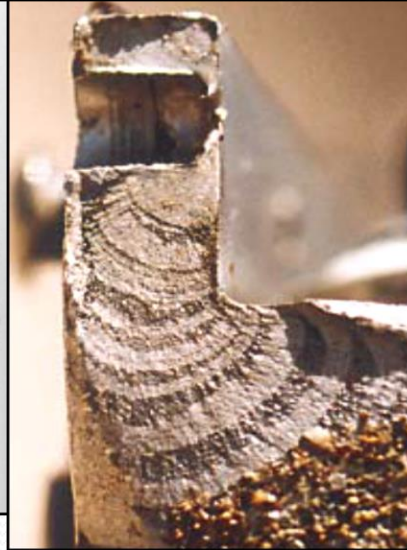
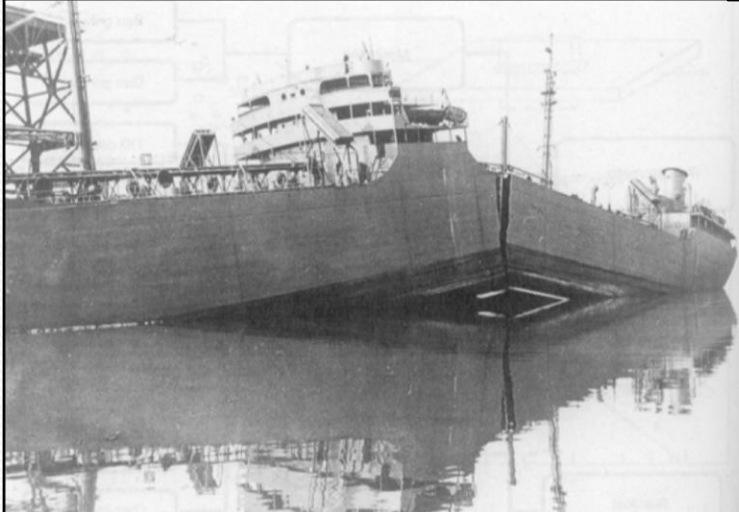


SMM0330–PRINCÍPIOS DE ANÁLISE DE FALHAS



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

ASPECTOS METALÚRGICOS DA FADIGA

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

PARA PEÇAS ACABADAS, PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE AFETAM A RESISTÊNCIA À FADIGA SÃO:

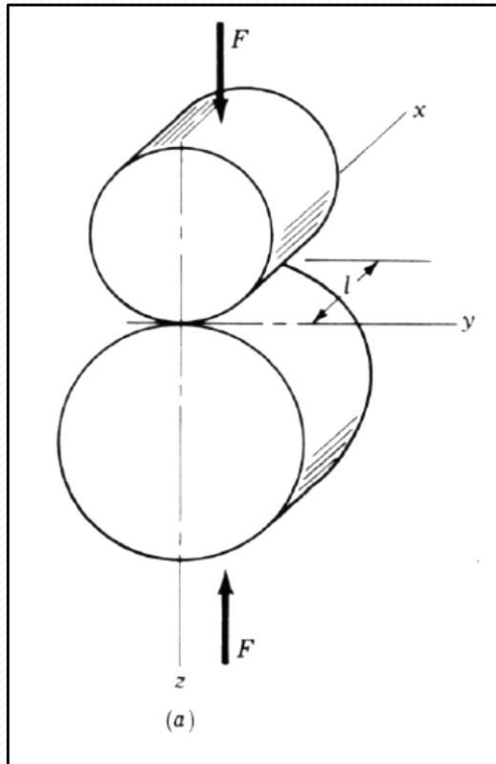
- **GEOMETRIA DA PEÇA;**
- **ACABAMENTOS SUPERFICIAL (RUGOSIDADE);**
- **TENSÃO RESIDUAL;**
- **LIMITE DE FADIGA DO MATERIAL.**

FADIGA DE CONTATO

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

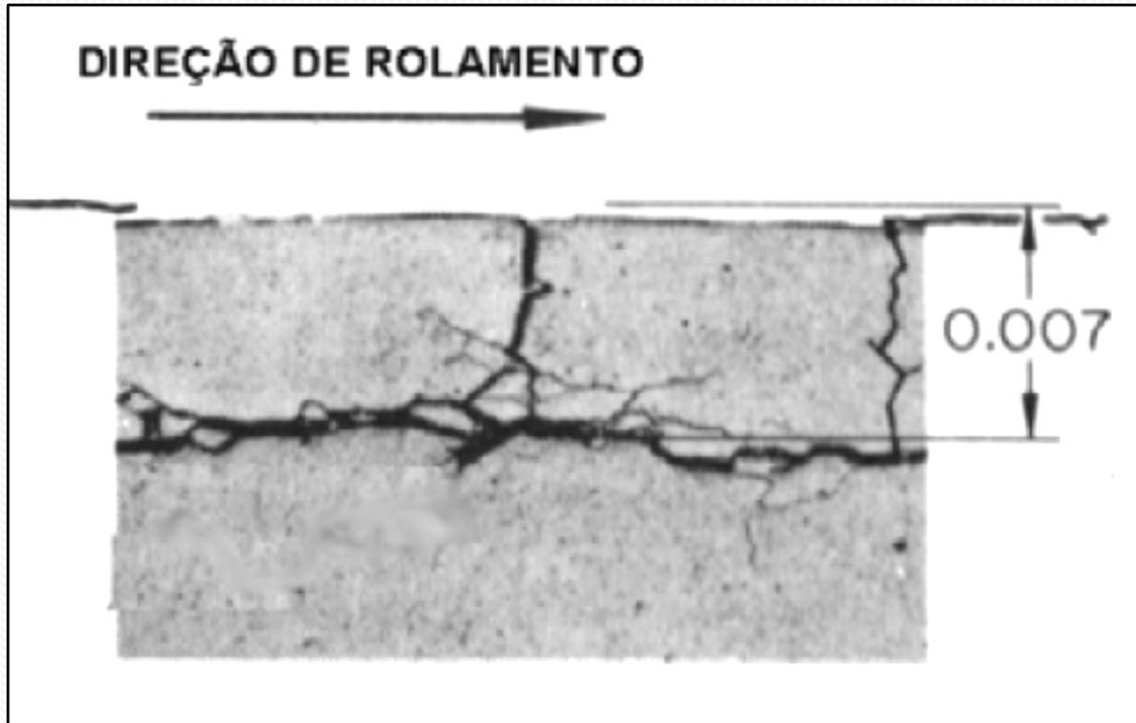
FADIGA DE CONTATO

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



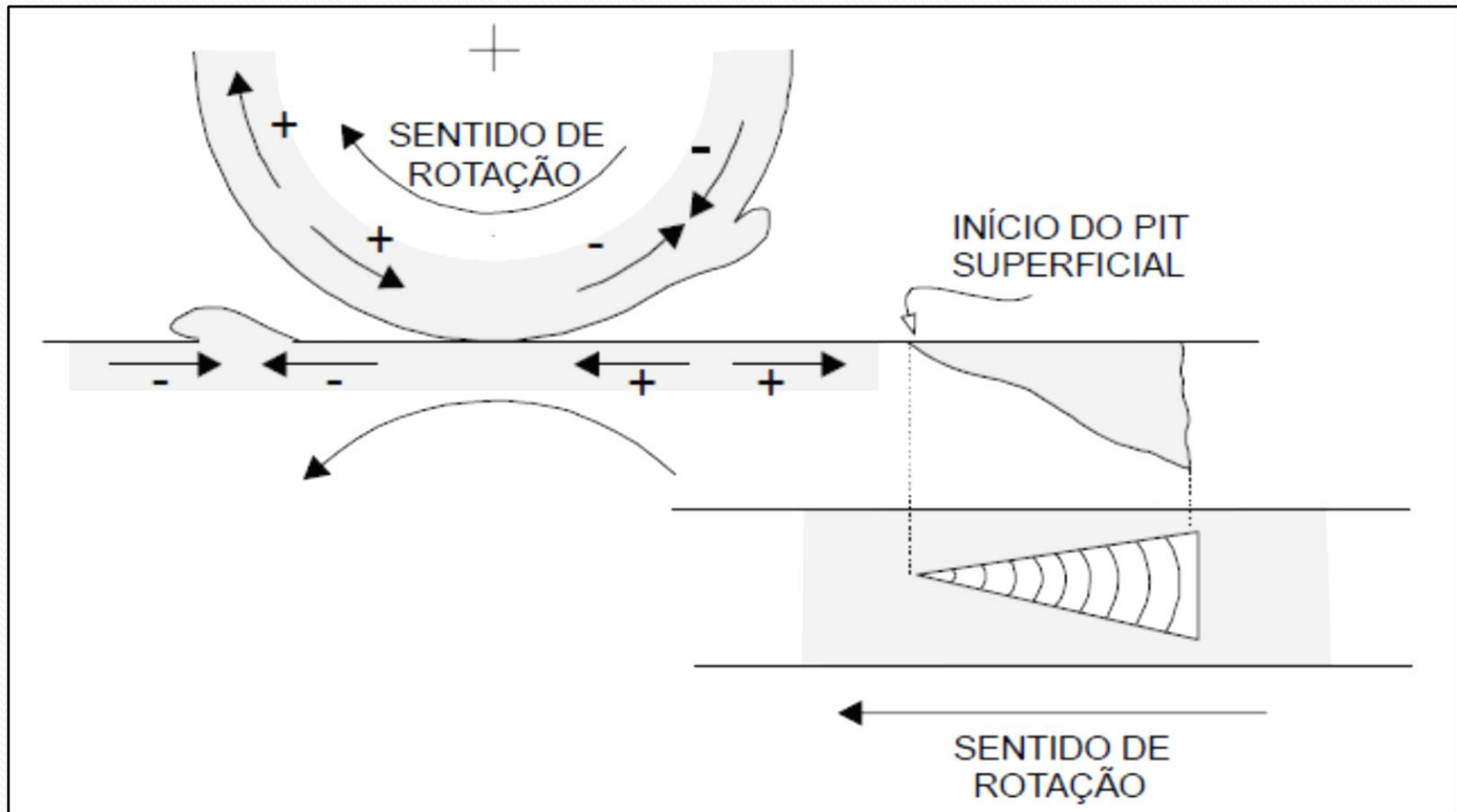
- Fadiga de contato de rolamento ou sub-superficial;
- Fadiga de contato de superfície;
- Lascamento (“spalling”).

FADIGA DE CONTATO DE ROLAMENTO - SUBSUPERFICIAL



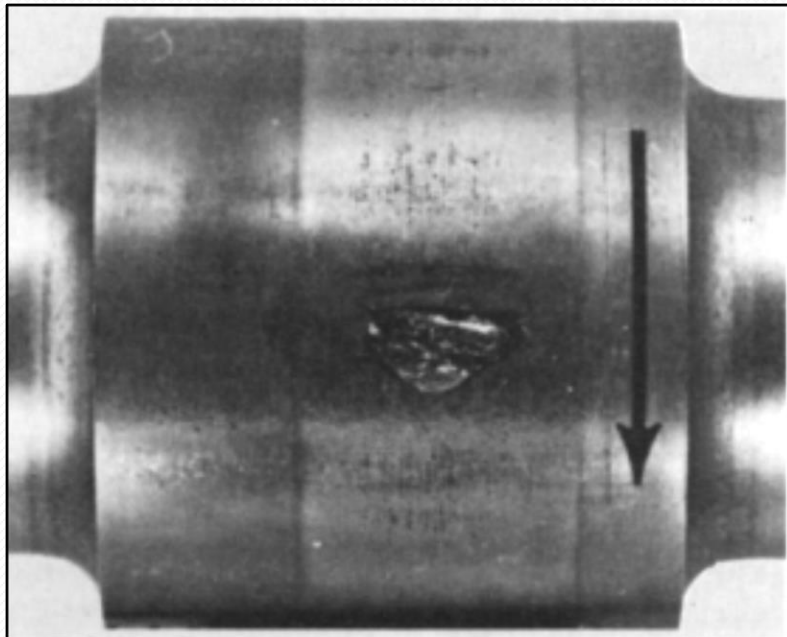
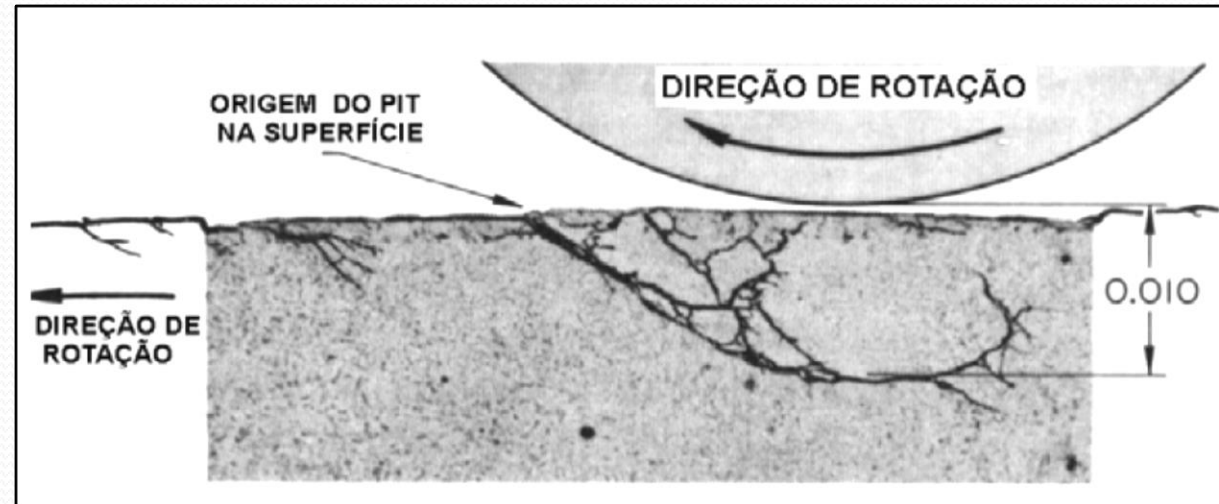
A máxima tensão de cisalhamento ocorre abaixo da superfície, a uma profundidade que depende do tamanho da área de contato, ou seja, da geometria das superfícies e da carga normal.

FADIGA DE CONTATO DE SUPERFÍCIE-ESCORREGAMENTO



Ocorre **escorregamento relativo – 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



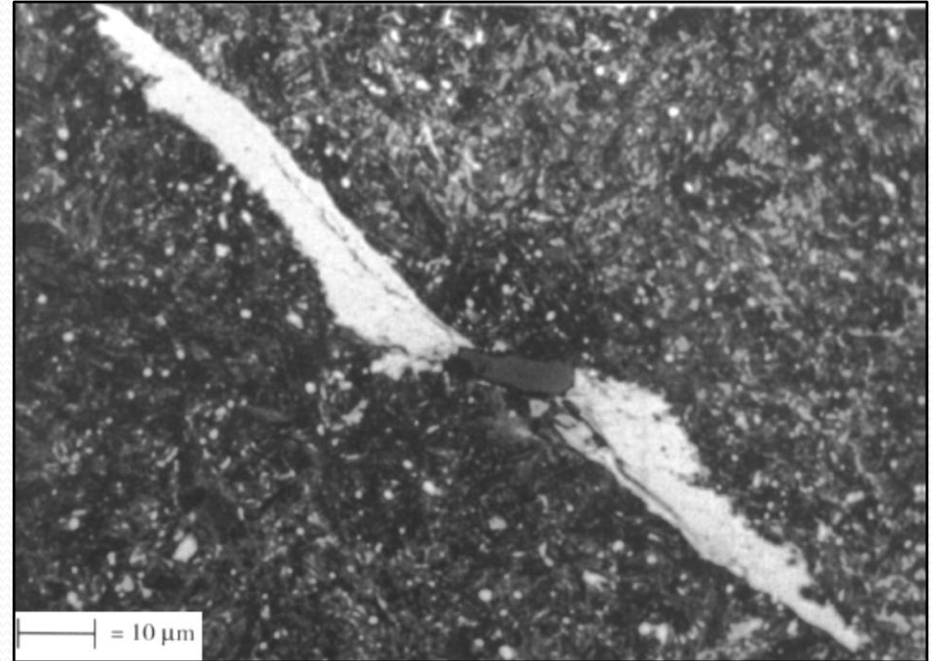
“Triângulo” (pit) de fadiga de contato de superfície. Seta indica sentido de rotação do cilindro.

