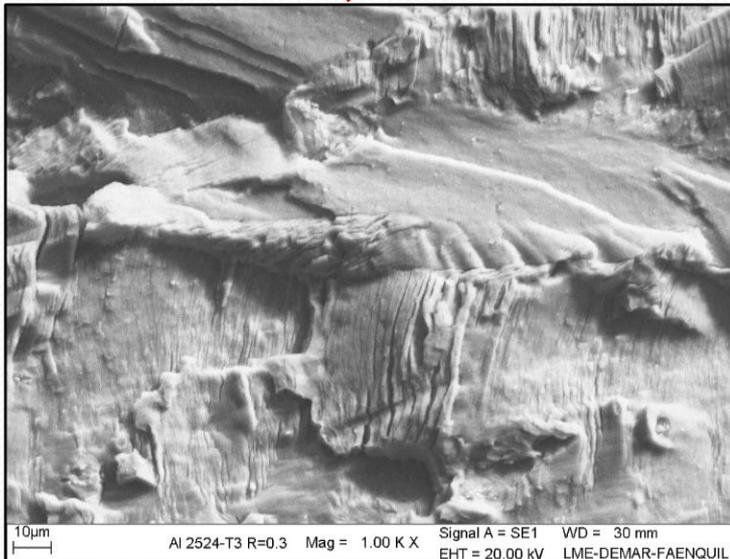
OBS.: Em todas as fotos a direção da propagação da trinca é da esquerda para a direita.



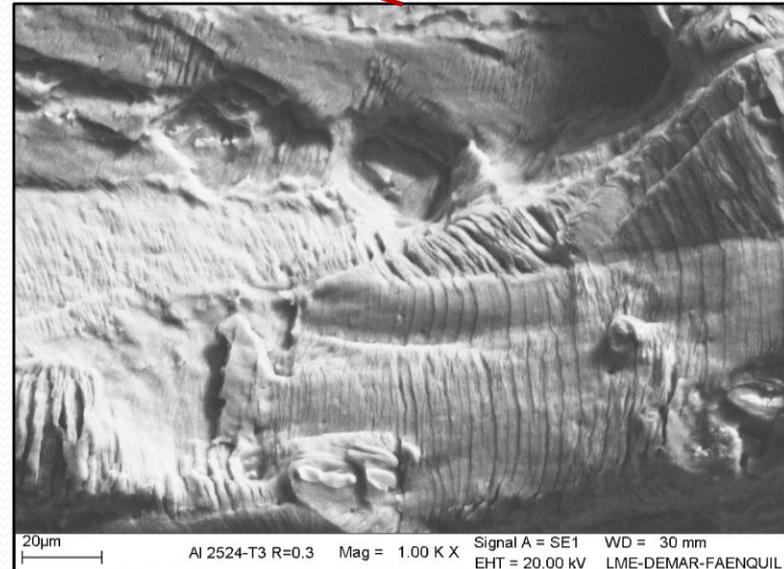
Morfologia da superfície de fratura:



