

# **CORROSÃO-FADIGA**

A fragilização de ligas metálicas sujeitas a carregamentos monotônicos ou **cíclicos** em **meio aquoso** envolve dois mecanismos: a dissolução anódica e/ou a fragilização por hidrogênio.

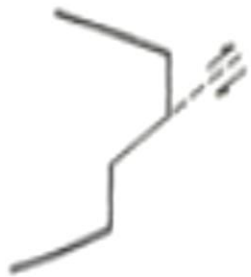
### **Dissolução Anódica:**

- Difusão de partículas ativas como **moléculas de água ou ânions de haletos**;
- **Ruptura** do filme **óxido protetor** nas bandas de deslizamento ou na ponta da trinca devido a **concentração de tensões** ou “**freeting**”\* entre as faces da trinca;
- A dissolução da superfície exposta, propagação da trinca;
- Nova formação do óxido (passivação) nas superfícies da trinca;

\***Freeting**: fenômeno complexo que envolve atrito e contato constante entre duas superfícies

# DISSOLUÇÃO ANÓDICA

Quebra do filme óxido



1

2



Dissolução do metal

Passivação



3

4

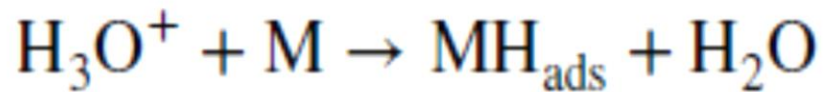


Quebra do filme óxido

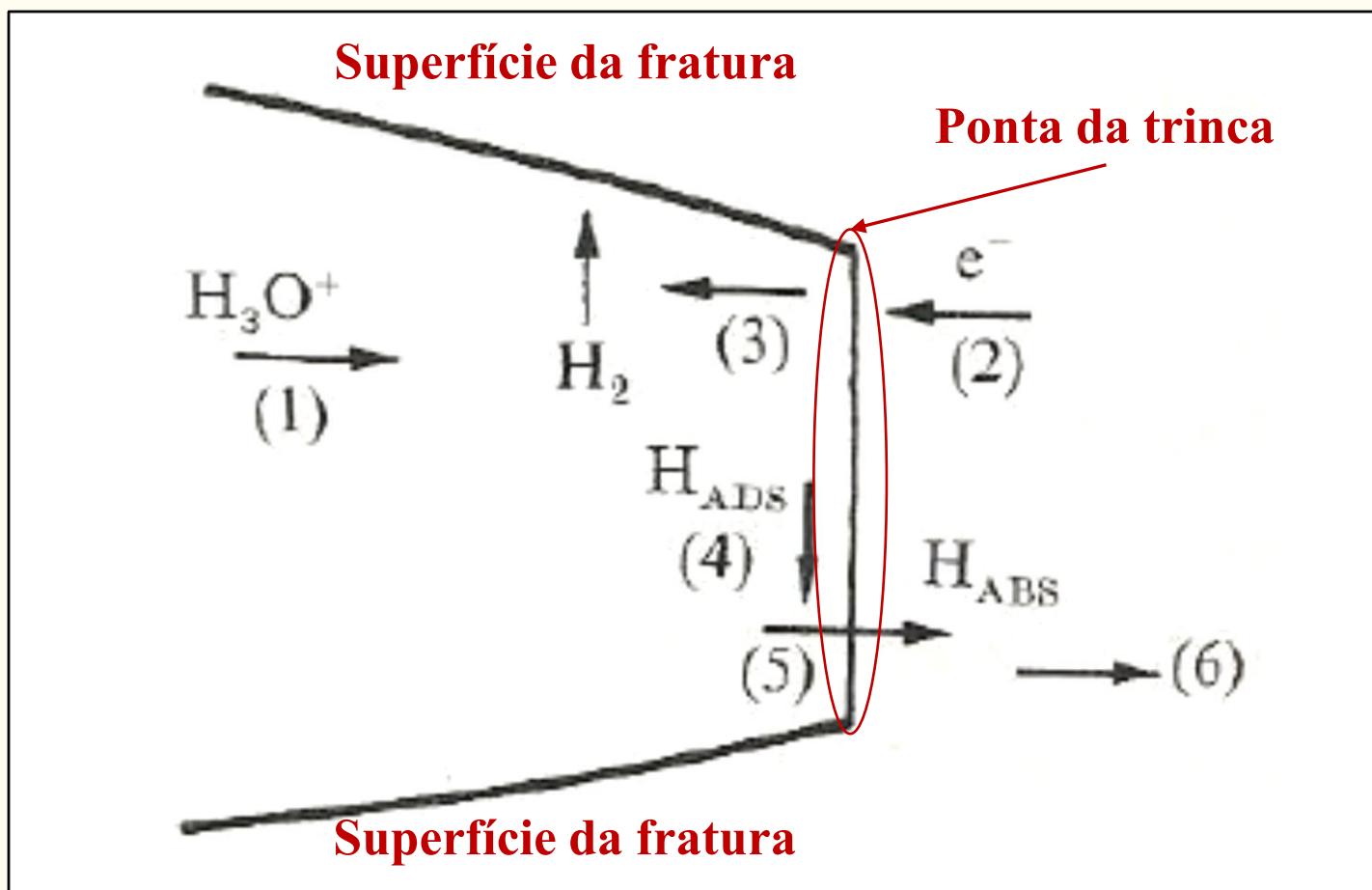
## FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO

- **Difusão** das moléculas de água ou íons de hidrogênio entre as paredes da trinca em direção a ponta da trinca;
- **Redução** destas partículas para criar átomos de hidrogênio na superfície da ponta da trinca;
- **Difusão** superficial e **absorção** de **H na forma atômica** pelo metal;
- Difusão dos átomos para pontos críticos como contornos de grão, vazios, regiões de alta densidade de linhas de discordância (LD), etc.

Meio ácido



Meio alcalino ou salino (neutro)



# PRINCIPAIS MECANISMOS DE FRAGILIZAÇÃO POR H

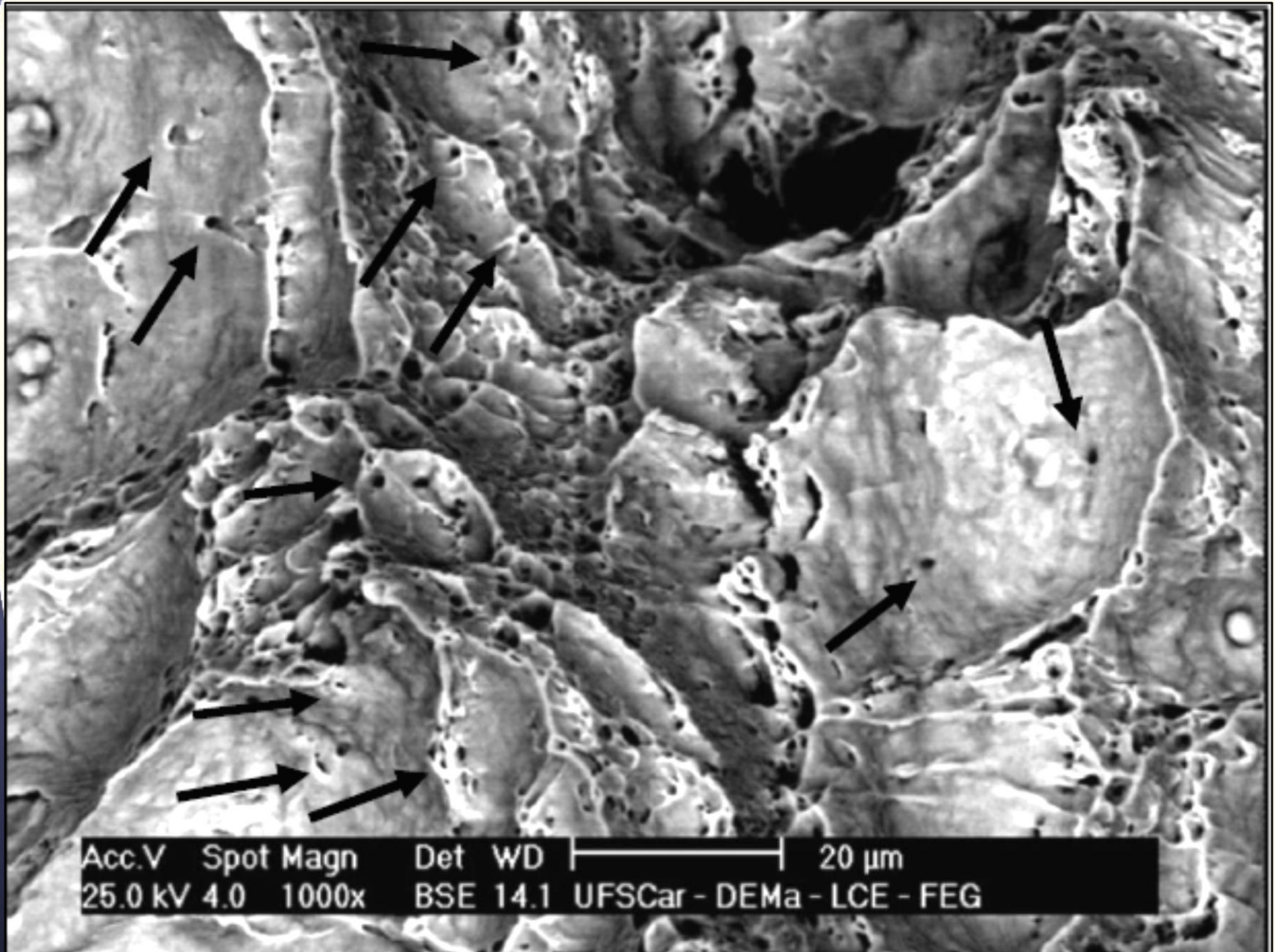
- **Plasticidade localizada induzida por hidrogênio (*HELP- Hydrogen Enhance Local Plasticity*):** Devido á precariedade das ligações químicas do H, ocorre um **aumento da mobilidade** das linhas de discordância, fazendo com que o **limite de escoamento** sofra **redução** e o material venha a fraturar (foi primeiramente proposto por **Beachem, 1971**);
- **Decoesão induzida por Hidrogênio (*HEDE- Hydrogen Enhance Decohesion*):** O H, com suas ligações fracas, **reduz a energia de ligação** média e promove a **decoesão** da **interface** entre um **precipitado e a matriz** ou entre **contornos de grão** e outros. Existe uma **quantidade crítica de H** para ocorrer;
- **Combinação HEDE+HELP.**

## OUTRO MECANISMO:

### TEORIA DA PRESSÃO DO HIDROGÊNIO

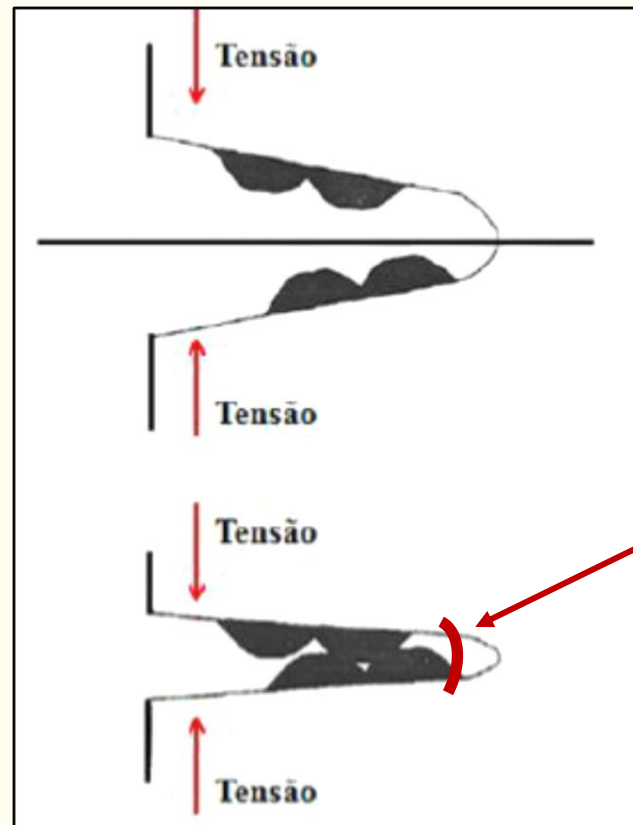
Proposta por Zaptte, 1941. Os átomos de H, migram para sítios com **alta energia** como **aglomerados de LD** (zona plástica na ponta da trinca), **microvazios**, **CG**, em uma determinada região, e acabam formando **moléculas do gás H<sub>2</sub>**. Isto leva à formação de uma **atmosfera do gás com alta pressão**. Quando essa **pressão ultrapassa a tensão crítica** para fratura do material, ocorre a **fratura** induzida por hidrogênio ou *Hydrogen Induced Cracking (HIC)*. Esse mecanismo explica a geração de “***Fish Eyes***” (***olho de peixe***), que são pequenas “**crateras**”, com forma similar a um olho de peixe, que aparecem na **superfície de fratura**, quando observada em **MEV** cuja causa da falha tenha sido **HIC**.

# "FISH EYES"





**Pode ocorrer o efeito contrário: redução da taxa de propagação da trinca, devido ao embotamento na ponta da trinca, causado pela formação das camadas de óxidos, em baixas cargas cíclicas ( $\Delta K$ s menores). No ensaio de treshold, com  $\Delta K$  decrescente, esse fenômeno pode ser observado.**