Benedito Marcomini

FADIGA DE CONTATO DE SUPERFÍCIE-ESCORREGAMENTO

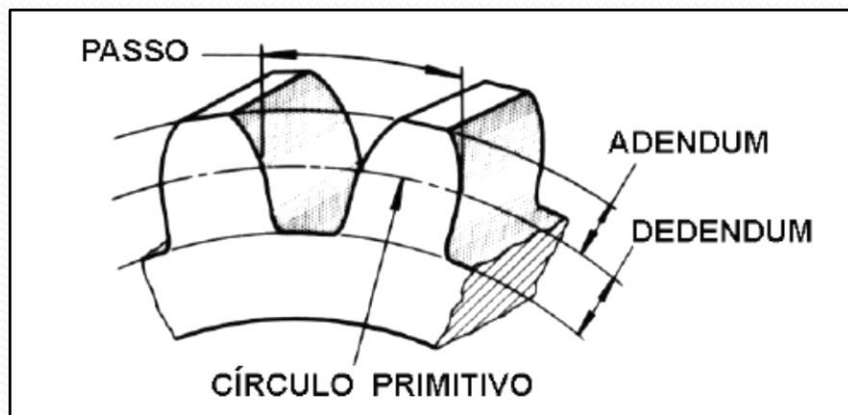
Cilindros de laminação: fratura frequentemente começa na superfície, em trincas térmicas não totalmente eliminadas na retífica. Pode ser **sub-superficial, em inclusões**. Em torno delas pode-se formar “**martensita de fricção**”- “**asas de borboleta**” (“**butterfly wings**”) - microdureza 700 HV

FADIGA DE CONTATO DE SUPERFÍCIE-ESCORREGAMENTO

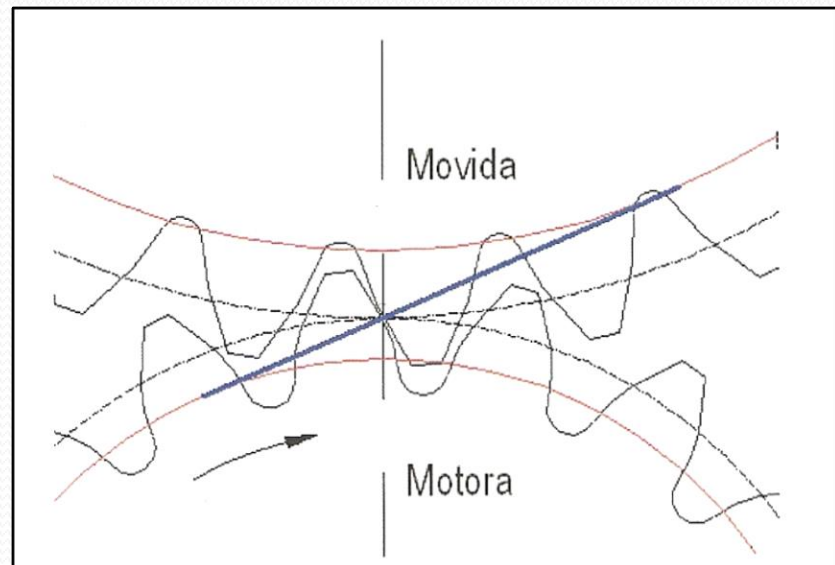
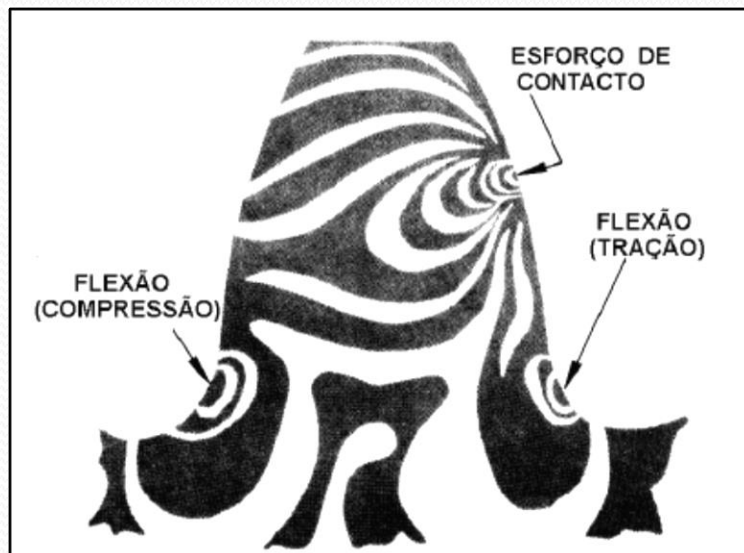


“Asas de borboleta”.
Martensita não revenida

FADIGA DE CONTATO -ENGRENAGEM



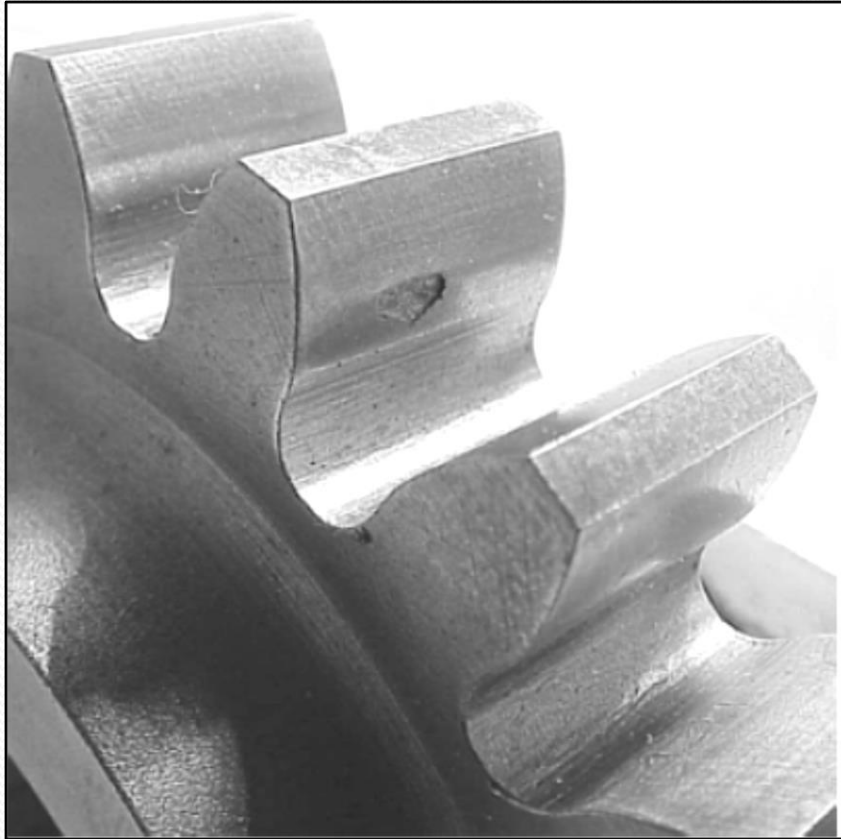
MAIORES TENSÕES E O ESCORREGAMENTO OCORREM NO DEDENDUM, LOCAL DE MAIOR PROBABILIDADE DE NUCLEAÇÃO DE TRINCA.



MODELO FOTOELÁSTICO

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

FADIGA DE CONTATO - ENGRENAGEM

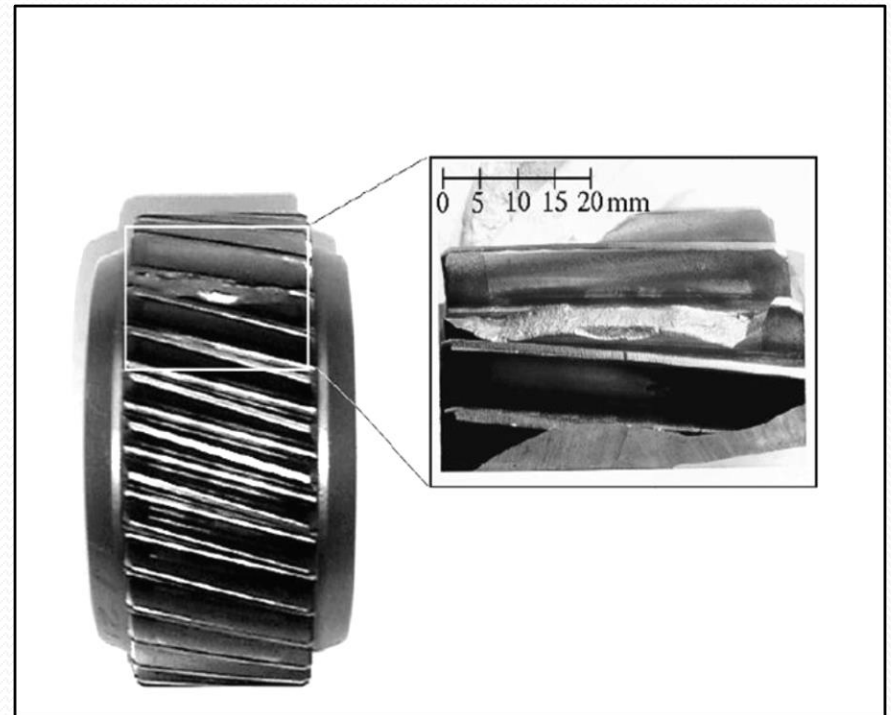
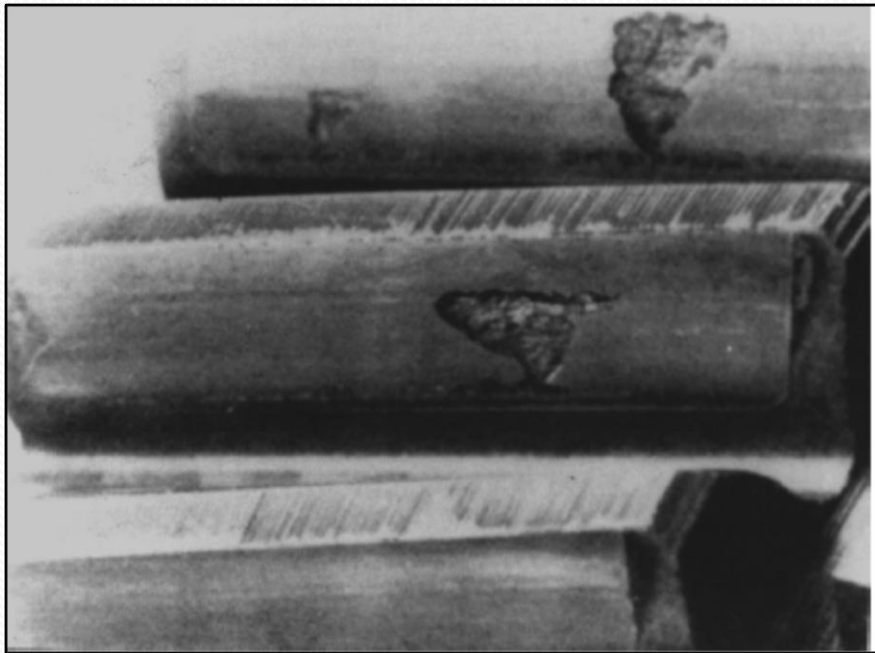


Se a falha ocorre :

- **Próximo ao diâmetro primitivo:** causado por especificações inadequadas de durezas, profundidades de camada ou tratamento térmico;
- **No diâmetro primitivo:** causado por sobrecarga;
- **Logo abaixo ou acima do diâmetro primitivo:** falha de engrenamento.

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”.



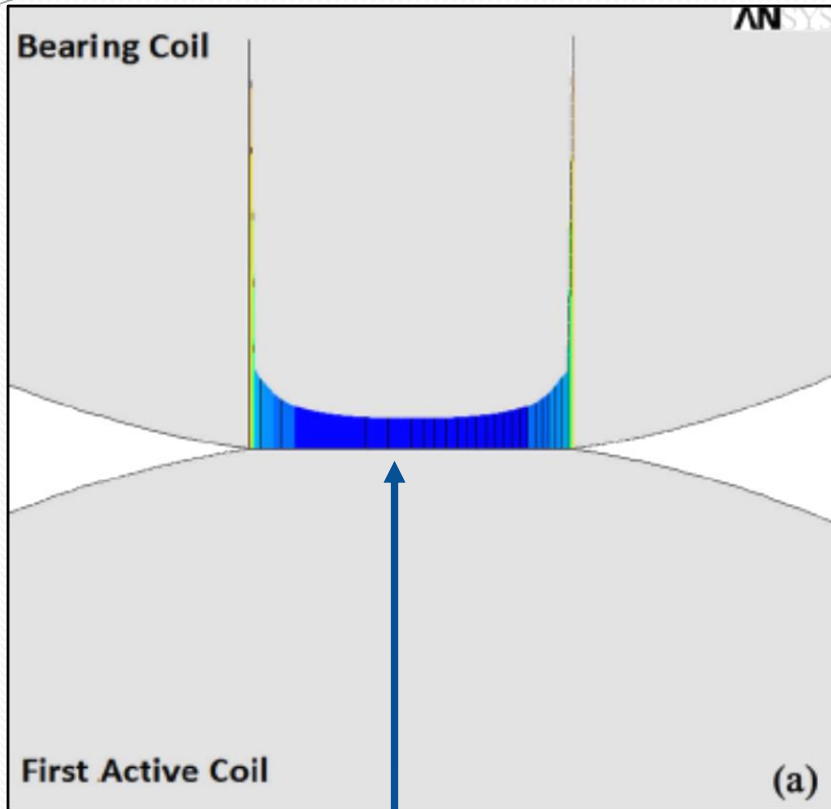
FRETTING-FADIGA

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.

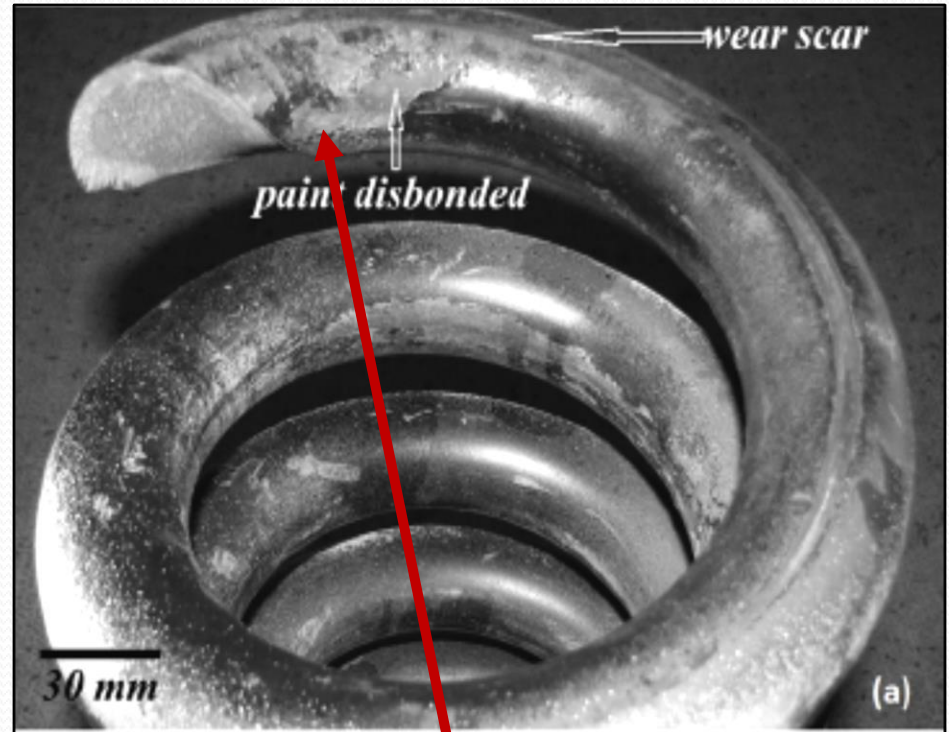
Diferença em relação à fadiga de contato: contato é constante e não intermitente.

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**.