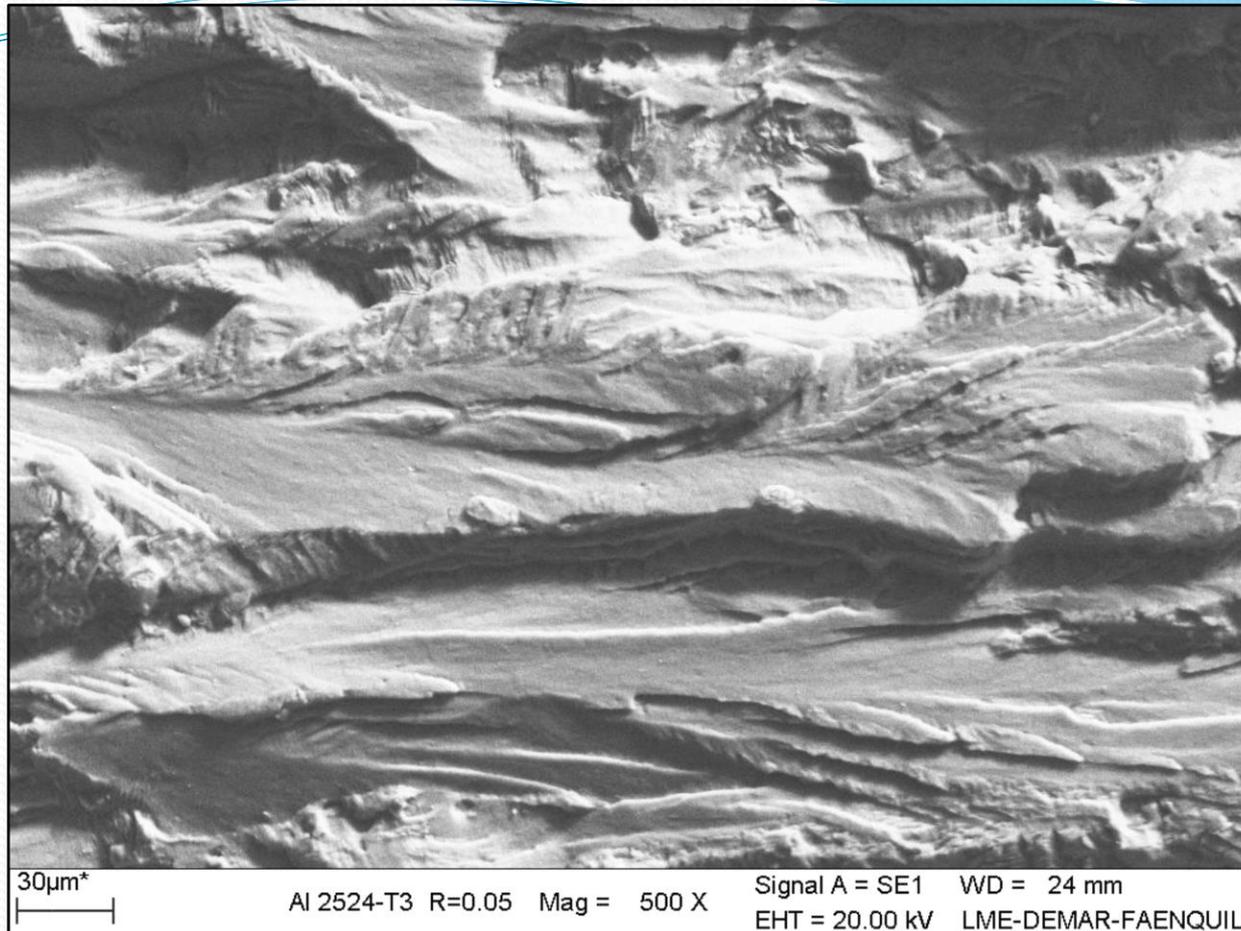
**Final do ensaio.**



**Início do ensaio.**



**Meio do ensaio.**

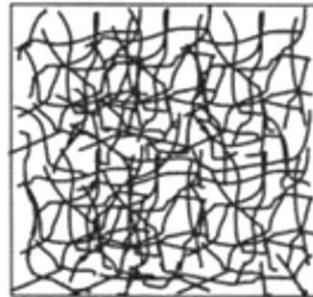


**Início do ensaio, com  $R=0,05$**

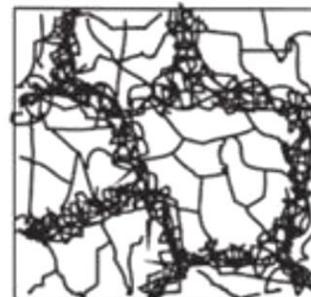
**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO

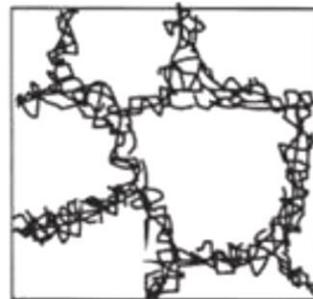
- O tamanho de grão normalmente controla a propagação da trinca por fadiga. Quanto menor mais resistente: a trinca perde mais energia com a mudança de direção;
- Metais CFC com alta EFE, forma subgrãos, quando submetidos a esforços cíclicos que então se sobrepõe ao efeito do TG;