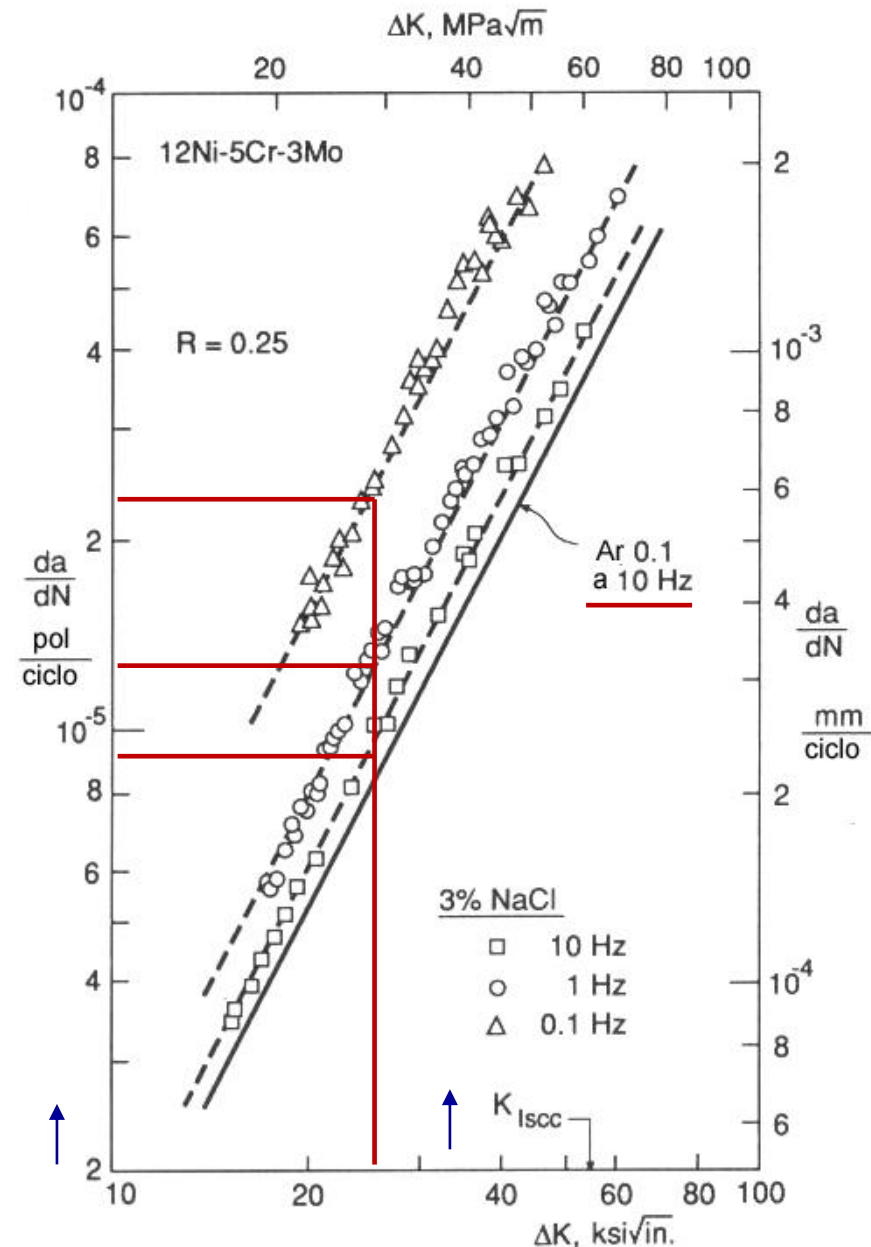
**REDUZ A  
CONCENTRAÇÃO  
DE TENSÃO NA  
PONTA DA TRINCA**

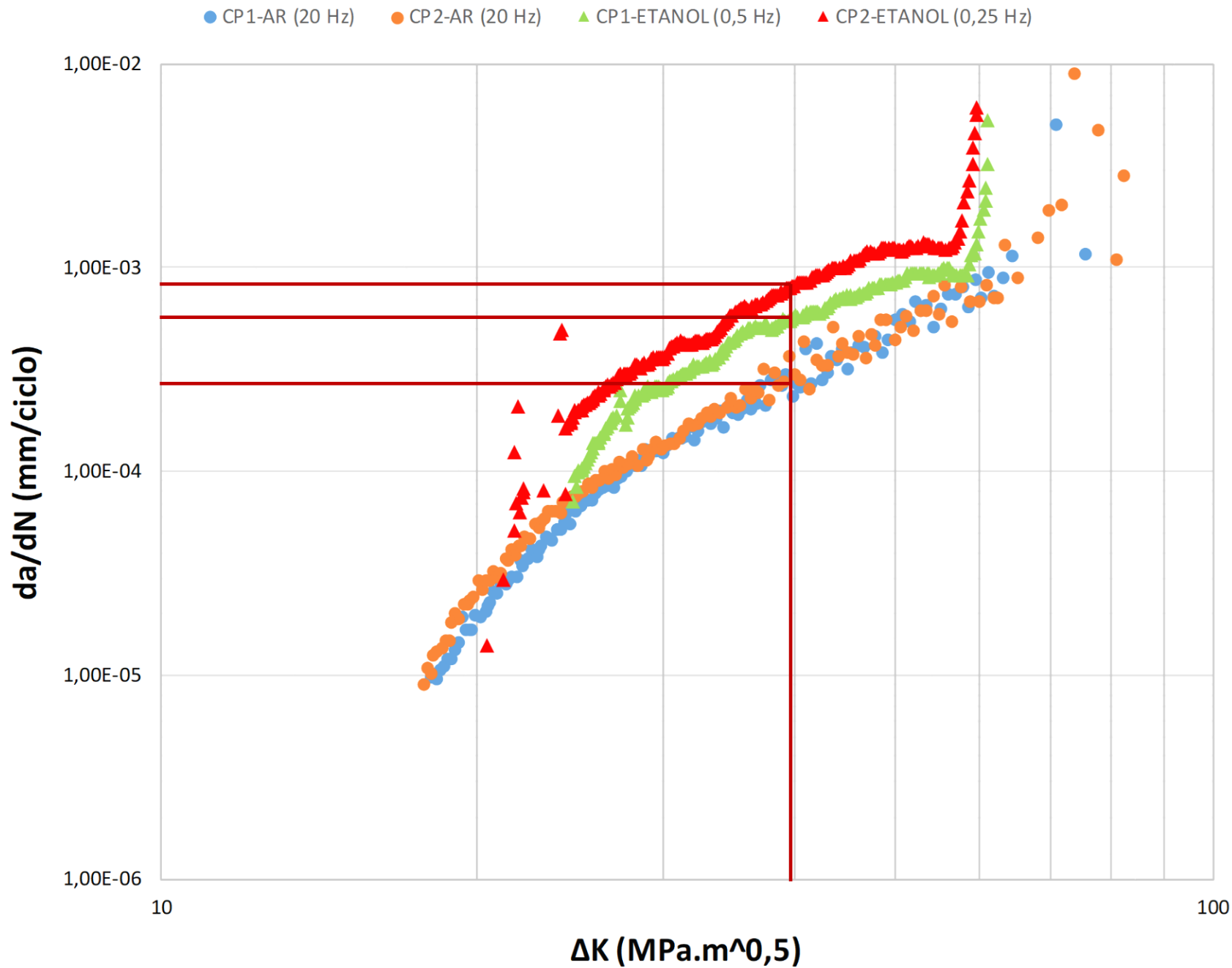
## MEIOS AGRESSIVOS

O termo **corrosão fadiga** é muitas vezes utilizado quando o **crescimento de trinca** acontece em meio **corrosivo**, sendo que, normalmente a **taxa de crescimento de trinca** é **aumentada**.

Ao **ar**, a **frequência** **não** influencia.

Em **meios agressivos**, quanto **menor a frequência** maior o **efeito da corrosão**.





# FILME





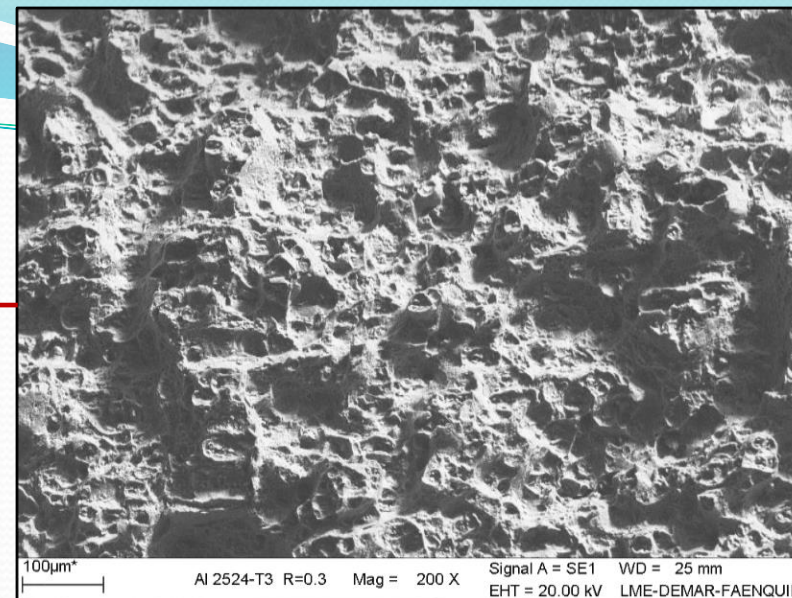
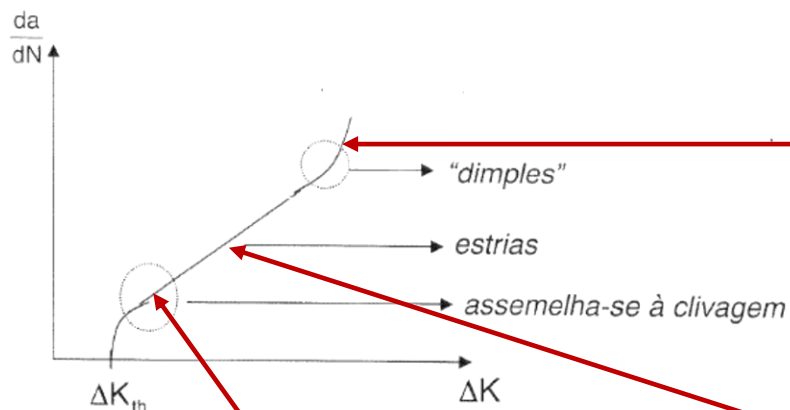
**ANÁLISE DE**

**FATIGA**

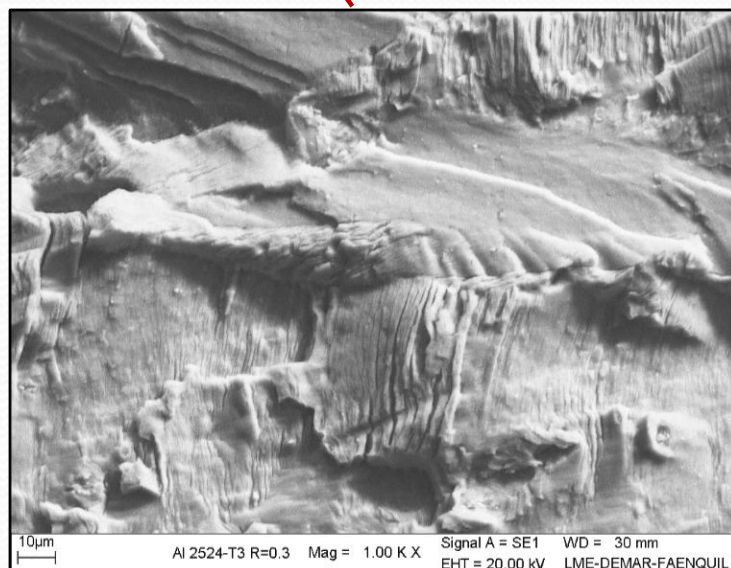
# **ASPECTOS METALÚRGICOS DA FADIGA**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

Morfologia da superfície de fratura:



**Final do ensaio.**



**Início do ensaio.**



**Meio do ensaio.**

- *É possível traçar vários paralelos entre os efeitos de determinadas variáveis metalúrgicas sobre as propriedades de fadiga e tração:*
- *Aços e ligas endurecidas por solução sólida - tem a mesma influência sobre fadiga e tração;*
- *Aços com mesmo limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) – as estruturas perlíticas têm menor resistência à fadiga do que as estruturas esferoidizadas  
⇒ as lamelas de cementita podem ter efeito de entalhe.*



➤ **Influência do tamanho de grão:**



1º. **Materiais com estrutura cristalina com alta energia de falha de empilhamento (metais CFC puros – Al, Cu etc) ⇒**

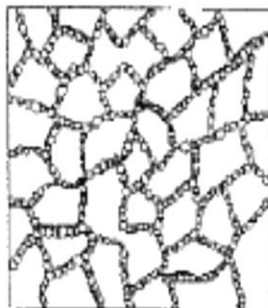


⇒ com o carregamento cíclico ocorre a formação de uma estrutura celular de discordâncias que controla o crescimento da trinca no estágio I e mascara a influência do tamanho de grão ⇒

⇒ Insensíveis à influência do tamanho de grão.



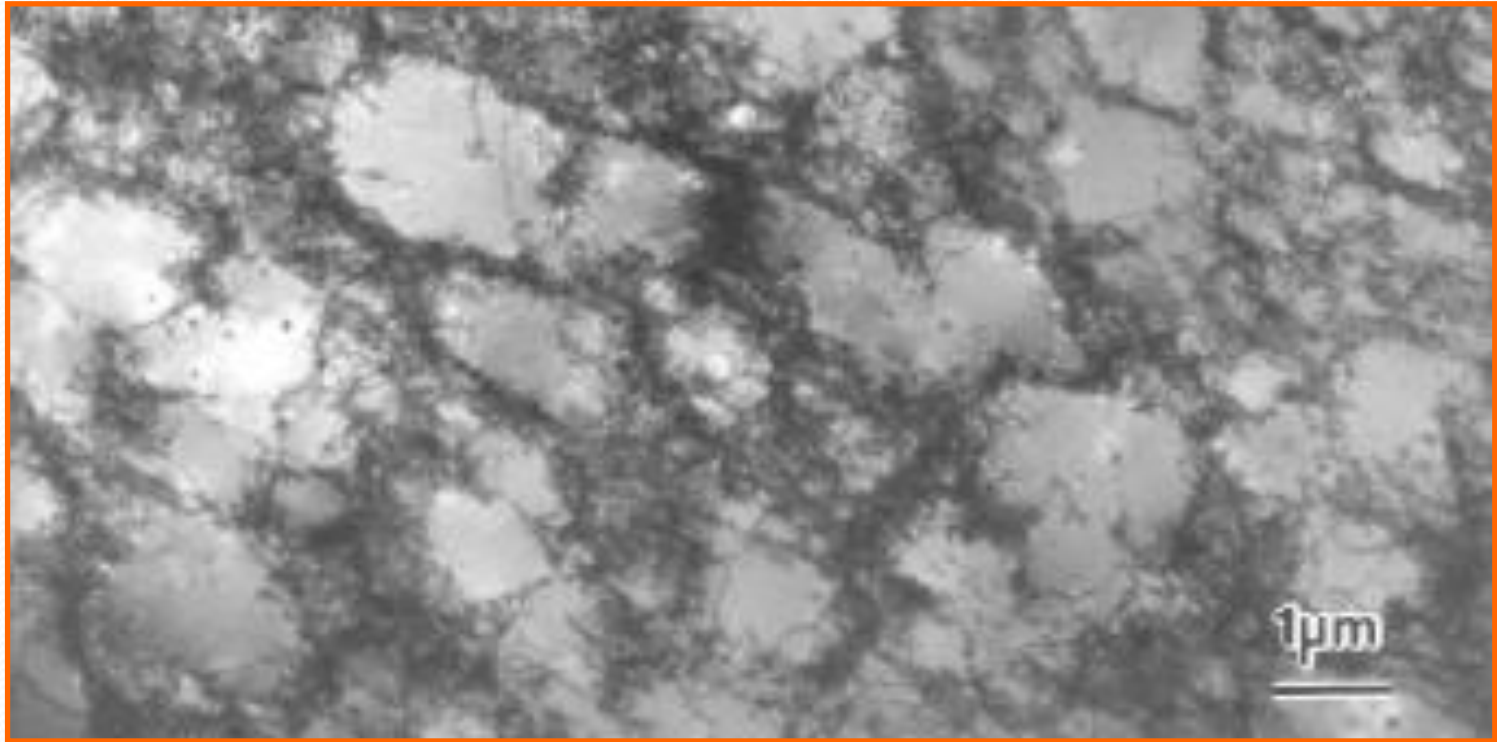
(a)



(b)

Exemplo de estrutura celular de discordâncias :

- com 10% de deformação plástica – início de formação das células;
- com 50% de deformação plástica (tamanho da célula em equilíbrio, com alta densidade de discordâncias nas paredes das células).