FRETTING-FADIGA



MÁXIMA TENSÃO

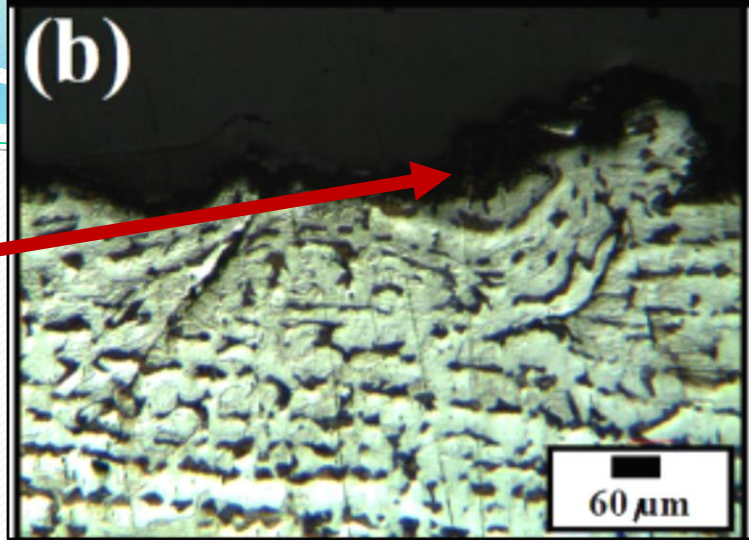


NUCLEAÇÃO DA TRINCA
DISTANTE DA MÁXIMA TENSÃO

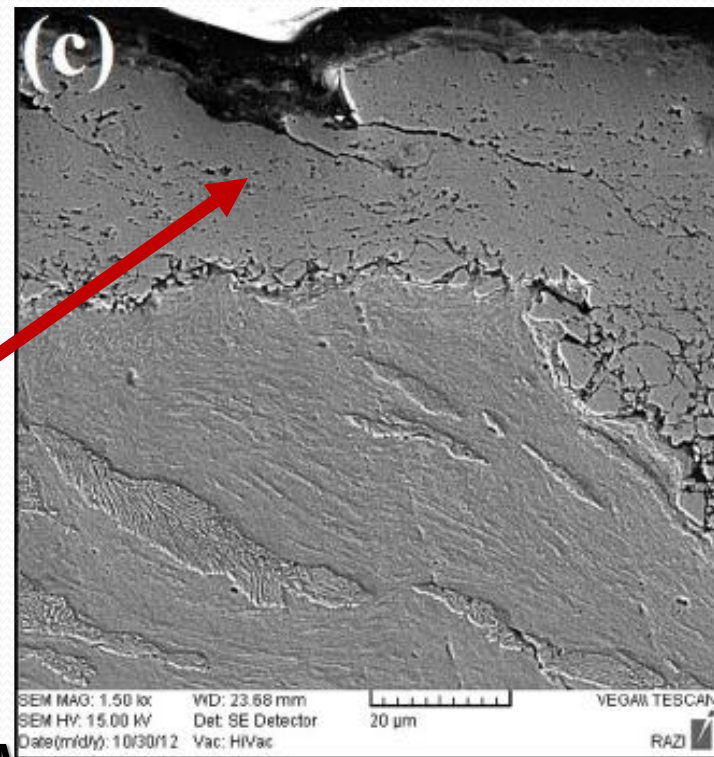
FRETTING-FADIGA



DEBRIS

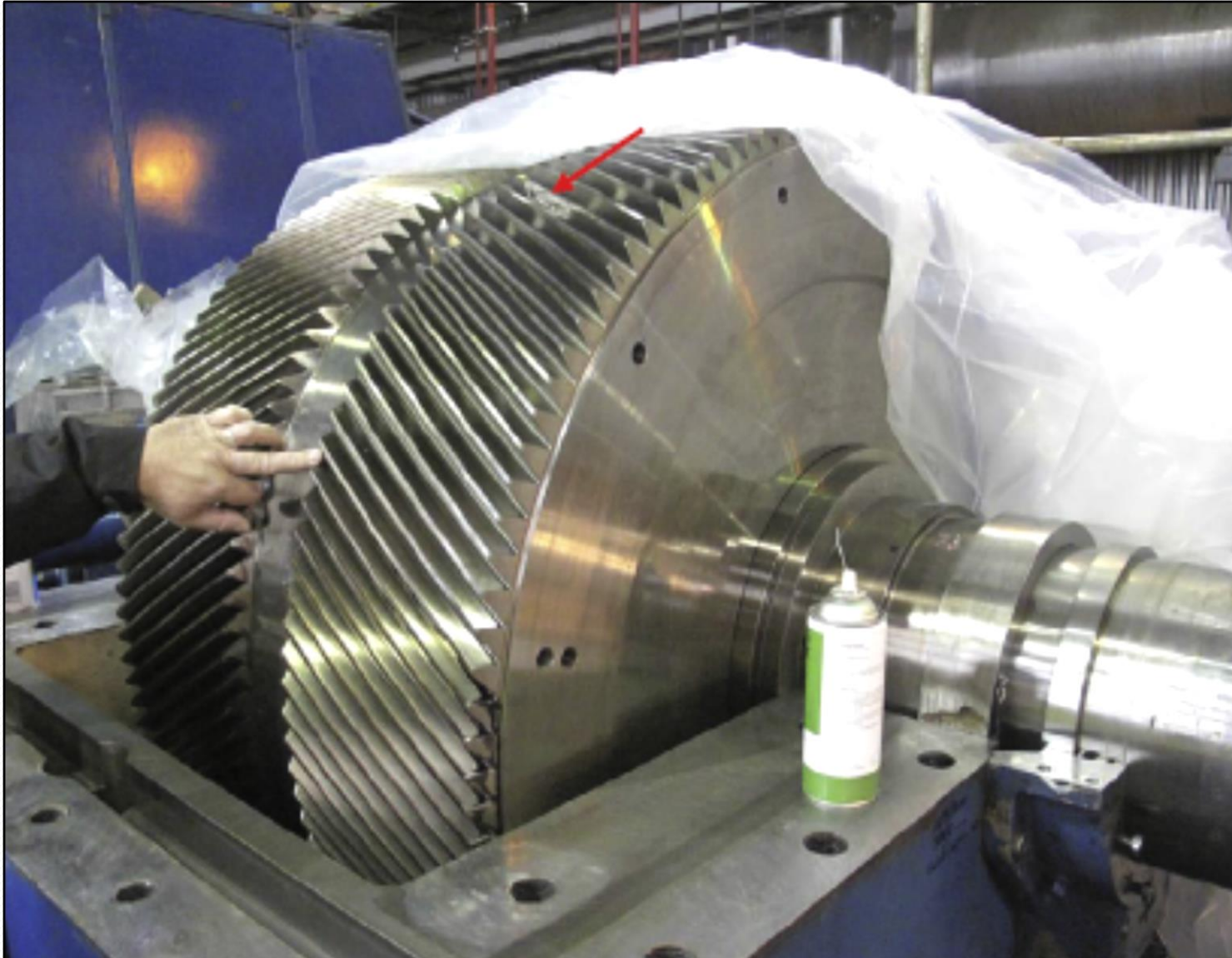


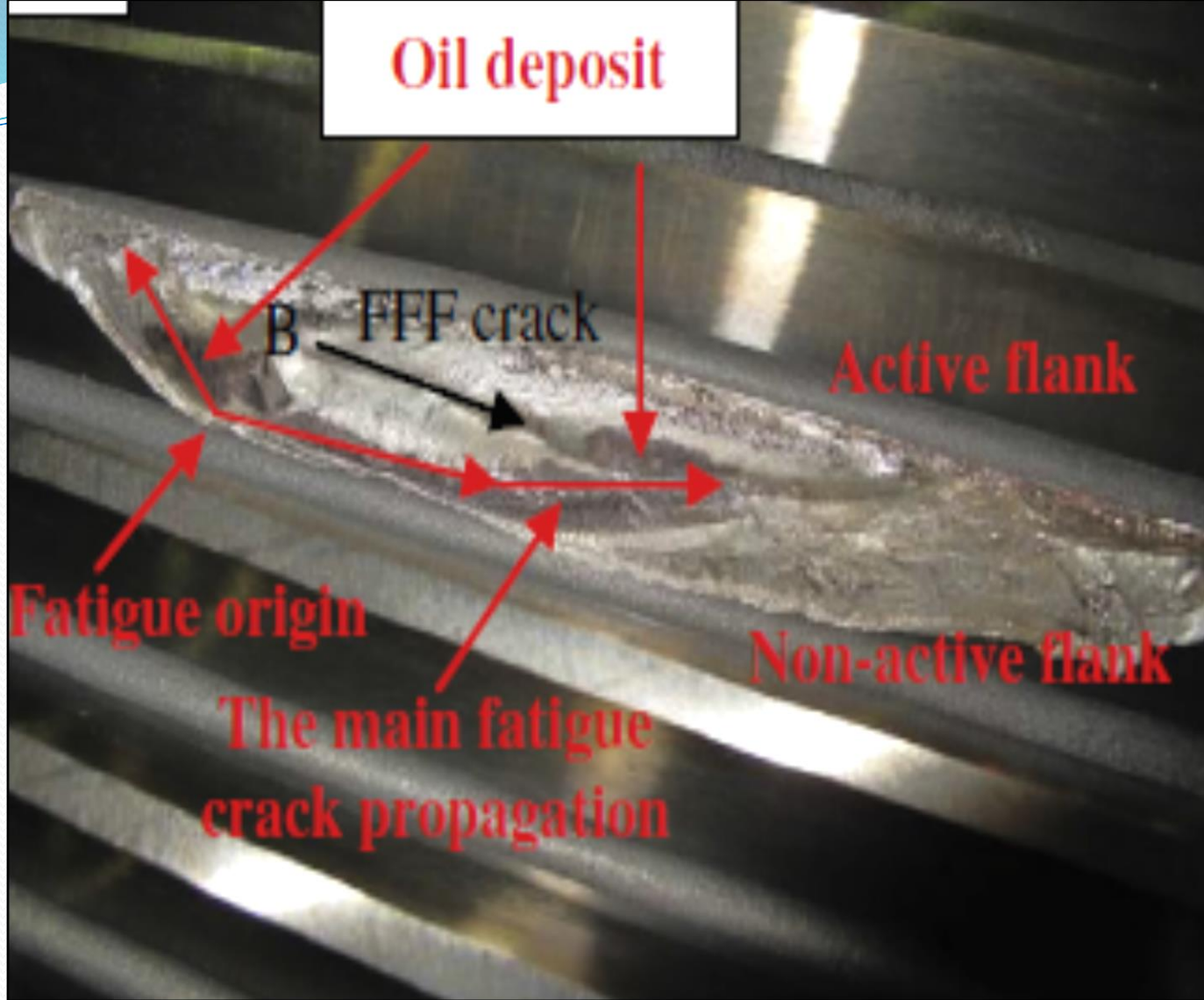
NUCLEAÇÃO DAS
TRINCAS DE FADIGA A
PARTIR DOS “DEBRIS”



Prof. Dr. José Benedito Marcomini

Fratura em dente de pinhão diferencial cementado de uma turbina de vapor de 40 MW após 35,231 horas de operação (10^9 ciclos).

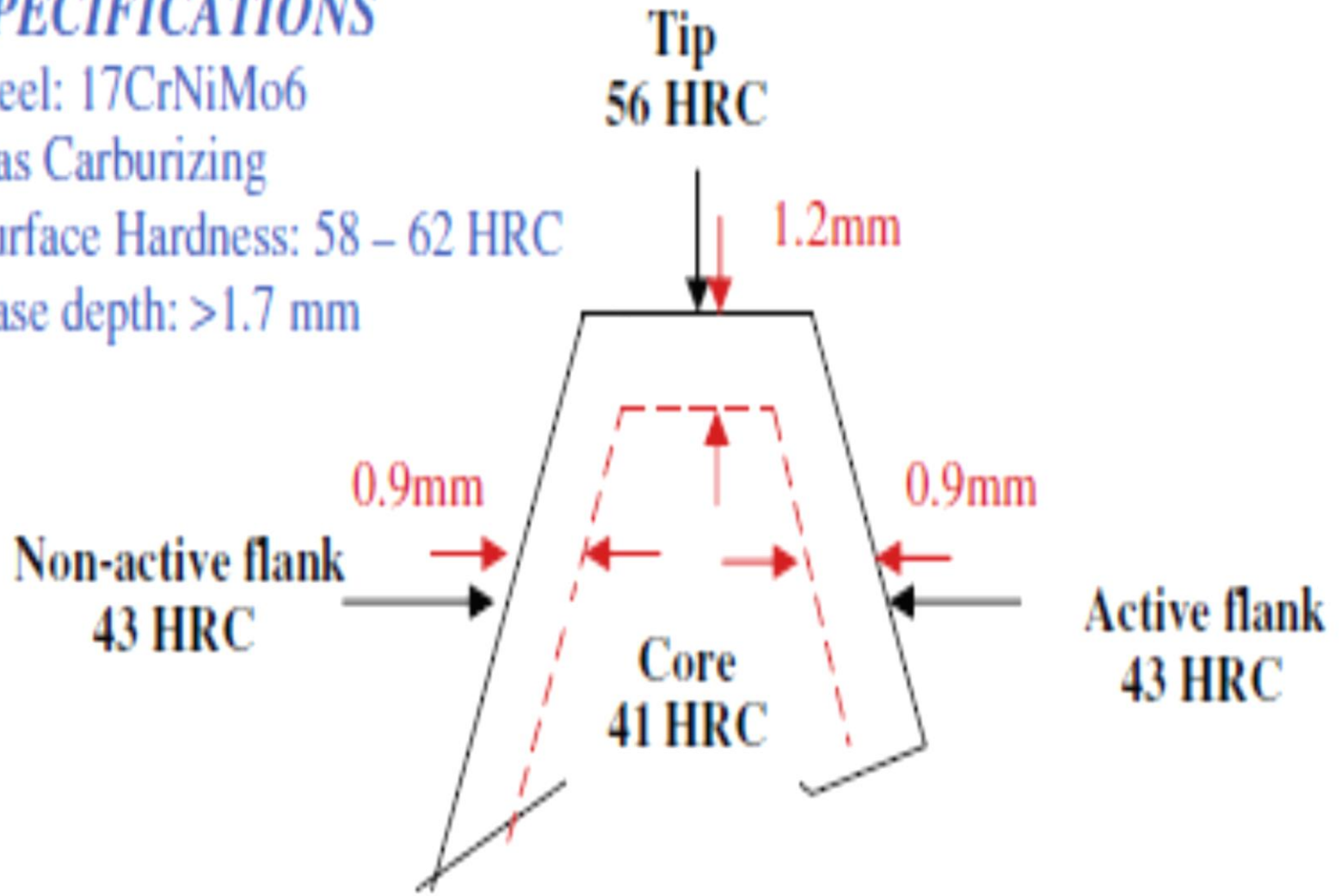


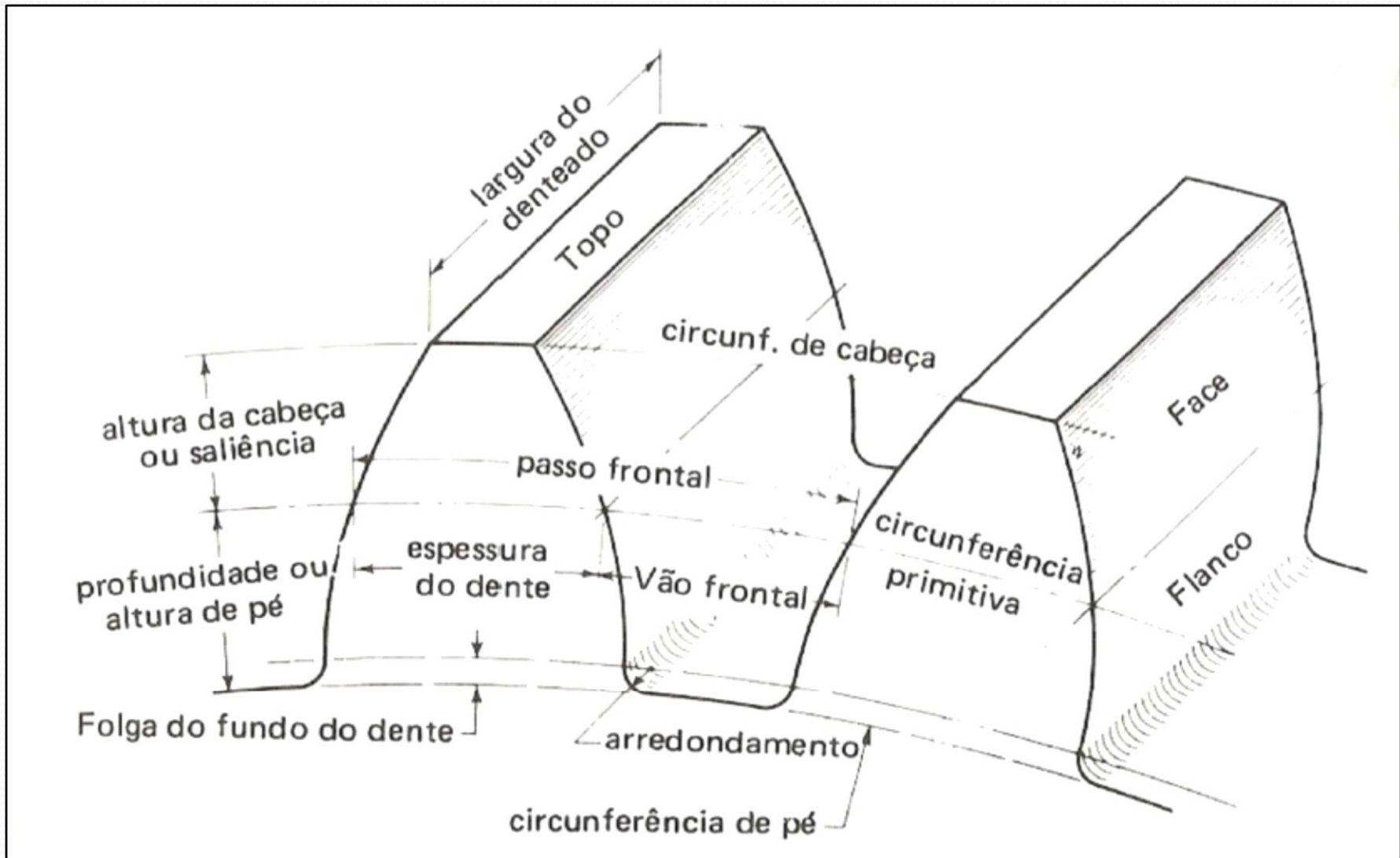


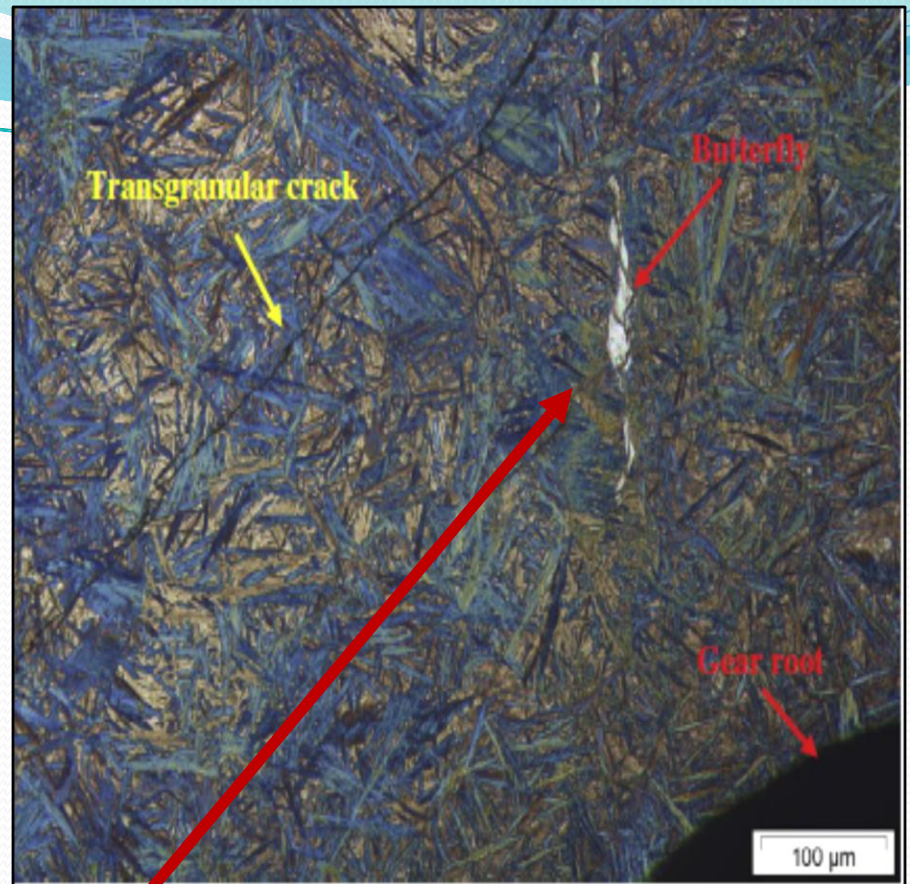
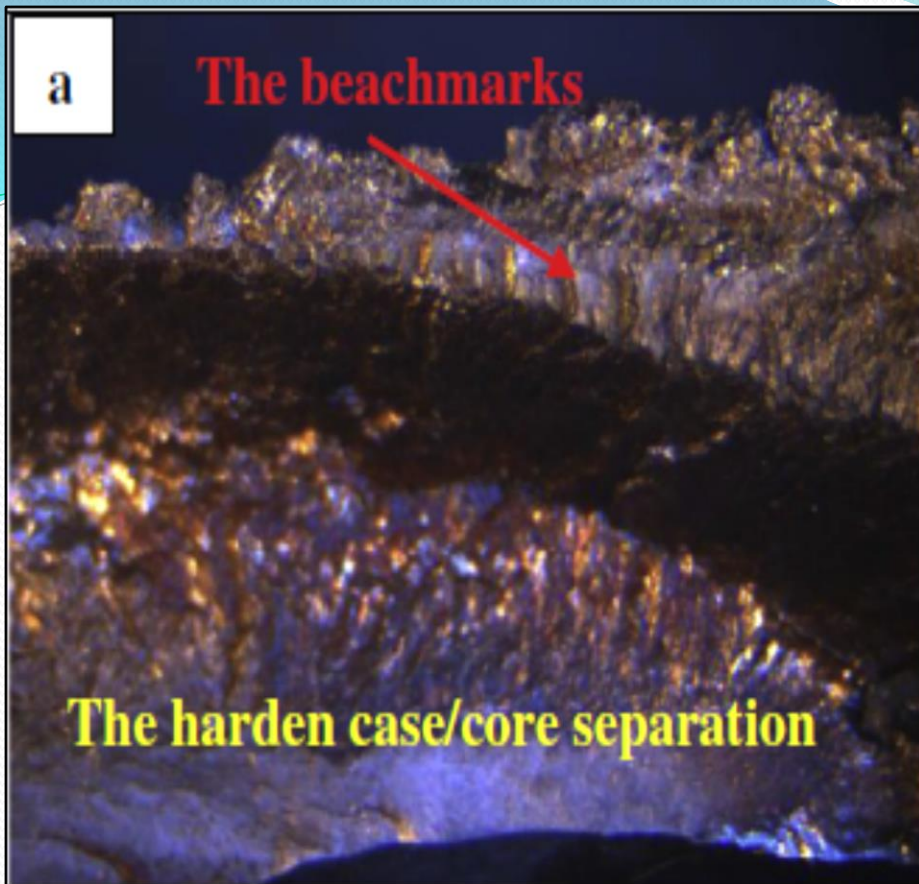
Spalling-lubrificante contribuiu para a propagação

