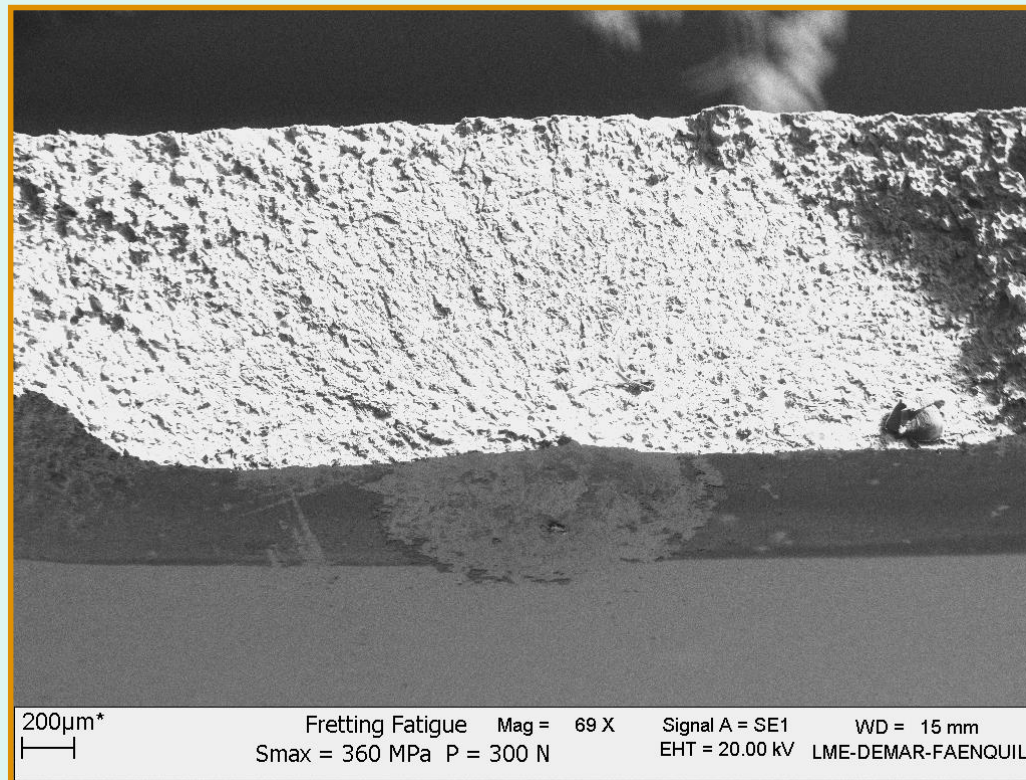


PARTE 6: FADIGA POR *FRETTING*



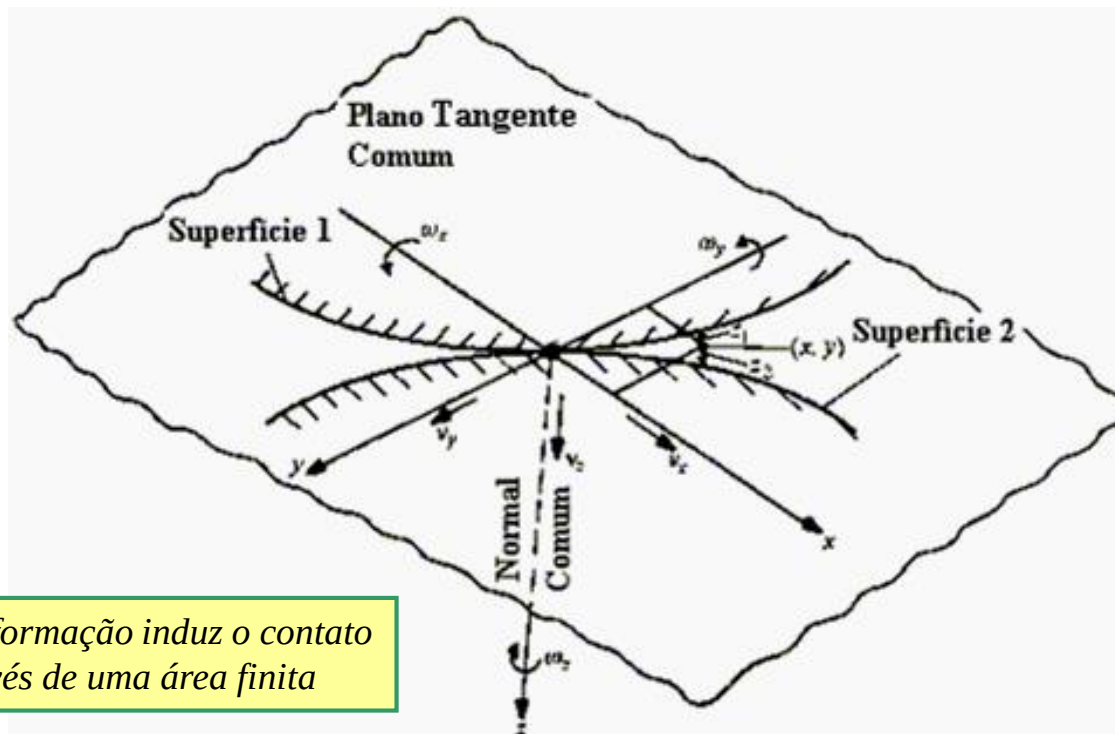
MECÂNICA DO CONTATO

Visão Geral

- Calcular tensões e deformações nos corpos sob diferentes formas de contato.

Quadro de referência centrado no ponto de contato entre duas superfícies; as velocidades linear e angular de cada corpo em relação a este quadro são:

$$\begin{cases} v_1 = V_1 - V_0 \\ v_2 = V_2 - V_0 \\ \omega_1 = \Omega_1 - \Omega_0 \\ \omega_2 = \Omega_2 - \Omega_0 \end{cases}$$



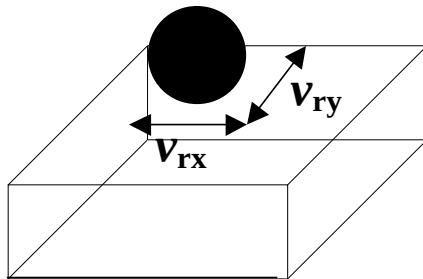
A deformação induz o contato através de uma área finita

Forças transmitidas entre as superfícies em contato:

$$\begin{cases} P = \int_A p(x, y) dA \\ Q_x = \int_A q_x(x, y) dA \\ Q_y = \int_A q_y(x, y) dA \end{cases}$$

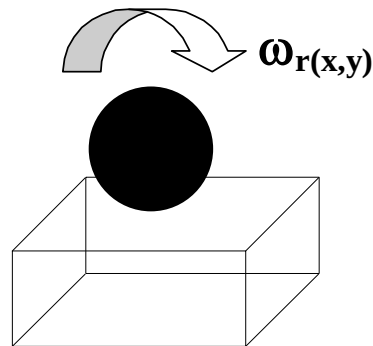
TIPOS BÁSICOS DE MOVIMENTO

Deslizamento



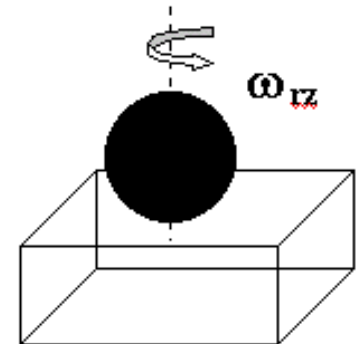
$$\begin{cases} v_{rx} = v_{x1} - v_{x2} \\ v_{ry} = v_{y1} - v_{y2} \end{cases}$$

Rolamento



$$\begin{cases} \omega_{rx} = \omega_{x1} - \omega_{x2} = \Omega_{x1} - \Omega_{x2} \\ \omega_{ry} = \omega_{y1} - \omega_{y2} = \Omega_{y1} - \Omega_{y2} \end{cases}$$

Rotação

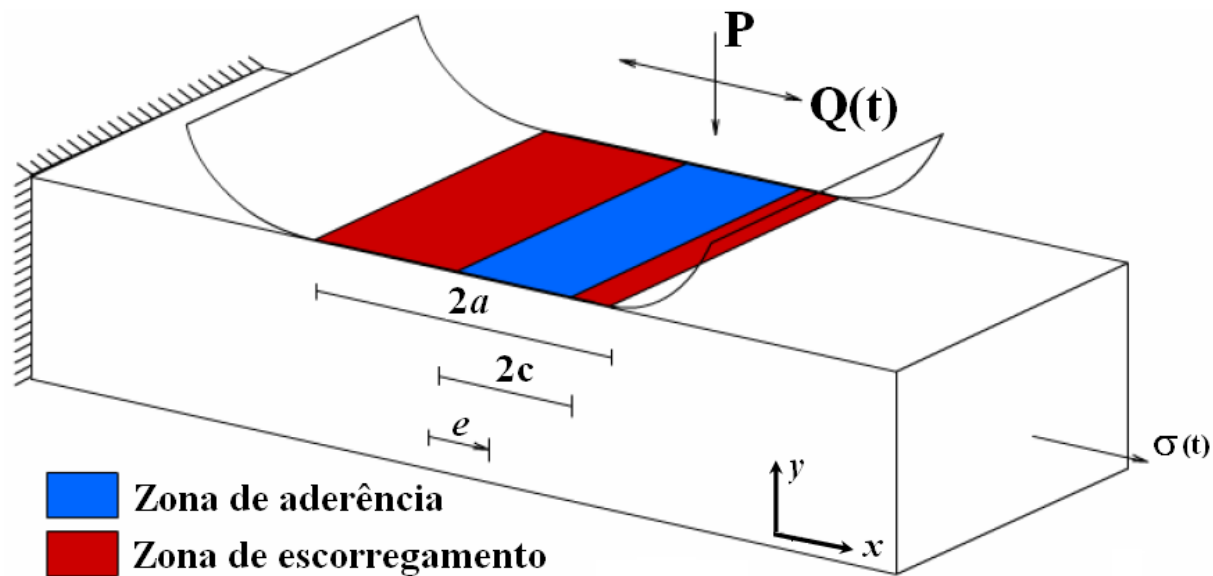


$$\begin{cases} \omega_{rz} = \omega_{z1} - \omega_{z2} \\ \omega_{rz} = \Omega_{z1} - \Omega_{z2} \end{cases}$$

TIPOS BÁSICOS DE MOVIMENTO

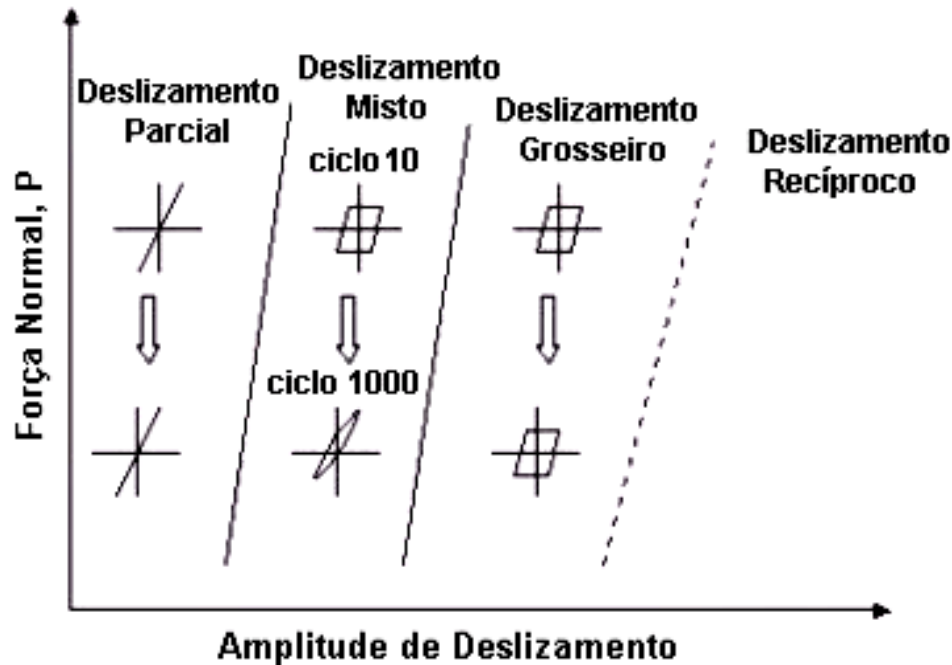
Fretting

- Quando o deslizamento oscilatório ocorre na forma de pequenos deslocamentos relativos em uma parte (próximo à periferia) da área de contato, enquanto as duas superfícies continuam fixas na porção central da região de contato.

