

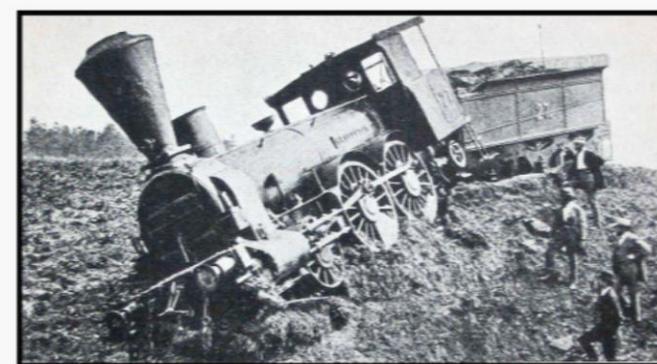
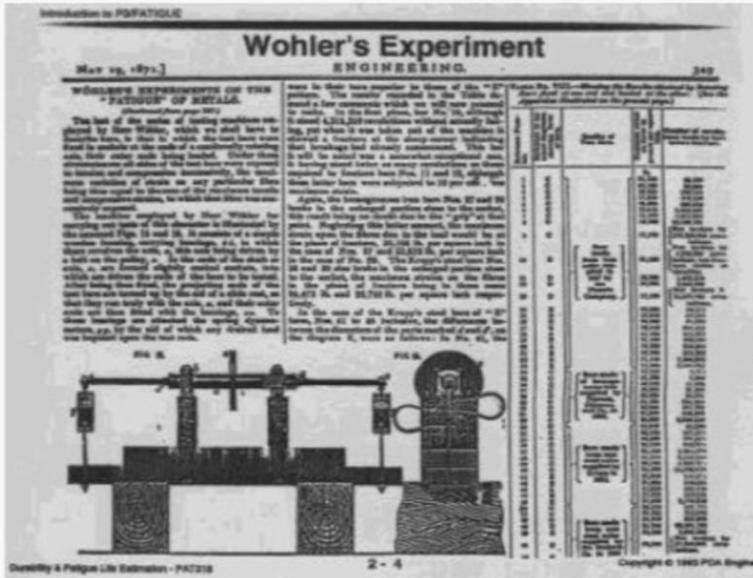
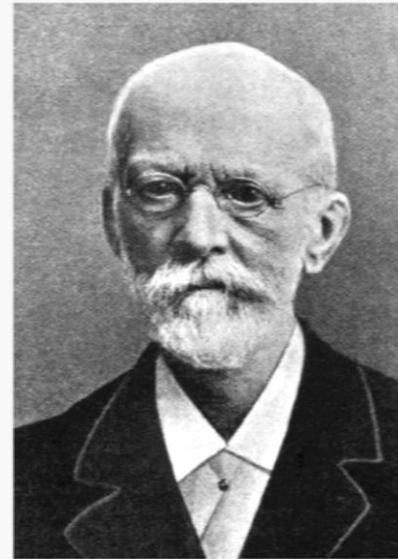
# **SMM 0156 – FADIGA E FRATURA**

## **FADIGA DOS MATERIAIS: INTRODUÇÃO E METODOLOGIA S-N**

**Prof. Dr. José Benedito Marcomini**

# OS PIONEIROS

August Wöhler (1819-1914)



August Wöhler desenvolveu estudos em fadiga entre 1852 a 1869

## FADIGA - DEFINIÇÃO

*Fadiga é o processo de dano estrutural permanente progressivo e localizado que ocorre em um material solicitado por tensões e/ou deformações cíclicas, em poucos ou muitos pontos do material, e que podem gerar trincas ou fratura completa do componente mecânico após um número suficiente de ciclos.*

# FADIGA: DEFINIÇÃO

Processo que causa **falha** **prematura** ou dano a um Componente sujeito a carregamentos repetitivos.

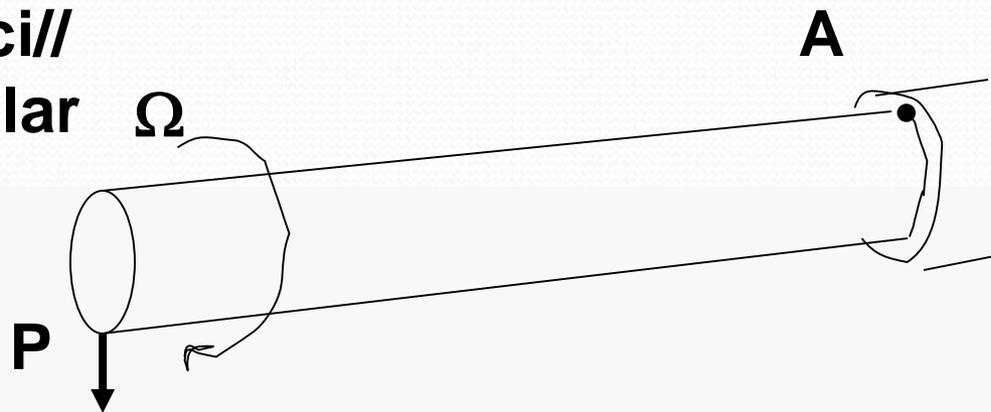
O componente é incapaz de *desenvolver satisfatoriamente a função pretendida*

*Bem abaixo da tensão limite ou de projeto*

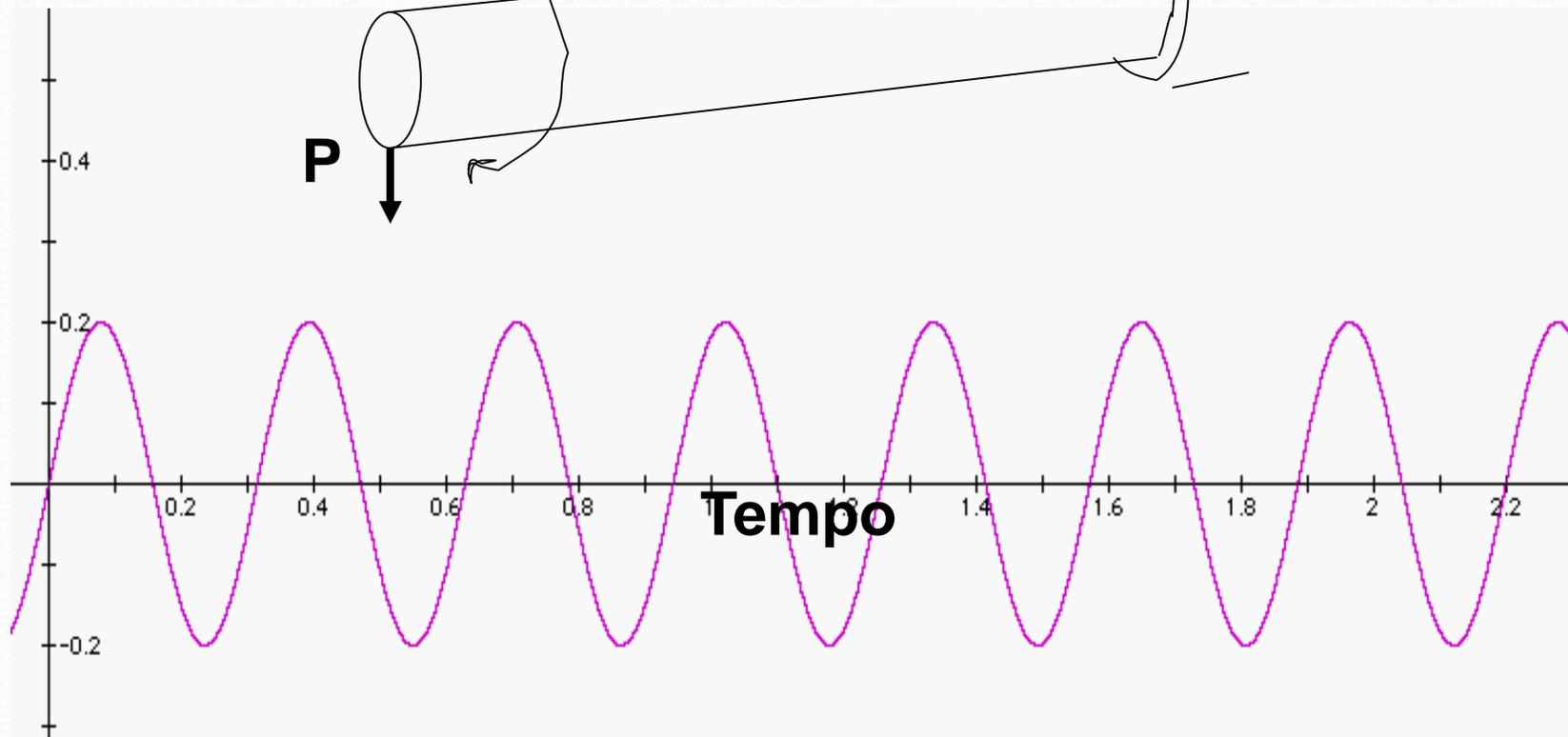
*Carregamento e descarregamento*  
*Vibrações*  
*Compressão e descompr.*  
*Aquecimento e resfriam.*  
*Decolagem e aterrissagem*

# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA

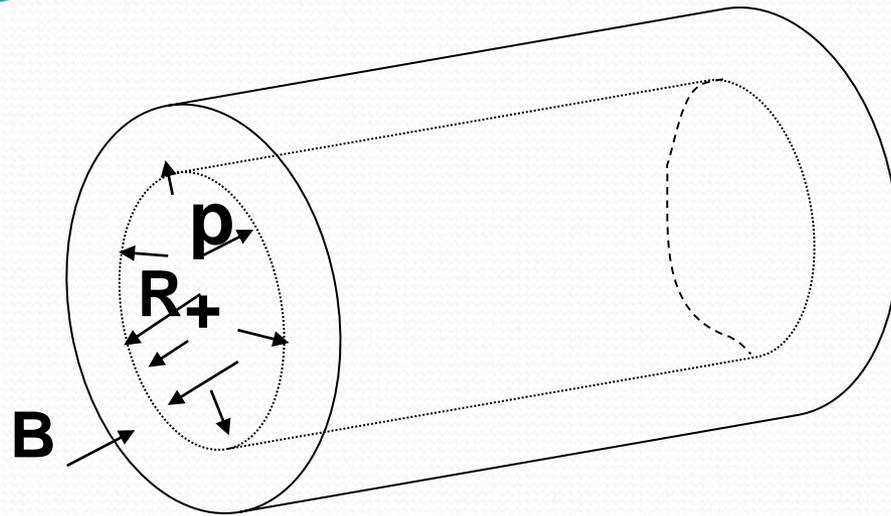
Velocidade angular  $\Omega$



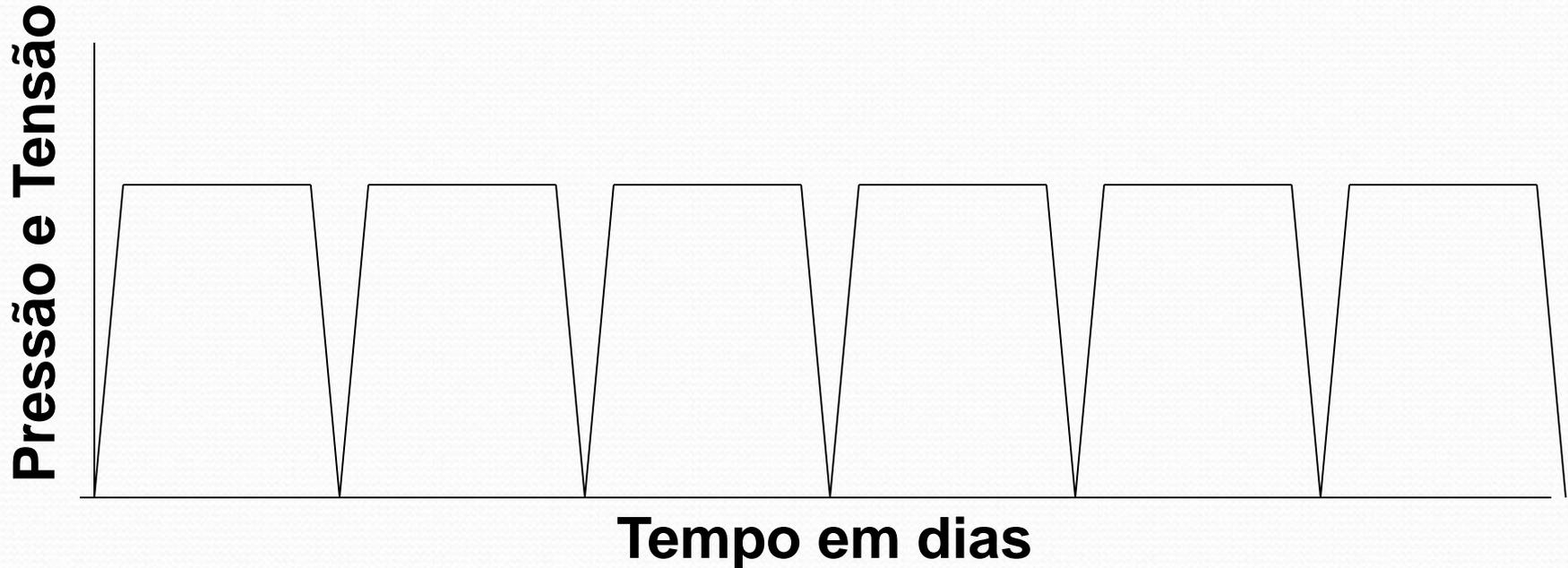
Tensão em A



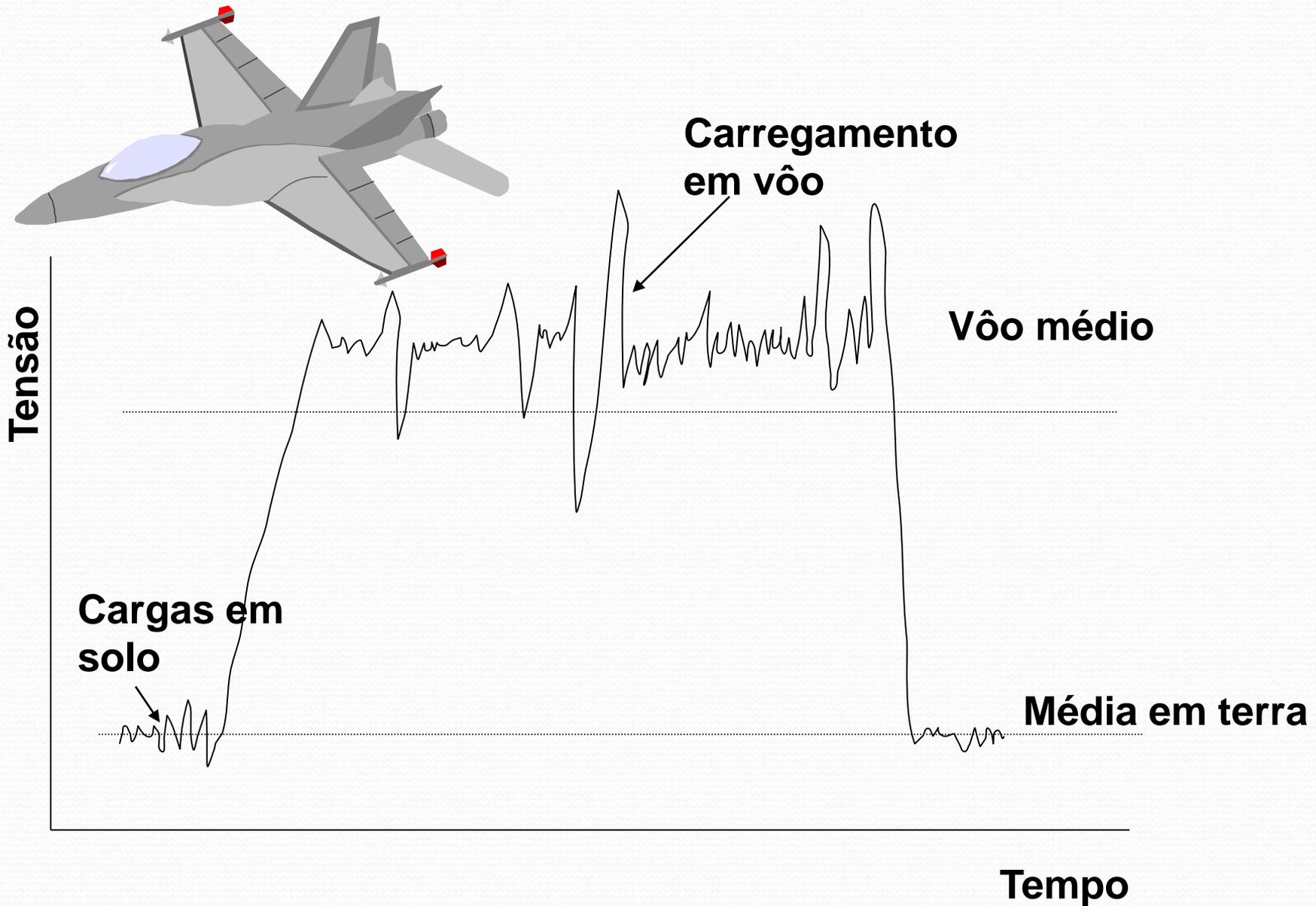
# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



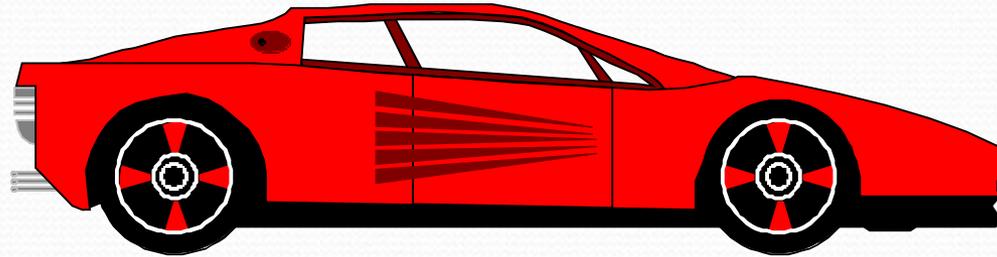
Pressurização e  
descompressão  
uma vez ao dia



# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



Carga

Típica história de tempo x carga para o eixo da roda



Tempo

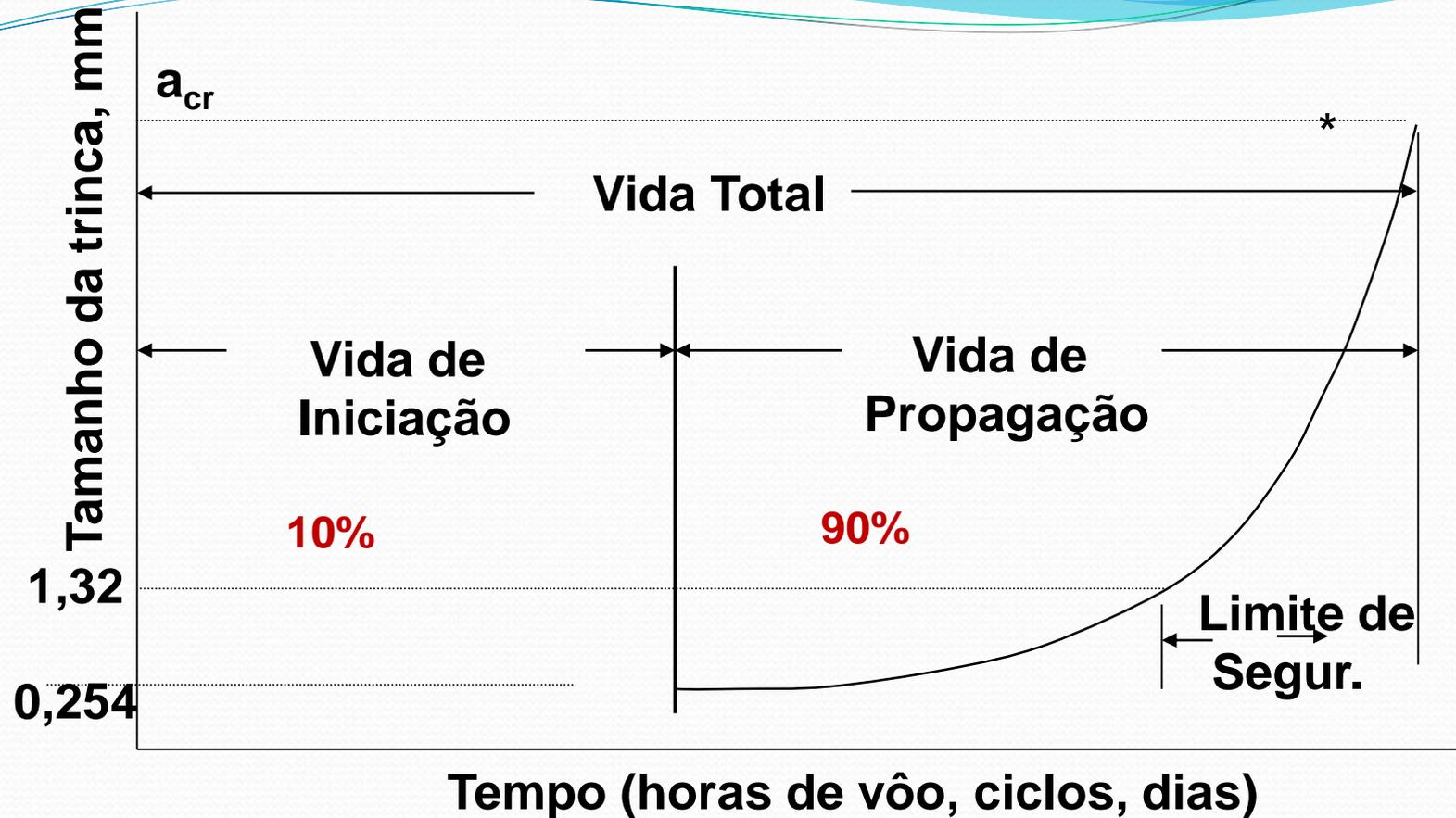
Mais de 90% das falhas: fadiga ou combinada à fadiga

- Fadiga **de alto ciclo (controlado por tensão)**;
- Fadiga **de baixo ciclo (controlada por deformação)**;
- **Propagação** de trinca por fadiga;
- Avaliação da **sensibilidade ao entalhe**;
- Fadiga **por fretting**;
- Fadiga **multiaxial**;
- Fadiga térmica: **isotérmica e termomecânica**;
- Fadiga em **meios agressivos**: iniciação e propagação;
- **Fadiga-fluência**.

## NORMAS:

- **ASTM E466-15** Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials;
- **ASTM E606-12** Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing;
- **ASTM E739-10(2015)** Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data;
- **ASTM E647-15e1** Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates;
- **ASTM E1049-85(2017)** Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis;
- **ASTM E2789-10(2015)** Standard Guide for Fretting Fatigue Testing.

# TERMINOLOGIA

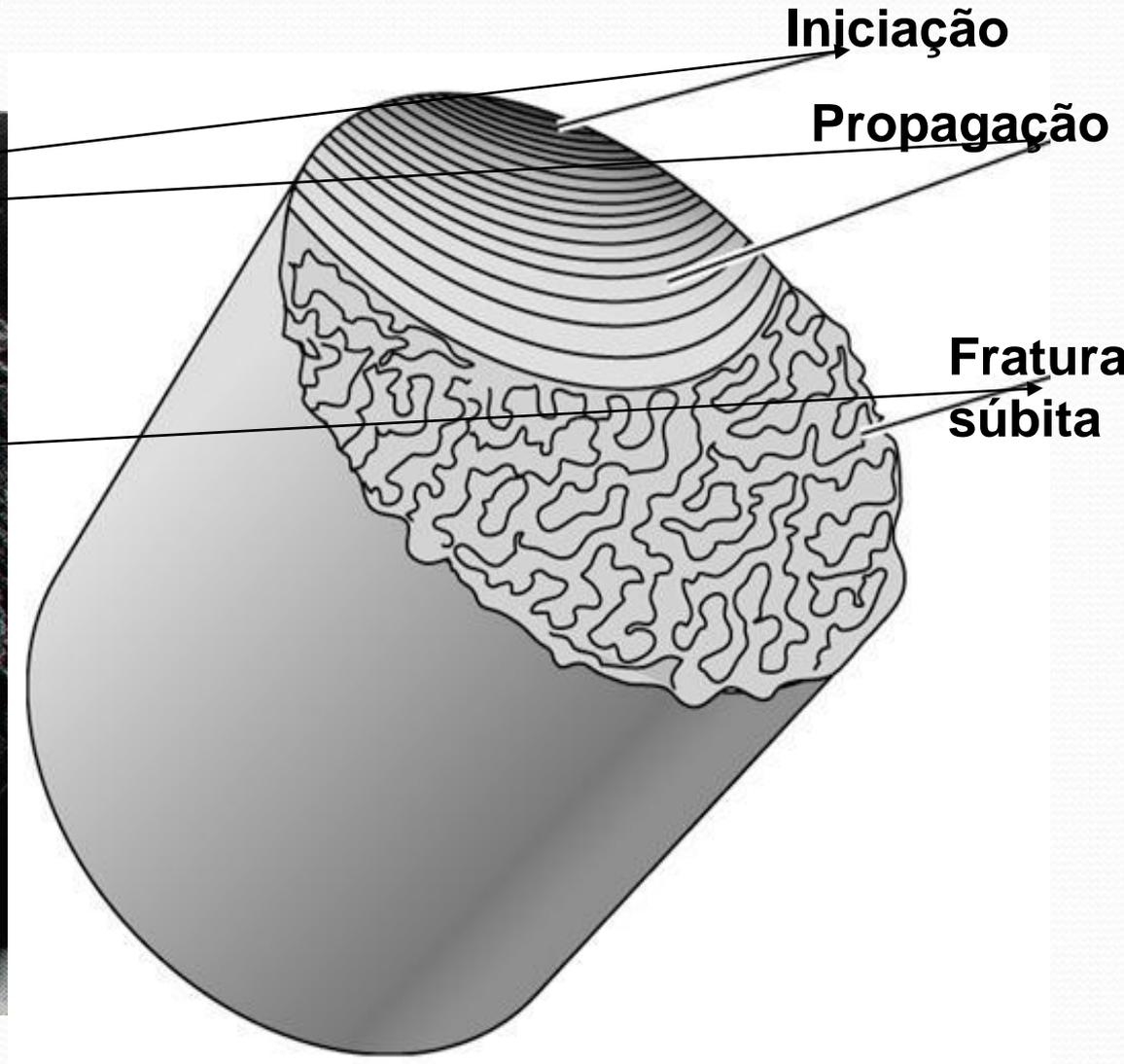
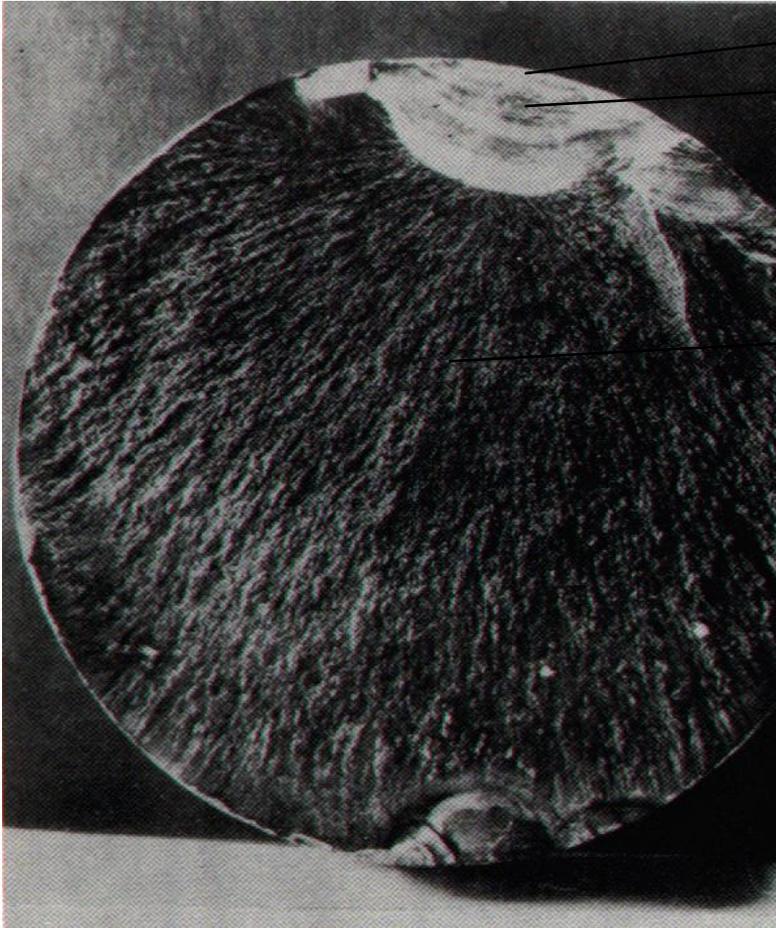


- Vida de Inic. – Tempo para nuclear uma trinca.
- Vida de Propag. – Tempo para o crescimento de uma trinca até a falha.
- Limite de Seg. – crescimento a partir de um tamanho crítico de trinca