SPECIFICATIONS

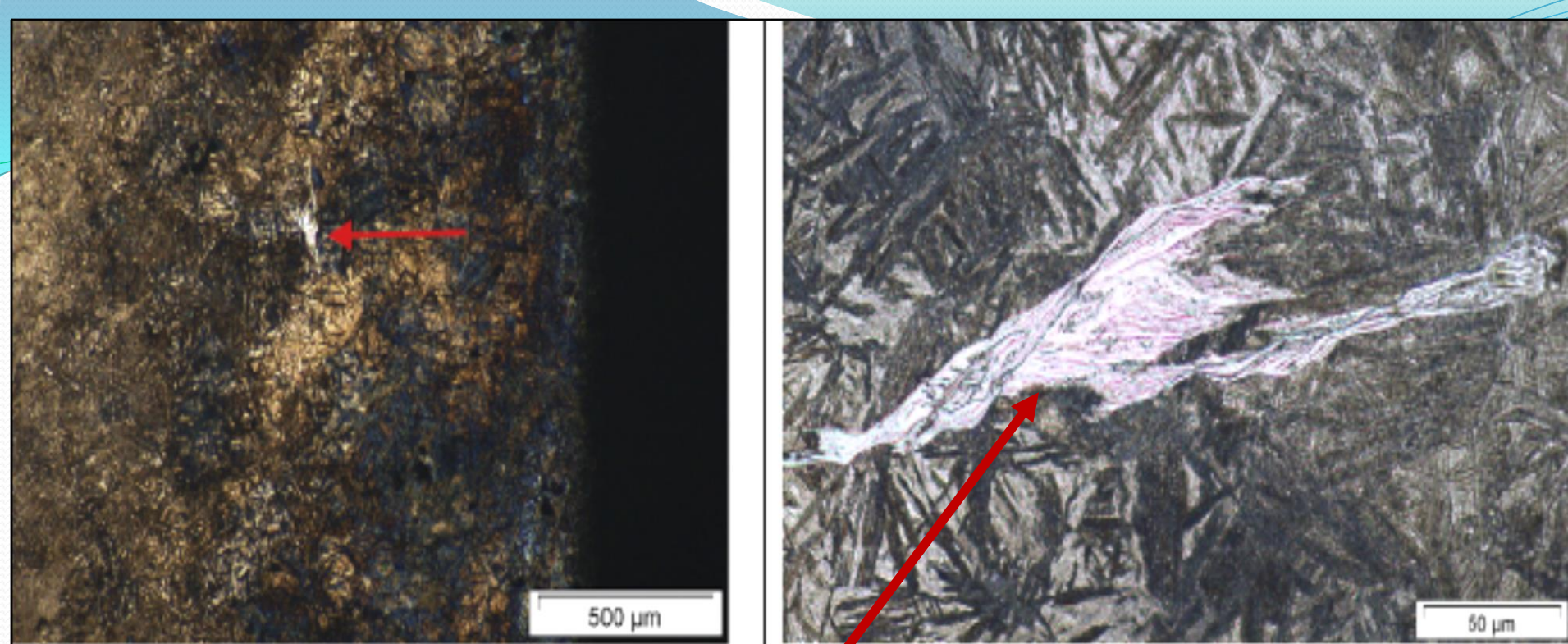
- Steel: 17CrNiMo6
- Gas Carburizing
- Surface Hardness: 58 – 62 HRC
- Case depth: >1.7 mm



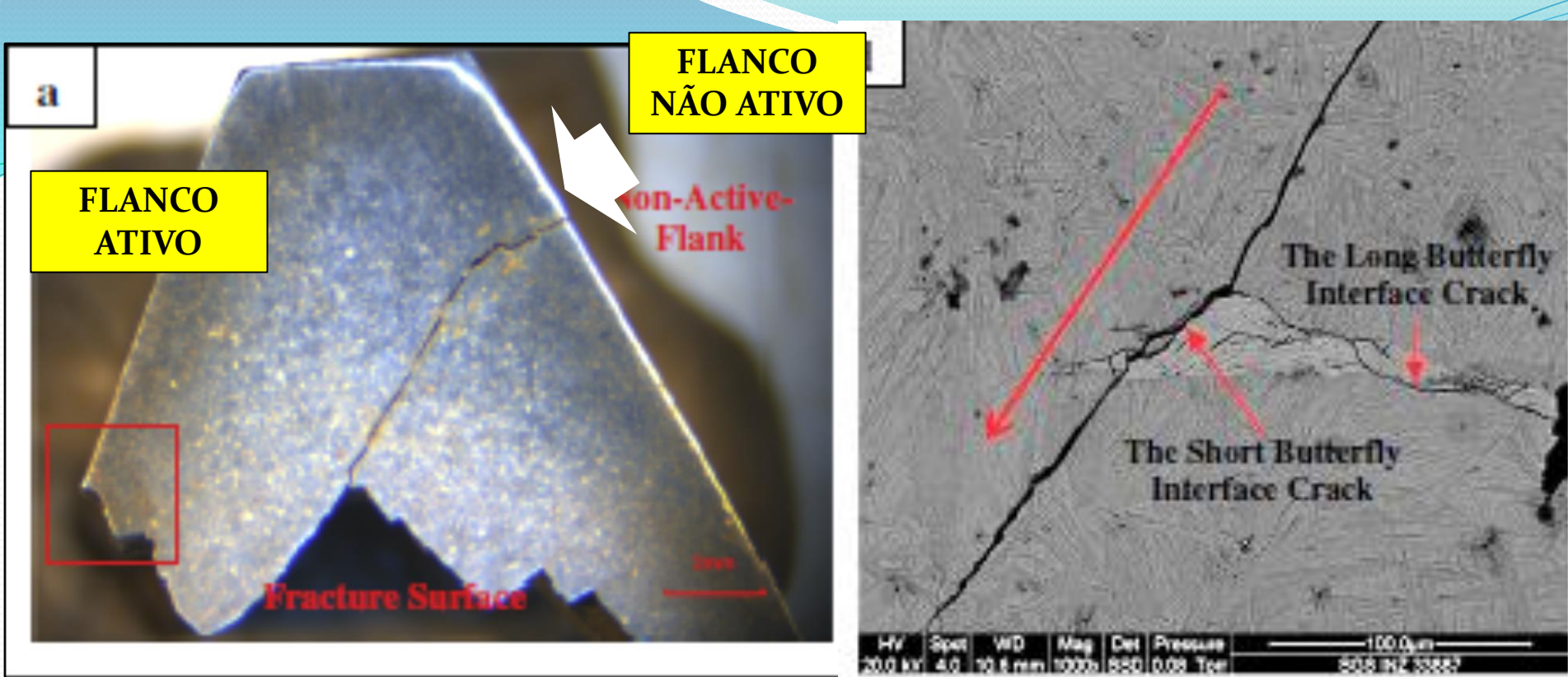




BUTTERFLY WING – NA CAMADA CEMENTADA. NÃO HÁ INCLUSÕES. RAIZ DO DENTE, DO FLANCO DE CONTATO.



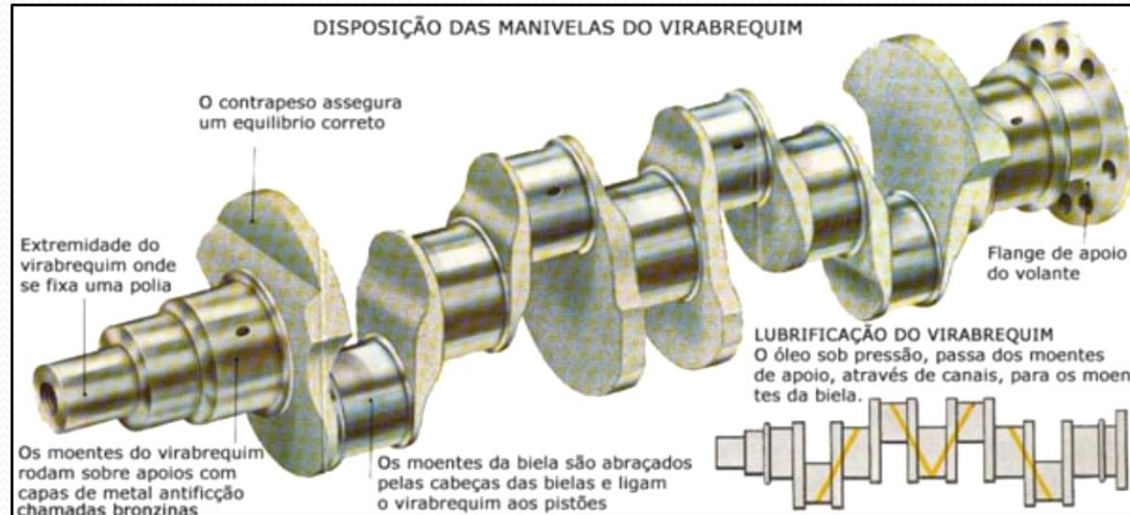
OUTRA BUTTERFLY WING – NA CAMADA CEMENTADA. NÃO HÁ INCLUSÕES. RAIZ DO DENTE, DO FLANCO DE CONTATO.



CONCLUSÃO: A TRINCA INICIOU-SE NO FLANCO NÃO ATIVO (INCOMUM-COMPRESSÃO) E PROPAGOU TRANSGRANULARMENTE PARA O FLANCO ATIVO. CAUSA RAIZ: TRATAMENTO TÉRMOQUÍMICO - DUREZA ABAIXO DO ESPECIFICADO, ESTRUTURA GROSSEIRA DE MARTENSITA, CAMADA IRREGULAR E PROFUNDIDADE ABAIXO DO ESPECIFICADO.

2. Histórico:

O virabrequim do motor Scania 11.000CC ,série 3, turbinado , reconcionado sofreu fratura em serviço(Fig.1). Foram enviadas as partes da peça fraturada , juntamente com a biela e bronzinas para análise.



ORIGEM DA FRATURA POR FADIGA NO “RESSALTO” USINADO. OBSERVA-SE A MUDANÇA DE PLANO CRISTALINO NA PROPAGAÇÃO DA TRINCA.

MARCAS DE PRAIA EVIDENCIANDO A PROPAGAÇÃO SUBCRÍTICA (ESTÁVEL) DA FRATURA POR FADIGA.

REGIÃO RUPTURA FINAL MUITO PEQUENA - PROPAGAÇÃO INSTÁVEL

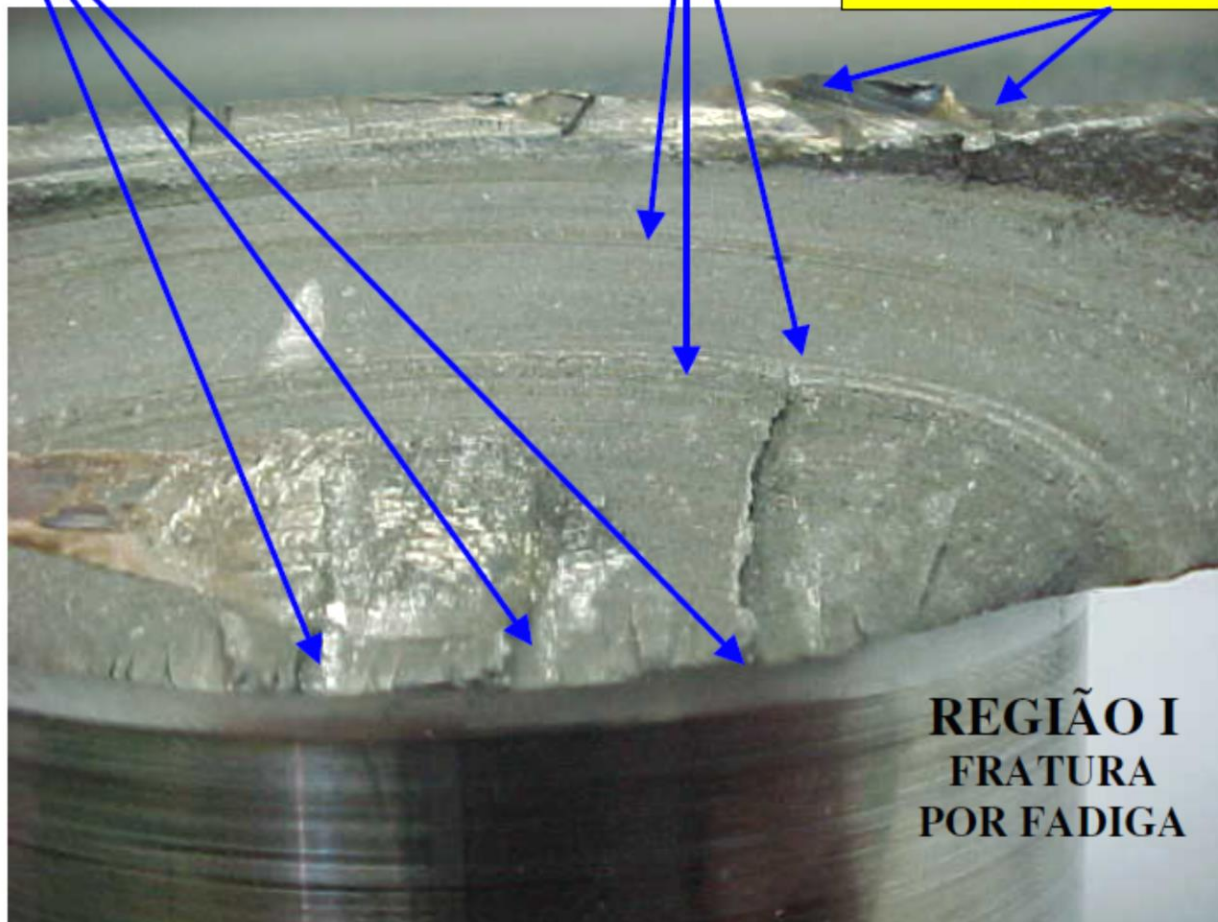


Figura 3 – Região da fratura por fadiga apresentando o início da trinca e a propagação subcrítica (estável) da mesma evidenciada por marcas de praia.