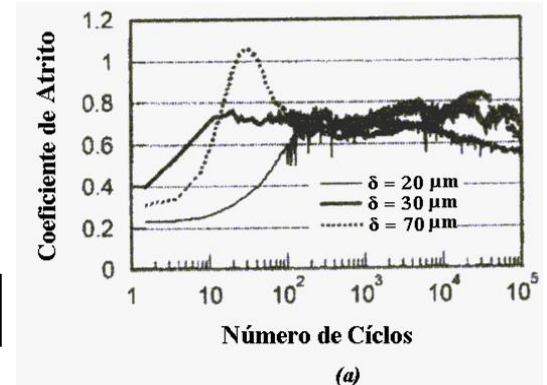
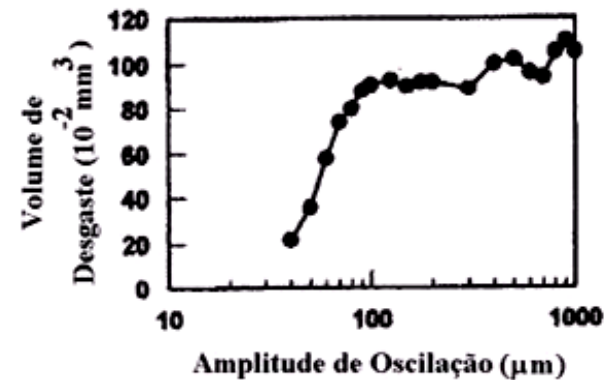


CONTATO POR DESLIZAMENTO

Regimes de deslizamento

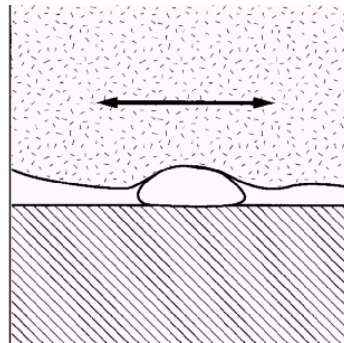
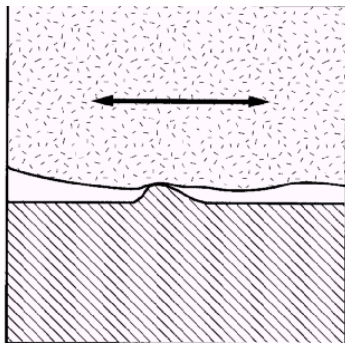


Variação do coeficiente de atrito com o número de ciclos

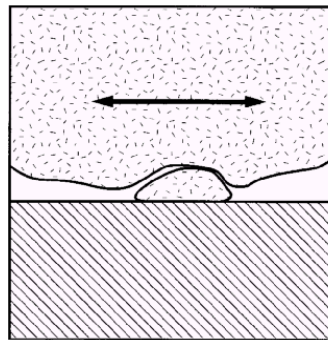


MECANISMOS DE DESGASTE

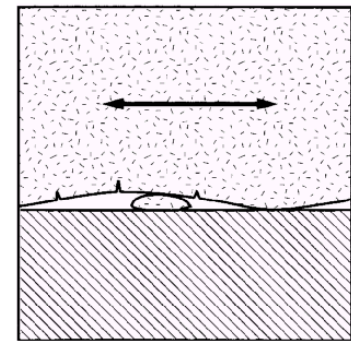
Abrasão



Adesão

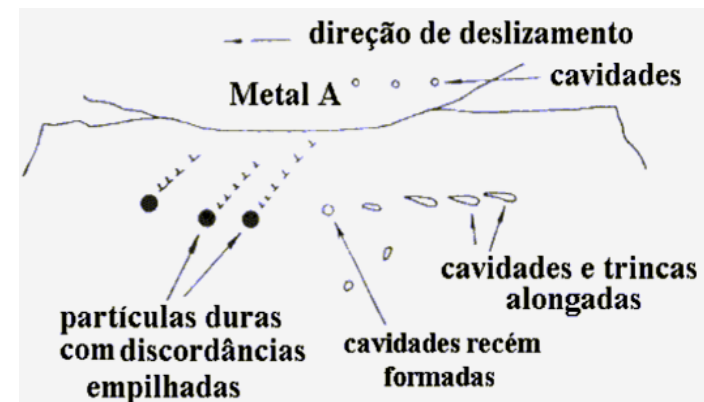


Fadiga



Teoria da Delaminação

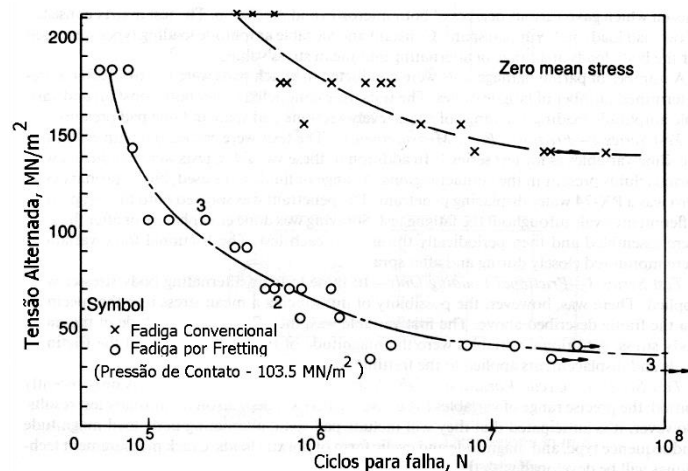
- Metais com durezas diferentes
- Geração de discordâncias
- Maior densidade sub-superficial
- Formação de vazios e trincas
- Partículas de desgaste (lâminas)
- Quebra ou deformação das partículas



FADIGA POR FRETTING

Fretting

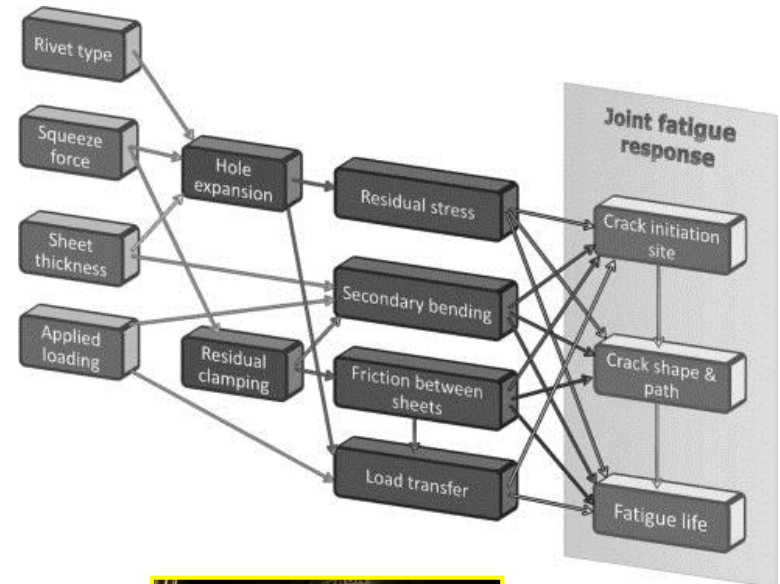
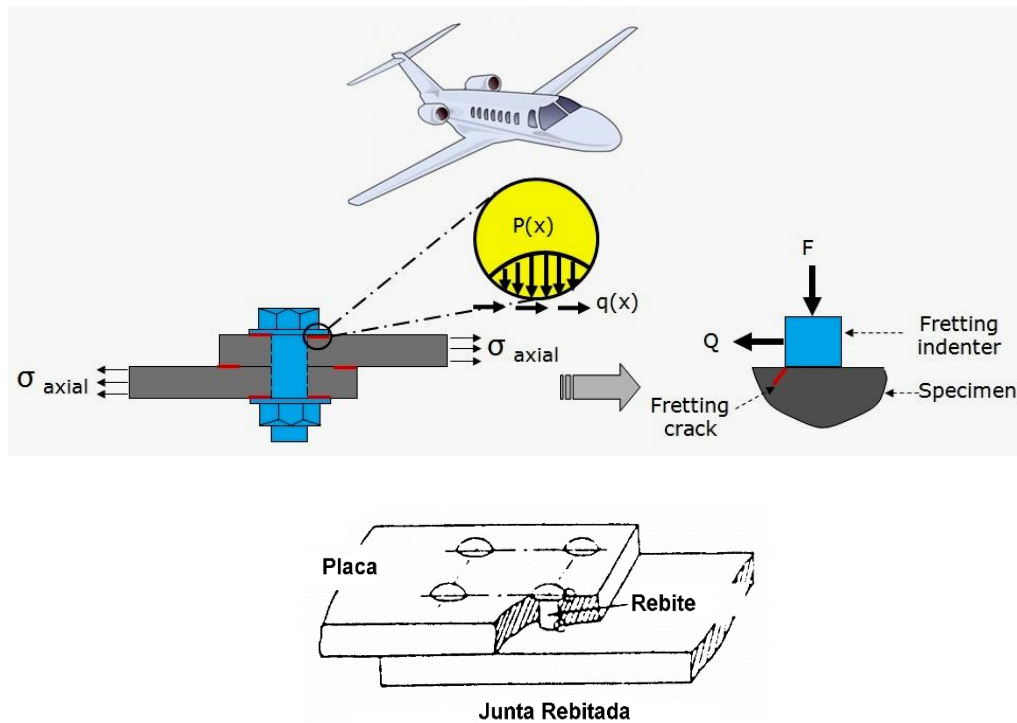
- Dois corpos pressionados um contra o outro por uma carga estática.
- Deslizamentos oscilatórios de baixa amplitude ($< 0,1$ mm) podem ocorrer entre as superfícies. Causas: vibrações, cargas cíclicas ou temperatura.
- Micro-soldas continuamente se formam e quebram: formação de pites.
- Fragmentos de metal arrancados podem oxidar, formando partículas de óxidos que, ao ficar aprisionados entre as superfícies, causam desgaste.
- Degradação das superfícies por este conjunto de fenômenos: *Fretting*.
- Se um meio agressivo está presente: Corrosão por *fretting*.
- Se carregamentos cíclicos são aplicados: Fadiga por *fretting*.



OCORRÊNCIA DA FADIGA POR *FRETTING*

EXEMPLOS

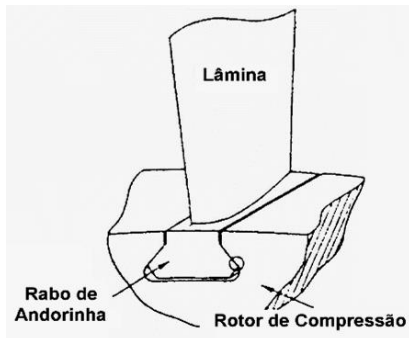
Juntas Rebitadas



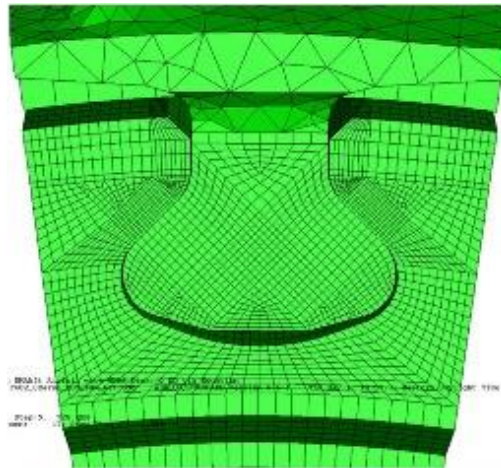
OCORRÊNCIA DA FADIGA POR *FRETTING*

EXEMPLOS

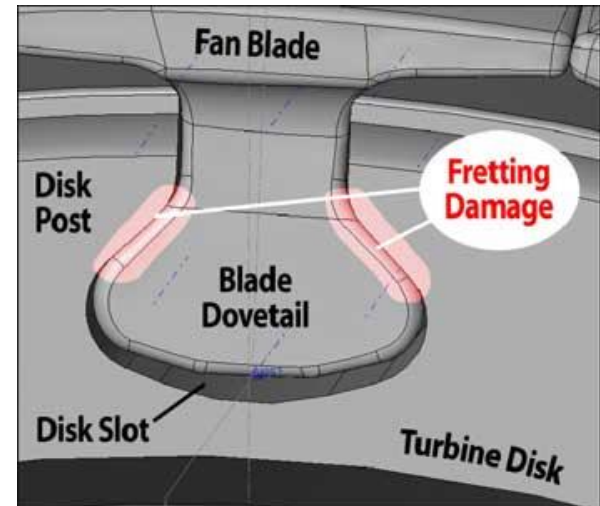
Encaixe das pás de turbinas



- *Modelo de Elementos Finitos*

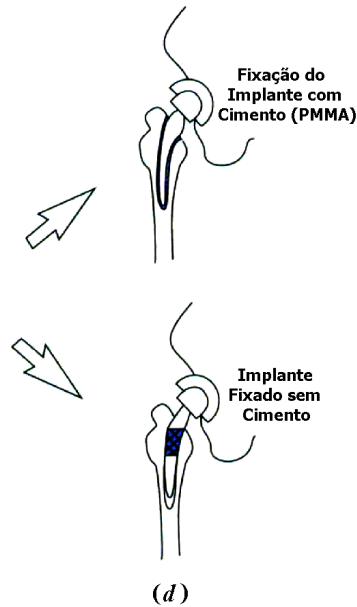
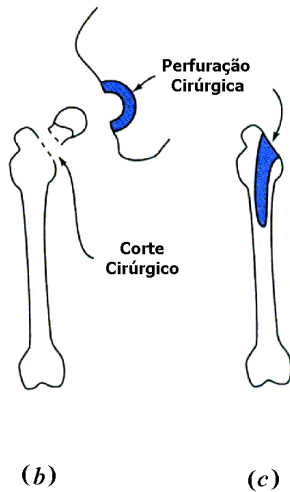
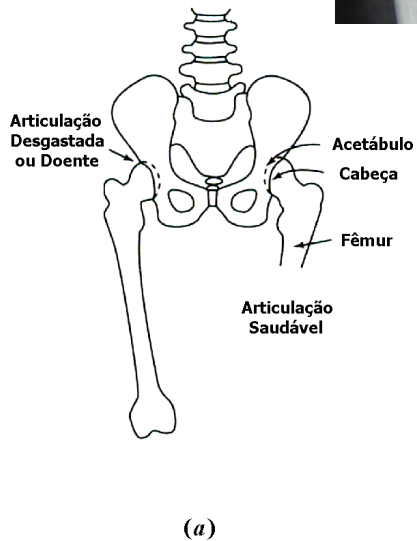


- *Exemplo de Ensaio de Fadiga por Fretting*

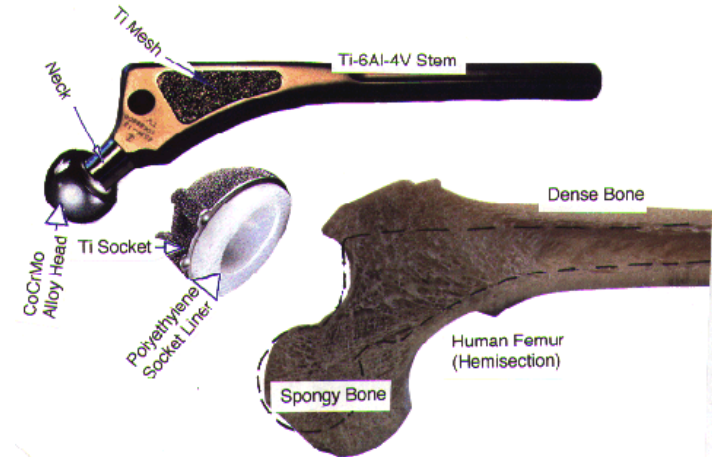


OCORRÊNCIA DA FADIGA POR *FRETTING*

Implantes



EXEMPLOS

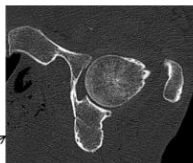
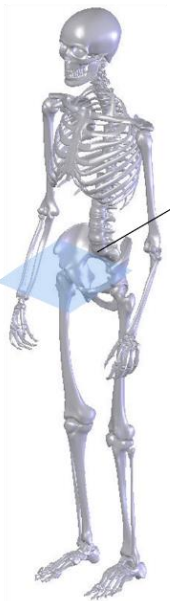