# **Aspectos Macro e Microscópicos da Fratura por Fadiga em Metais**

# Fraturas de Fadiga e Características Macroscópicas



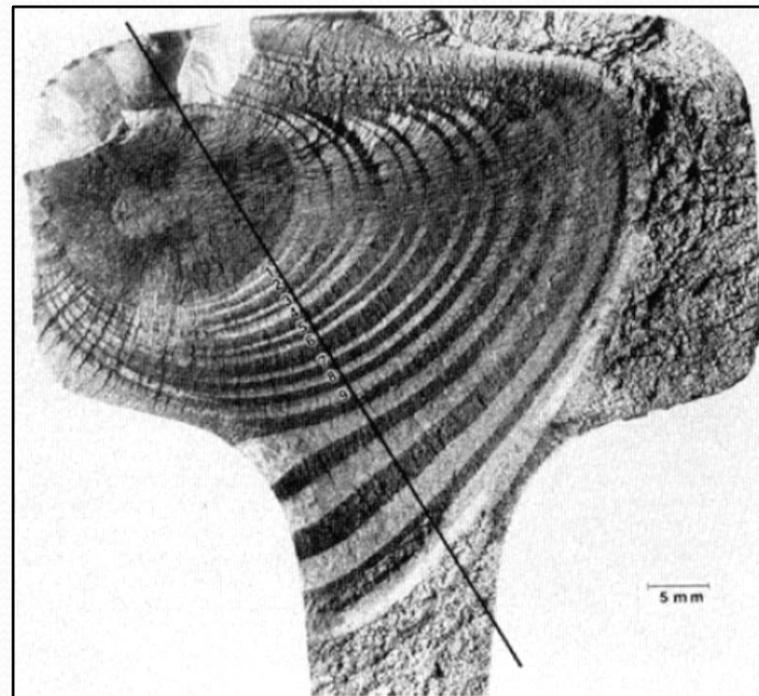
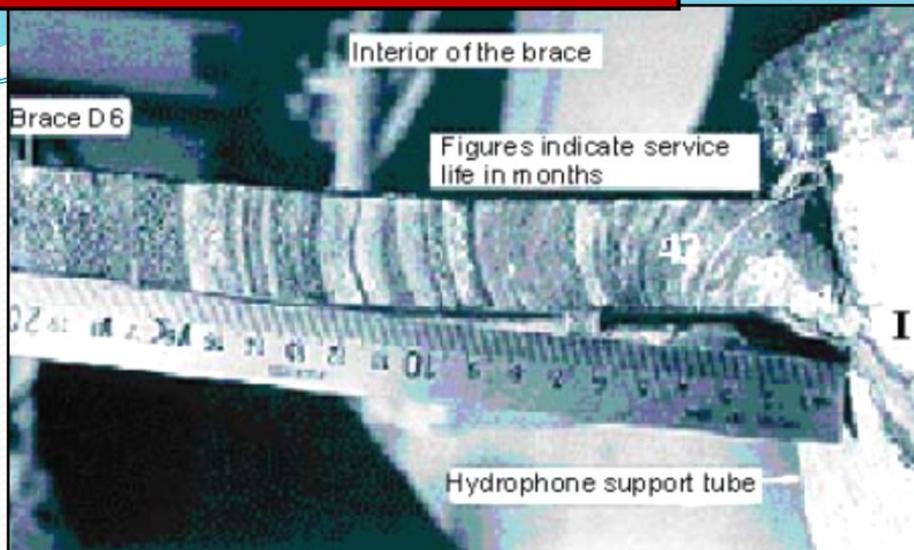
Iniciação

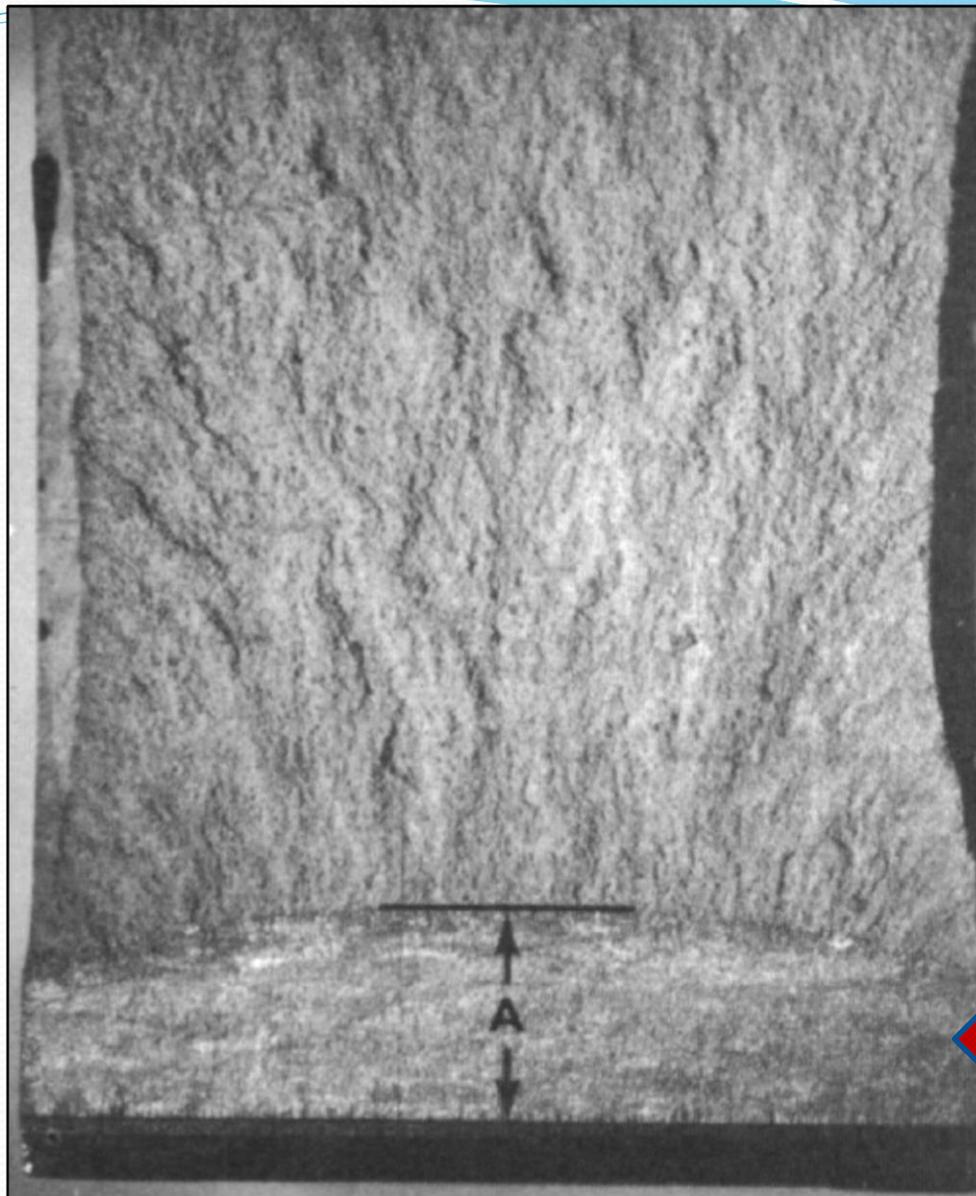
Propagação

Fratura súbita

- 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





**SEM MARCAS  
DE PRAIA**

8. Trinca produzida por fadiga em  
c.p. de Mecânica da Fratura

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

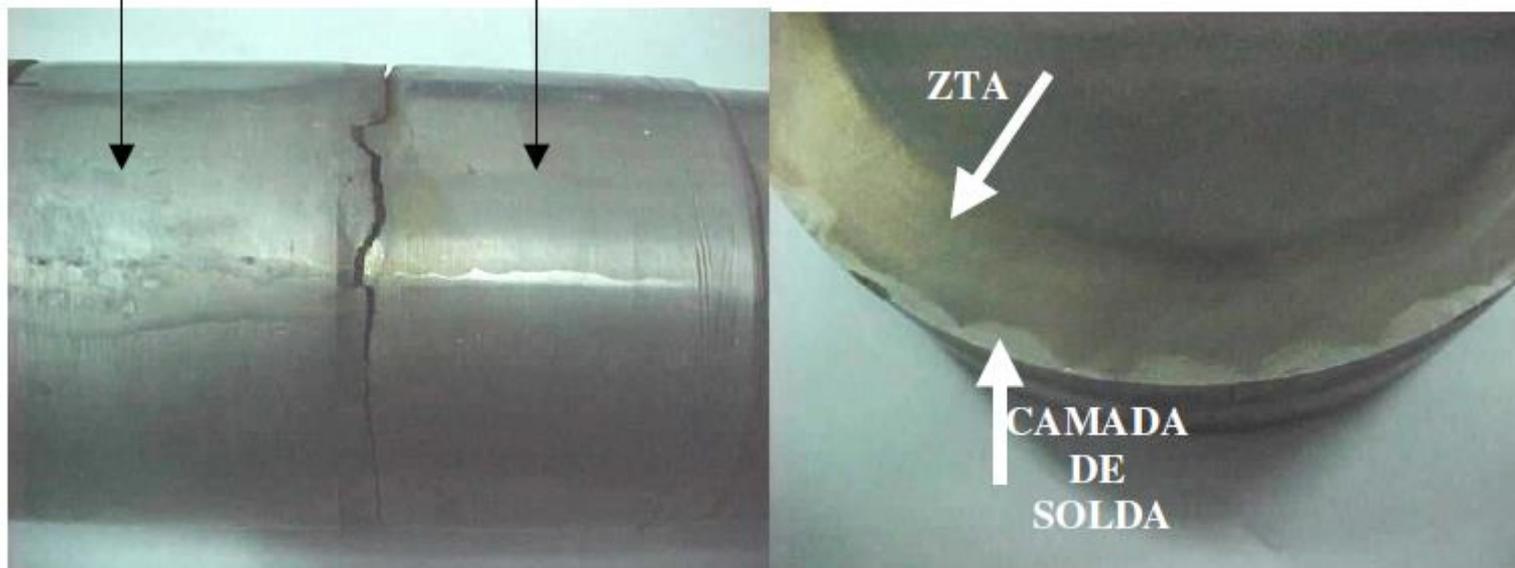
**Quanto maior a área de ruptura final, maiores as tensões ( ou menor a tenacidade).**