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

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

## ➤ *Influência do tamanho de grão:*

2º. *Materiais com estrutura cristalina com baixa energia de falha de empilhamento (ferro, aços etc) ⇒*

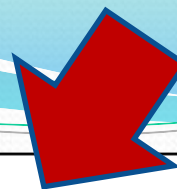
⇒ *com o carregamento cíclico não ocorre a formação da estrutura celular de discordâncias (há deslizamento planar das discordâncias)*

⇒ *os contornos de grão controlam a taxa de propagação da trinca ⇒*

⇒  *$N_f$  é proporcional à  $d^{-1/2}$  (d é o diâmetro médio do grão)*

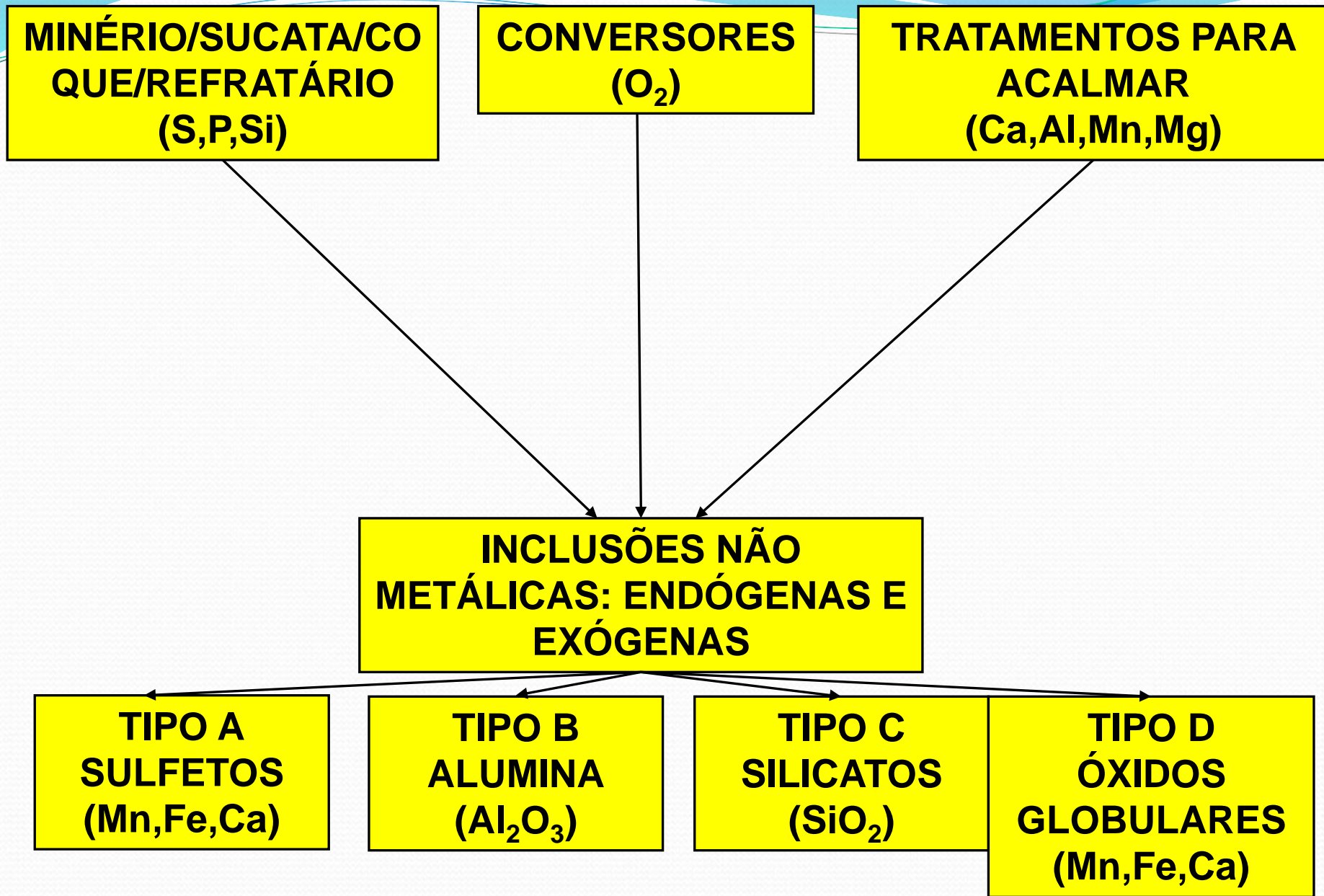
⇒ *quanto menor o tamanho de grão melhores são as propriedades de fadiga*



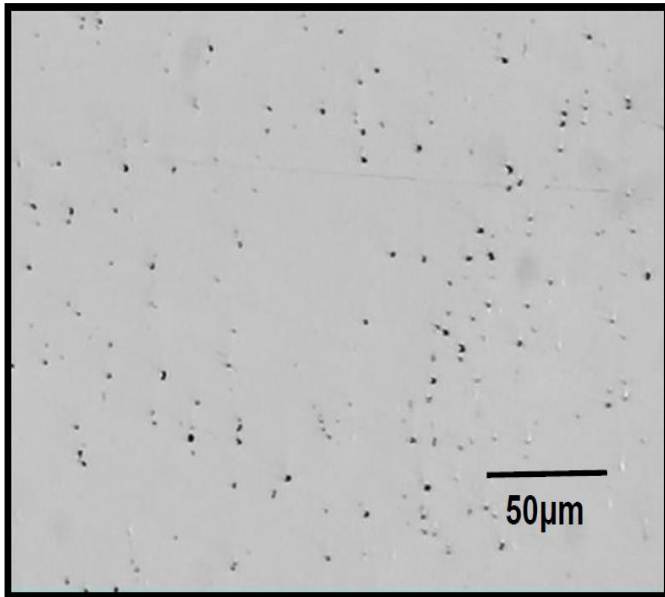


- *O limite de fadiga de aços na direção transversal é da ordem de 60 a 70% do limite de fadiga na direção longitudinal*
- *Na direção transversal as trincas nucleiam em inclusões não metálicas*
- *A eliminação de inclusões não metálicas por fusão a vácuo aumenta bastante o limite de fadiga transversal*

# FADIGA - ASPECTOS METALÚRGICOS



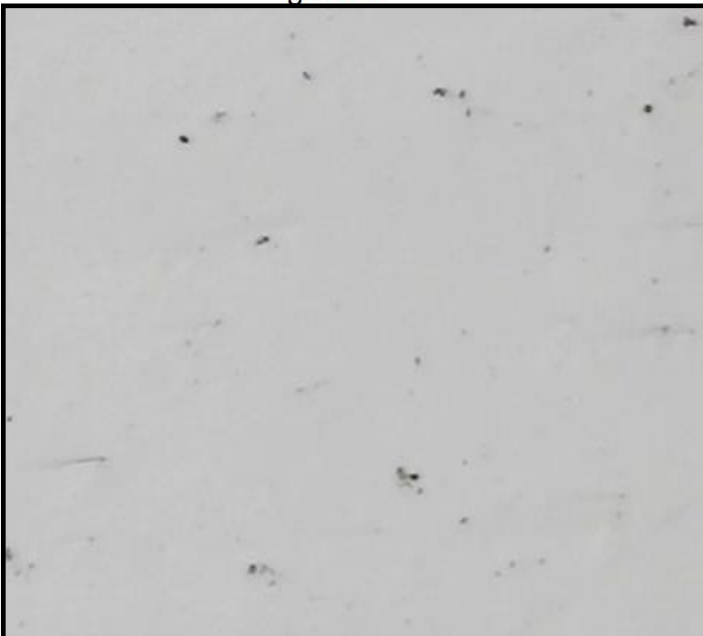
(MARCOMINI)



Amostra 3. Inclusões de óxido globular (tipo D), nível 3, série fina e grossa.



INCLUSÕES DE SULFETO-  
1000X



análise de microinclusões do CP3. Tipos A,B, nível1, série fina

**CLASSIFICAÇÃO PELA ASTM E 45**

**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>

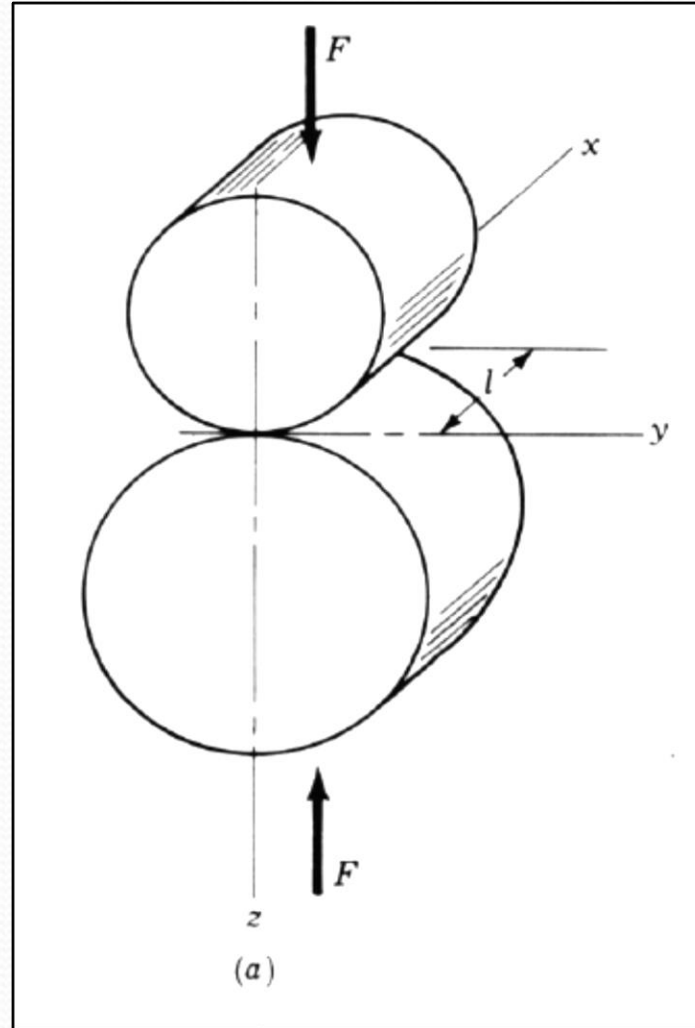
# **FADIGA DE CONTATO**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



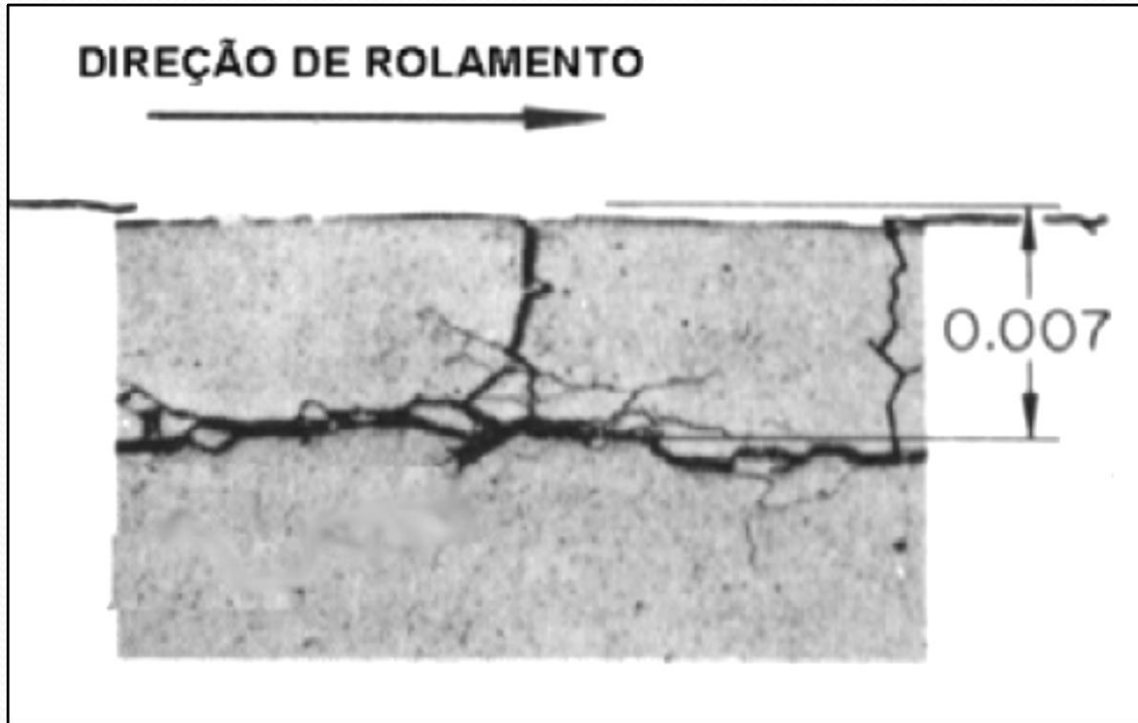
## FADIGA DE CONTATO

Fadiga de contato resulta das tensões provocadas por esforços de contato entre duas superfícies, com movimento de rolamento relativo.



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

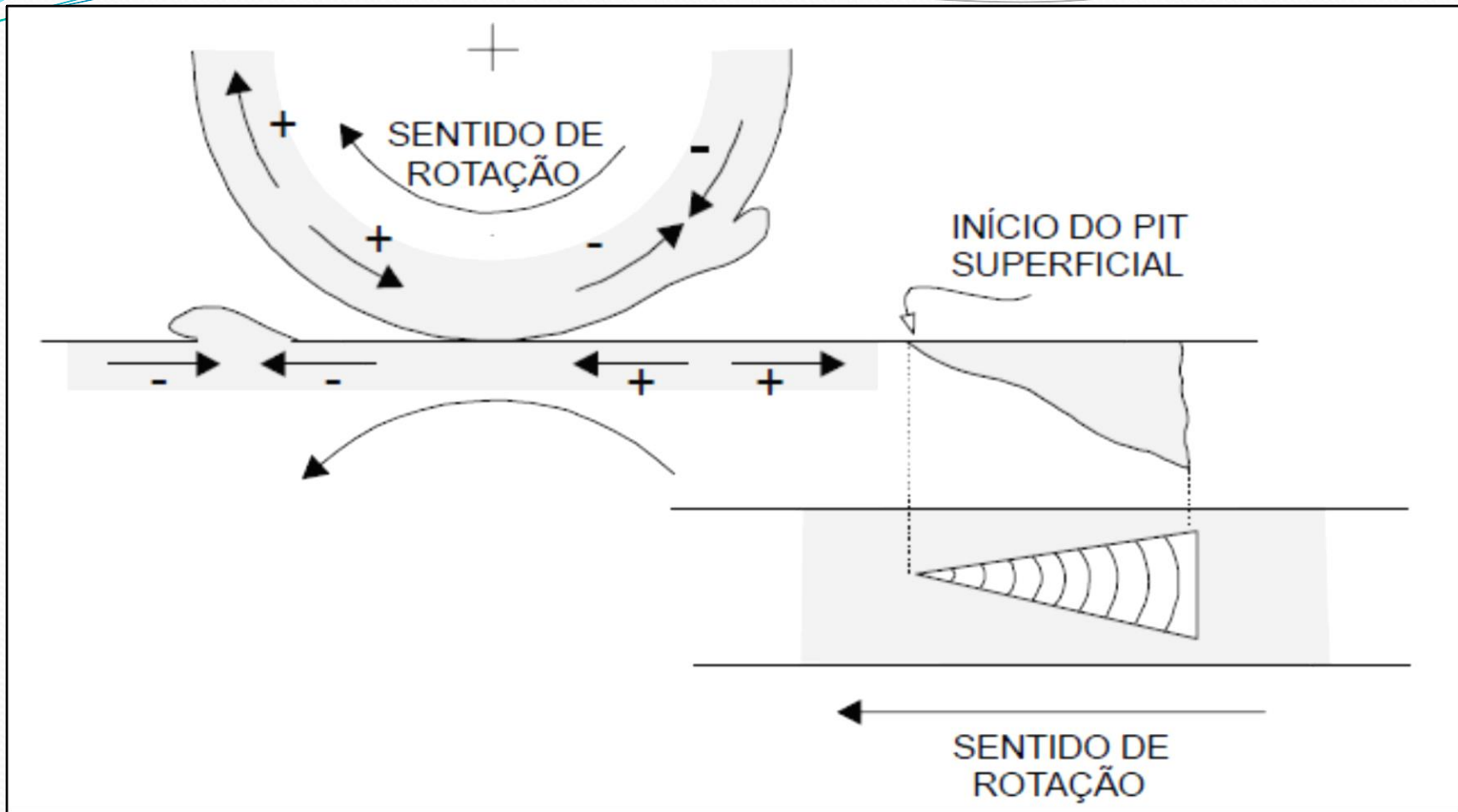
# FADIGA DE CONTATO DE ROLAMENTO - SUBSUPERFICIAL



**A máxima tensão de cisalhamento ocorre abaixo da superfície, a uma profundidade que depende do tamanho da área de contato, ou seja, da geometria das superfícies e da carga normal.**