OCORRÊNCIA DA FADIGA POR *FRETTING*

EXEMPLOS

Implantes (cont.)

a) CT scan of patient hip

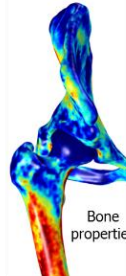


Sectional image from CT scan

b) Generation of geometry & bone properties

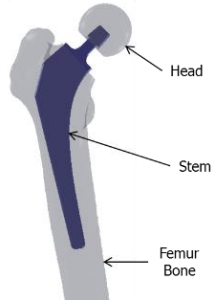


Hip geometry



Bone properties

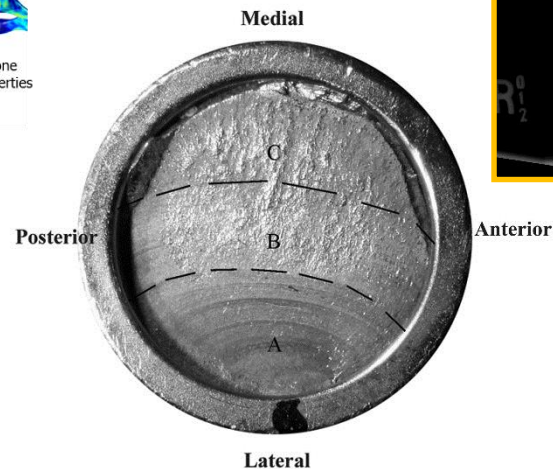
c) Virtual implantation of hip replacement



Head

Stem

Femur Bone



EVOLUÇÃO DO DANO EM FADIGA POR *FRETTING*

Marcas de desgaste (*Fretting Scars*)

- Deslizamento parcial favorece início da trinca na fronteira entre as duas regiões.
- Deslizamento total favorece o desgaste induzido pela formação de detritos.

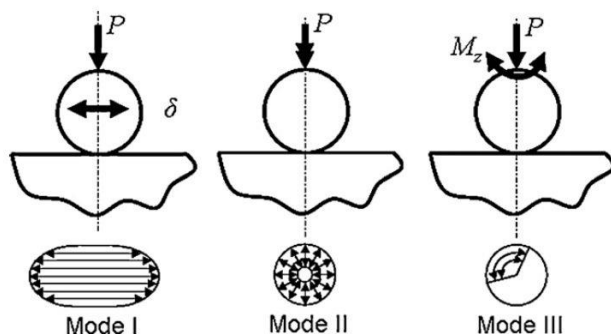
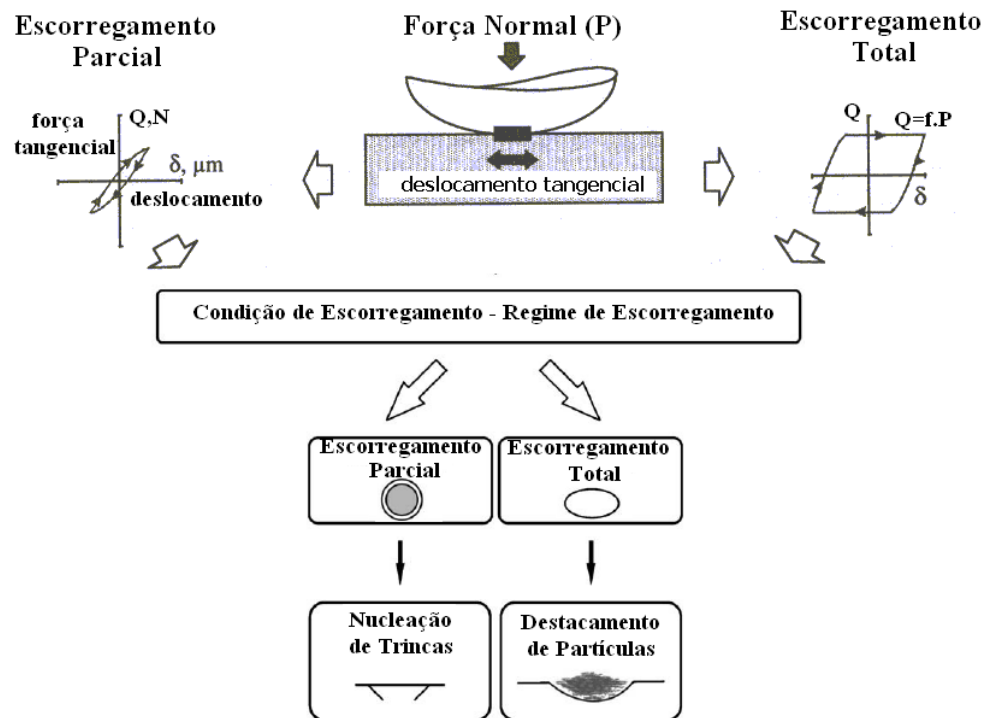
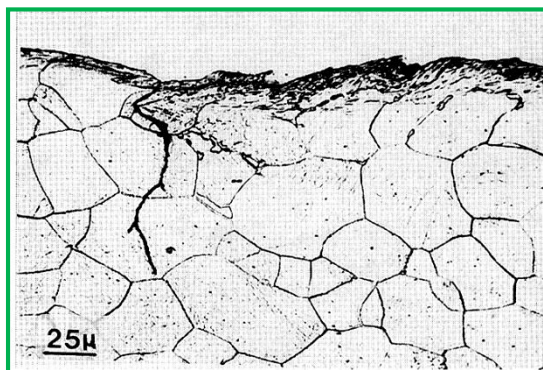


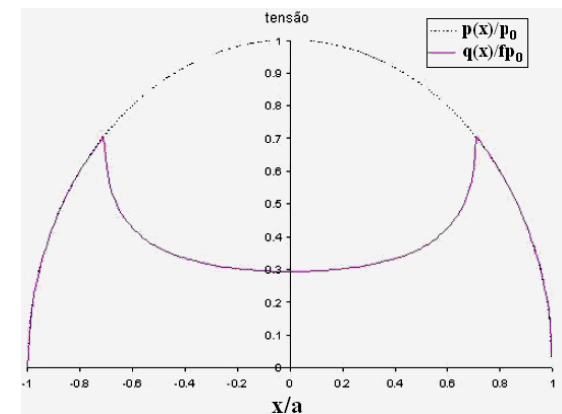
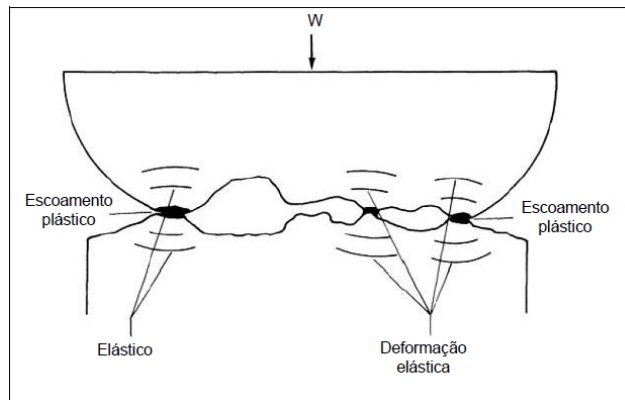
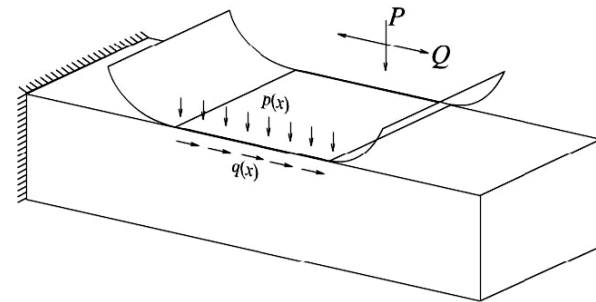
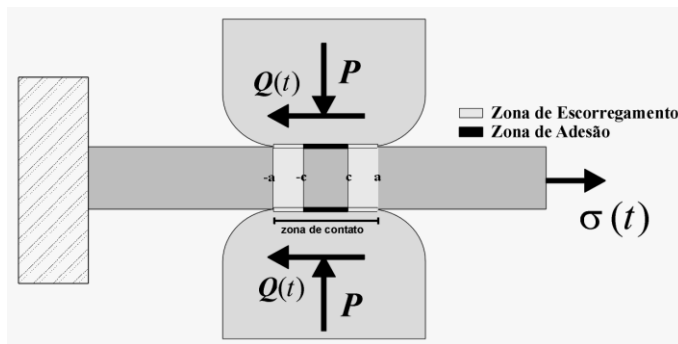
Fig. 1. Three different fretting modes depending on the forces and moments transmitted through the contact. Slips are transversal in fretting mode I; slips are radial in fretting mode II; slips are circumferential in fretting mode III.



TENSÕES DE CONTATO

Distribuição de Tensões Elásticas

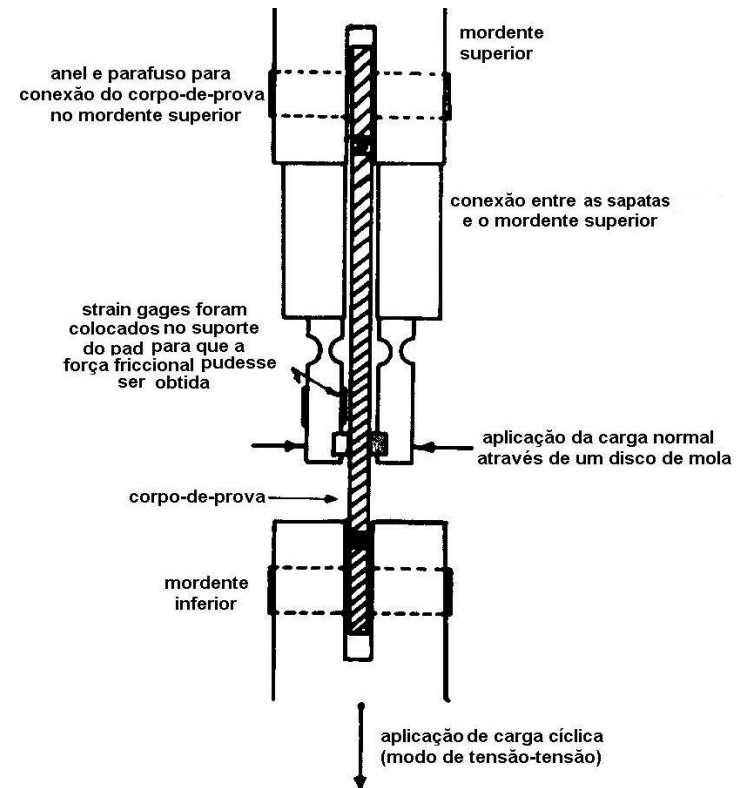
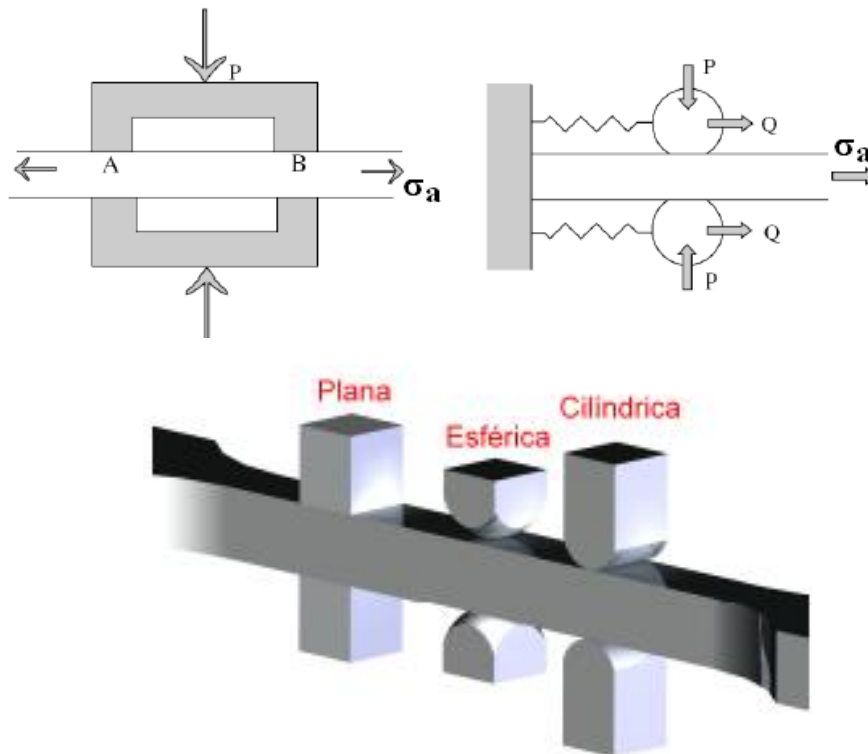
- Formulações analíticas para campo de tensões no contato hertziano.
- Em fadiga por fretting: tensões normais e cisalhantes.
- Área real de contato é limitada devido à rugosidade; tensão local muito elevada.