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

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

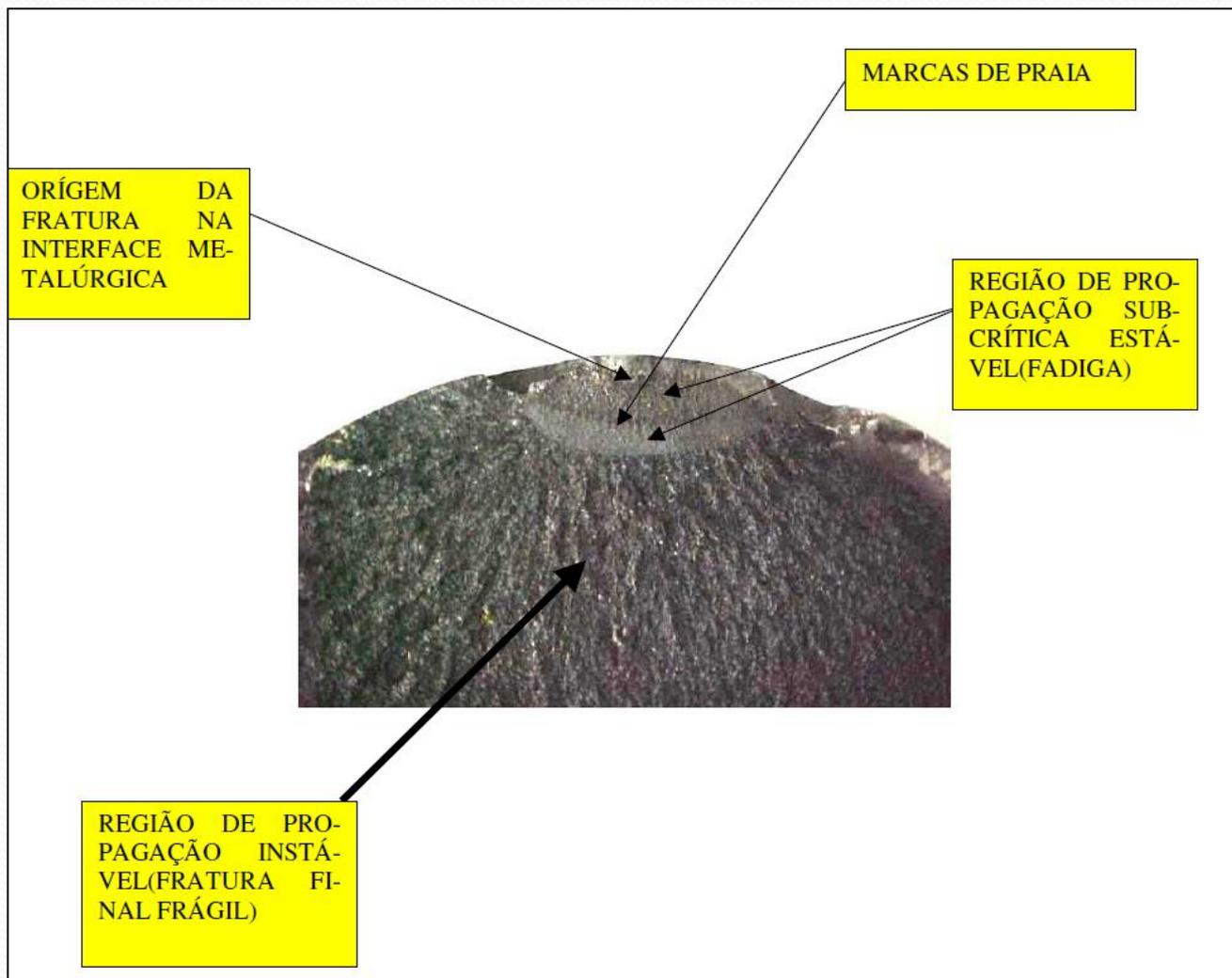
CAMADA DE  
SOLDA

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

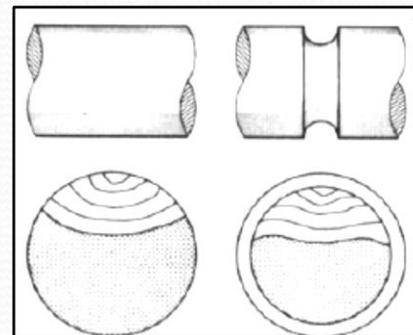


**ANÁLISE DE FALHAS – EIXO – AÇO SAE4140 – T+R - 2005.**

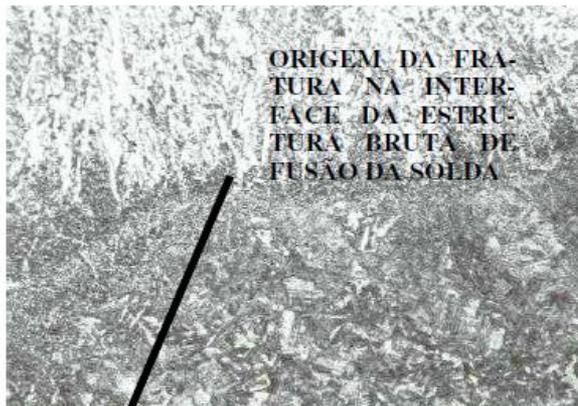
**A TRINCA POR FADIGA É NUCLEADA NA SUPERFÍCIE, A NÃO SER QUE OCORRA UMA DESCONTINUIDADE SUBSUPERFICIAL.**



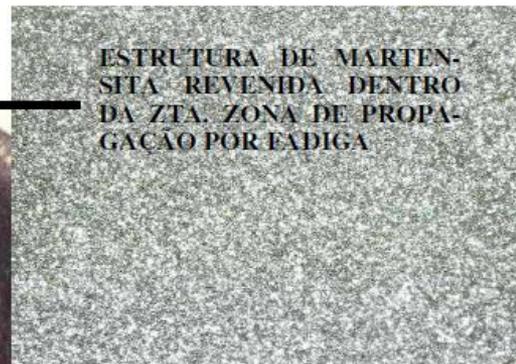
ALTAS TENSÕES



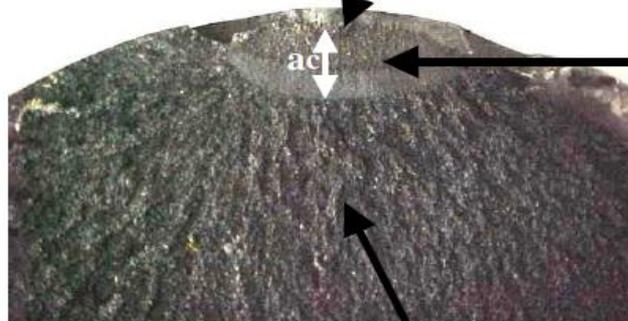
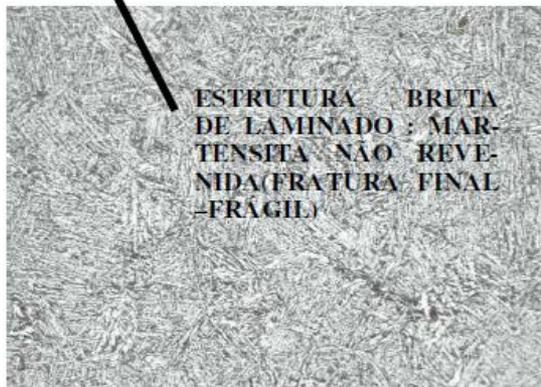
ORIGEM DA FRA-  
TURA NA INTER-  
FACE DA ESTRU-  
TURA BRUTA DE  
FUSÃO DA SOLDA