INÍCIO DA FRA-
TURA EM
TRINCA POR
FADIGA NO
RESSALTO USI-
NADO –EVI-
DENCIADO
PELO ENSAIO
DE LÍQUIDO
PENETRANTE

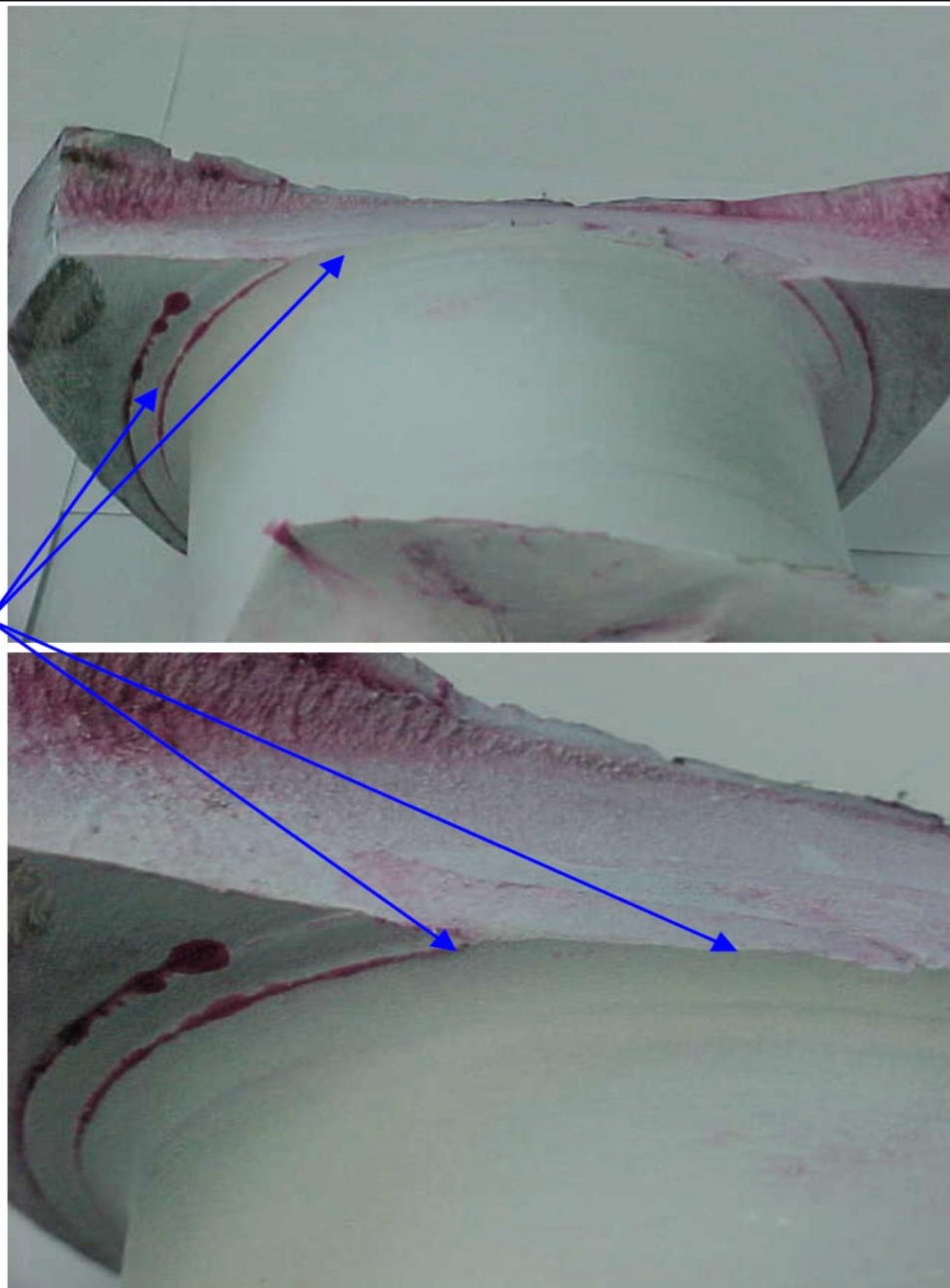
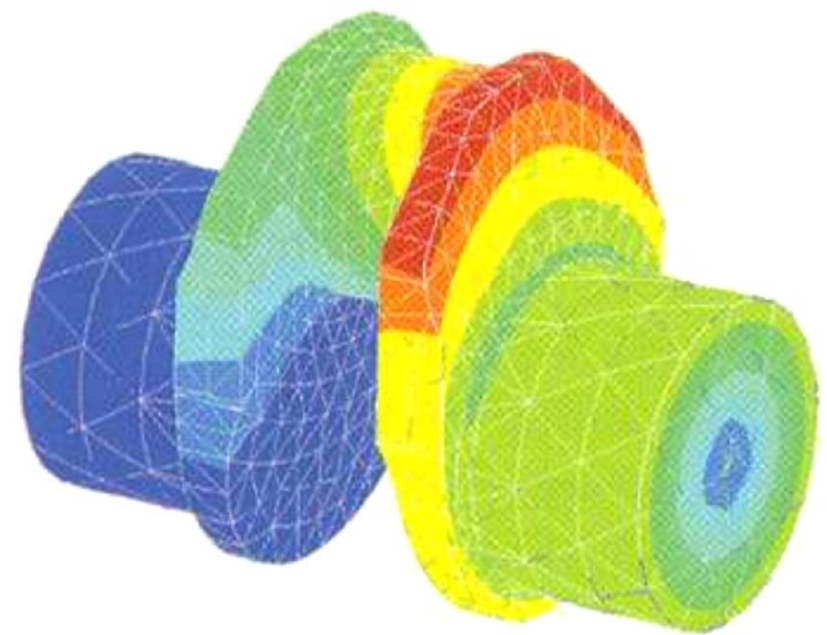
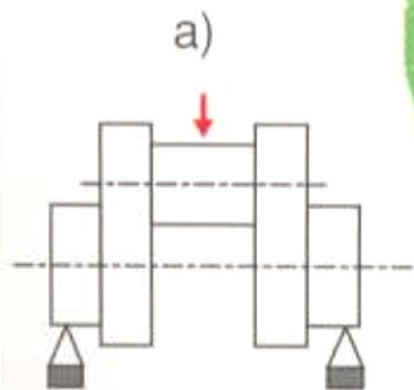
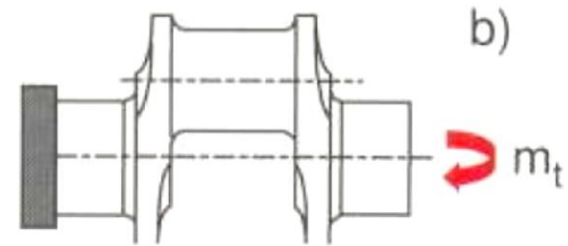
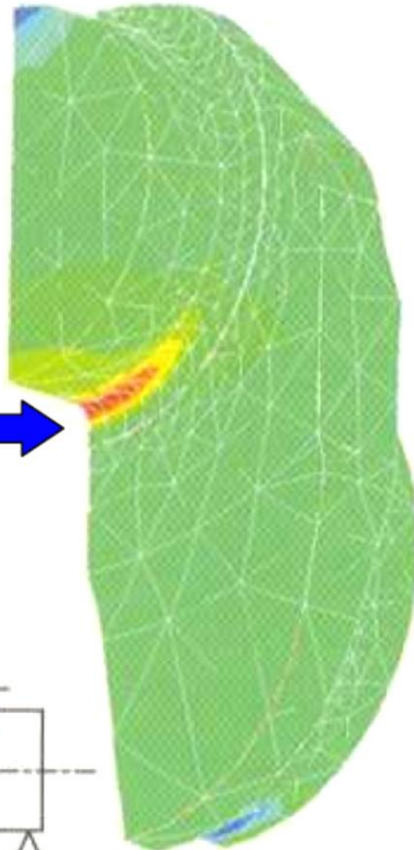
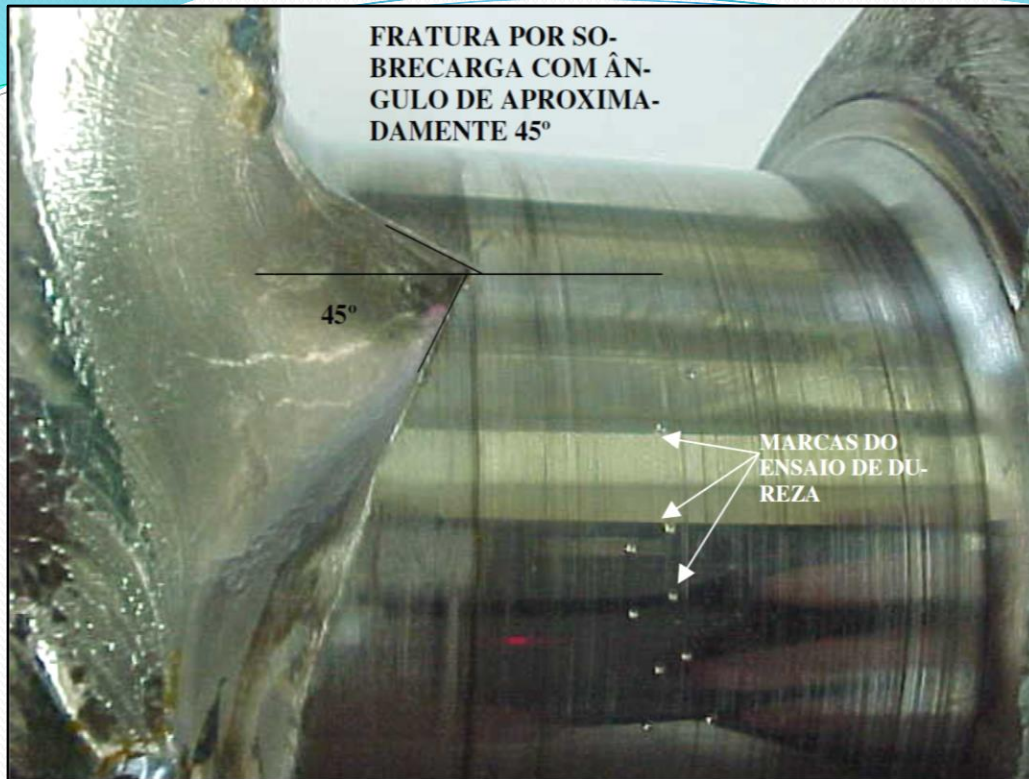


Figura 4 – Peça ensaiada com líquido penetrante evidenciando o início da fratura em trinca por fadiga no ressalto usinado.

Maior concentração de tensão no Fillet



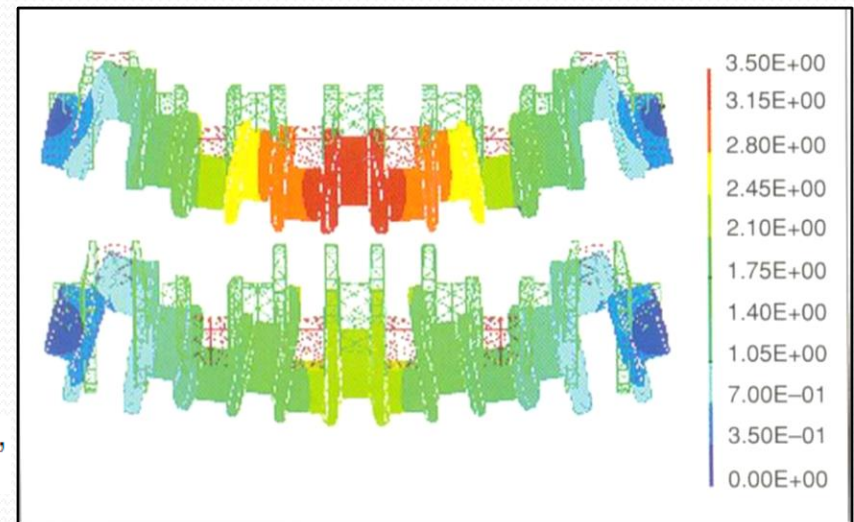
Modelo em elementos finitos apresentando maior concentração de tensão, por "bending", no raio de concordância(fillet) do pin journal.

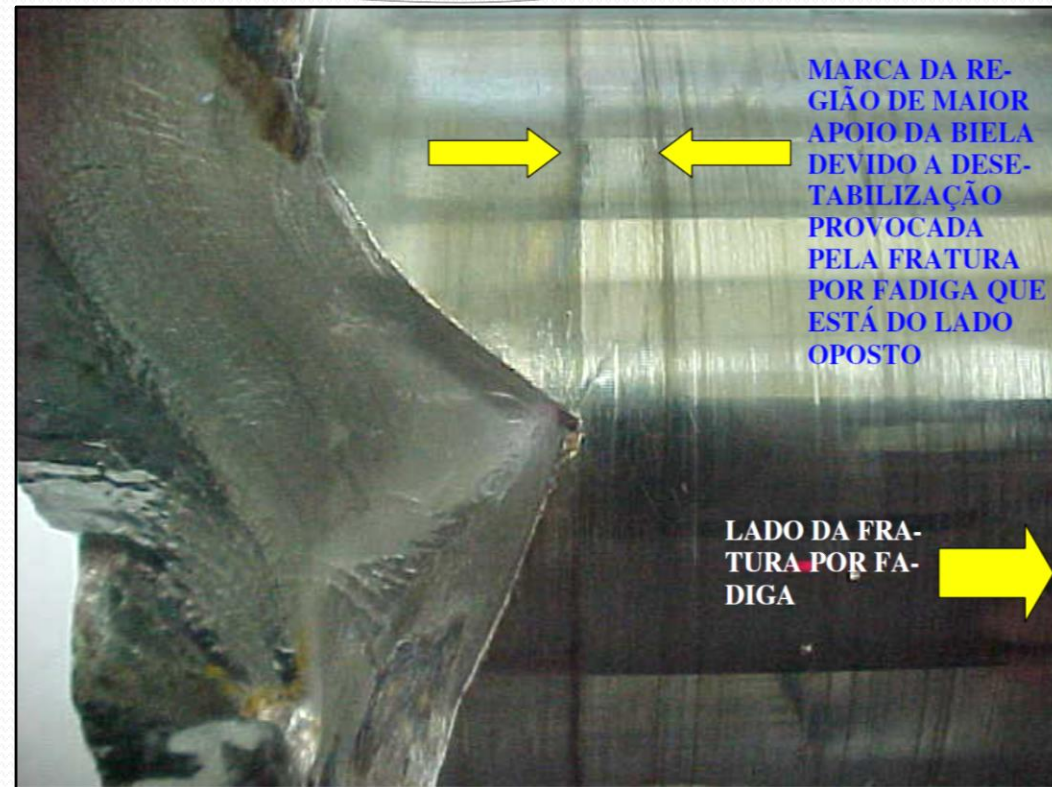
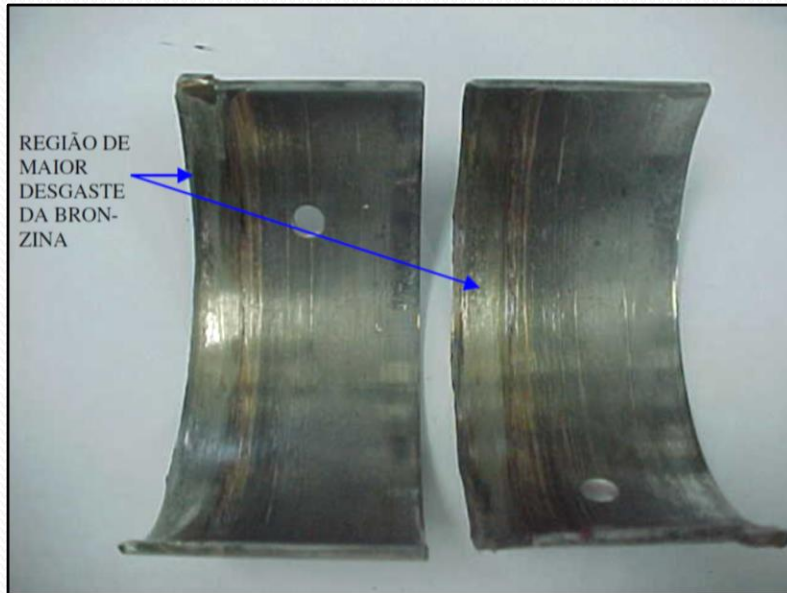


Microestrutura de martensita revenida e áreas de ferrita.
Aumento 100X – Ataque: Nital 3%



Microinclusões tipo C, série fina, nível 3 e tipo D série fina, nível 2, conforme ASTM E 45.





Desgaste não uniforme da bronzina devido ao desalinhamento do virabrequim causado pela abertura da trinca por fadiga.

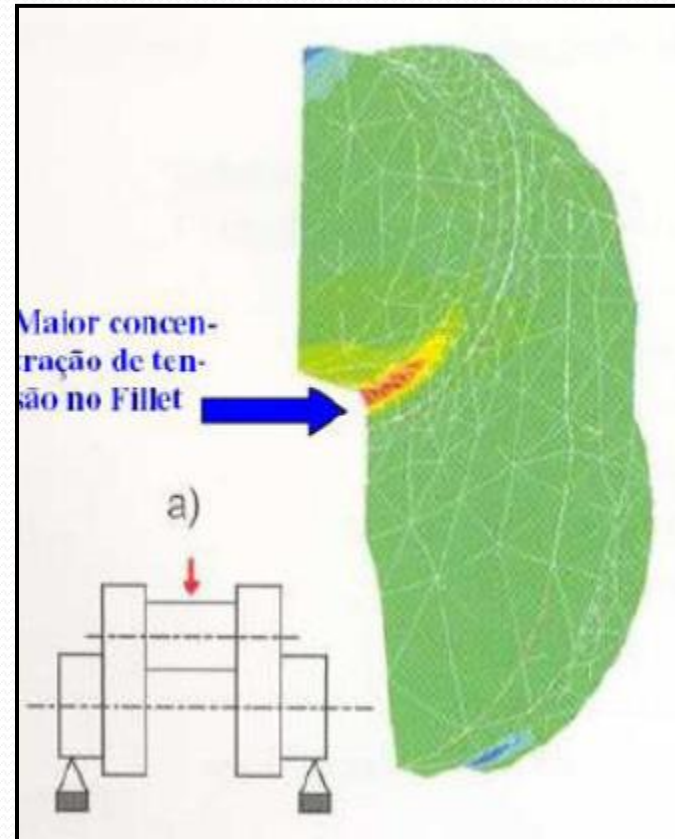
Diante dos resultados , o principal fator da falha do virabrequim foi a concentração de tensão no ressalto presente no espelho do moente. Esse ressalto pode ter sido causado por uma falha de usinagem.

MEDIDAS PARA AUMENTAR A VIDA EM FADIGA DE VIRABREQUINS:

- **ROLETEAMENTO;**
- **SHOT PEENING;**
- **TÊMPERA POR INDUÇÃO NO “FILLET”.**



Figura 2.12 – Secção do virabrequim a ser ensaiada.



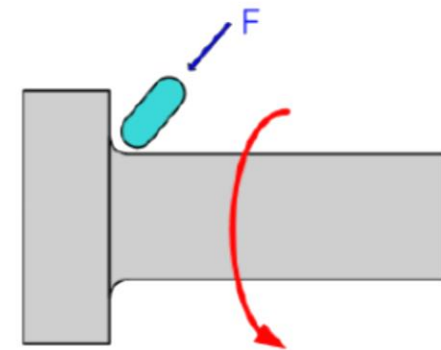
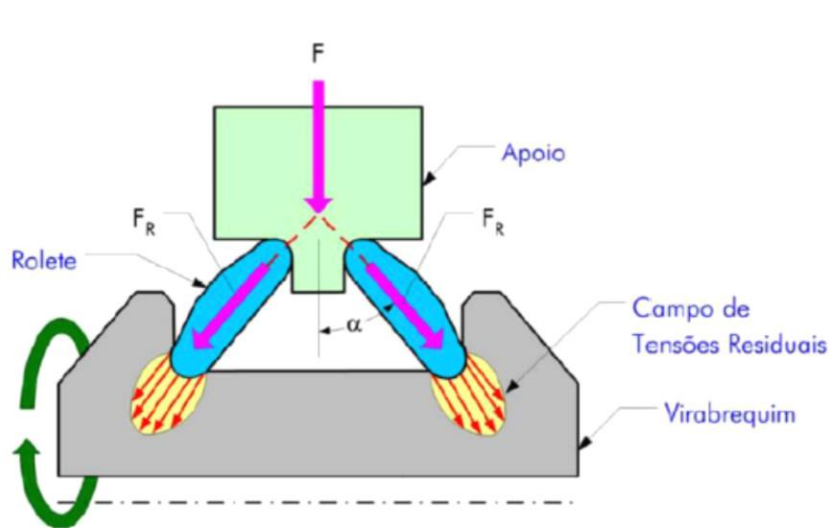
(Adaptado de : THYSSENKRUPP)

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

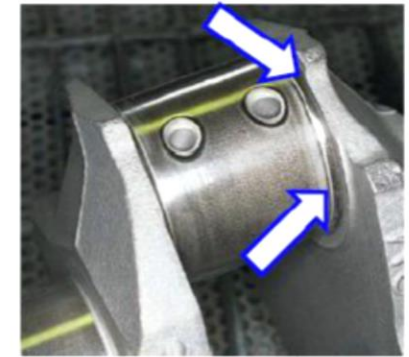
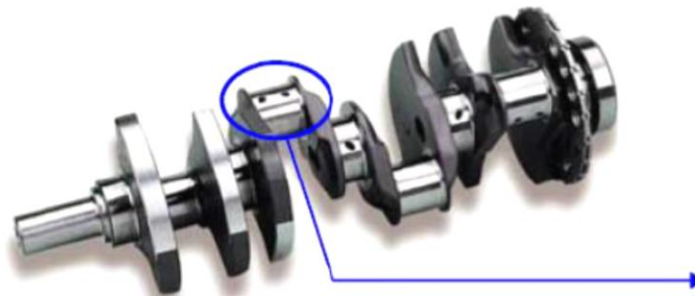
ROLETEAMENTO

Descrição

- Processo de conformação por meio de roletes.
- Induz tensões residuais compressivas próximo à superfície.
- Pode reduzir a nucleação de trincas de fadiga.