ENSAIOS DE FADIGA POR *FRETTING*

Dispositivos de *Fretting*

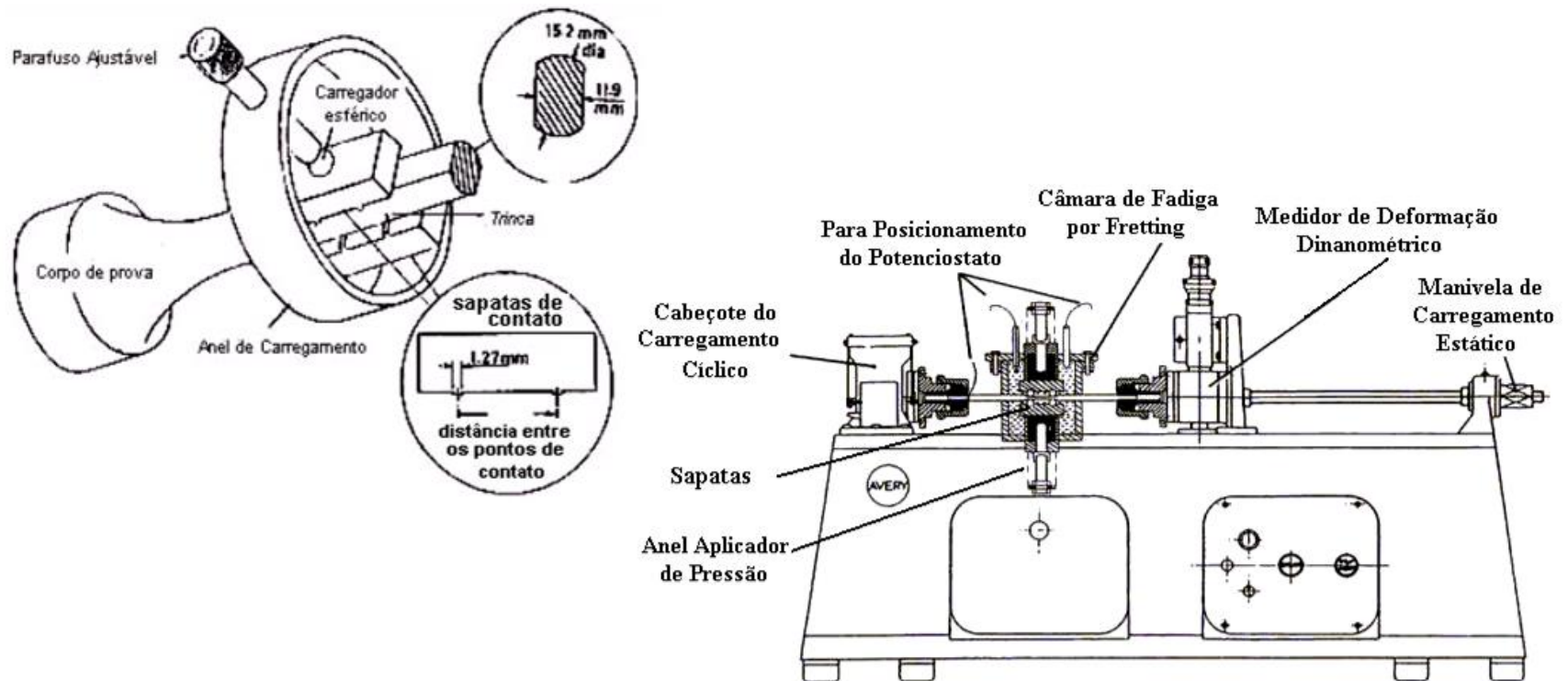
- Realizar ensaios com diferentes objetivos: Reproduzir uma situação real de falha; avaliar efeitos de variáveis mecânicas; investigar efeitos das condições do meio.
- Sapatas de *fretting* podem ter diferentes geometrias.



ENSAIOS DE FADIGA POR *FRETTING*

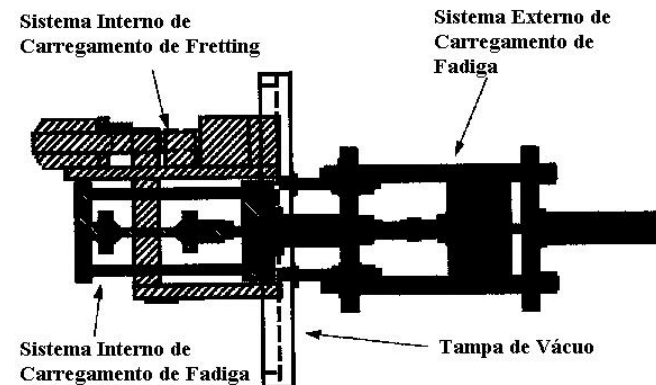
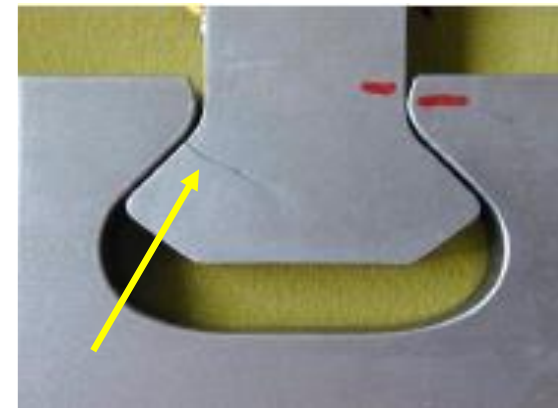
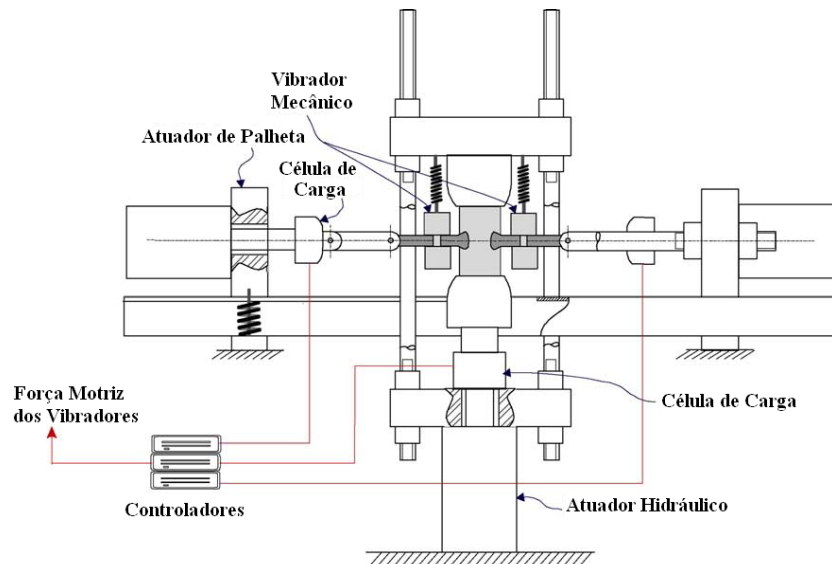
Dispositivos de *Fretting*

- Primeira norma ASTM para ensaios de fadiga por *fretting*: ASTM E 2789 (2010).
- Na literatura, encontram-se dispositivos com diferentes níveis de complexidade.



ENSAIOS DE FADIGA POR *FRETTING*

Dispositivos para ensaios de fadiga por *Fretting* (cont.)



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRET*TING

Titânio de pureza comercial

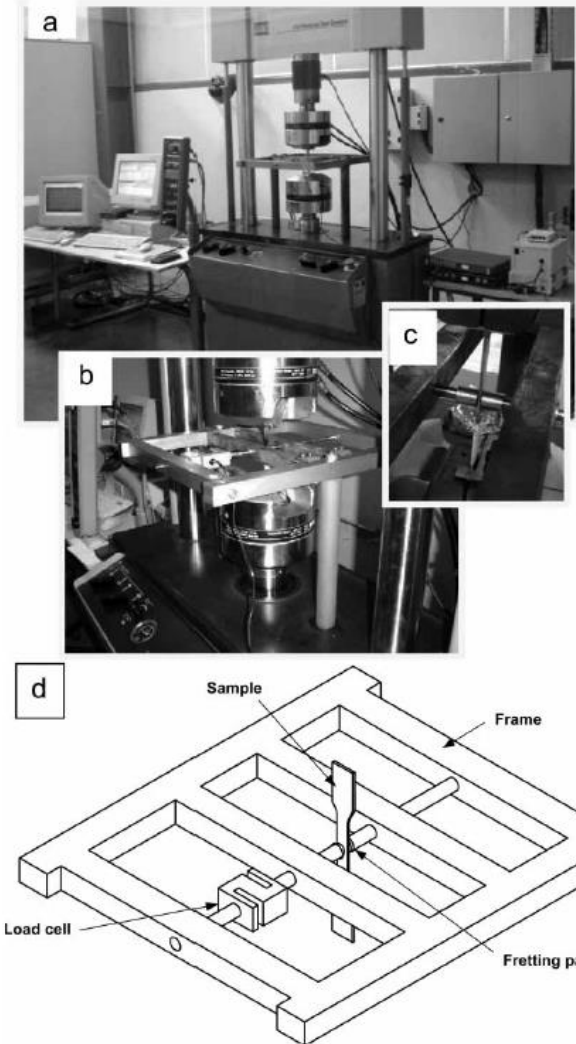
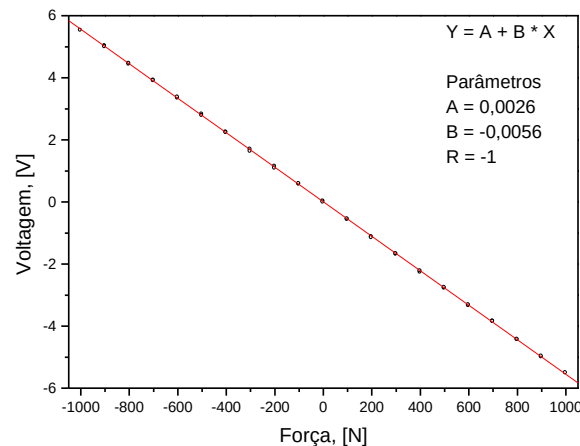
- Sapatas esféricas, cargas de contato de 100 a 900 N, frequência 10 Hz, razão de tensão $R = 0,1$.

Rossino, L.S., Dissertação de mestrado. Lorena: FAENQUIL, 2004.

Montagem do Experimento



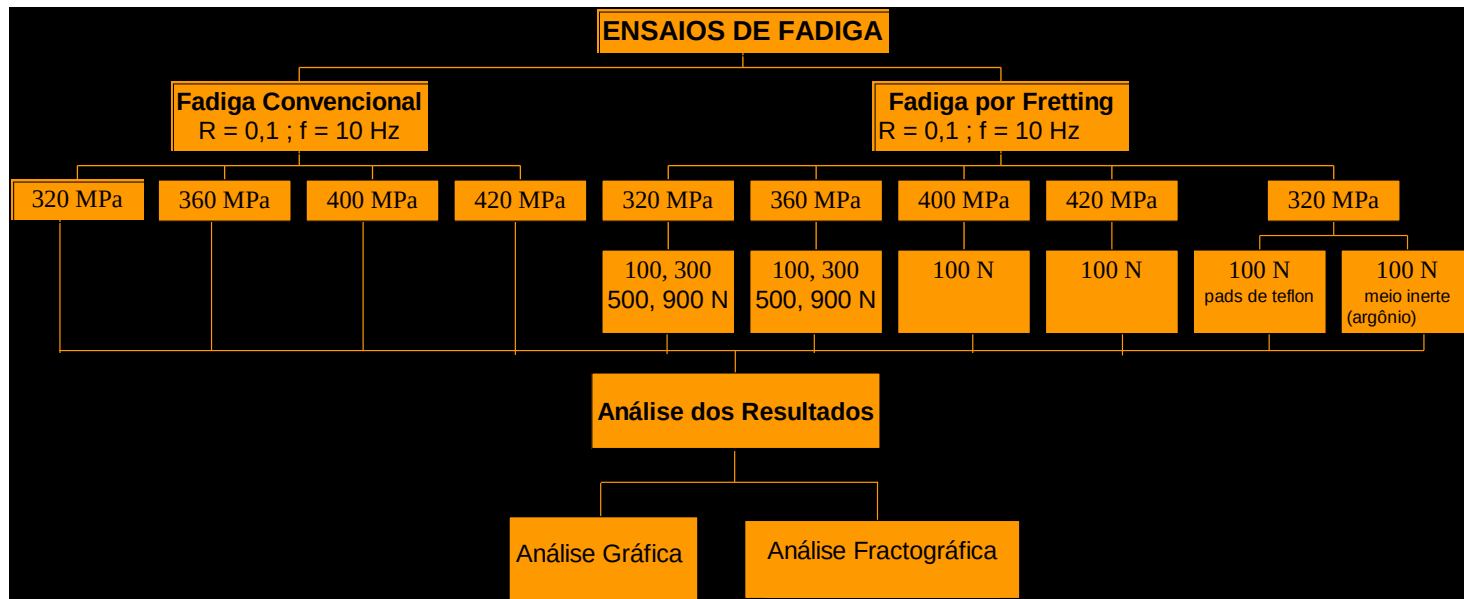
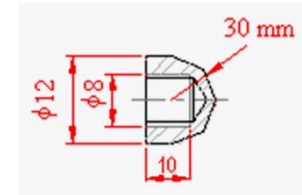
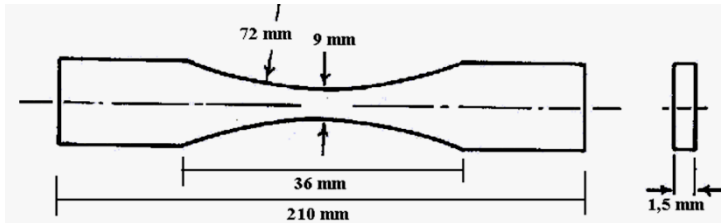
Calibração da célula de carga