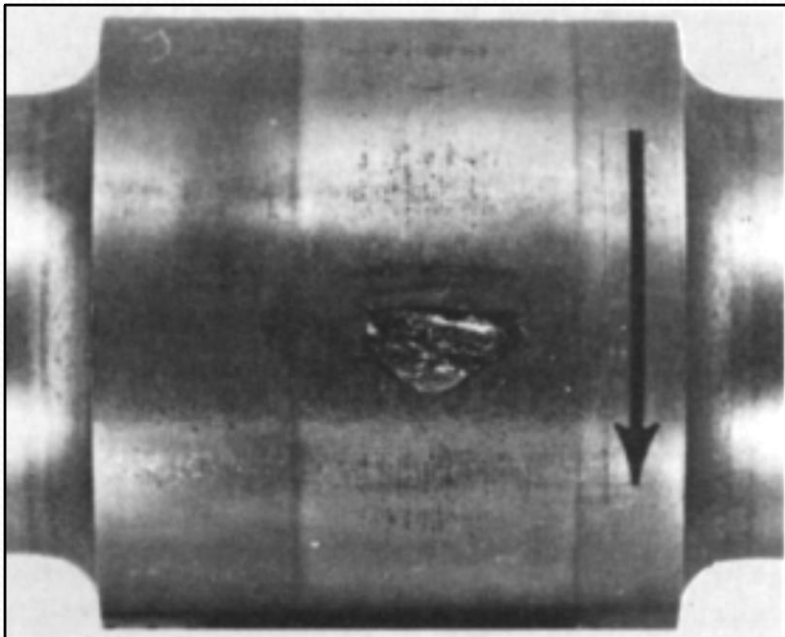
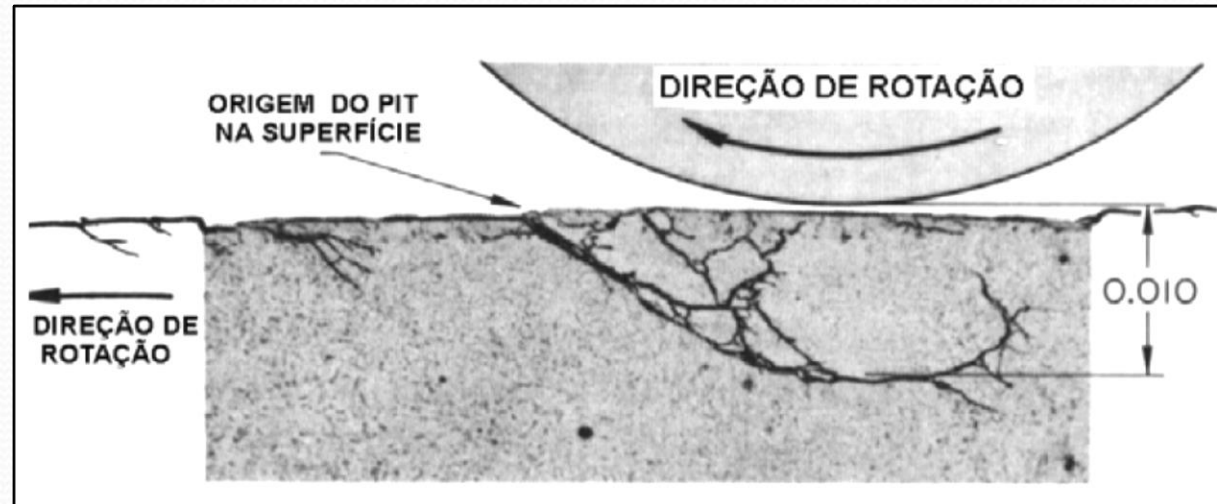
**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# FADIGA DE CONTATO DE SUPERFÍCIE-ESCORREGAMENTO



Ocorre escorregamento – ATRITO - altera as tensões atuantes pois provocam tensões de tração e compressão, a frente e atrás do contato, em ambos os elementos que rolam.

# FADIGA DE CONTATO DE SUPERFÍCIE-ESCORREGAMENTO



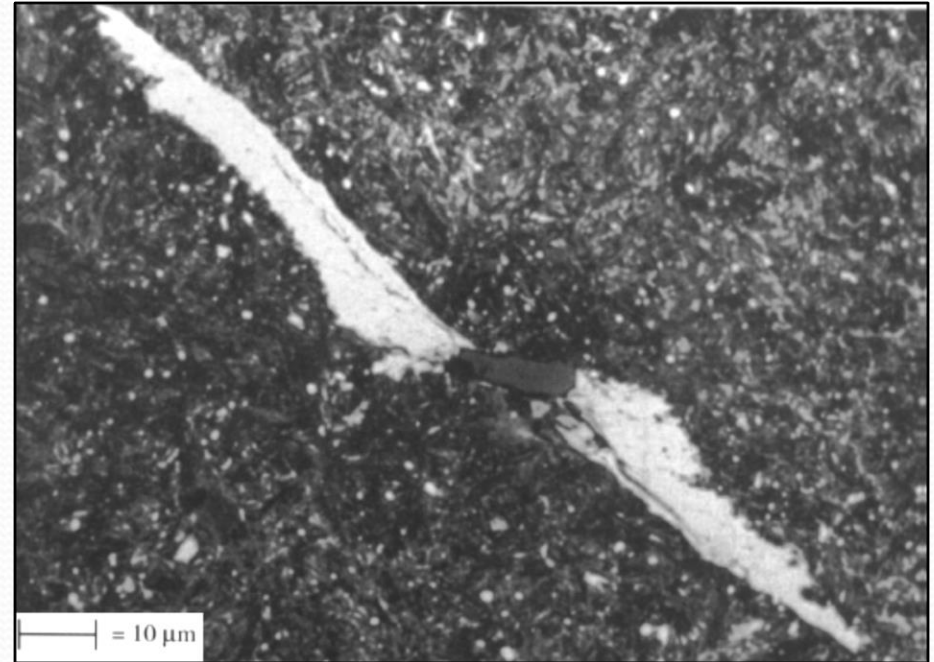
**“Triângulo” ( pit ) de fadiga de contato de superfície. Seta indica sentido de rotação do cilindro.**

**Benedito Marcomini**

## FADIGA DE CONTATO DE SUPERFÍCIE COM ESCORREGAMENTO

**Cilindros de laminação: fratura frequentemente começa na superfície, em trincas térmicas não totalmente eliminadas na retífica. Pode ser **sub-superficial, em inclusões**. Em torno delas pode-se formar **“martensita de fricção”- “asas de borboleta” (“burtterfly wings”)** - microdureza **700 HV****

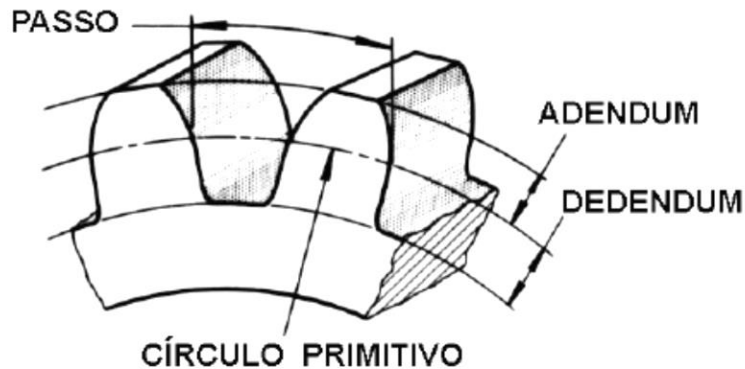
# FRATURA SUBSUPERFICIAL POR FADIGA DE CONTATO EM CILINDRO DE LAMINAÇÃO



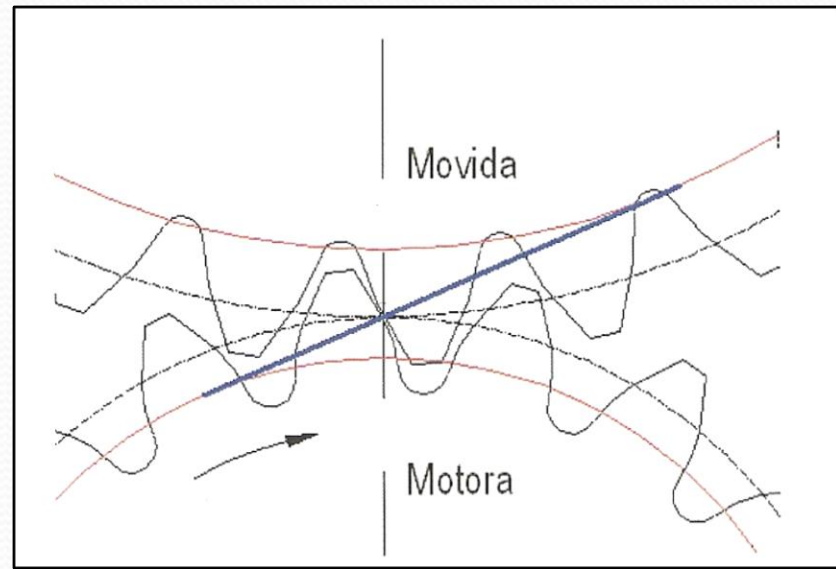
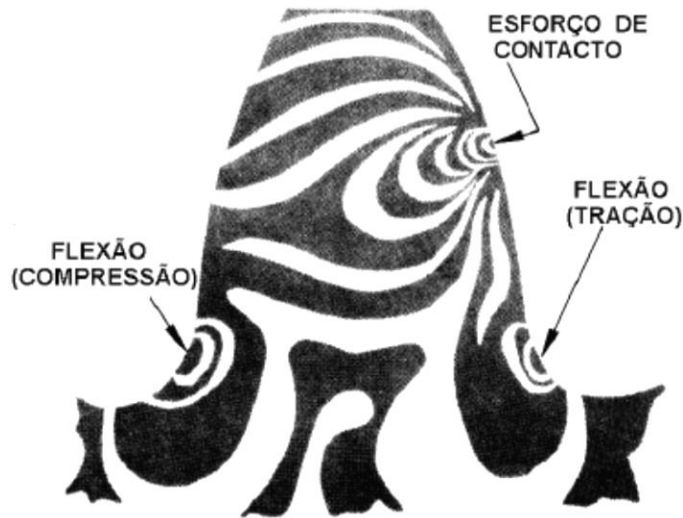
**“Asas de borboleta”.  
Martensita não revenida em  
inclusão não metálica**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

# FADIGA DE CONTATO -ENGRENAGEM



**MAIORES TENSÕES E O ESCORREGAMENTO OCORREM NO DEDENDUM, LOCAL DE MAIOR PROBABILIDADE DE NUCLEAÇÃO DE TRINCA.**

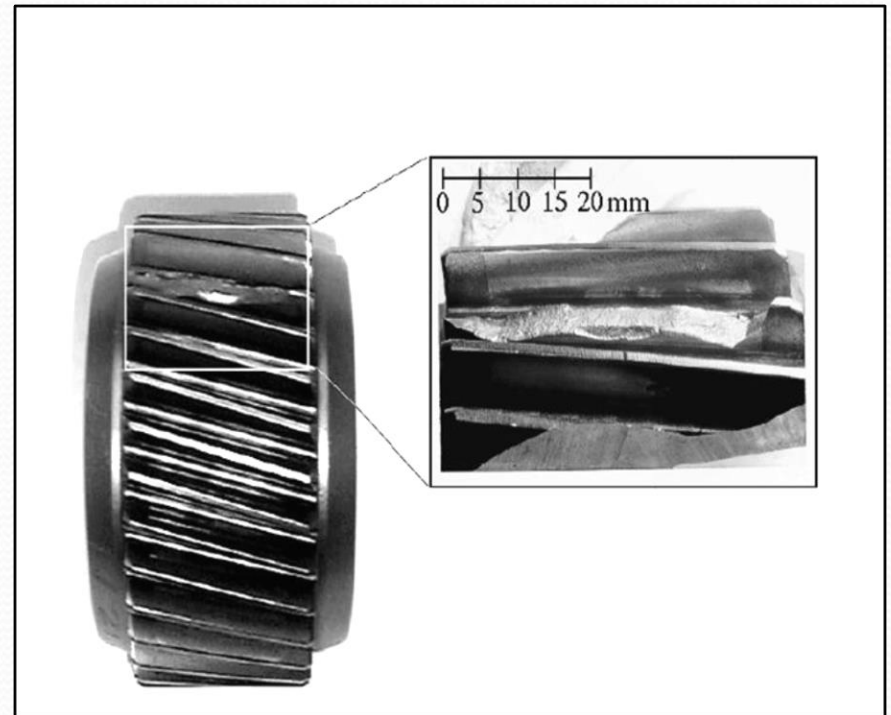
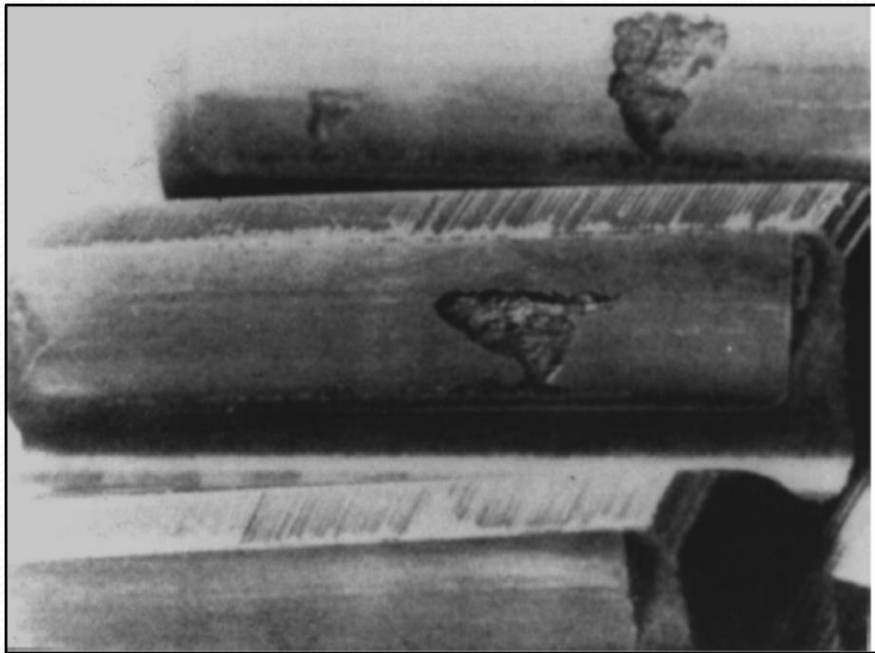


**MODELO FOTOELÁSTICO**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

## FADIGA DE CONTATO –ENGRENAGEM - SPALLING

O “Spalling” é a propagação de um “pitting” e pode ter contribuição do lubrificante presente nas superfícies de contato. Nucleação se dá nos “micropittings”.