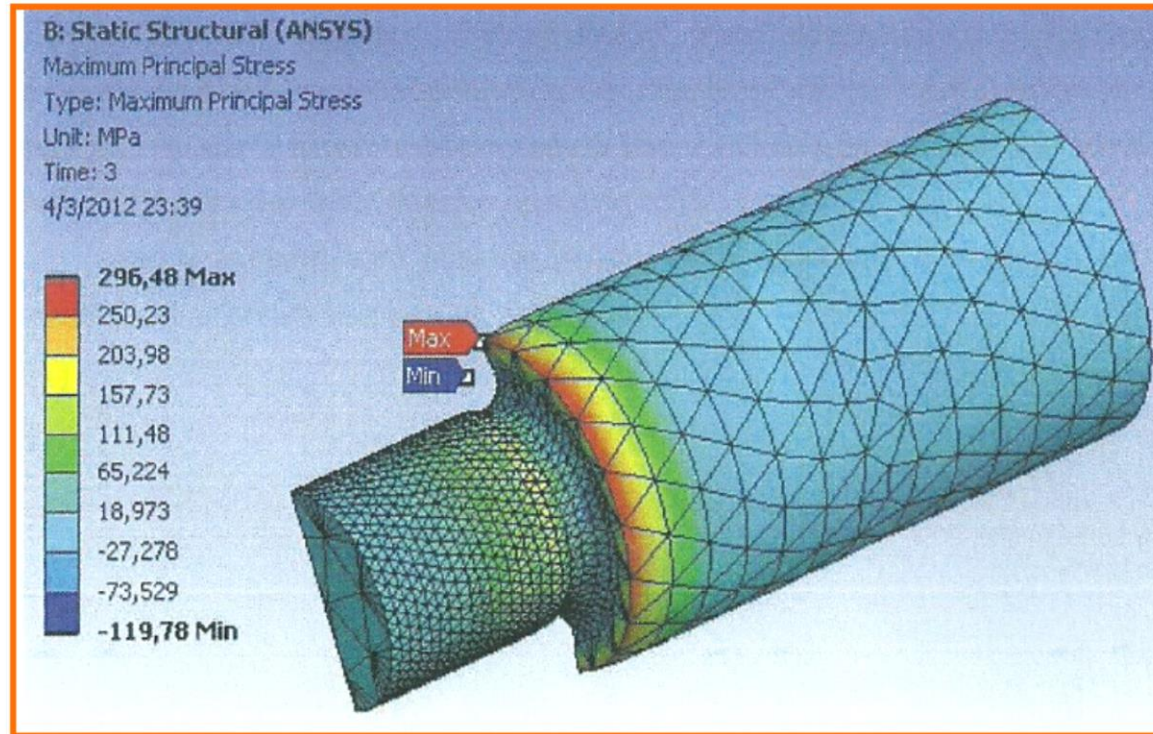


Ex.: Roleteamento de virabrequim

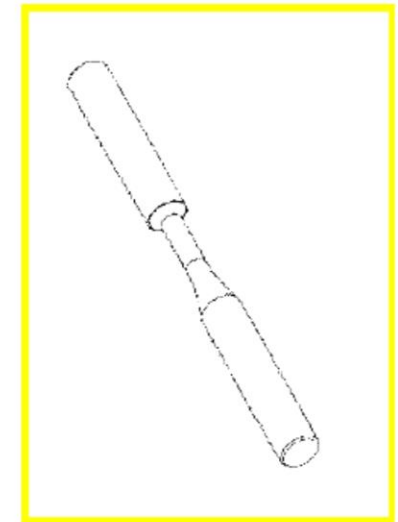


ROLETEAMENTO

Efeito do roleteamento na resistência à fadiga (cont.)



Oliveira, C.L., Dissertação de Mestrado. UNITAU, 2012.

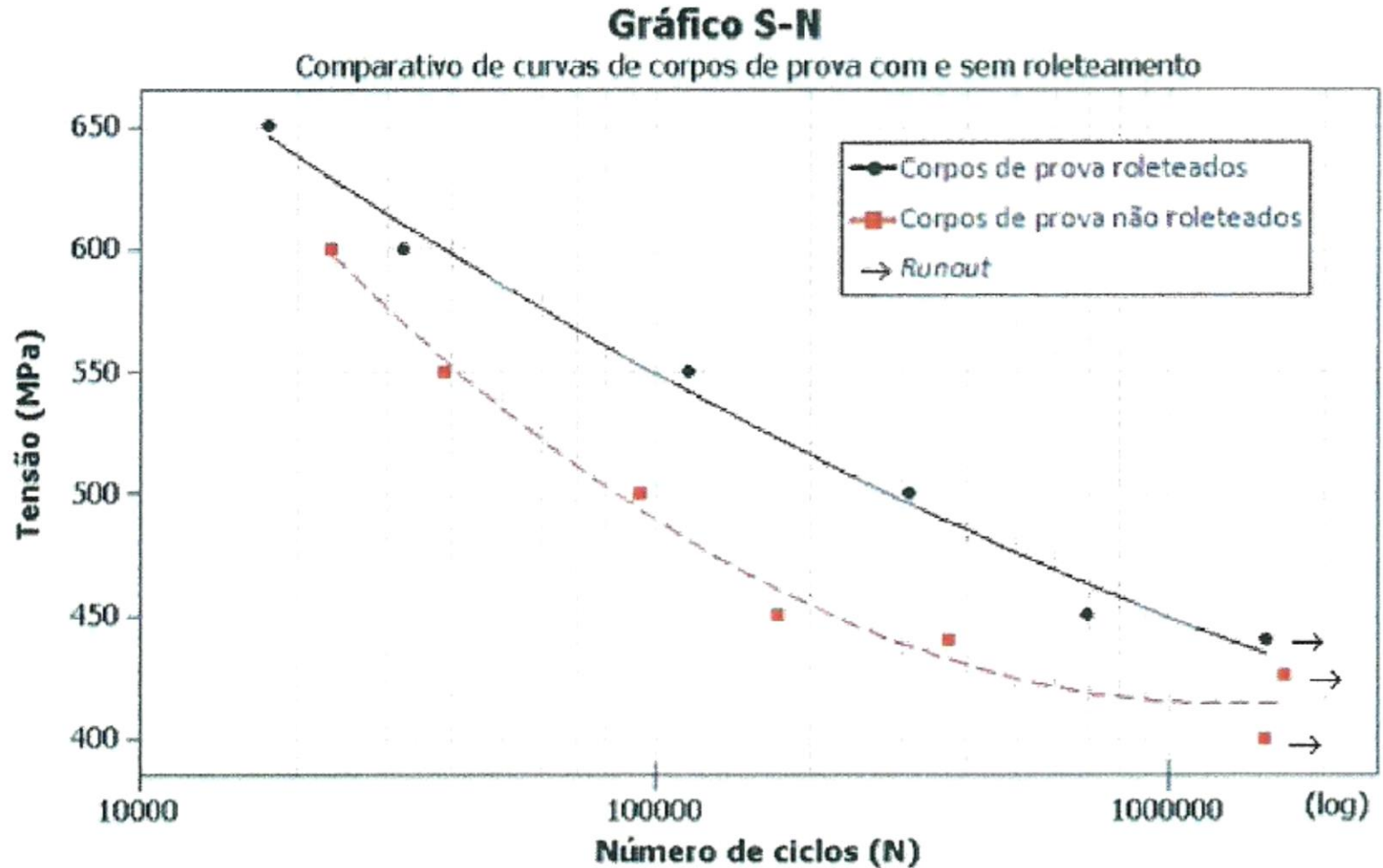


Tentativa de simulação das tensões residuais induzidas pelo processo de Roleteamento usando análise não-linear por Elementos Finitos.

Corpo-de-prova para o ensaio de fadiga.

ROLETEAMENTO

Efeito do roleteamento na resistência à fadiga (*cont.*)



PARAFUSOS DE SERVOMOTOR- 06/Março/2013
HIDROELÉTRICA DE SANTO ANTONIO-RIO MADEIRA – RONDÔNIA -
JBM





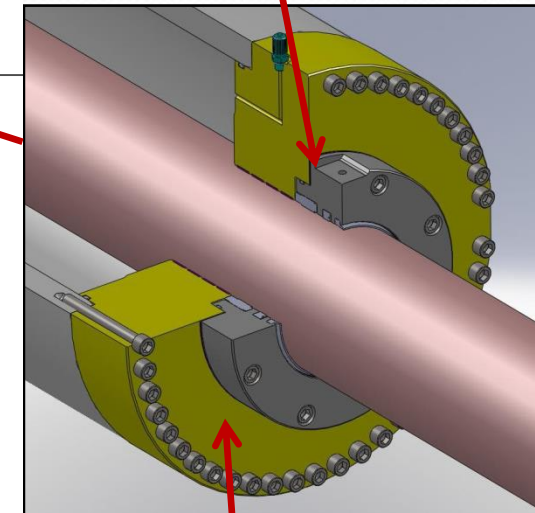
Prof.Dr. José Benedito Marcomini



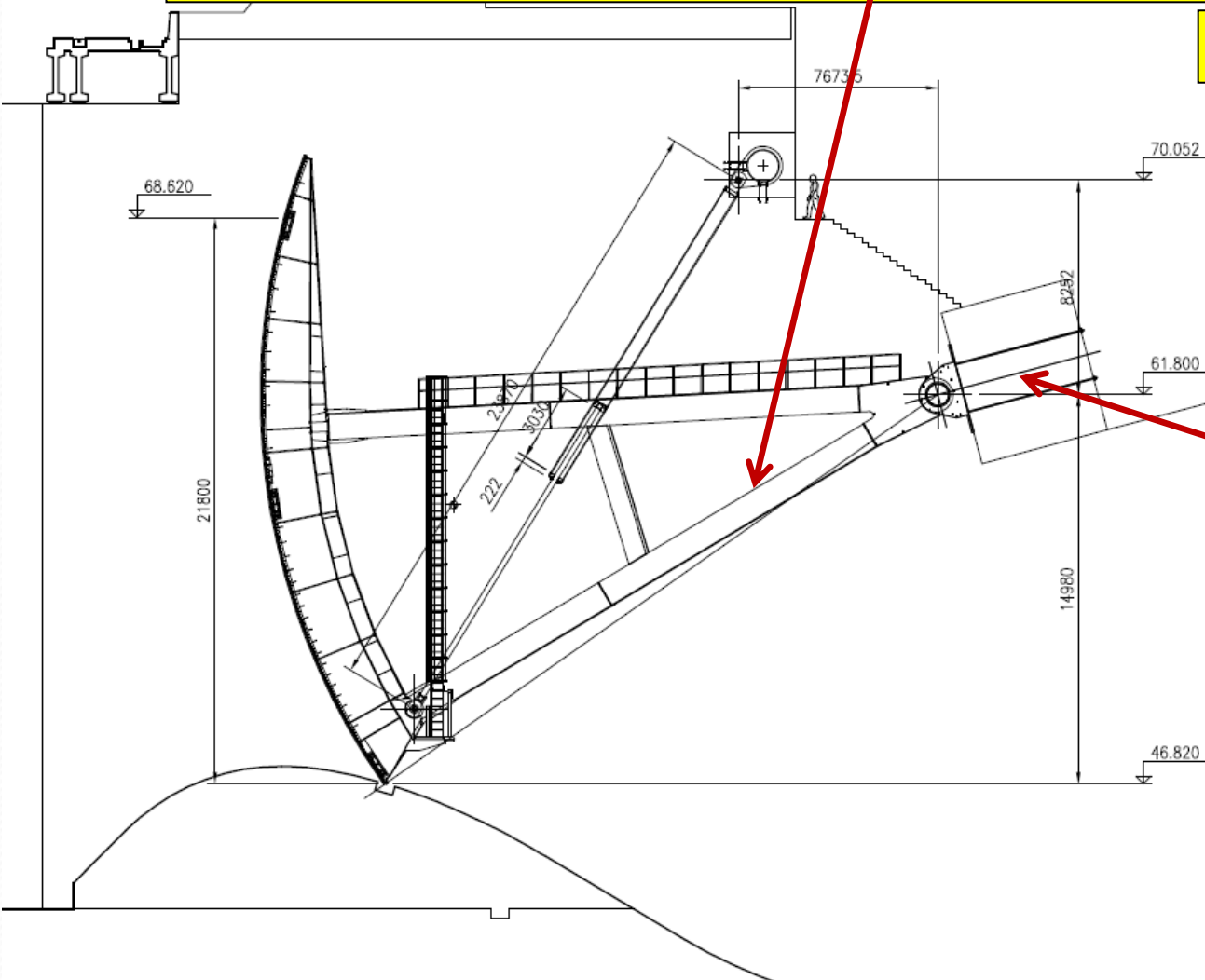
DETALHE DO PROJETO DA COMPORTA SEGMENTO - ALTURA APROXIMADA: 70m

Haste do servomotor: abertura e fechamento da comporta

8 Parafusos M16x80 mm



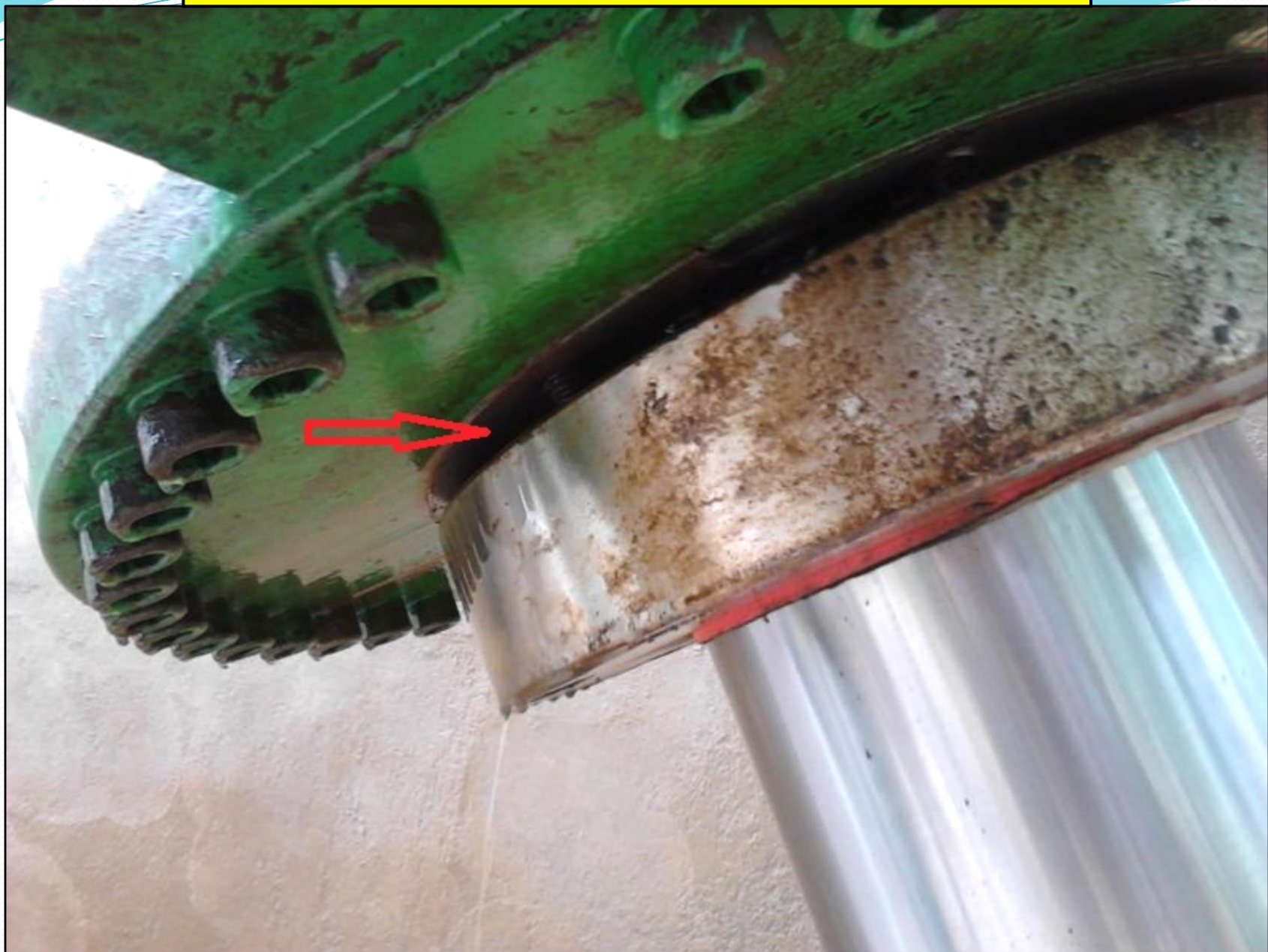
Prensa Gaxeta



CONJUNTO SERVO-MOTOR E HASTE



PARAFUSOS DO SERVO-MOTOR



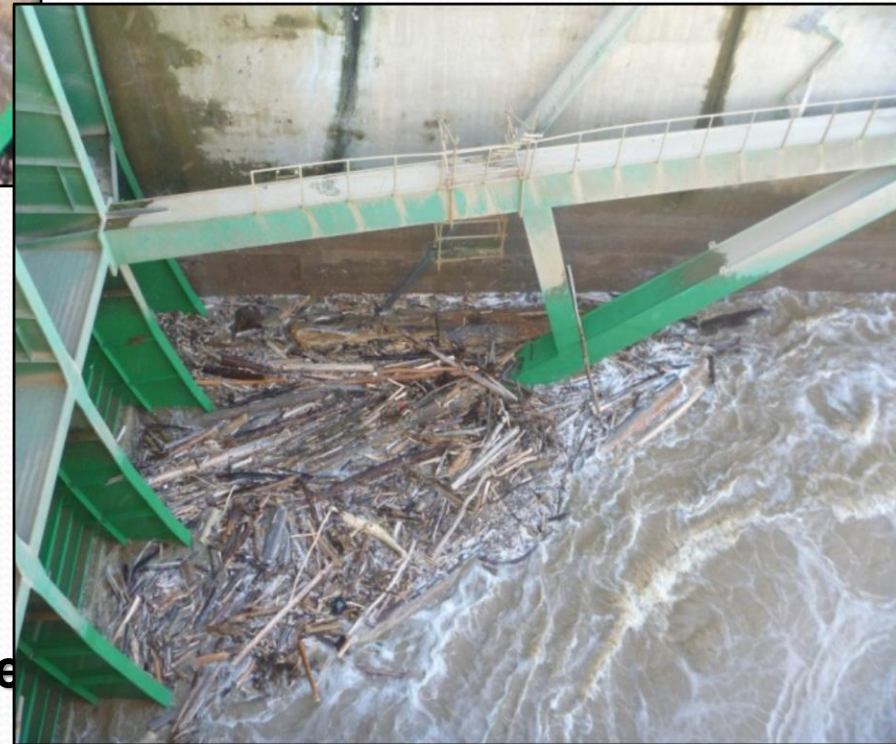
RESSALTO HIDRÁULICO À JUSANTE

MUITA MADEIRA E ONDAS

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



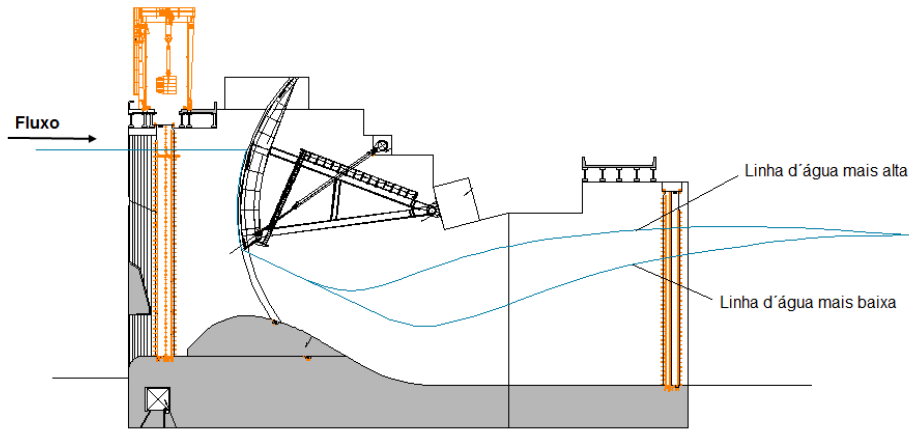
**COMPORTA TRABALHANDO SEMI-
ABERTA PARA RETENÇÃO DE
TRONCOS DE MADEIRA, UMA VEZ
QUE OS RESPONSÁVEIS PELA
BARRAGEM NÃO CONSTRUÍRAM
ESCOADOURO DE TRONCOS.
MAL USO DO EQUIPAMENTO.**