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Esquema Experimental

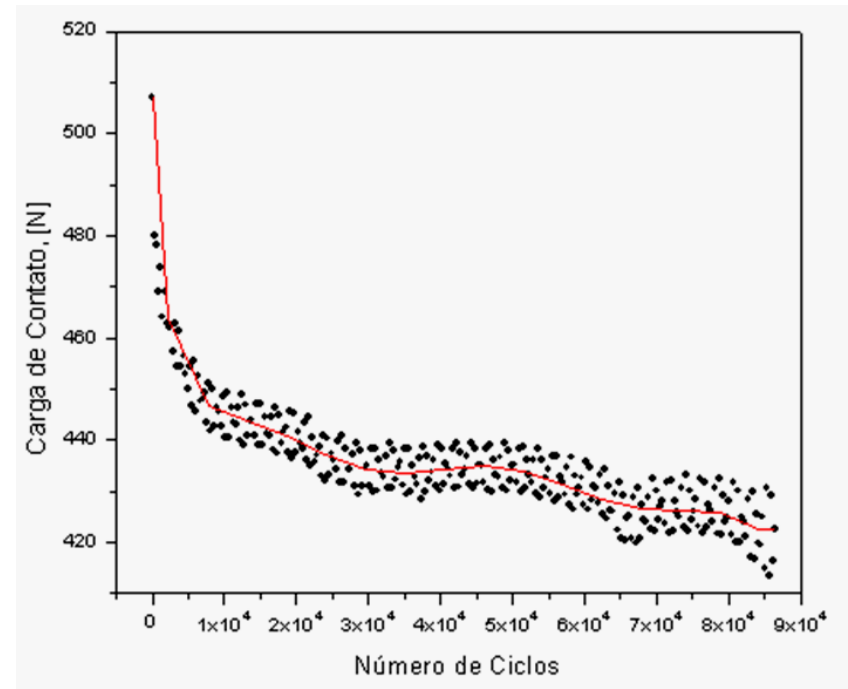
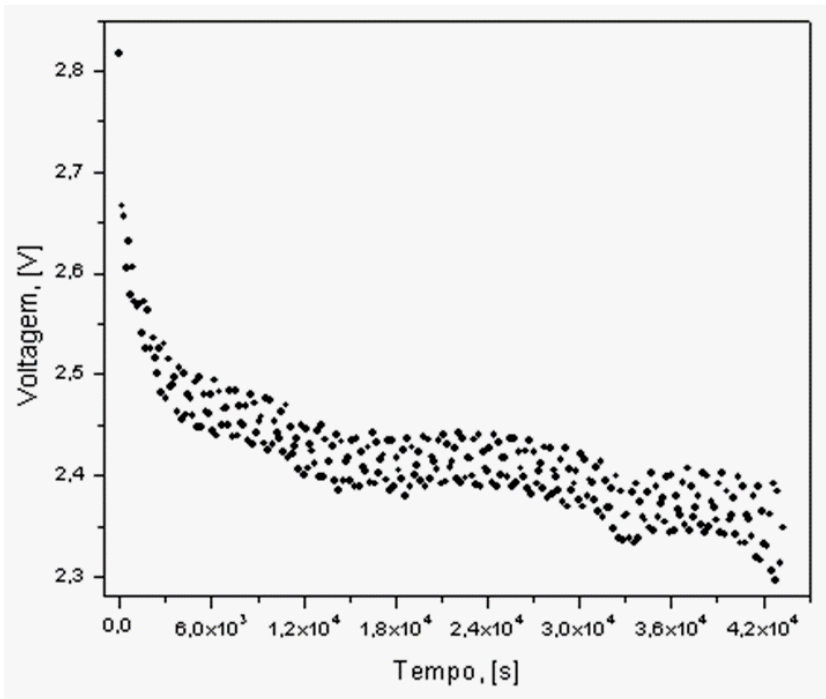
Forma e dimensões do corpo-de-prova e das sapatas de titânio.



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Evolução da Força de Contato

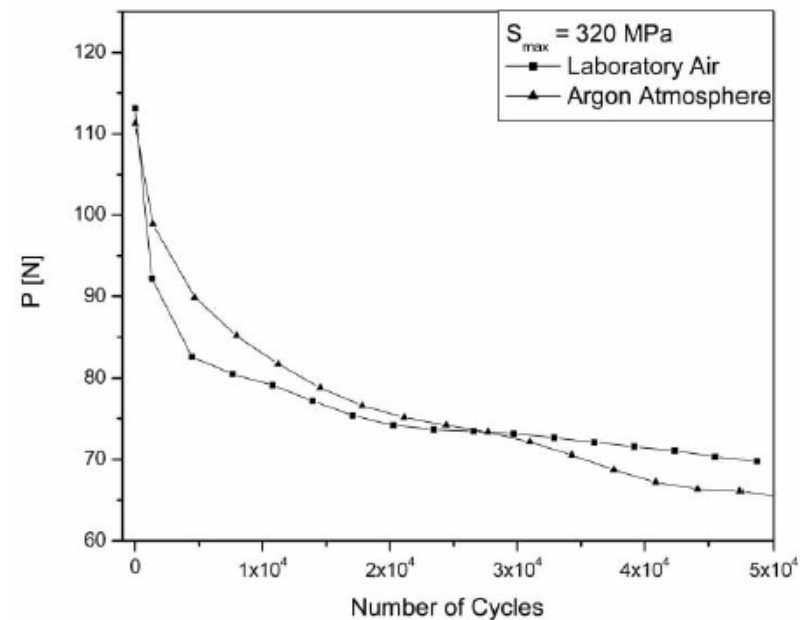
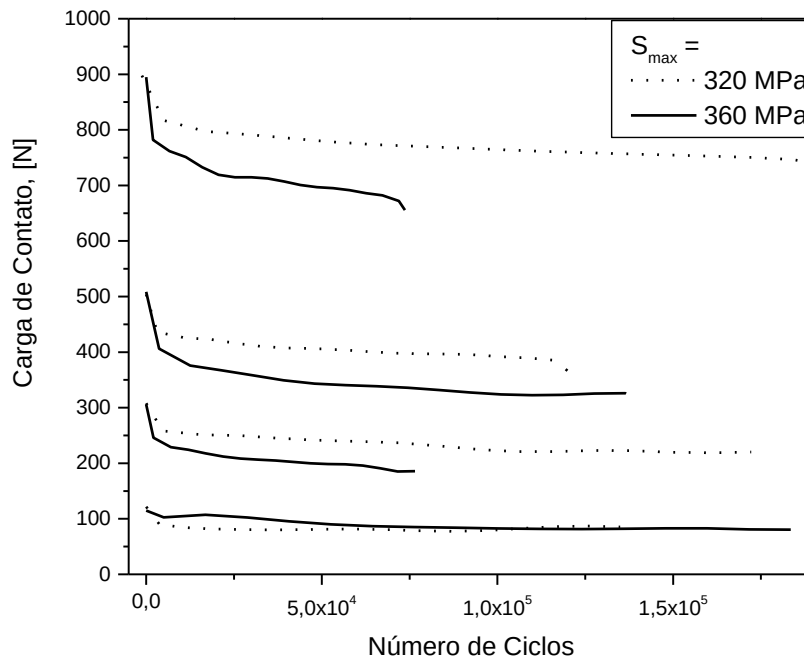
- Pontos coletados com taxa de amostragem de 50 Hz; carga tem uma oscilação.
- Obtenção de curva média (polinômio de grau 9).
- Queda inicial devida à acomodação das superfícies (*running in*).



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Evolução da Força de Contato

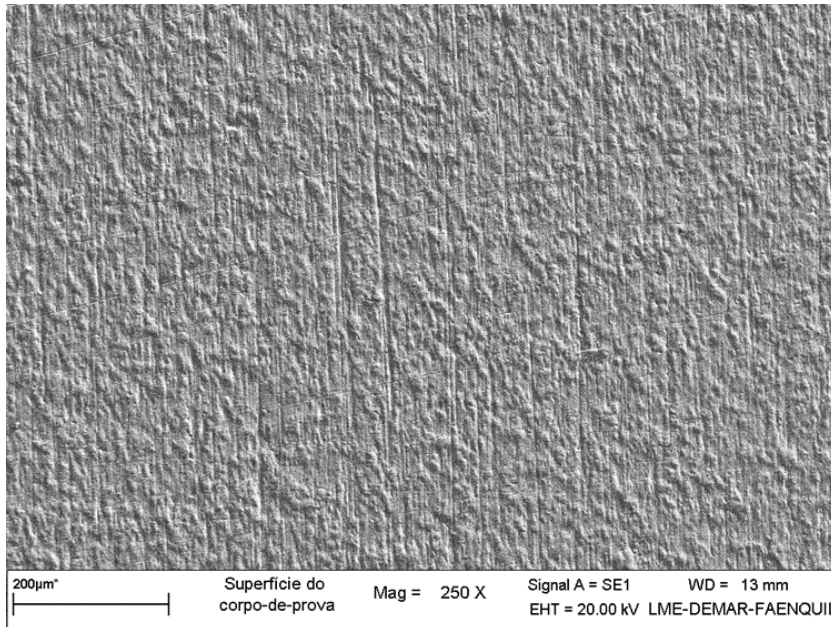
- Duração da queda entre 1000 e 5000 ciclos.
- Queda proporcionalmente maior para menores cargas de contato.
- Para uma dada carga de contato, a queda aumenta com a tensão de fadiga.
- Não foi observado efeito do ambiente sobre a variação da carga de contato.



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

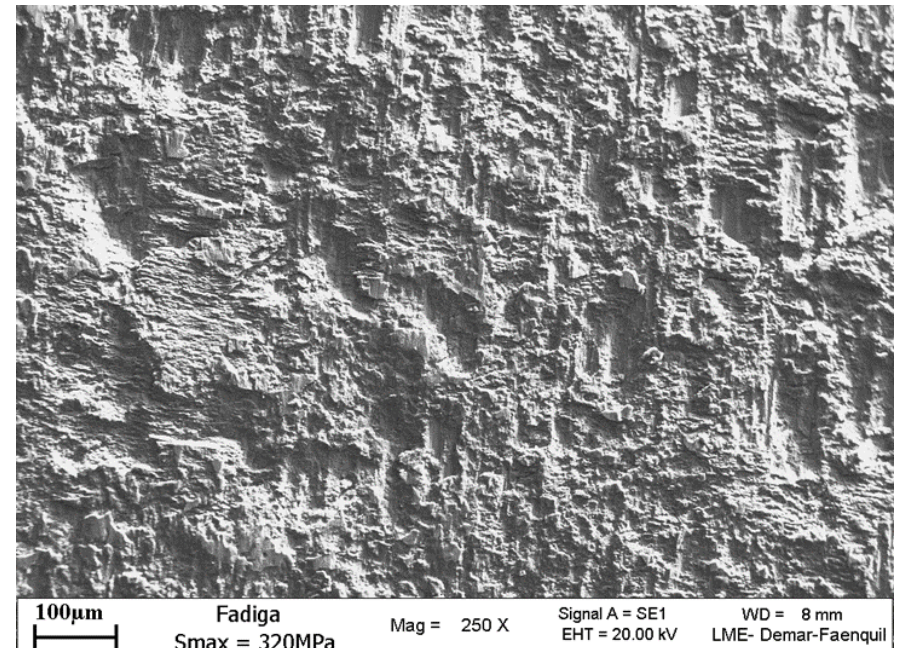
Dano na superfície

- Variação da rugosidade naa região do corpo-de-prova em contato com a sapata.



Acabamento original do corpo-de-prova

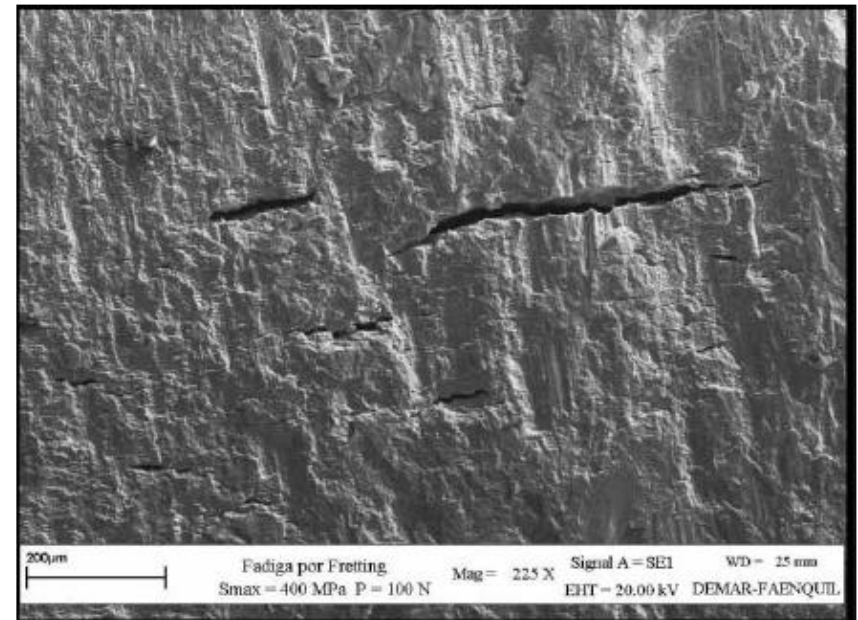
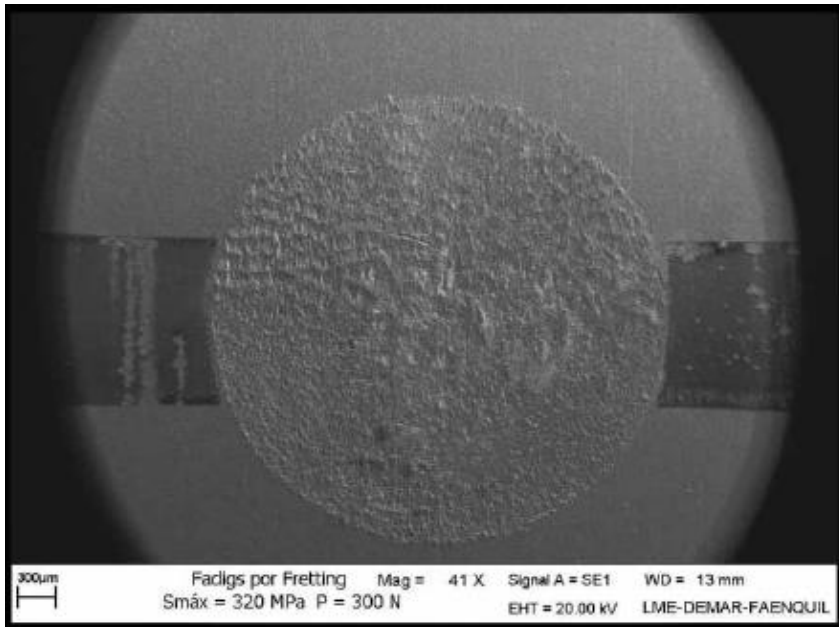
Superfície de contato após milhares de ciclos