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**



## FRETTING-FADIGA

Duas superfícies em contato constante sob vibração: pode ocorrer “**desgaste adesivo**”, formação de “debris” (rebarba, dano), que acelera a nucleação da trinca de fadiga. Principal característica: a **nucleação** da trinca ocorre a certa **distância do local de maior concentração** de tensão ou de concentradores de tensão.

Diferença em relação à fadiga de contato: **no fretting, contato é constante e não intermitente.**

Teoria da delaminação: com a **vibração, partículas se desprenderiam do metal que se oxidariam (formando um pó de cor escura – indício de fratura por fretting)**, tendo sua **dureza incrementada**. Essas partículas provocariam **microdesplacamento** nas peças em contato, criando **espaço para o movimento relativo** entre as mesmas, levando ao **desgaste abrasivo de terceiro corpo**, favorecendo a **nucleação de uma trinca**. Caso haja o **esforço cíclico envolvido: fretting-fadiga**.



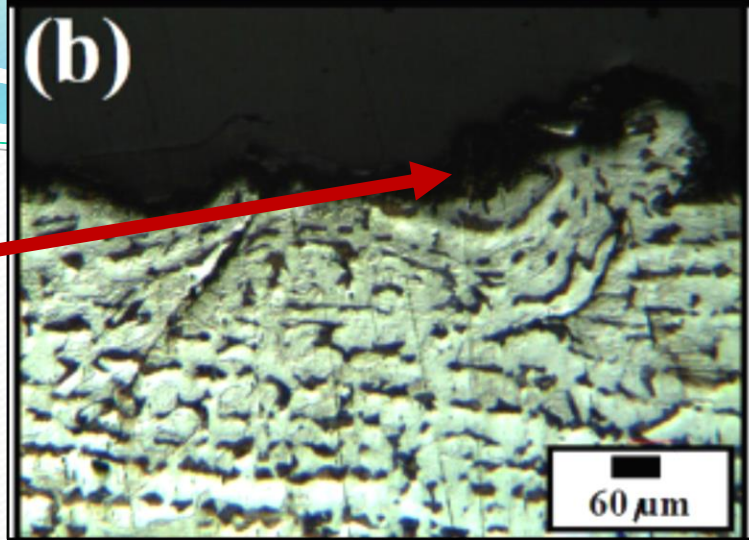
# **ESTUDO DE CASOS**

**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

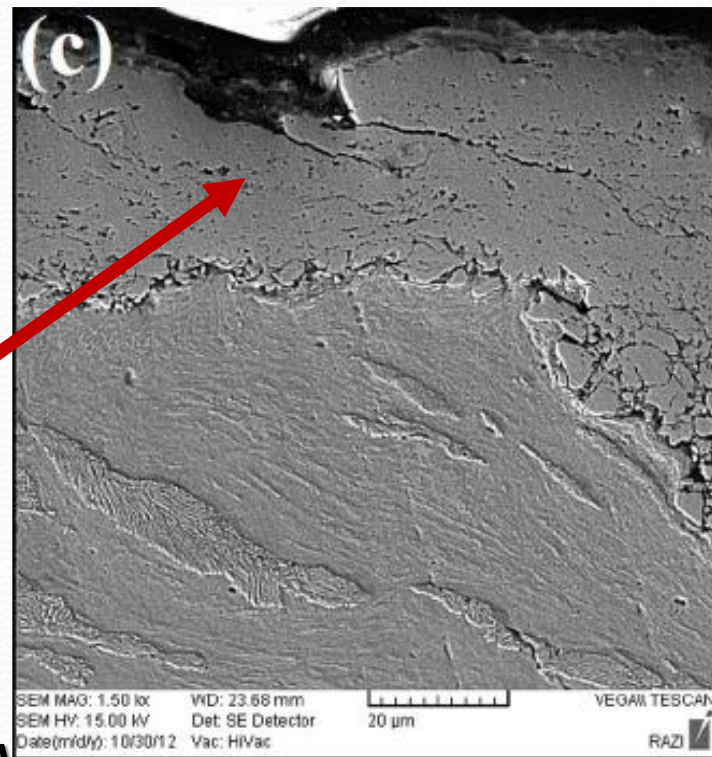
# FRETTING-FADIGA



DEBRIS



NUCLEAÇÃO DAS  
TRINCAS DE FADIGA A  
PARTIR DOS “DEBRIS”



Prof. Dr. José Benedito Marcomini

M. Mehdizadeh, F. Khodabakhshi / Case Studies in Engineering Failure Analysis 2 (2014) 61-68

# FRATURA DE PARAFUSOS DE SERVOMOTOR – JBM - 2013



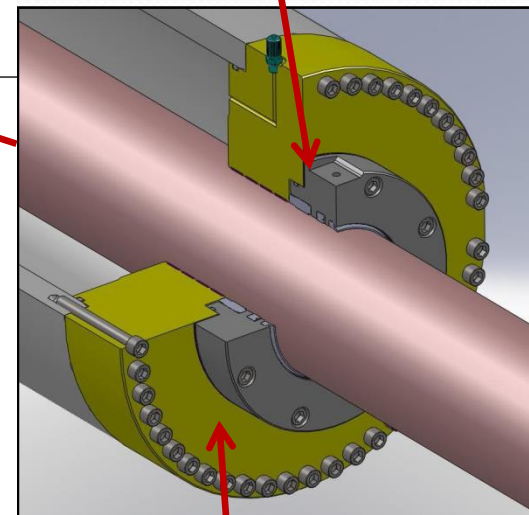
# COMPORTA SEGMENTO DE UM VÃO DA HIDRELÉTRICA



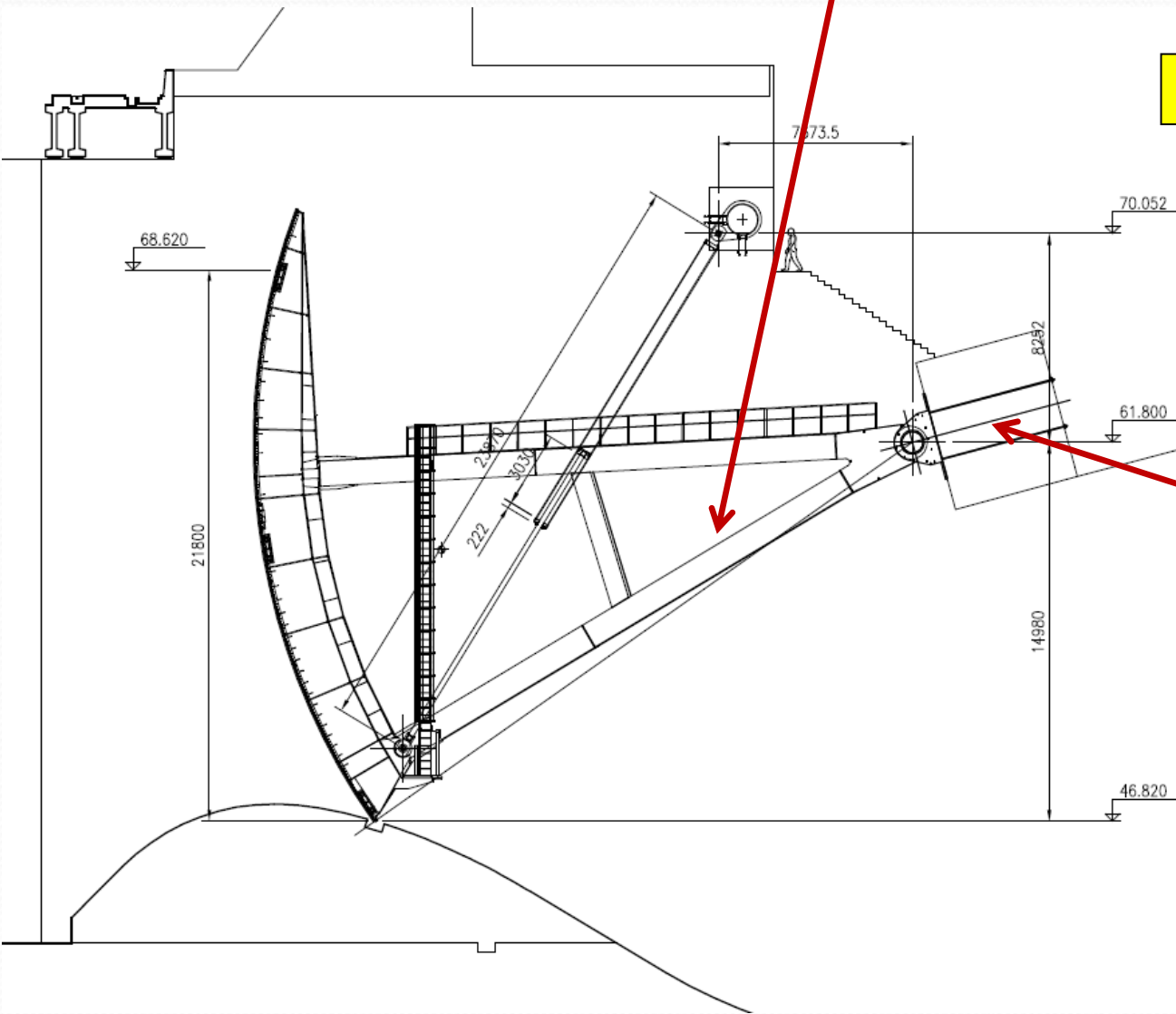
# DETALHE DO PROJETO DA COMPORTA - ALTURA APROXIMADA: 70m

Haste do servomotor: abertura e fechamento da comporta

8 Parafusos M16x80 mm



Prensa Gaxeta



# CONJUNTO SERVO-MOTOR E HASTE



# PARAFUSOS DO SERVO-MOTOR





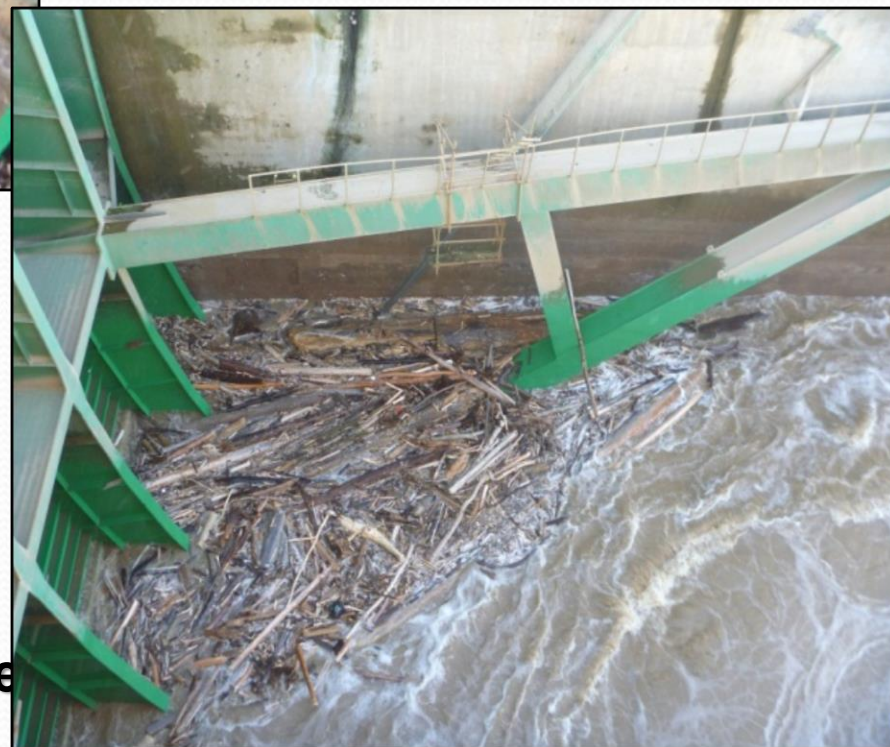
## RESSALTO HIDRÁULICO À JUSANTE



**MUITA MADEIRA E ONDAS**

**TRONCO COM 8 M DE  
COMPRIMENTO E 1 M DE  
DIÂMETRO,  
APROXIMADAMENTE**

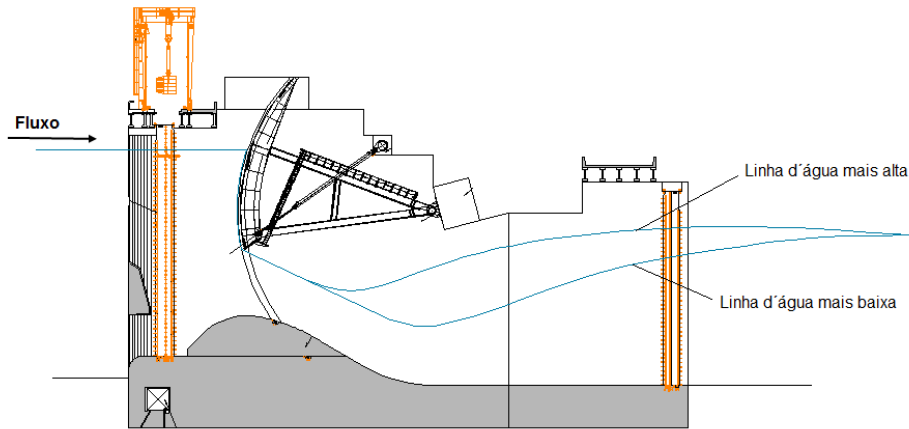
**COMPORTA TRABALHANDO SEMI-  
ABERTA PARA RETENÇÃO DE  
TRONCOS DE MADEIRA, UMA VEZ  
QUE OS RESPONSÁVEIS PELA  
BARRAGEM NÃO CONSTRUÍRAM  
ESCOADOURO DE TRONCOS.  
MAL USO DO EQUIPAMENTO.**



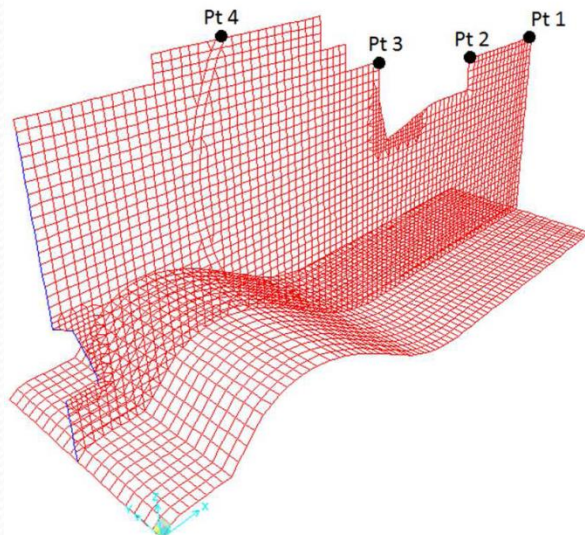
# IMPACTO DE TRONCOS À JUSANTE



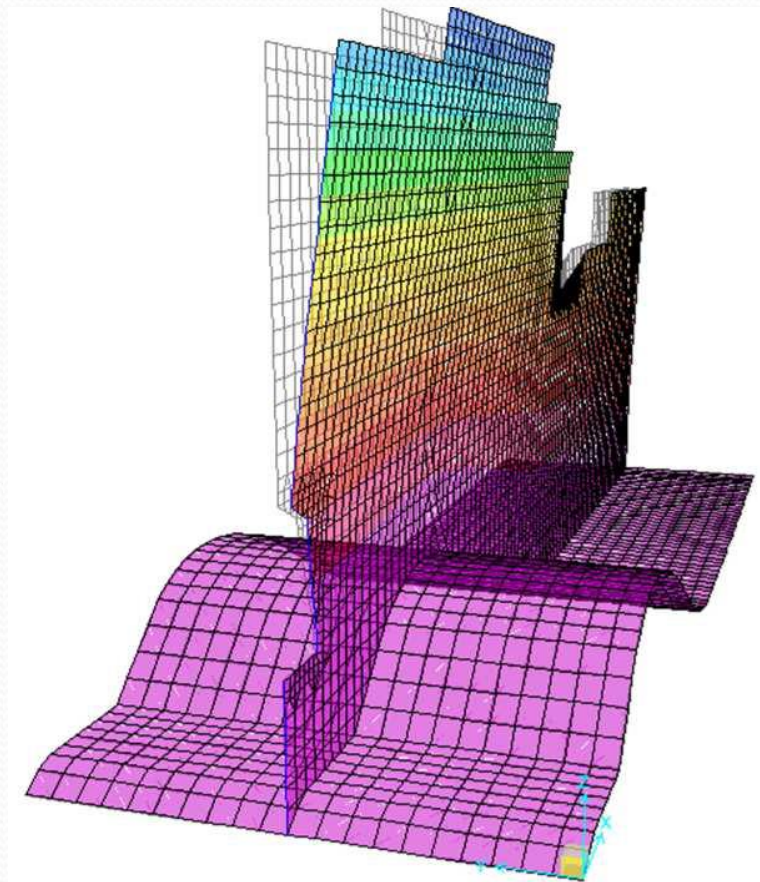
# ESTUDO DAS VIBRAÇÕES NA ESTRUTURA DE CONCRETO POR FEM, REALIZADO PELA ENGENHARIA DE PROJETO