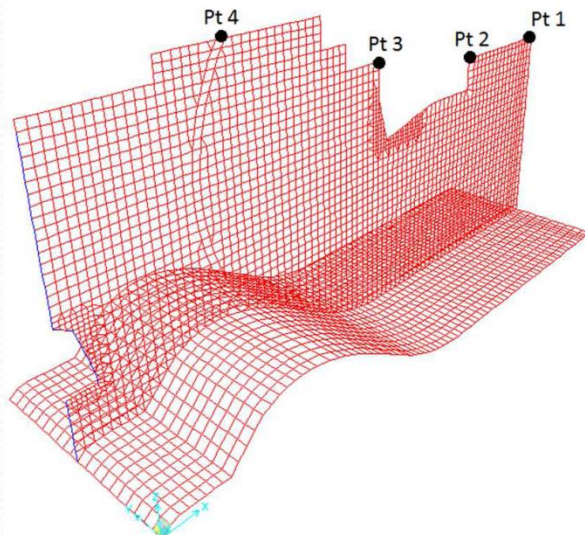
IMPACTO DE TRONCOS À JUSANTE



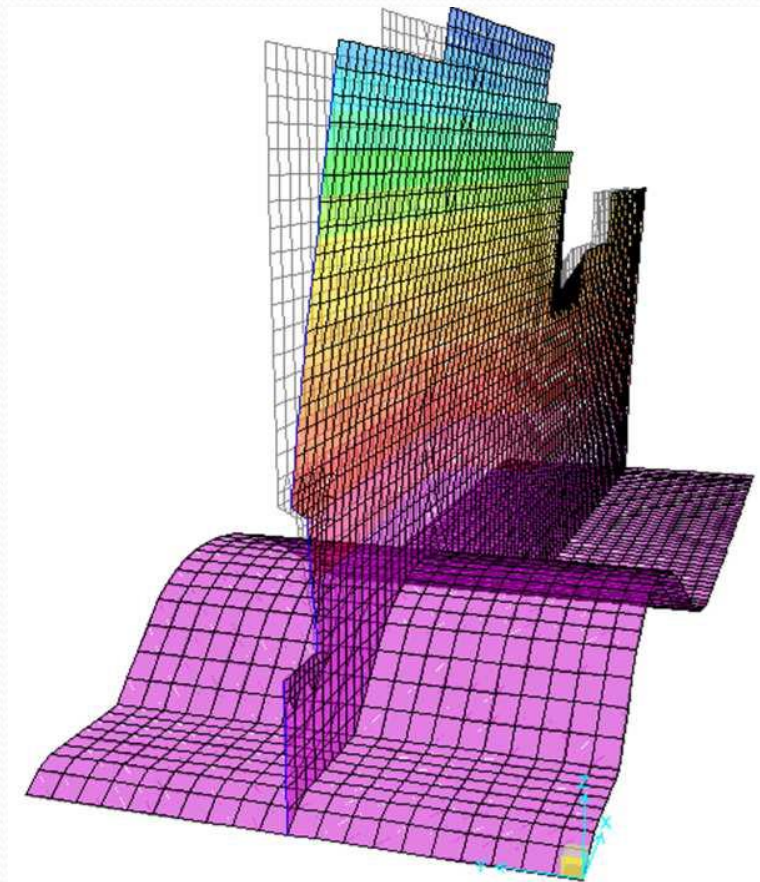
ESTUDO DAS VIBRAÇÕES NA ESTRUTURA DE CONCRETO POR FEM, REALIZADO PELA ENGENHARIA DE PROJETO



Comporta com Abertura de 9 m



Pontos usados para avaliação dos níveis de deslocamentos vibracionais



1º Modo de Vibração = 3,12 Hz

ANÁLISE DA FALHA-JBM

Tabela1 – 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

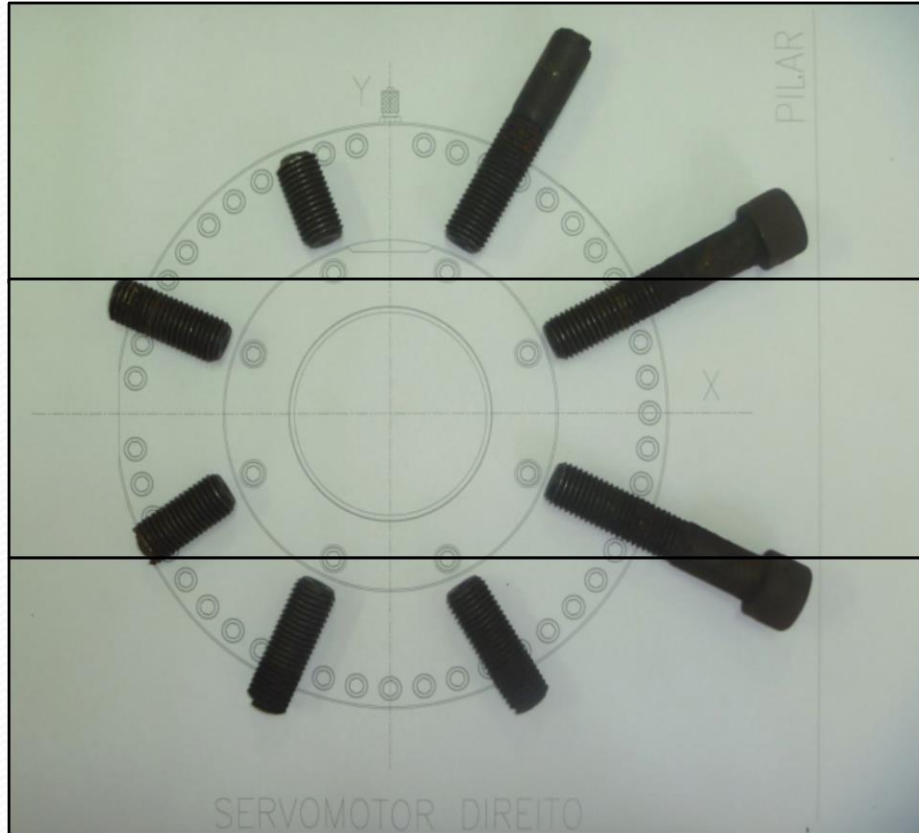
	Limite de resistência à tração (MPa)	Al (%)
Amostra 1	1370	12
Amostra 10	1351	-

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

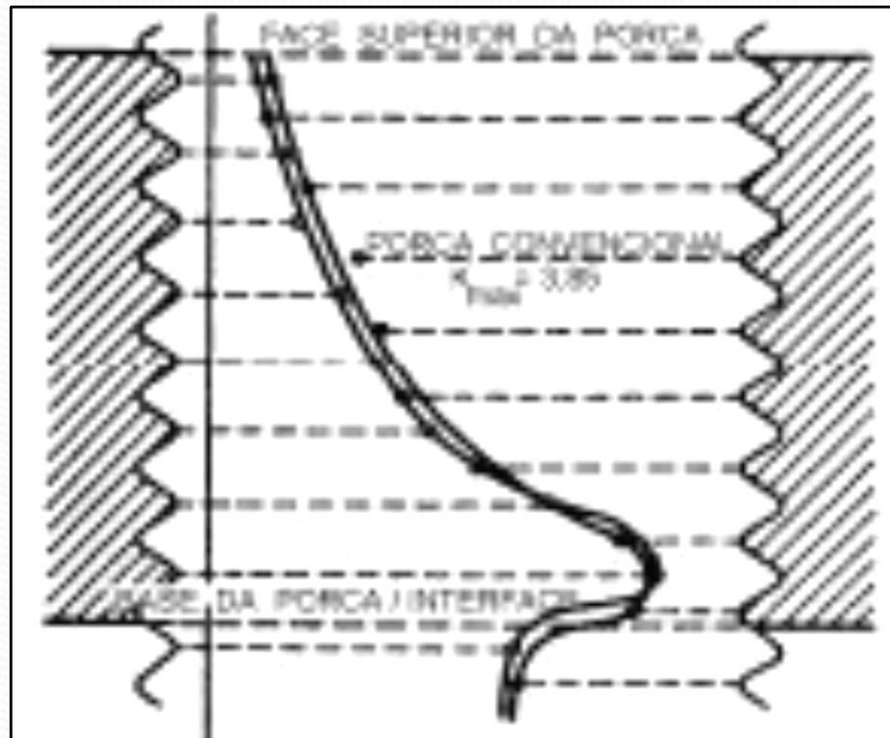
Todas amostras com Dureza entre 40HRC e 41HRC. (Norma requer 39HRC a 44HRC)

Superfície de fratura dos parafusos

Disposição dos parafusos rompidos



Todos os parafusos romperam no local de maior 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. Por isso, 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.



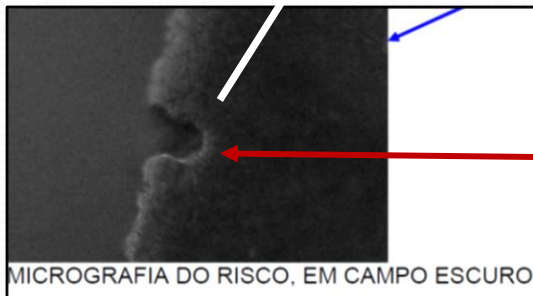
MARCAS DE PROPAGAÇÃO

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



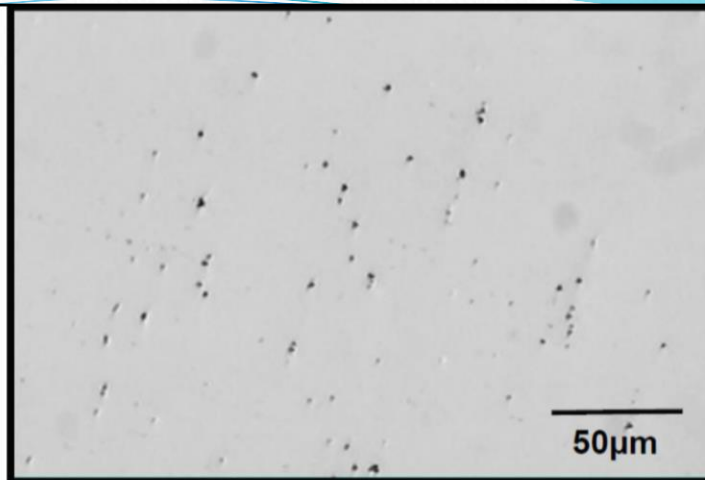
PROVÁVEL ORIGEM DA FRATURA

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.

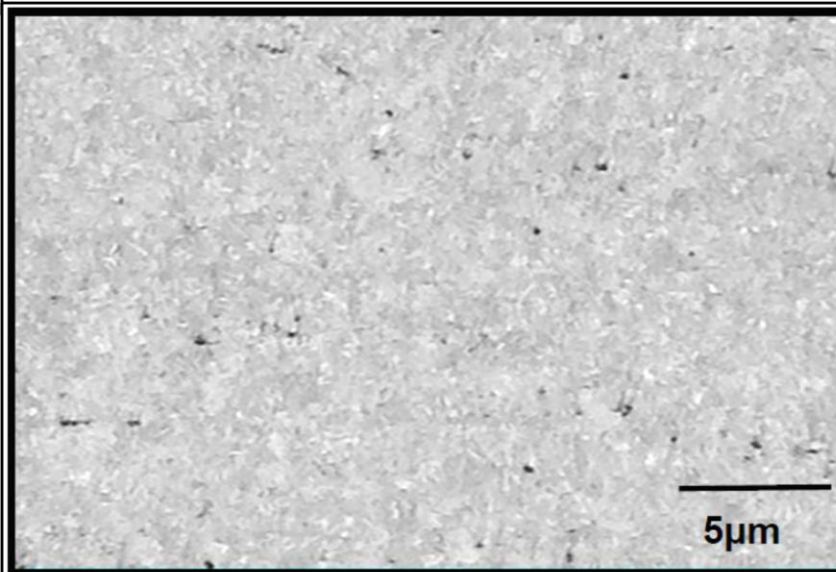


MICROGRAFIA DO RISCO, EM CAMPO ESCURO

ANÁLISE METALOGRÁFICA: INCLUSÕES E ESTRUTURA

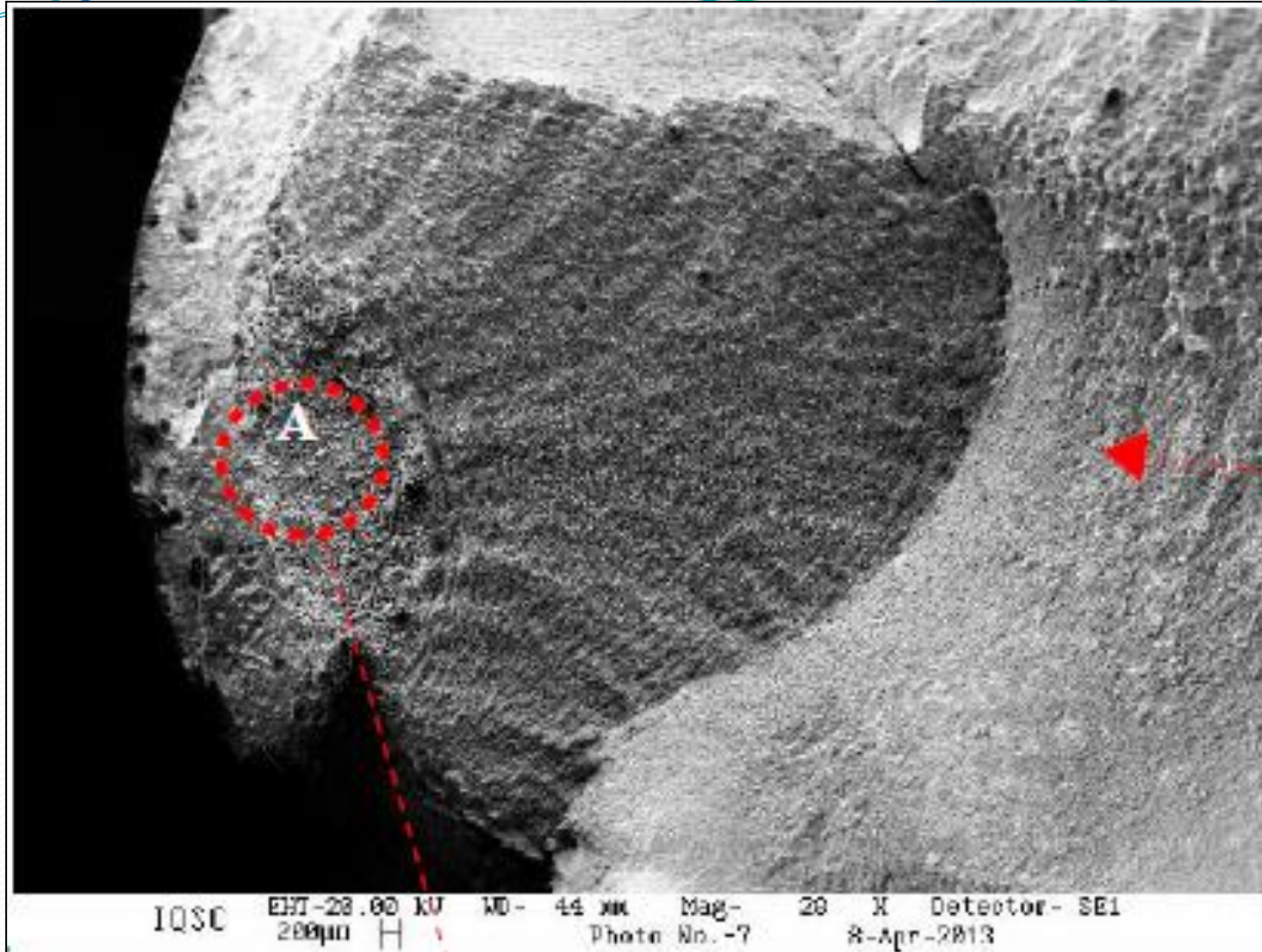


Amostra 5. Inclusões de óxido globular (tipo D), nível 2, série fina e grossa.



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.**

COMPORTA ENSECADDEIRA – JBM -03/2013



MONT. DEF. INF.