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Dano na superfície

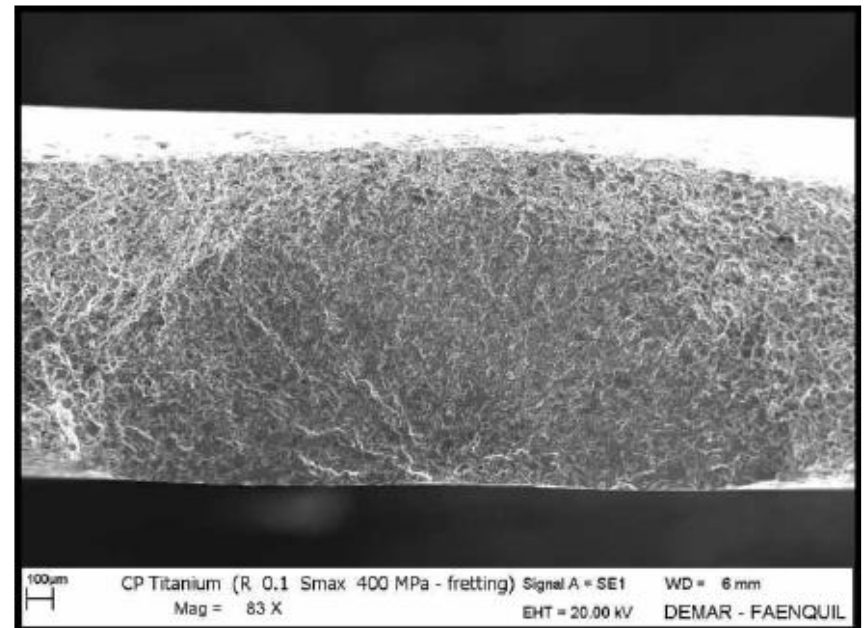
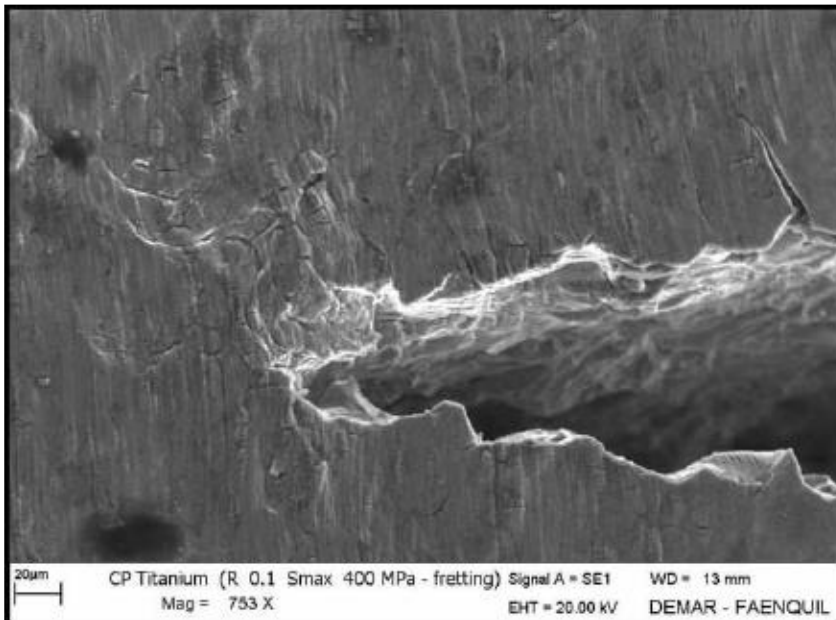
- Marca de *fretting* (*scar*); torna-se alongada a ciclagem (*cyclic creep*).
- Nucleação de trincas na região de contato.



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Fadiga

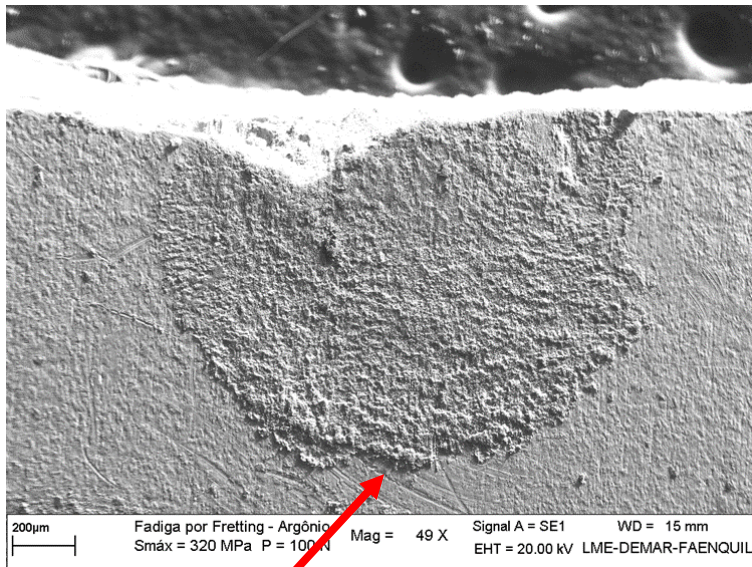
- Formação da trinca e característica da superfície de fratura.



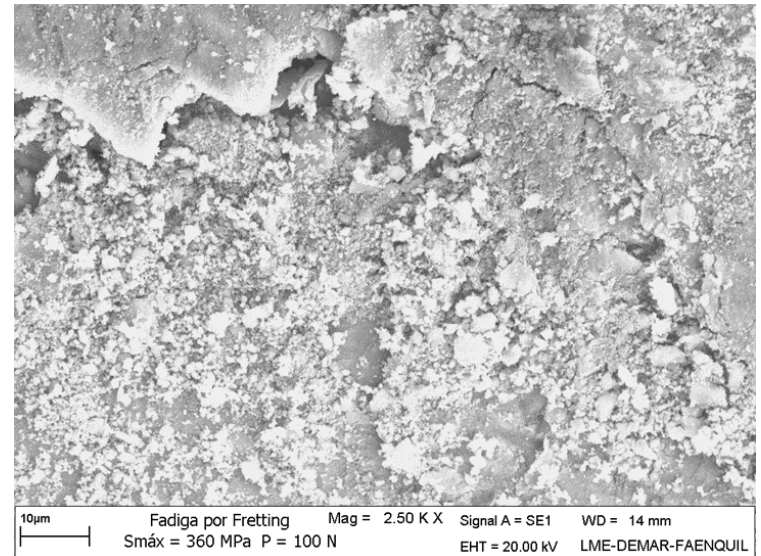
ESTUDOS EM FADIGA POR *FRET*TING

Formação de detritos (*debris*)

- Processo de delaminação retira fragmentos do metal, os quais tornam-se quebradiços ao se oxidarem e, estando aprisionados entre as superfícies do corpo-de-prova e da sapata, são triturados, formando um pó.



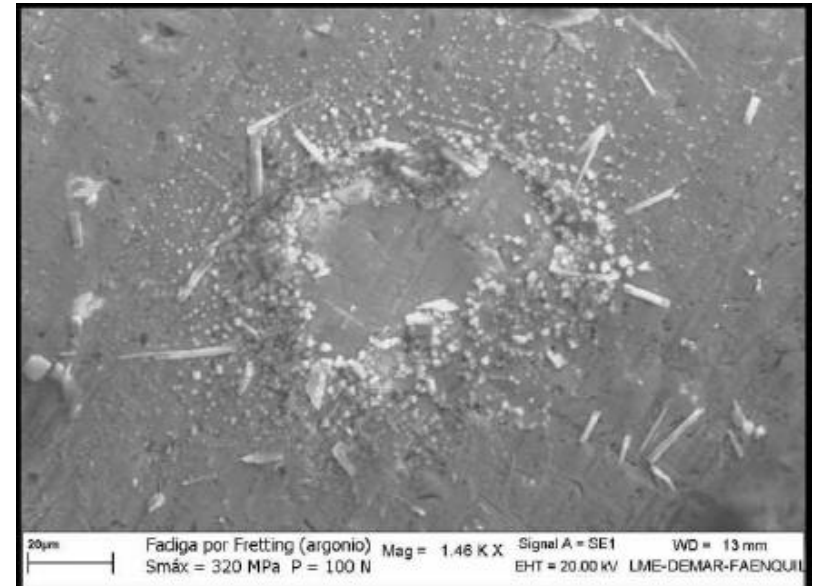
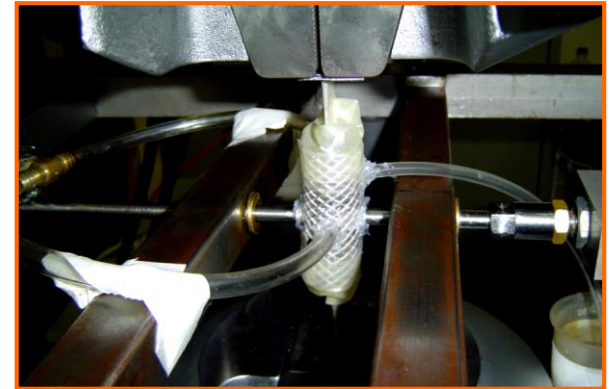
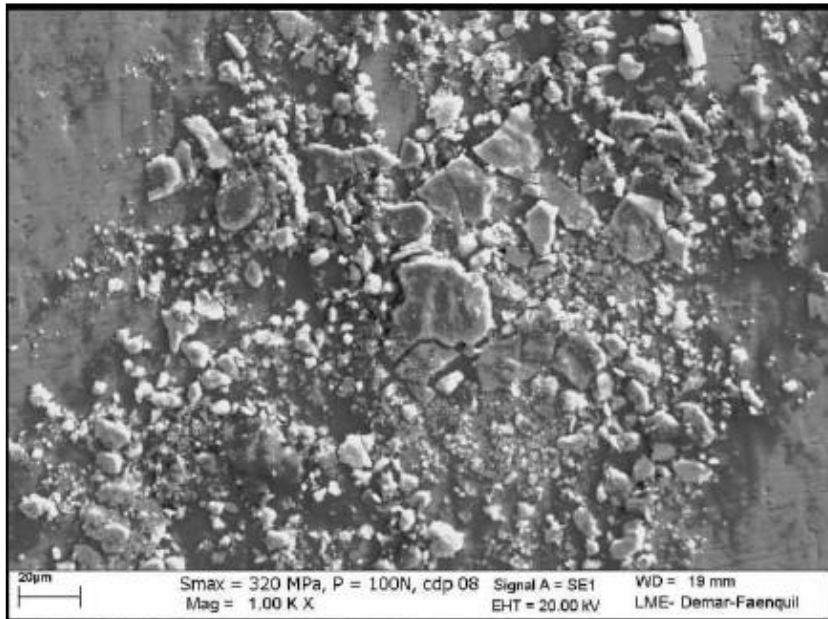
Detritos formados durante o ensaio



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRET*TING

Formação de detritos

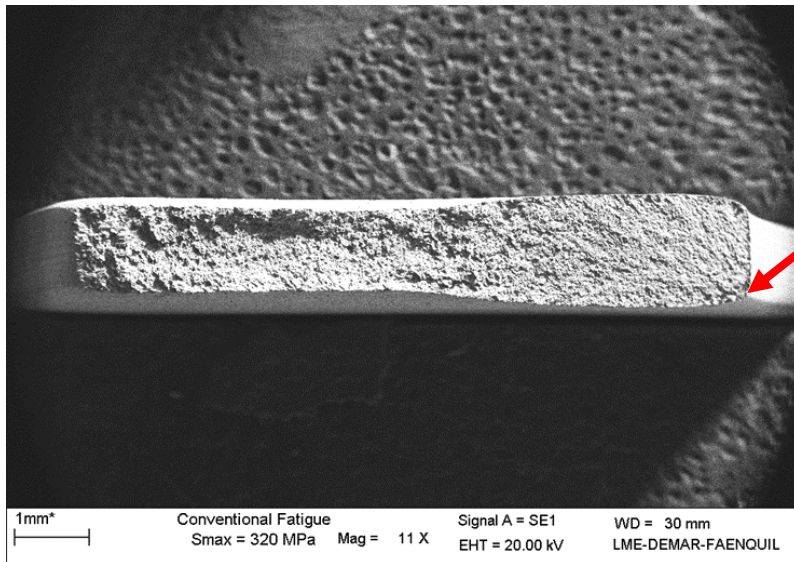
- Efeito da atmosfera nas características dos detritos.



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

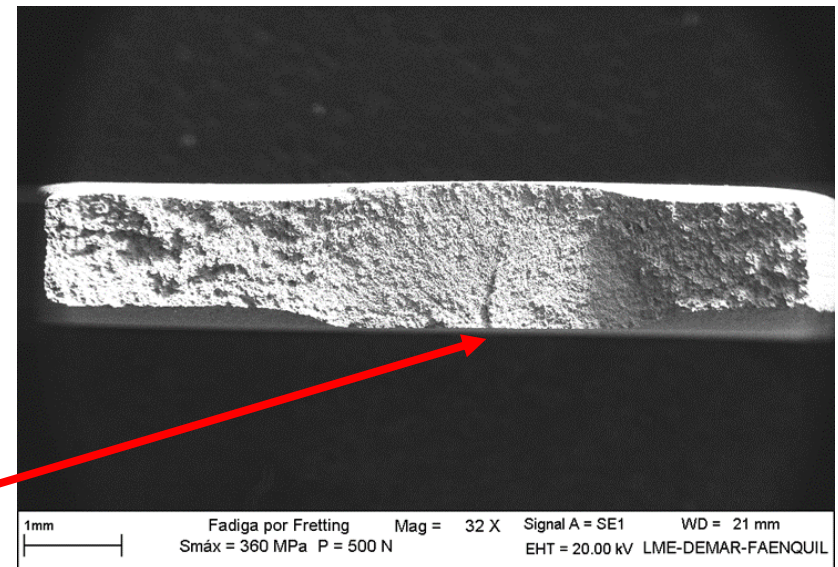
Aspecto da fratura

- Sítios preferenciais de nucleação da trinca para diferentes condições de ensaio.