Comporta com Abertura de 9 m



Pontos usados para avaliação dos níveis de deslocamentos vibracionais



1º Modo de Vibração = 3,12 Hz

Tabela 1 – Resultado da análise química dos parafusos

	C (%)	Mn (%)	Cr (%)
Amostra 9	0,27	0,86	0,42
Amostra 5	0,30	0,88	0,41

**Norma ISO 898-1, aço ligado, com pelo menos um dos elementos: Cromo, Níquel, Molibdênio ou Vanádio.**

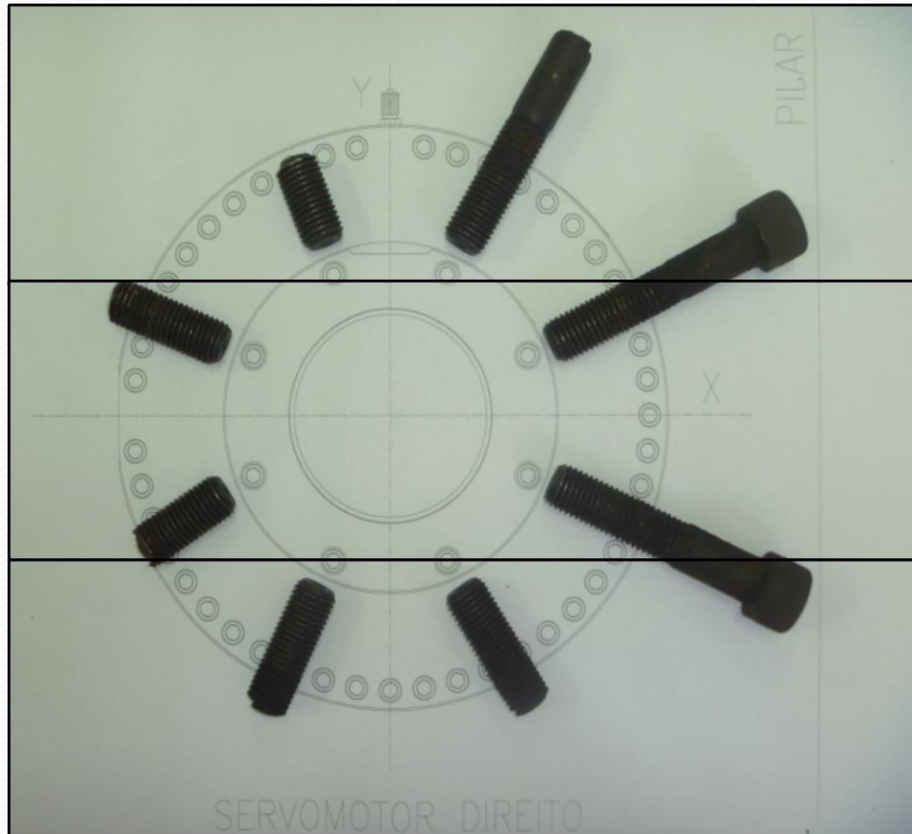
Tabela 2 – Resultados do ensaio de tração

	Limite de resistência à tração (MPa)	Al (%)
Amostra 1	1370	12
Amostra 10	1351	-

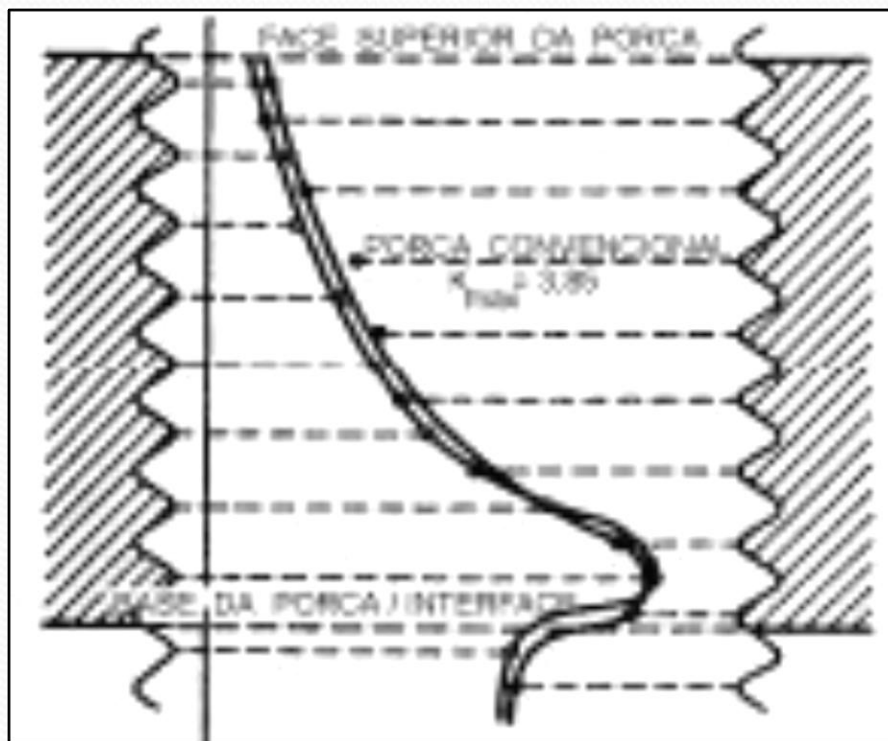
**Norma ISO 898-1, prevê mínimo 1200 Mpa e Alongamento mínimo 8%.**

**Todas amostras com Dureza entre 40HRC e 41HRC. (Norma requer 39HRC a 44HRC)**

### Disposição dos parafusos rompidos



**Todos os parafusos romperam no local de maior concentração de tensão, quando se trata de parafusos rosqueados, isto é, no segundo “fillet” rosqueado, exceto um deles, o último parafuso a se romper antes da inspeção, que detectou a falha e substituiu todos os parafusos. Devido à substituição, os dois últimos não romperam. Isto significa que após o rompimento dos primeiros parafusos, a amplitude sollicitação ou , movimentação da tampa do servo-motor, aumentou, sobrecarregando o último parafuso e fazendo com que fraturasse próximo à cabeça.**



MARCAS DE PROPAGAÇÃO

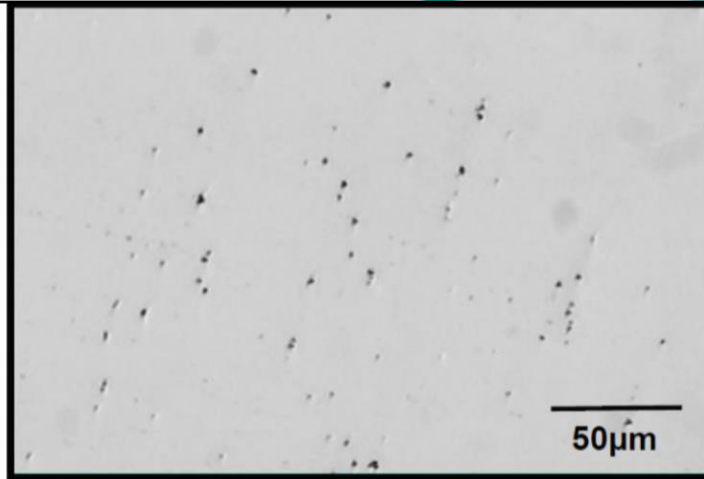
**Único parafuso que não apresentou a fratura no fillet: sobrecarga por estar suportando a carga quase toda.**

PROVÁVEL ORIGEM DA FRATURA

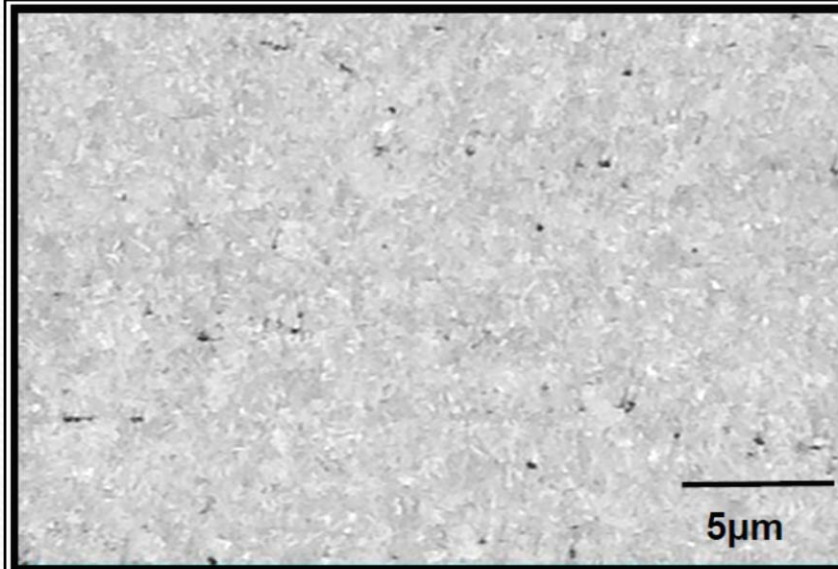
**Existia a desconfiança que este risco fosse uma dobra de laminação, porém, a microscopia de campo escuro revelou que apresentava um raio de curvatura na base, portanto era um risco.**

MICROGRAFIA DO RISCO, EM CAMPO ESCURO

# ANÁLISE METALOGRÁFICA: INCLUSÕES E ESTRUTURA



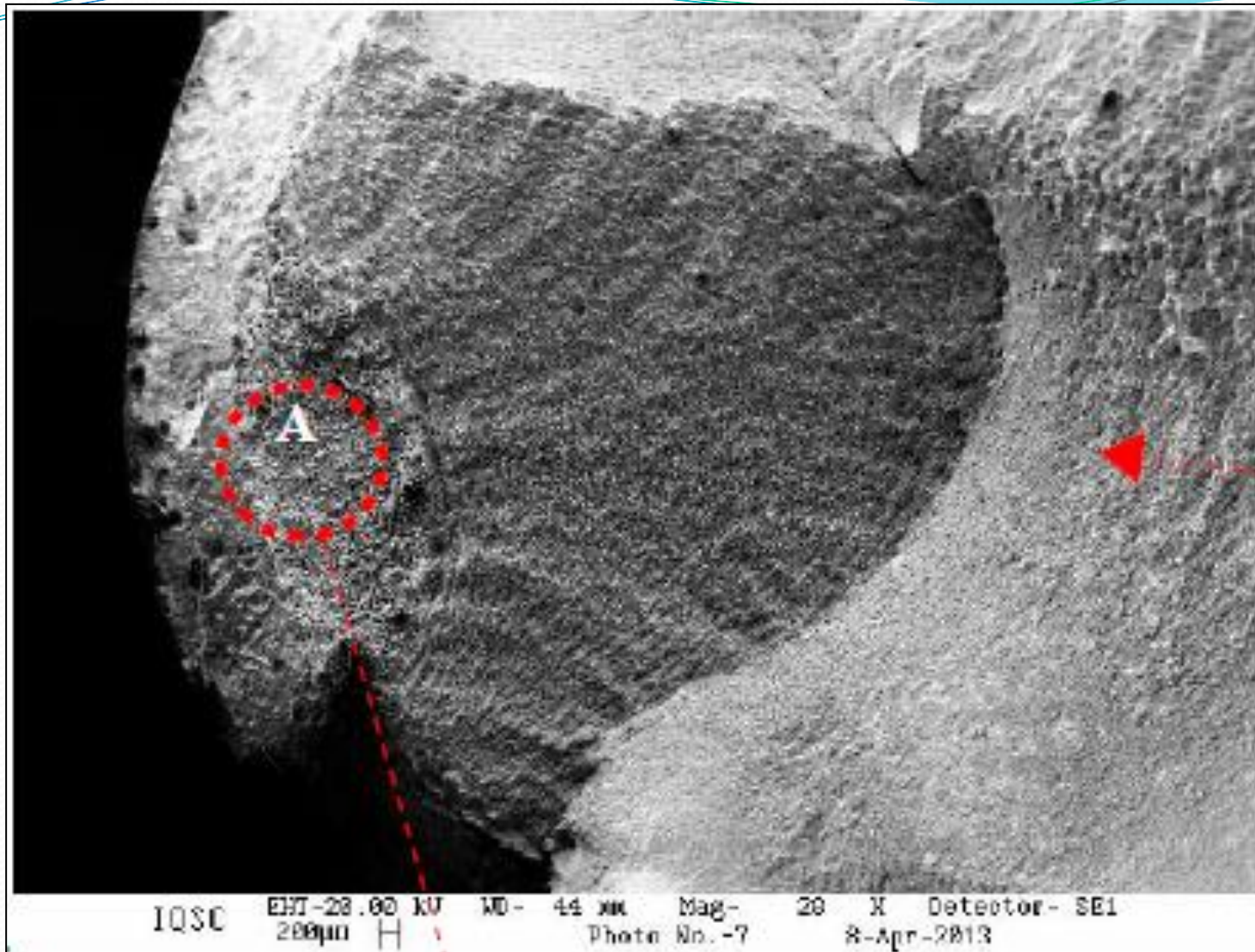
Amostra 5. Inclusões de óxido globular (tipo D), nível 2, série fina e grossa.



Amostra 8. Estrutura constituída de Martensíta revenida. Ataque Nital 3%.