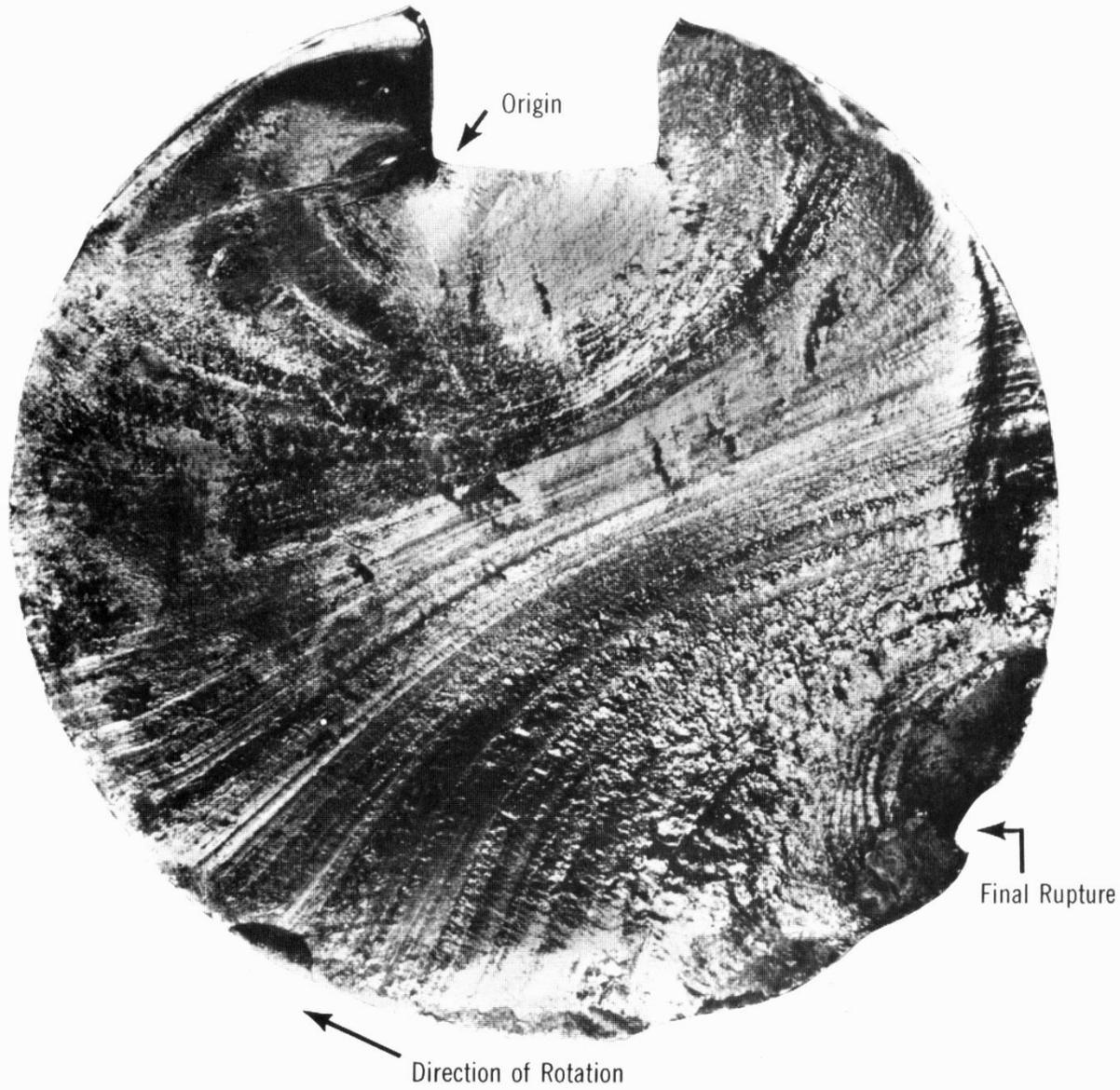


ESTRUTURA DE MARTEN-  
SITA REVENIDA DENTRO  
DA ZTA. ZONA DE PROPAGA-  
ÇÃO POR FADIGA



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

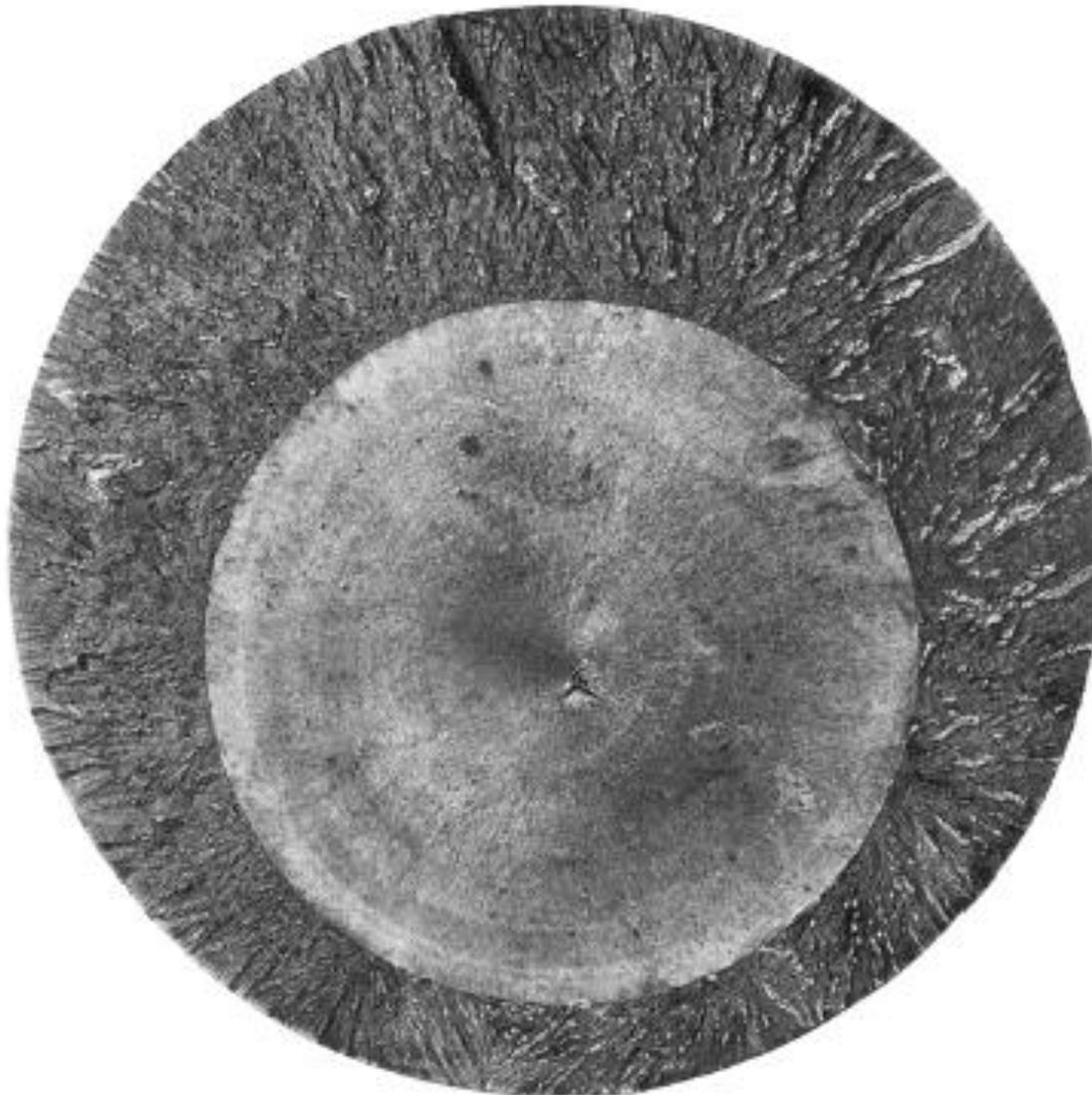




## Fadiga Rotativa

Fadiga acarretada por **flexão reversa**. A **simetria** revela que ambos **os lados** sofreram as **mesmas amplitudes** de carregamentos e no de ciclos.



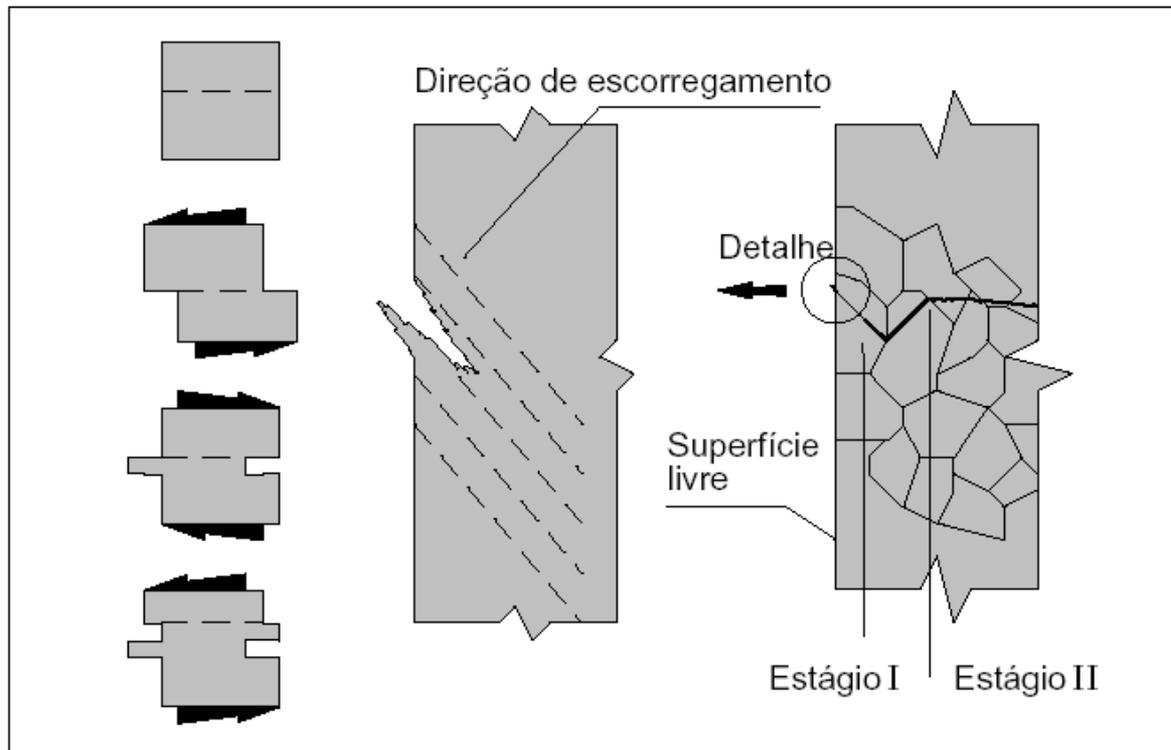


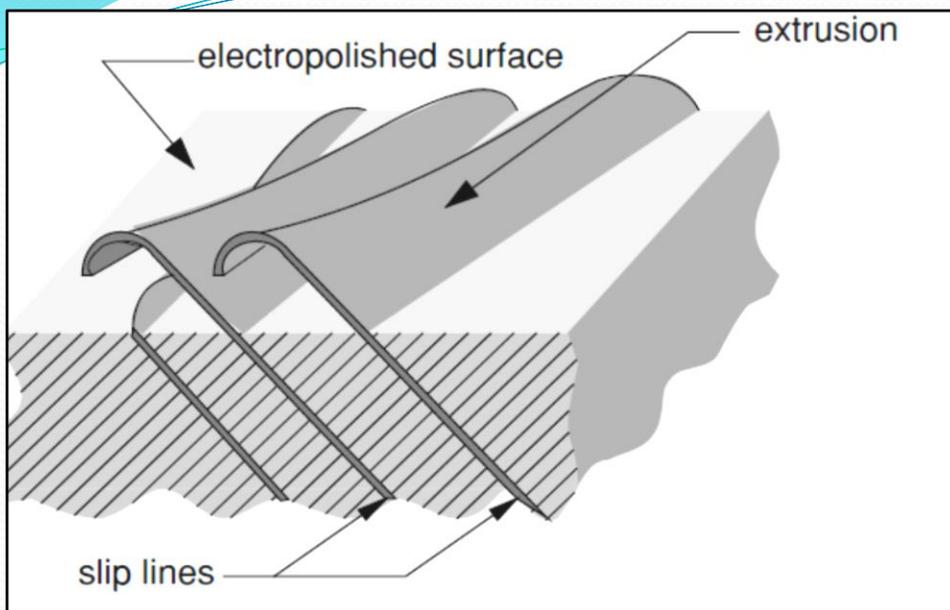
**Fadiga em tração iniciada no centro  
devido a um defeito de forjamento**