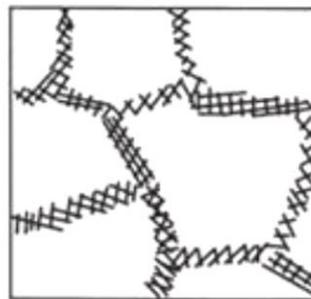
(a) Emaranhado de discordâncias



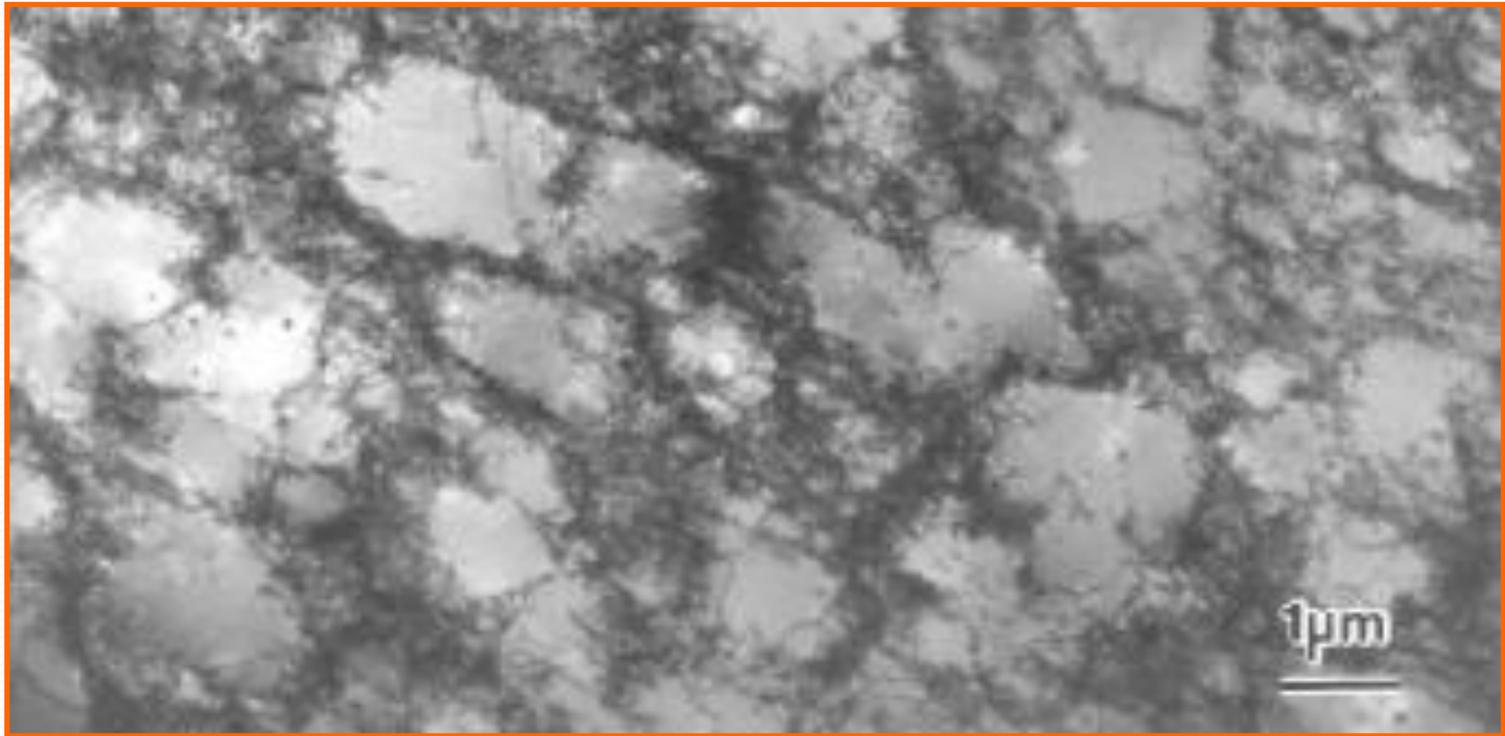
(b) Formação de células



(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**