Fadiga: trinca nucleada no canto.

Fadiga por fretting: trinca inicia na região de contato

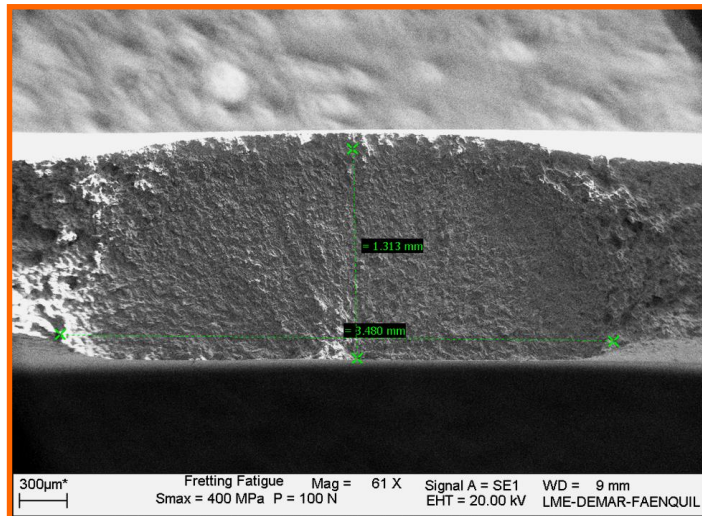


ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

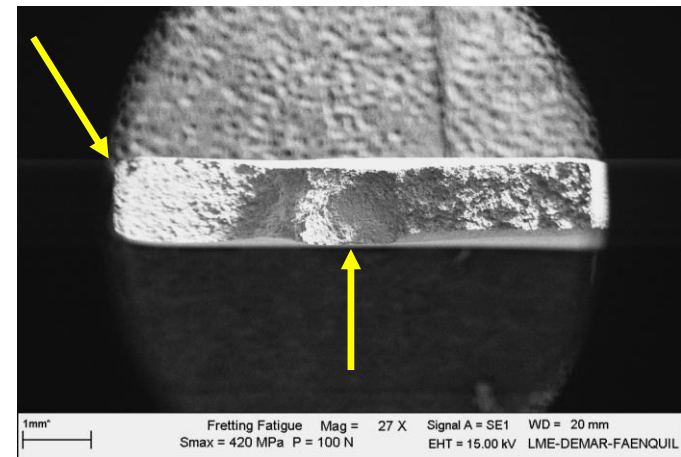
Aspecto da fratura

- Medida das características das superfícies de fratura por fadiga.

P [N]	Smax = 320 MPa		Smax = 360 MPa		Smax = 400 MPa		Smax = 420 MPa	
	2c (mm)	e (mm)	2c (mm)	e (mm)	2c (mm)	e (mm)	2c (mm)	e (mm)
100	4,44	1,44	3,71	1,35	2,95	1,23	1,99	0,89
300	4,27	1,38	3,65	1,29	-	-	-	-
500	4,17	1,29	3,56	1,29	-	-	-	-
900	4,17	1,24	3,54	1,23	-	-	-	-



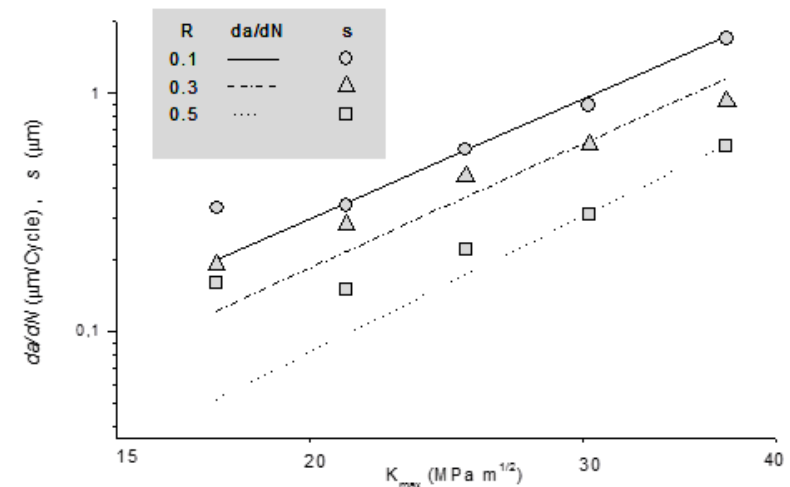
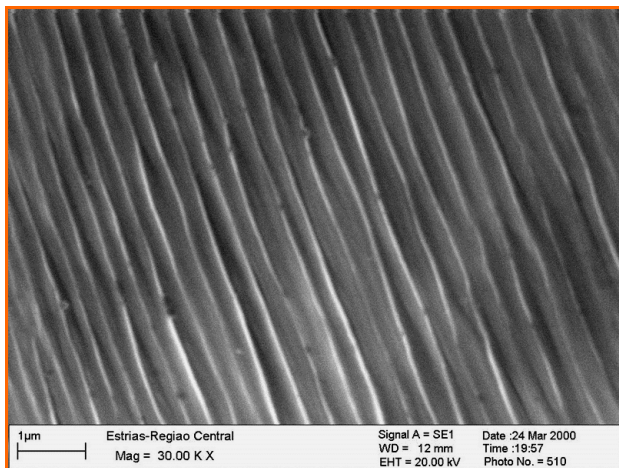
Com $\sigma_{max} = 420$ MPa: nucleação simultânea da trinca



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Relação entre a taxa da trinca e o espaçamento entre estrias

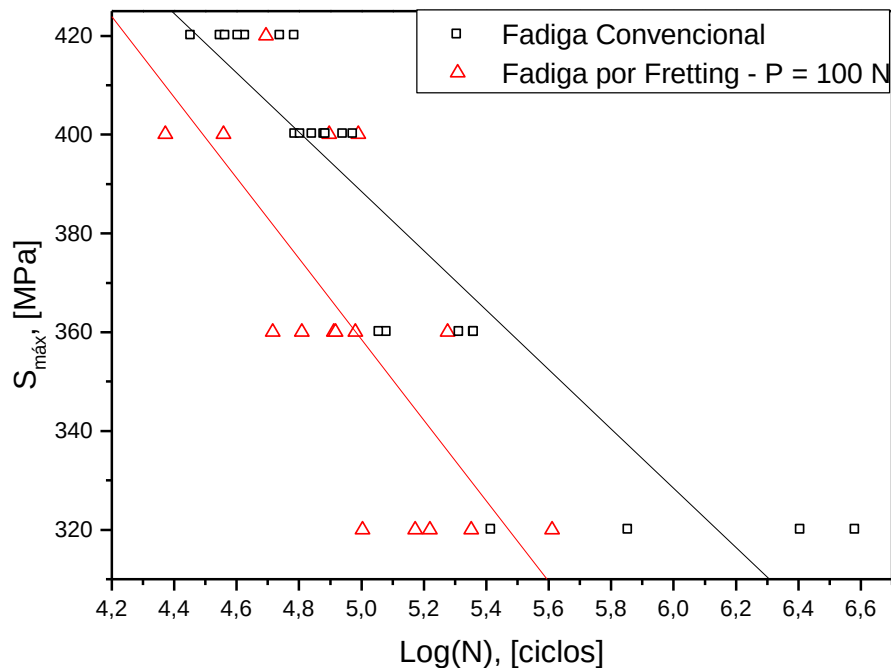
- Ensaio de propagação da trinca por fadiga empregando a mesma liga.



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Vida em fadiga por *fretting*

- Efeito do *fretting* aumenta à medida em que a tensão máxima diminui.
- Estimativas da vida em propagação, assumindo $a_0 = 0,1\text{mm}$ e a/c constante.



$$\Delta K = (1 - R) \cdot Y \left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \phi \right) \cdot S_{\max} \cdot \sqrt{\left(\pi \cdot \frac{a}{Q} \right)}$$

Table 2 Striation spacing and crack growth rate at mid-thickness for fretting fatigue samples

$S_{\max}$ [MPa]	a_f (mm)	ss (μm)	da/dN ($\mu\text{m}/\text{cycle}$)
320	1.44	0.36	0.44
360	1.35	0.64	0.60
400	1.23	0.73	0.83

Table 3 Fatigue life and crack propagation cycles (N is the average of five results)

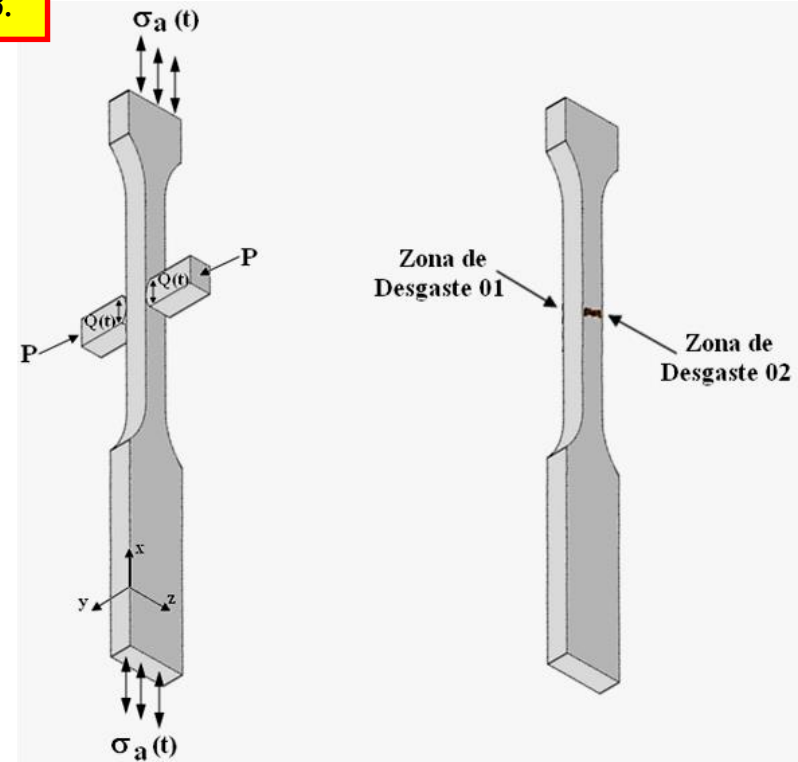
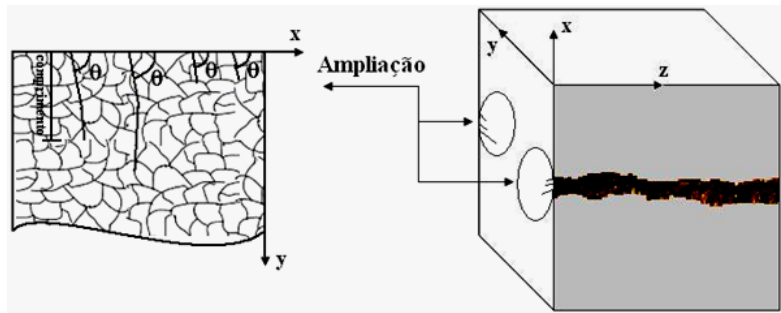
$S_{\max}$ [MPa]	N (cycles)	N_p (cycles)	N_p/N (%)	N_i/N (%)
320	338 844	17 587	5.2	94.8
360	100 940	12 464	12.3	87.7
400	31 620	9136	28.9	71.1

ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Fadiga por *Fretting* em liga de alumínio 7050-T7451

- Estudo do efeito da tensão média e da pressão de contato na vida total.
- Configuração de contato cilíndrico-plana.

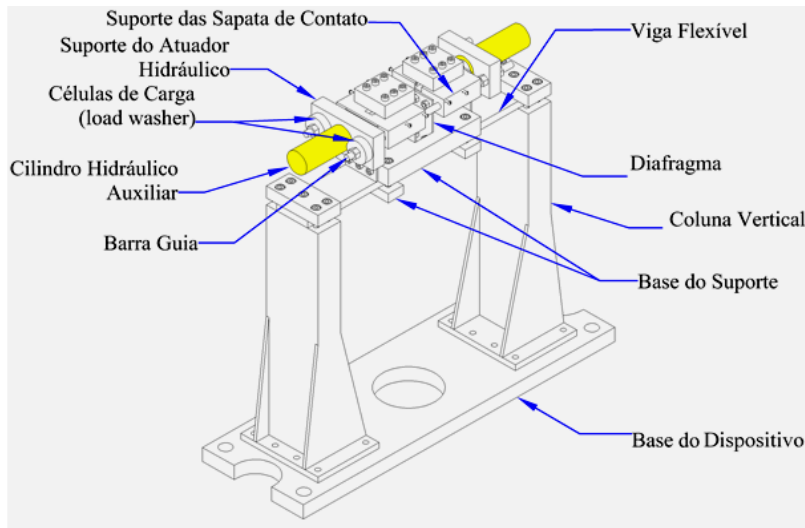
Rossino, L.S., Tese de doutorado. São Carlos: EESC/USP, 2008.