# Mecanismos de Fadiga e Características Microscópicas

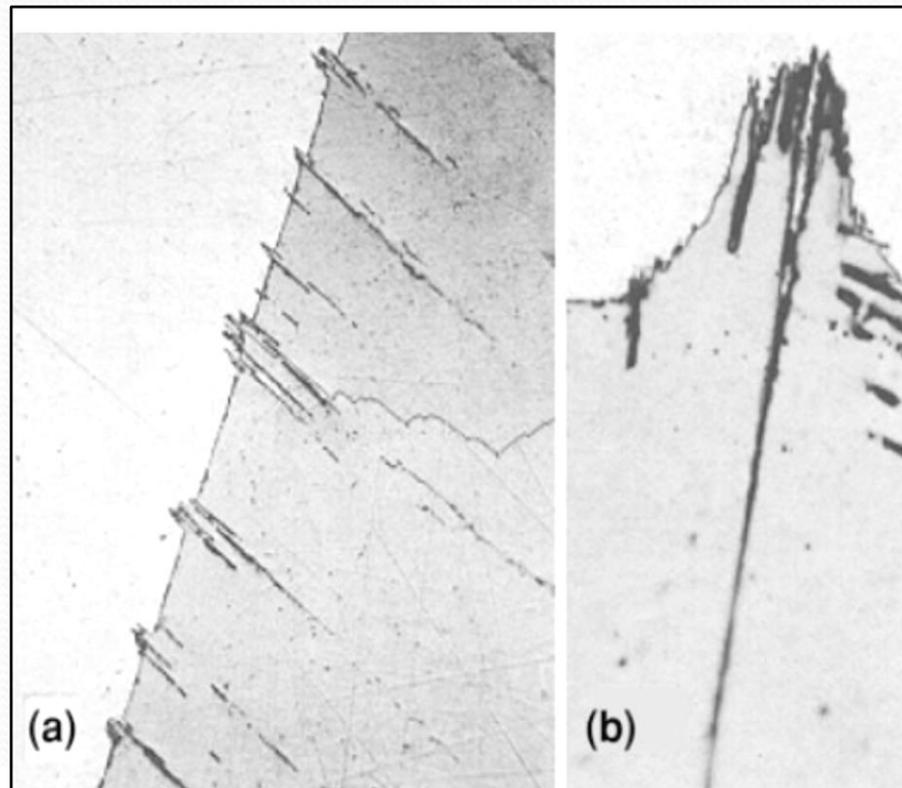
## NUCLEAÇÃO DE TRINCAS

- 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.





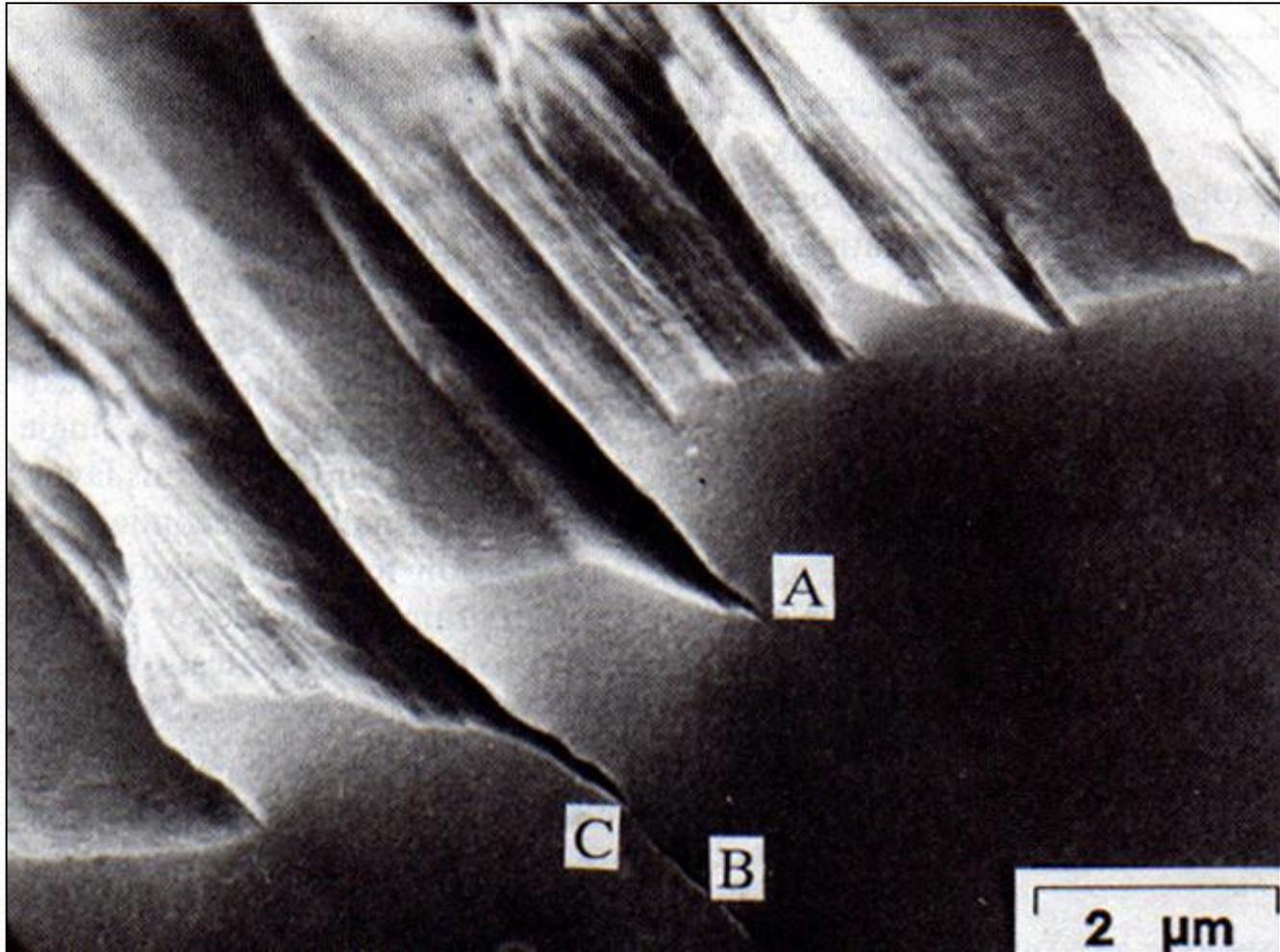
**INTRUSÕES E EXTRUSÕES,  
SEGUNDO FORSYTH (1956-1958)**



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

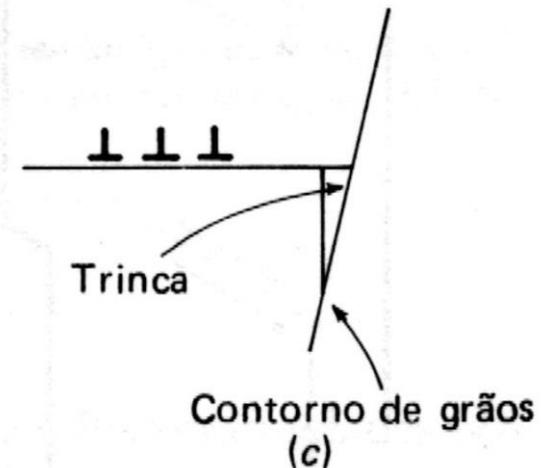
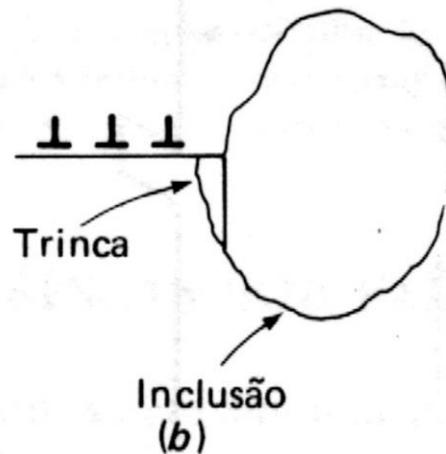
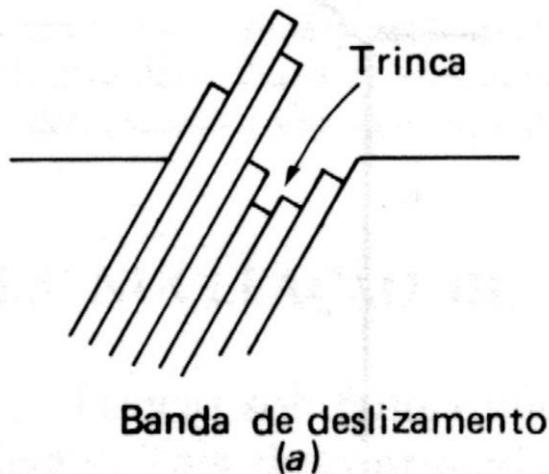


**Typical ladder-like structure of PSBs (Metals Handbook, vol. 19)**



**INTRUSÕES E EXTRUSÕES**

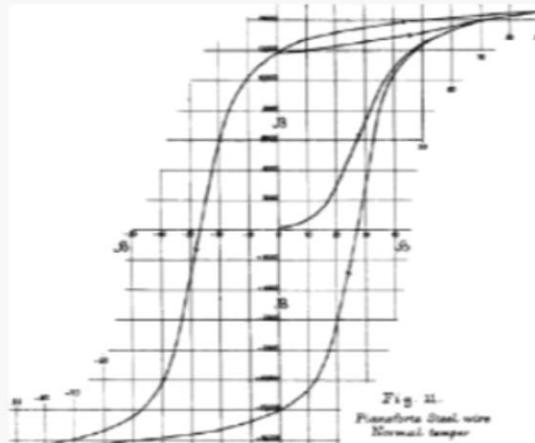
- No caso de materiais **frágeis ou duros**, como as ligas de alta resistência de alumínio e os aços tratados para uma alta dureza, a **nucleação** das trincas inicia na interface entre a matriz e as **inclusões** existentes, já que a matriz não chega a ser deformada plasticamente.
- Desta forma **não**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



- 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. Hoopfer*

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



Fig. 9. Specimen after 1000 revolutions of a stress of 22.4 tons per sq inch.  $\times 1000$ .