# IMAGEM DE MEV DO PARAFUSO- ESTRIAS



**Prof.Dr. José Benedito Marcomini**

## CONCLUSÃO

Como os parafusos estavam em conformidade com as normas e, a comporta foi utilizada de forma errada e, ainda, considerando as condições atípicas do rio em questão (madeira e ondas), concluiu-se que a fratura ocorreu da seguinte maneira:

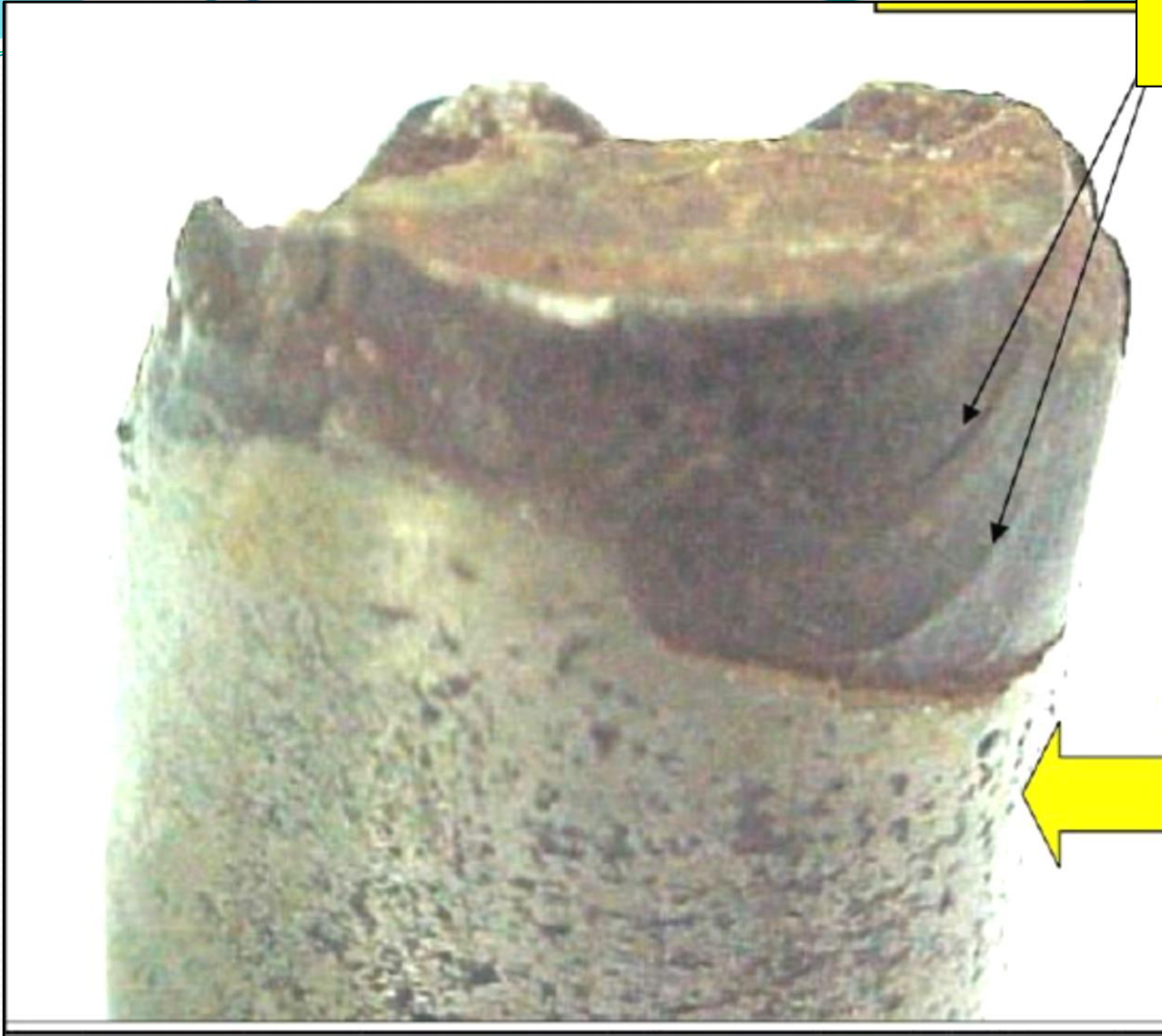
- Comporta semi-aberta sofreu impacto dos troncos combinado às ondas , gerando um momento fletor cíclico na haste e transmitida para a tampa do servo-motor e conseqüentemente para os parafusos;
- O impacto de troncos pode ter levado a uma sobrecarga, nucleando a trinca, nos primeiros parafusos, no ponto de maior concentração de tensão (fillet);
- O esforço cíclico fez com que a trinca se propagasse por fadiga e fraturasse os primeiros parafusos;
- A sobrecarga levou à fratura do último parafuso.
- **CONCLUSÃO: A CAUSA RAIZ FOI A UTILIZAÇÃO ERRÔNEA DA COMPORTA SEGMENTO.**

**FRATURA DE EIXO DE AÇO LAMINADO SAE4140, DIÂMETRO 25,40MM - 2013**



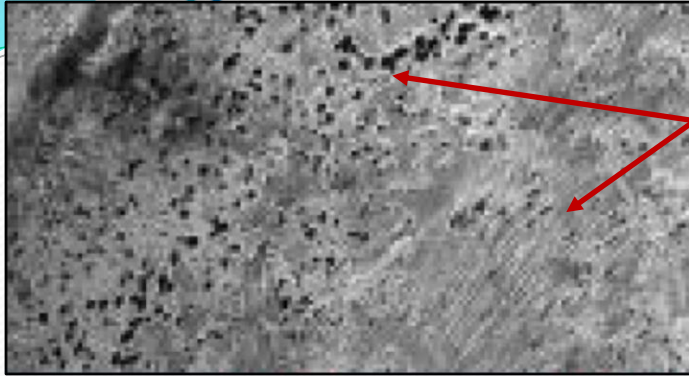
**EIXO DE CORRENTE DE ESTEIRA TRANSPORTADORA DE BAGAÇO  
DE CANA DE AÇUCAR-USINA DE ALCOOL**

**MARCAS DE  
PROPAGAÇÃO/MARCAS  
DE PRAIA**



**CORROSÃO  
ALVEOLAR-TÍPICA  
DE DEPÓSITO DE  
ELETRÓLITO.**

**CORROSÃO ALVEOLAR + FADIGA: FADIGA CORROSÃO**

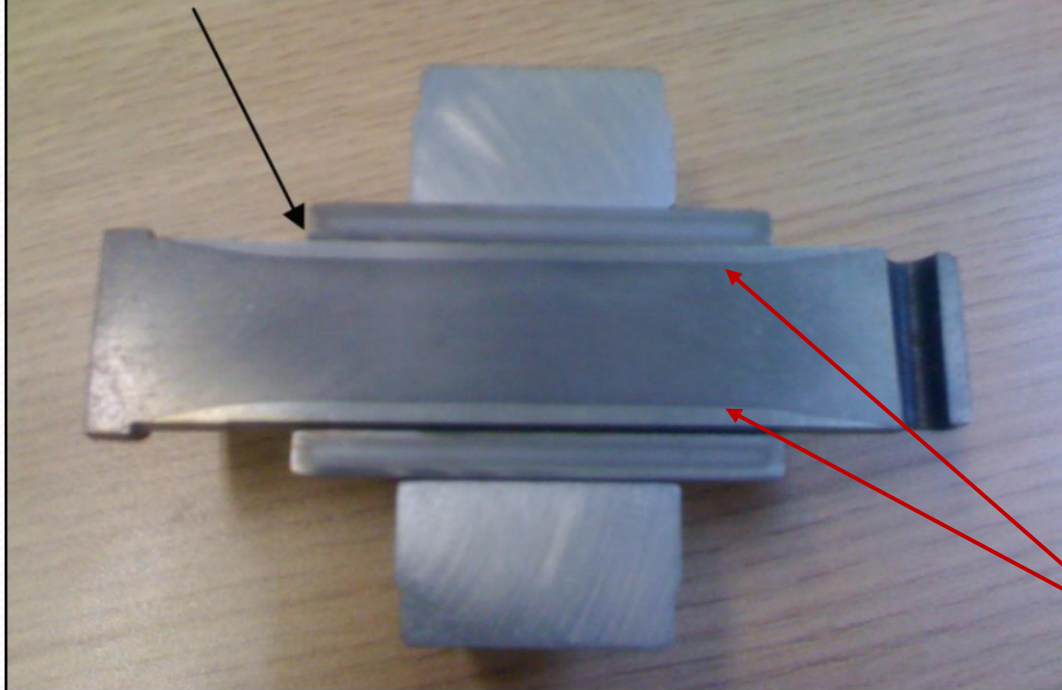


**ESTRIAS +  
CORROSÃO**



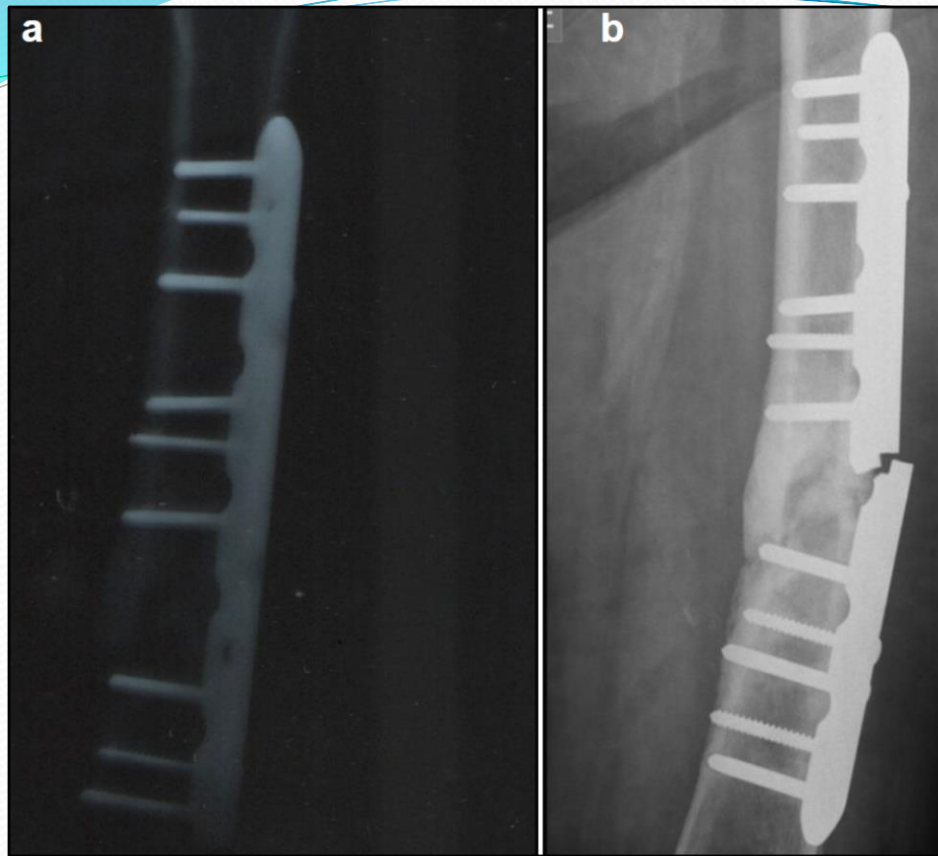
**CORROSÃO ALVEOLAR +  
FADIGA: FADIGA  
CORROSÃO**

**POSSÍVEL ALOJAMENTO DE ELETRÓLITO**

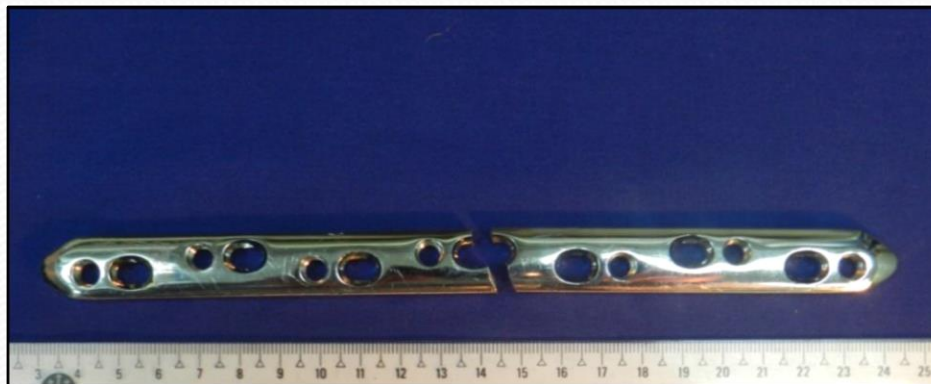


**MARCAS DE TÊMPERA  
SUPERFICIAL POR  
INDUÇÃO**

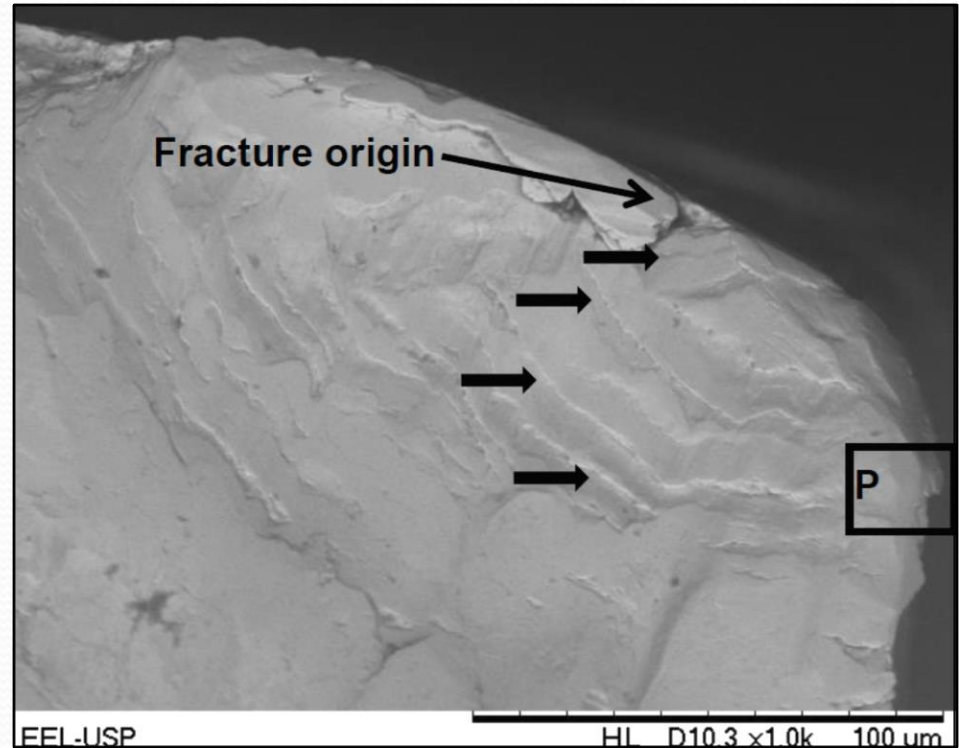
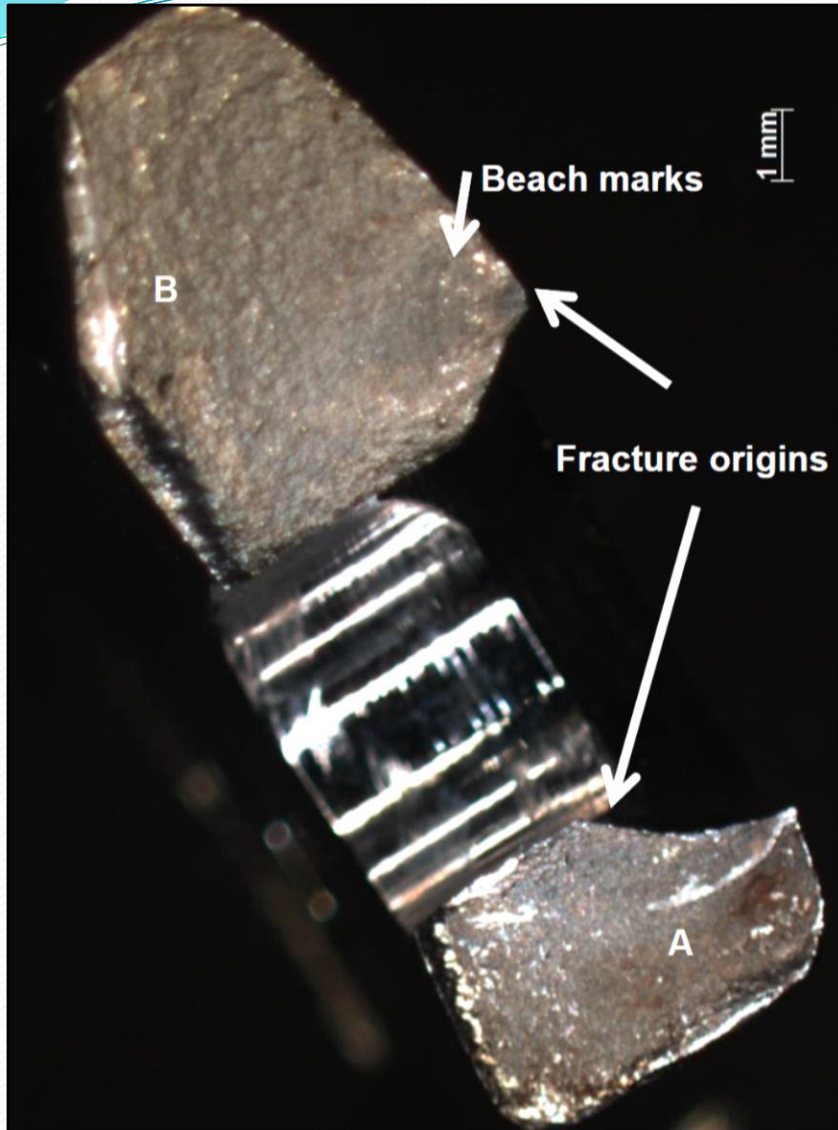
## FRATURA EM PLACA FEMURAL - 2013