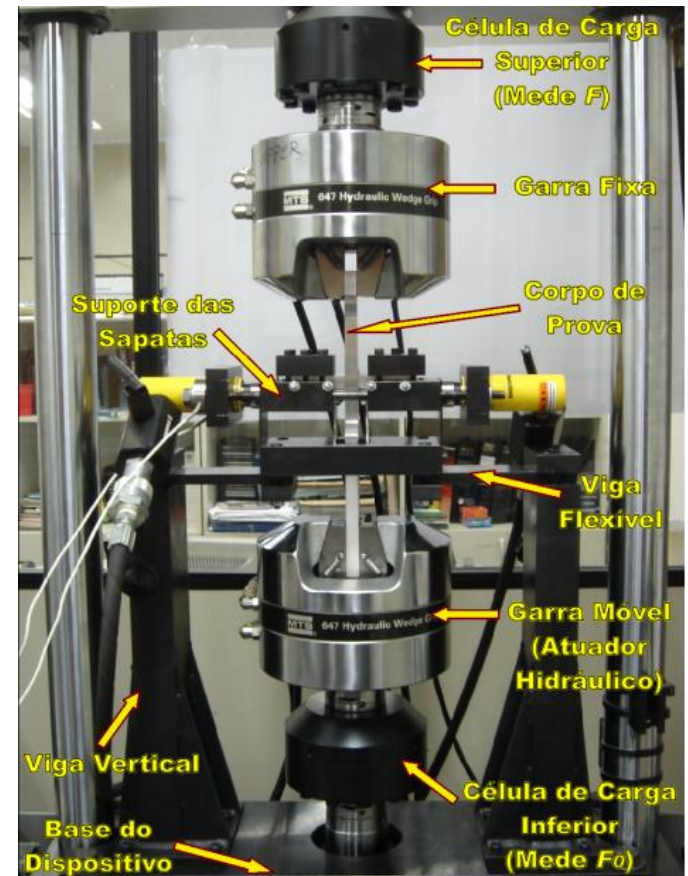
ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Dispositivo desenvolvido para o trabalho

- Aparato com funcionamento similar ao proposto por Nowell (1988).



Desenvolvido na UnB pelo grupo do Prof. J.A. Araújo

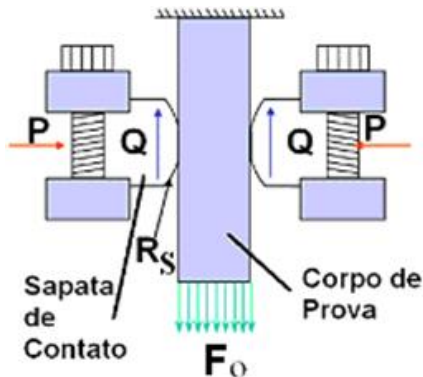


ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

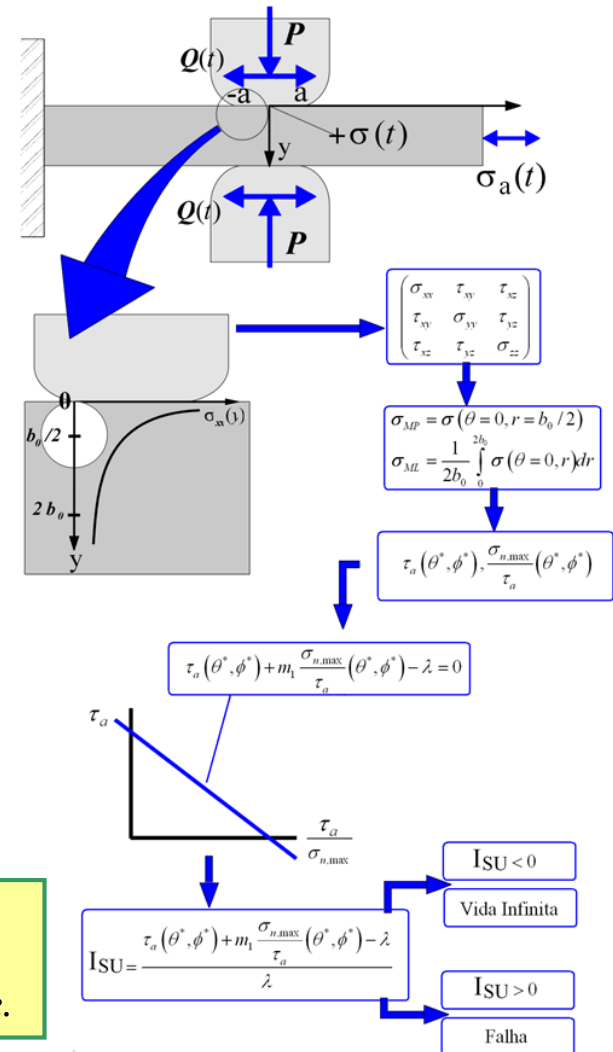
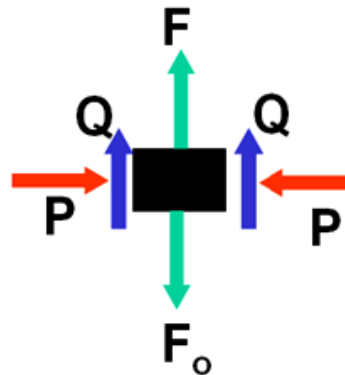
Modelagem Matemática

- Relação entre a carga remota e carga cisalhante.
- Estimativa da resistência à fadiga por *fretting*.

P é a força normal de contato; Q é a carga de cisalhamento; F_0 é a força cíclica aplicada pelo atuador (carga de fadiga)



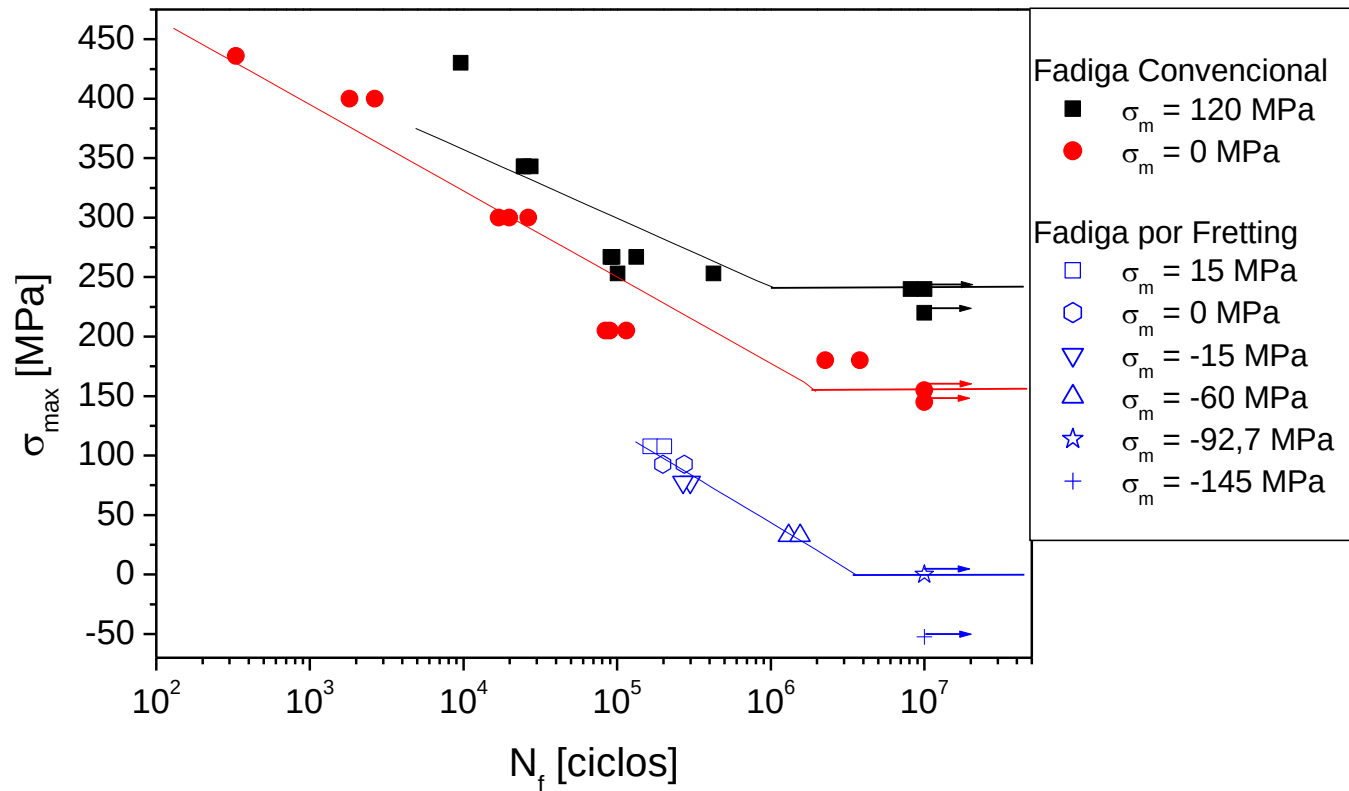
Rotina implementada em MATLAB para calcular o campo de tensão gerado em fretting e a previsão da vida em fadiga por fretting usando modelo de fadiga multiaxial de Susmel-Lazzarin e um método de entalhe.



ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Resultados Experimentais

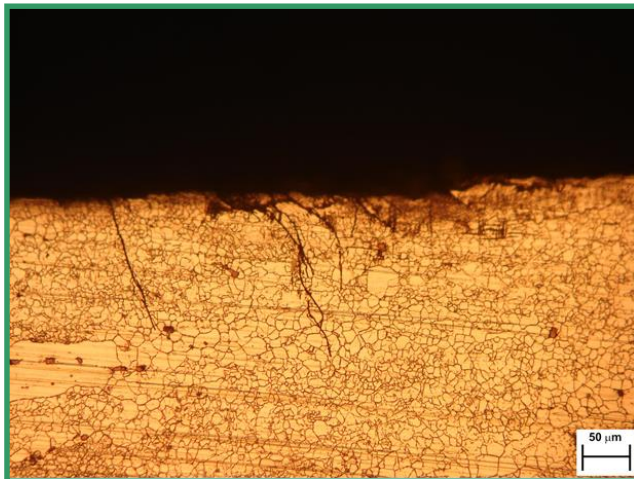
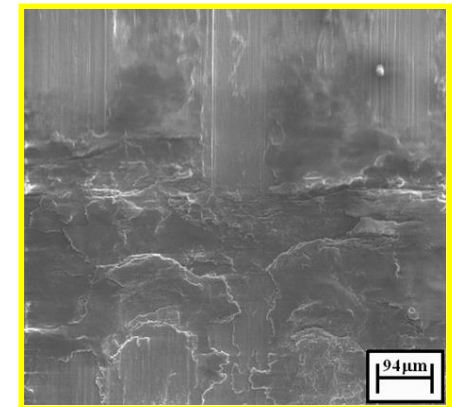
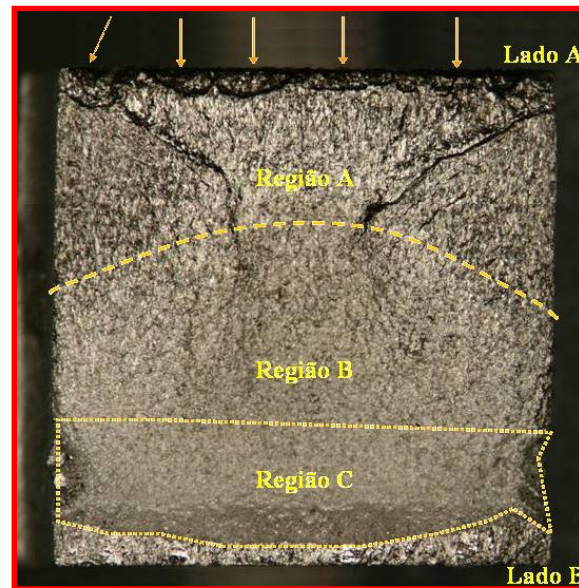
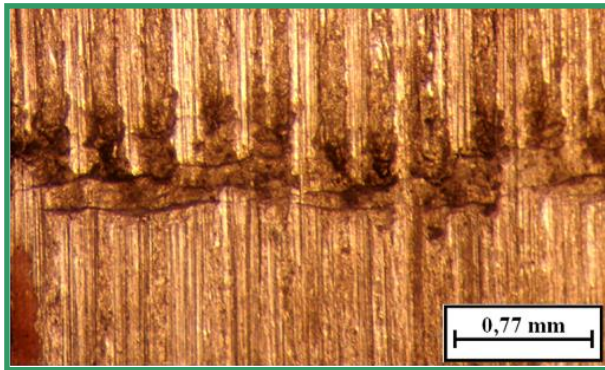
- Para mesma carga de contato e amplitude de tensão, variou-se a tensão média.

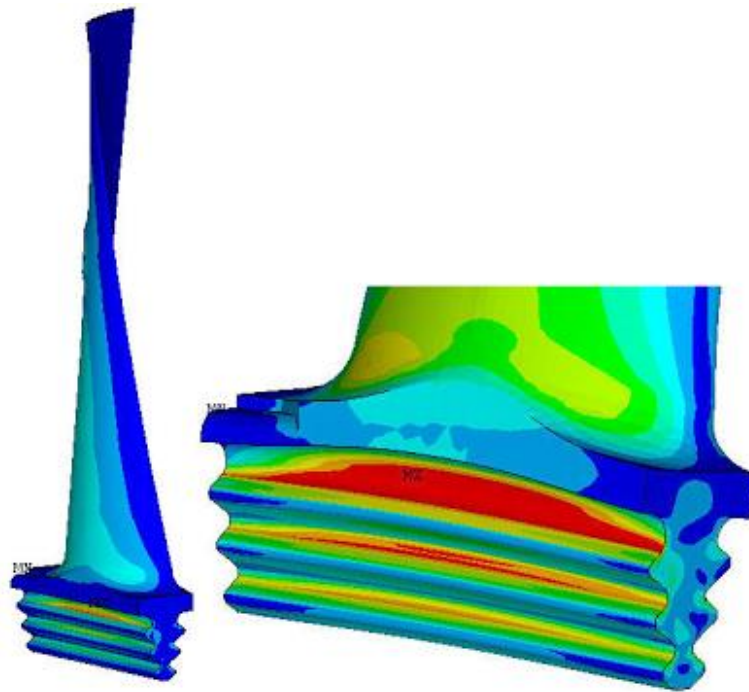


ESTUDOS EM FADIGA POR *FRETTING*

Análises Microscópicas

- Desgaste na região de deslizamento, análise de trincas paradas, fractografia.





FIM DA PARTE 6