Prof.Dr. José Benedito Marcomini

AMOSTRAS ENVIADAS AO LABORATÓRIO

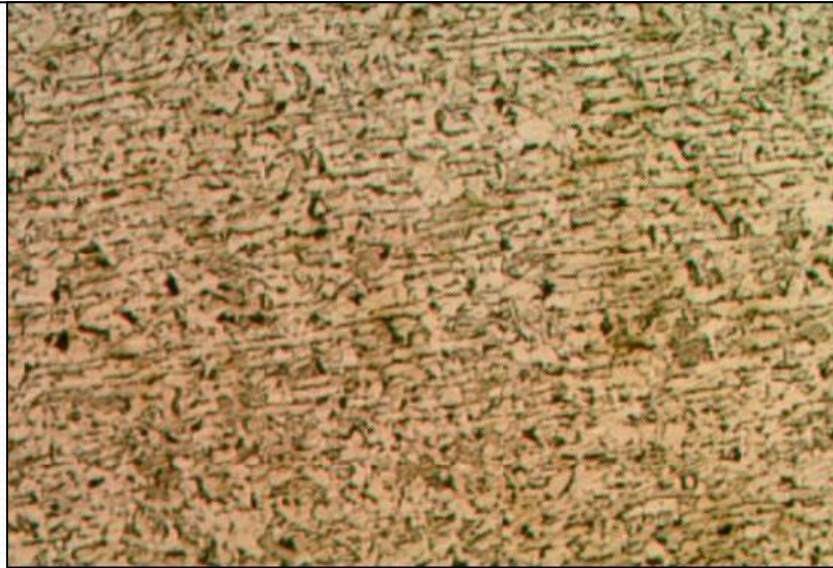


Prof.Dr. José Benedito Marcomini

ANÁLISES DAS AMOSTRAS

Tabela 1 – Resultados da análise química.

ELEMENTOS	Amostra 1	Amostra 2	Aço ASTM A36
C (%)	0,13	0,13	0,25 Max.
Mn(%)	0,79	0,79	-
Si(%)	0,17	0,16	0,40 Max.
S(%)	0,016	0,016	0,05 Max.
P(%)	0,023	0,023	0,04 Max.



Micrografia apresenta estrutura constituída de Ferrita e Perlita
Tamanho de Grão 7.

Ataque: Nital 3%. Aumento 100X.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

ANÁLISES DAS AMOSTRAS

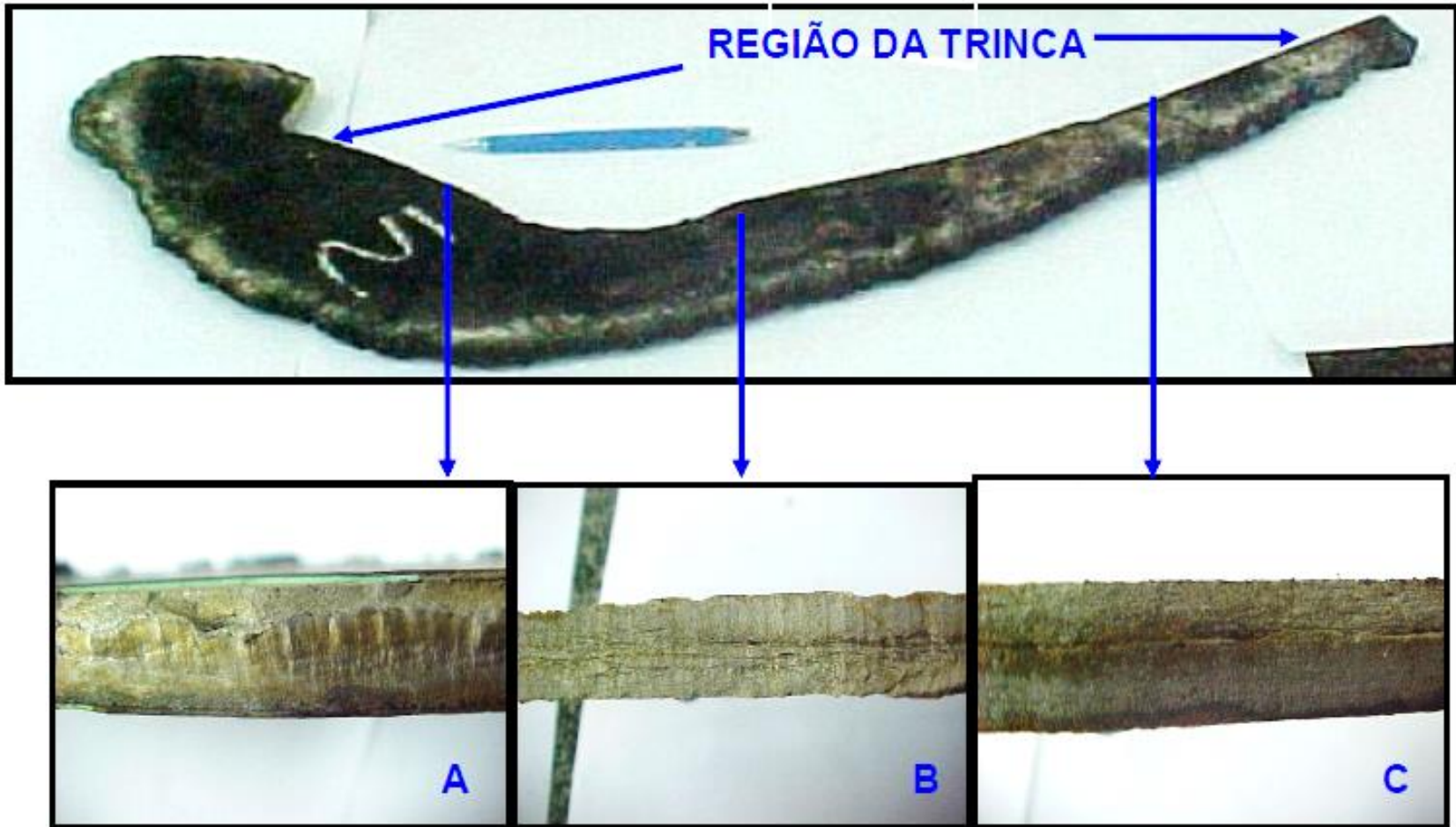
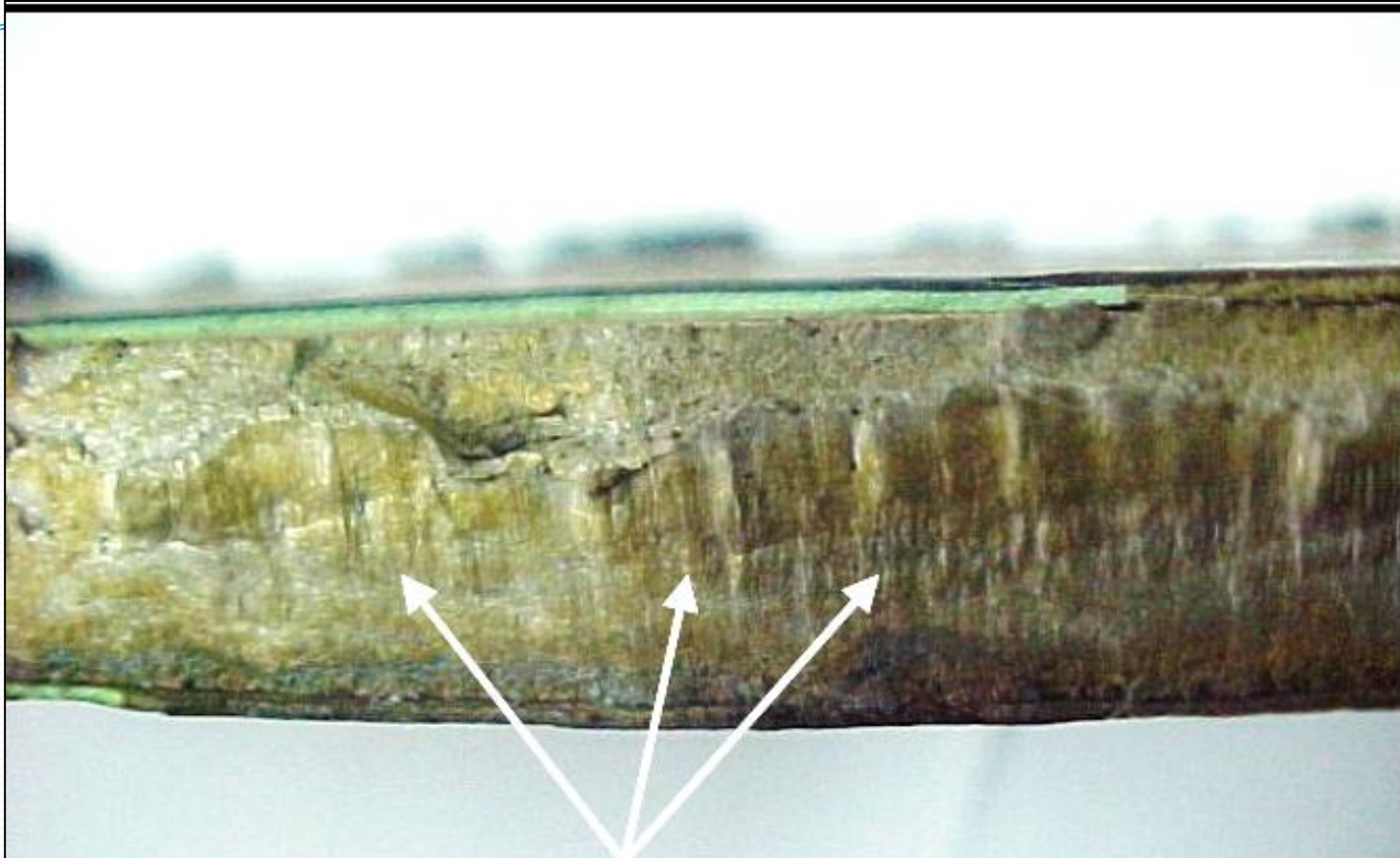


Figura1 – Amostra submetida à análise de fratura.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

SUPERFÍCIE DE FRATURA



MARCAS DE PROPAGAÇÃO ESTÁVEL POR FADIGA: “SINGLE SHEAR PLANE”

Figura 1A – Superfície de fratura. Propagação da fratura por fadiga.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

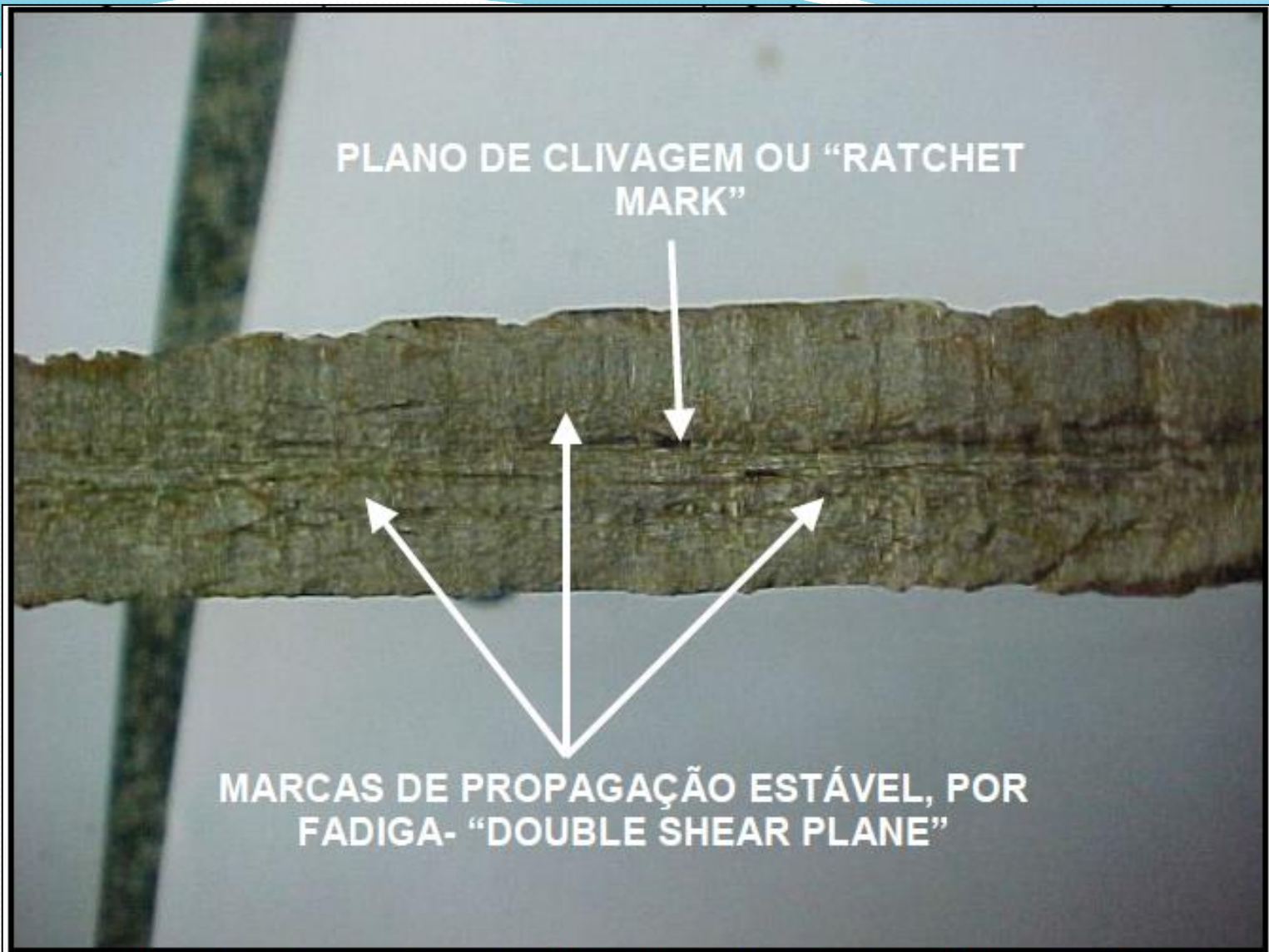


Figura 1B - Superfície de fratura. Propagação da fratura por fadiga.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

ANÁLISES DAS AMOSTRAS

ASM Metals Handbook, Vol11

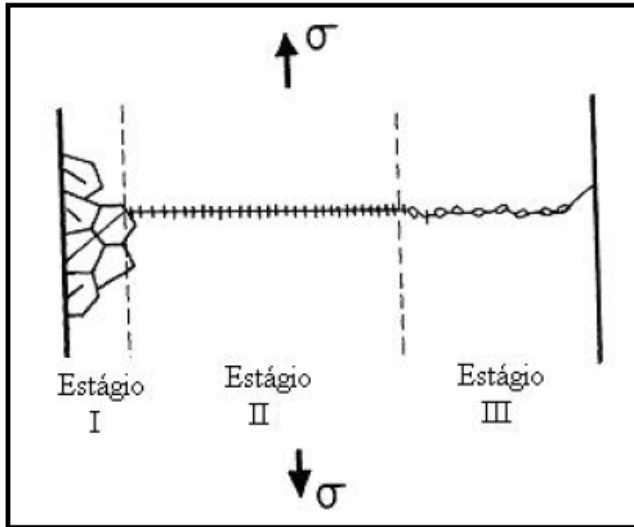
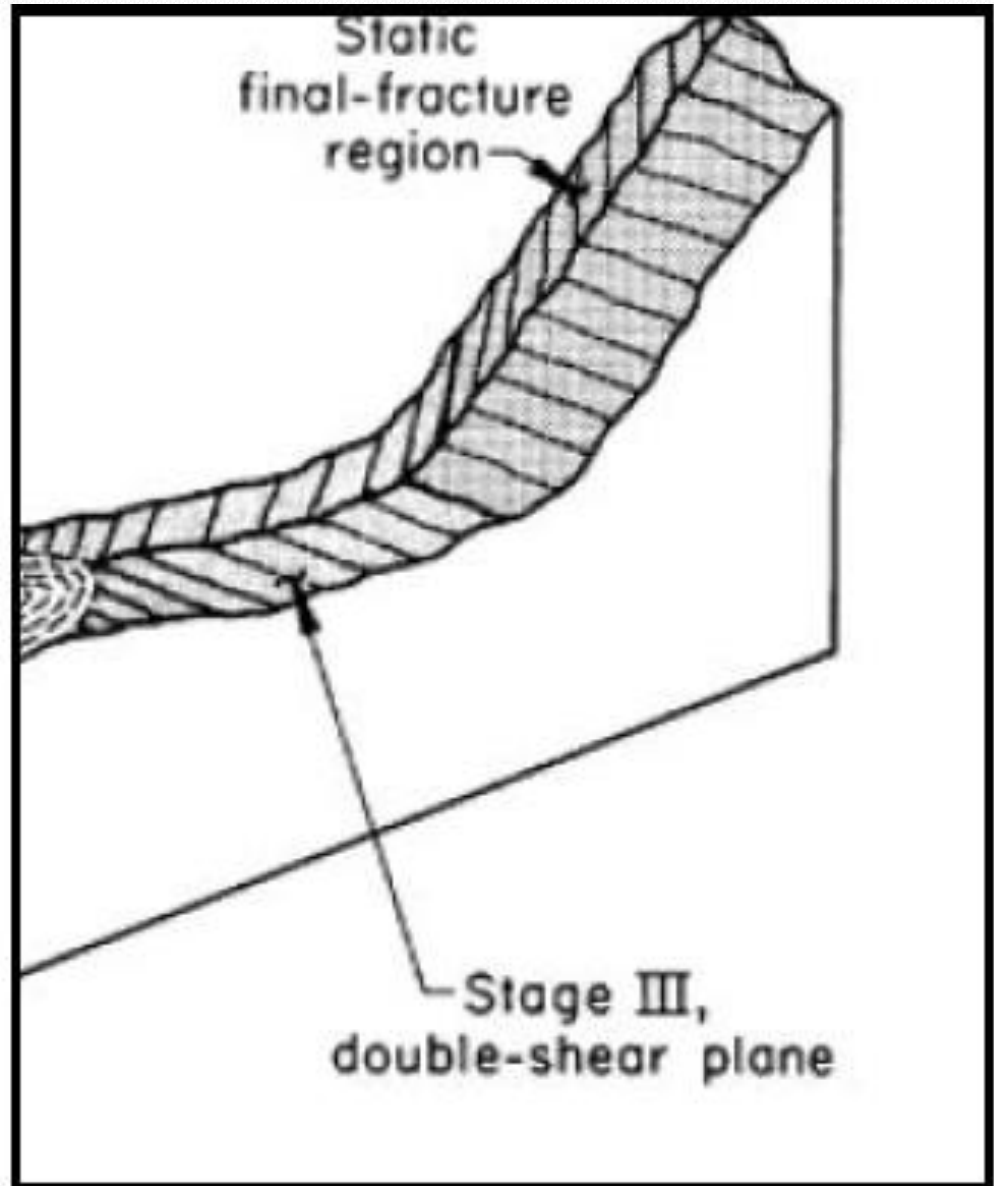


Figura 2 – Estágios de propagação da trinca por fadiga.





FIM

Prof.Dr. José Benedito Marcomini