**Placa foi implantada em uma mulher de 83 anos e fraturou após 4 meses. Nova placa implantada fraturou novamente em 6 meses. Mesmo fornecedor. Houve outro caso com outra pessoa.**



# ANÁLISE VISUAL E MEV DA SUPERFÍCIE DE FRATURA



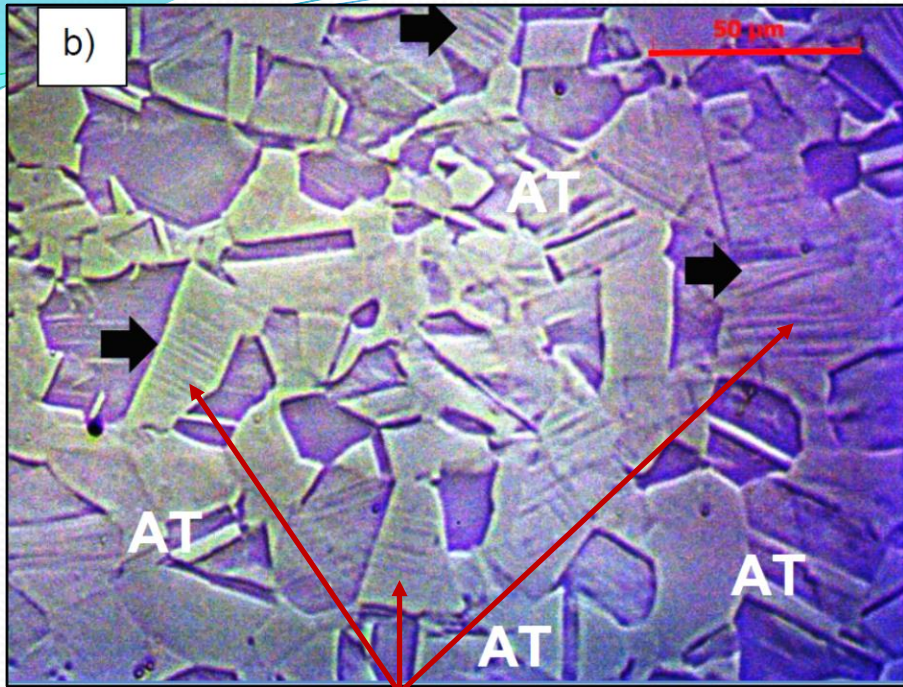
- Chemical composition of DCP femoral plate

C(%)	Cr(%)	Ni(%)	P(%)
0.03	17.65	15.00	0.046

ISO 5832-9

maximum P 0.025%

# MICROGRAFIAS



**BANDAS DE DESLIZAMENTO**



**GRÃOS ALINHADOS**

**DEFORMAÇÃO A FRIO**

**DUREZA NORMAL PARA  
APLICAÇÃO: 230HB  
A PEÇA ESTAVA COM 288HB.**



# IMAGEM DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) DA SUPERFÍCIE DE FRATURA

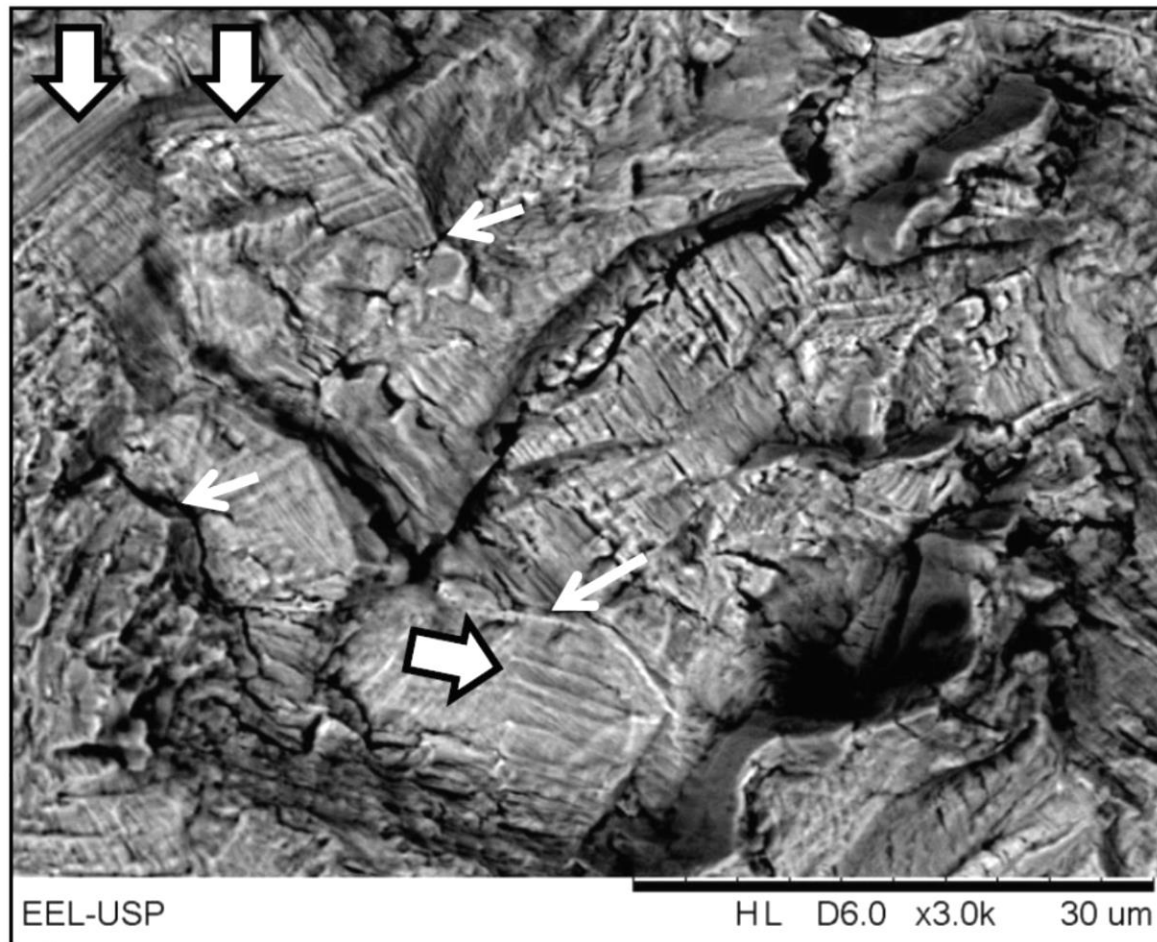


Figure 2.6 - Fracture surface near the origin B (Fig 2.1) showing slip bands (Thick white arrows), intergranular secondary cracks (thin arrows). Intergranular fracture mechanism and fatigue striations.

# IMAGEM DE MEV DA SUPERFÍCIE DE FRATURA APRESENTANDO BANDAS DE CISALHAMENTO (SHEAR BANDS-SB)

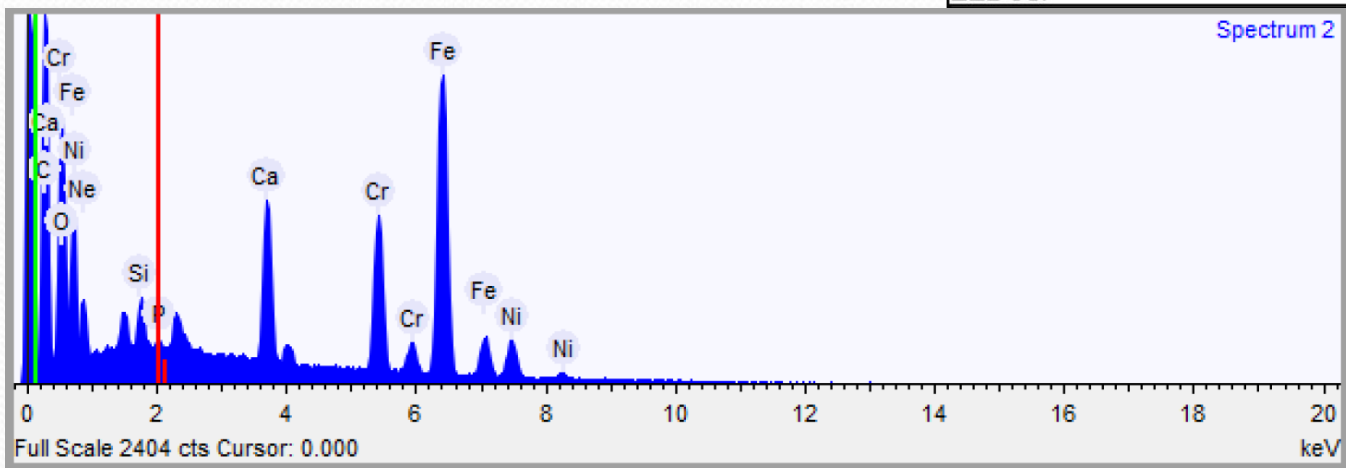
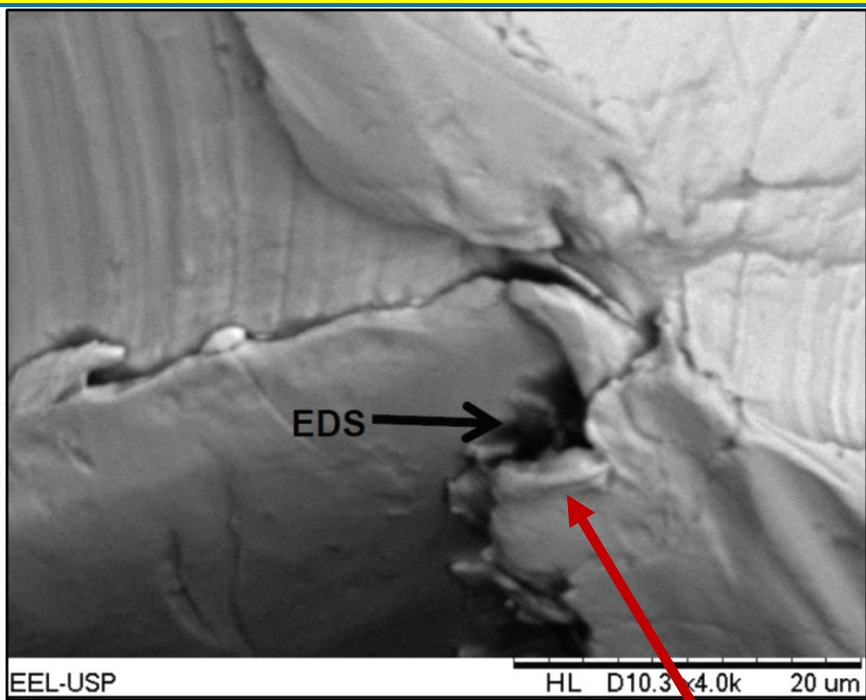
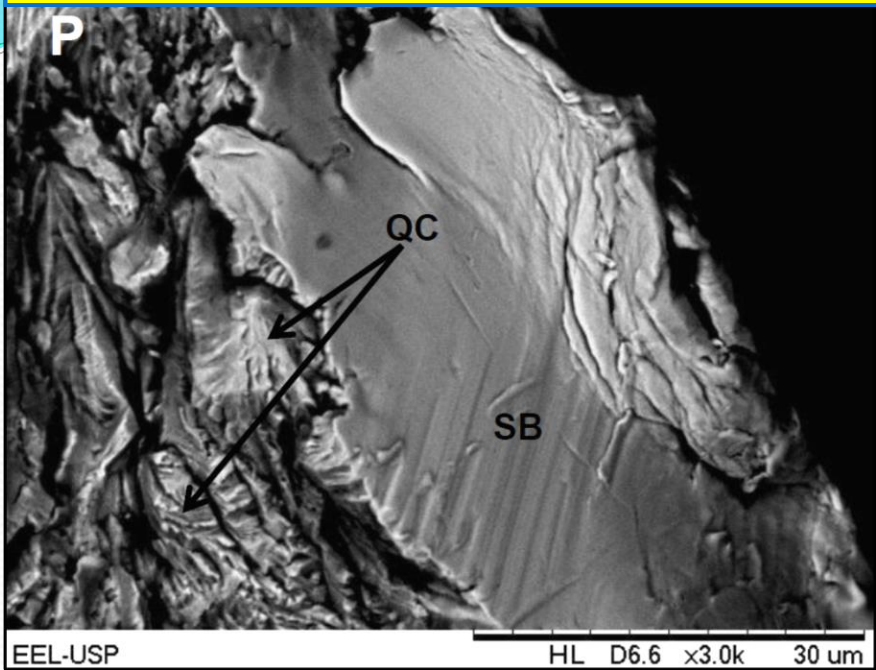


Figure 2.5- EDS analysis of the crack on the fracture surface (Fig.2.4). Phosphorus was detected inside the crack.

**LOCAL ONDE FOI REALIZADA A ANÁLISE DE EDS, NA QUAL FOI DETECTADA A PRESENÇA DE FÓSFORO (P)**

## CONCLUSÃO

A PLACA ESTÁ SUBMETIDA À ESFORÇOS CÍCLICOS DO ANDAR. A PLACA DEVERIA SUPORTAR ESTES ESFORÇOS POR, PELO MENOS, 10 A 15 ANOS. A **FALHA PREMATURA** OCORREU DEVIDO À **COMBINAÇÃO** DOS FENÔMENOS DE **FRAGILIZAÇÃO PELO FÓSFORO** E ENCRUAMENTO DO **TRABALHO A FRIO**. O MICROMECHANISMO DE FRATURA **INTERGRANULAR** DEMONSTRA O EFEITO DA SEGREGAÇÃO DE **P** E O CARÁTER FRÁGIL DA FRATURA (**POUCA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA**) E AS INÚMERAS **BANDAS DE CISALHAMENTO** E OS **GRÃOS ALINHADOS**, DEMONSTRA O EFEITO DO **TRABALHO A FRIO**.

**FIM**