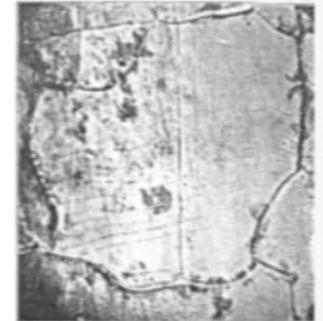


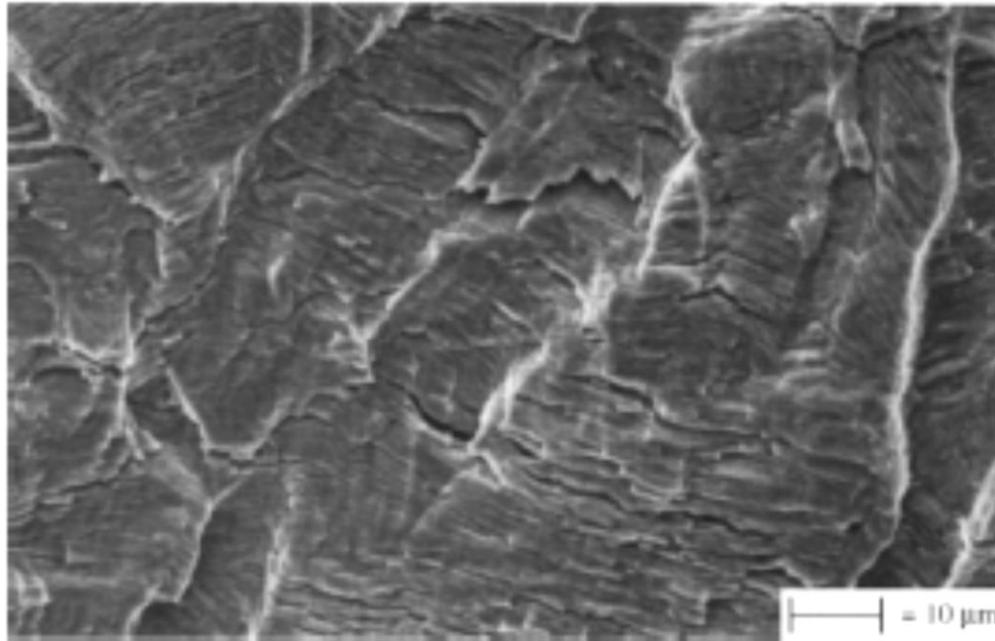
Fig. 10. Same after 2000 revolutions.  $\times 1000$ .



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



Fig. 12. Same 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 entalhes 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 CRISTALOGRAFICOS.

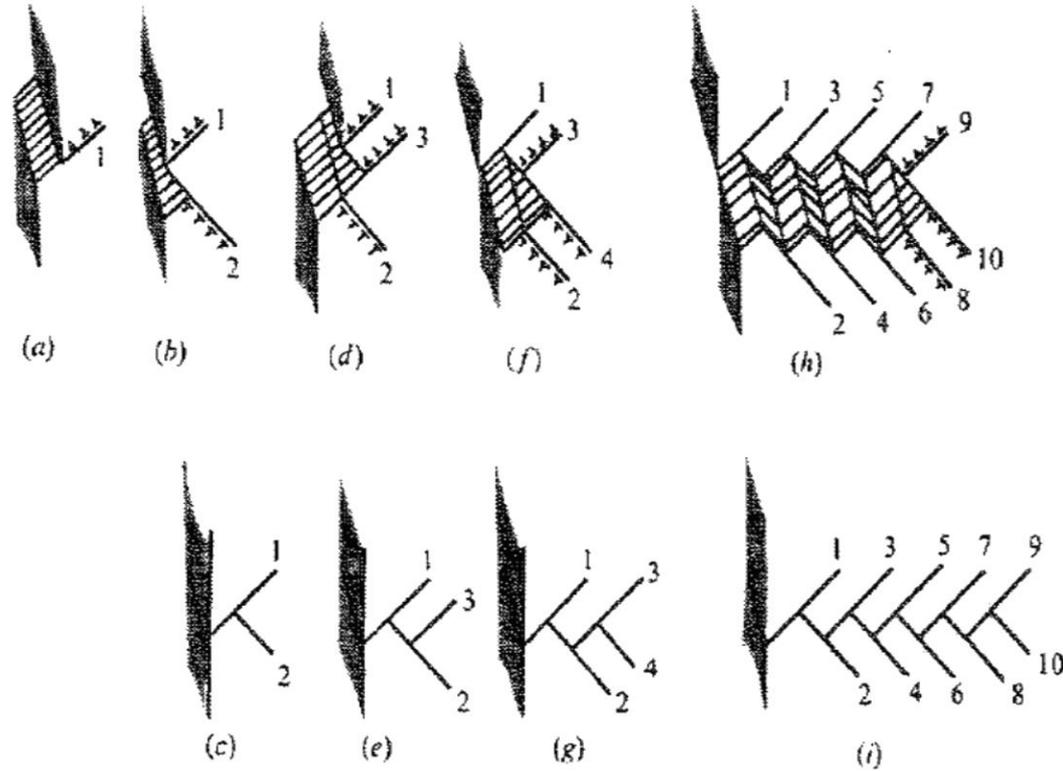
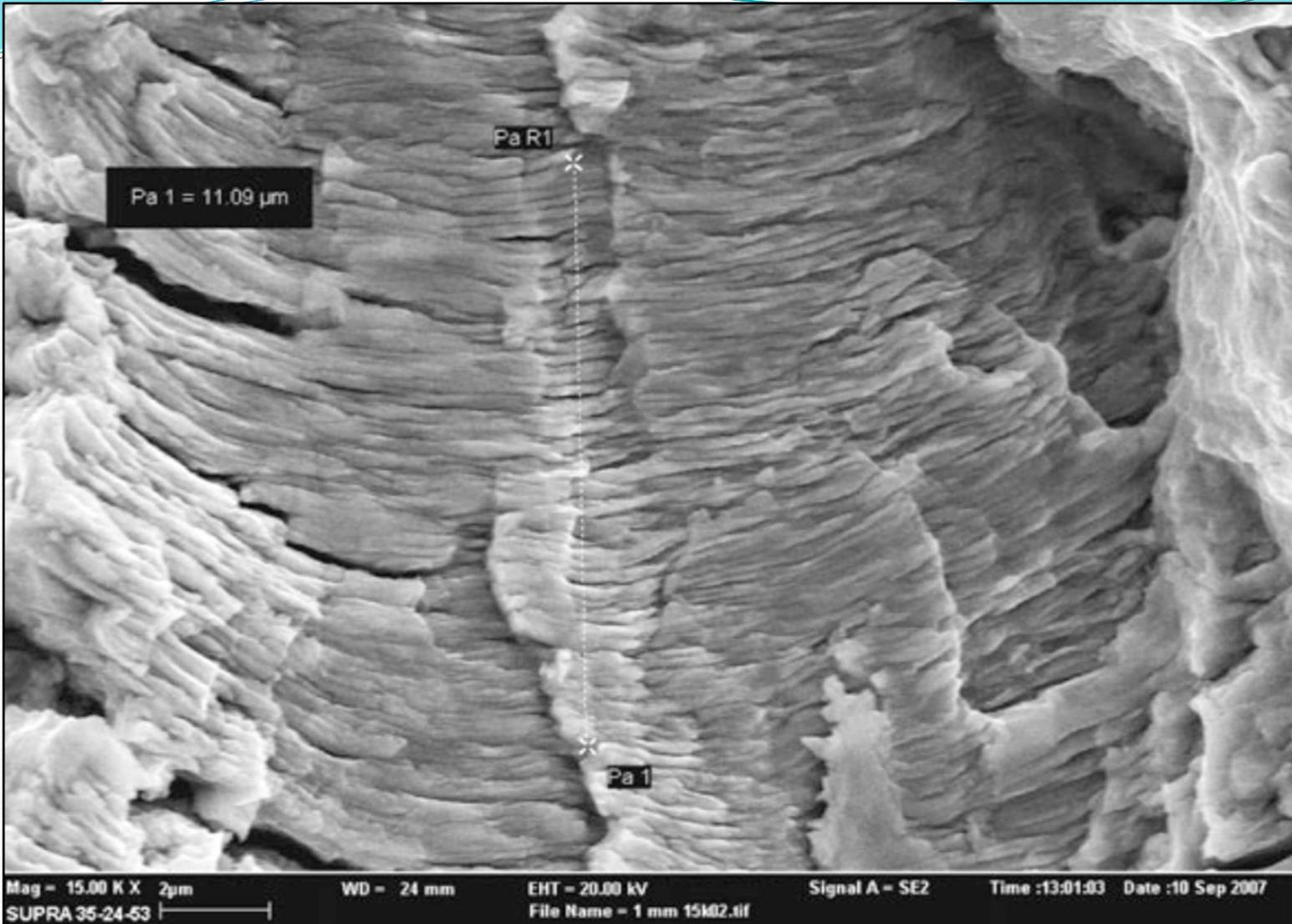


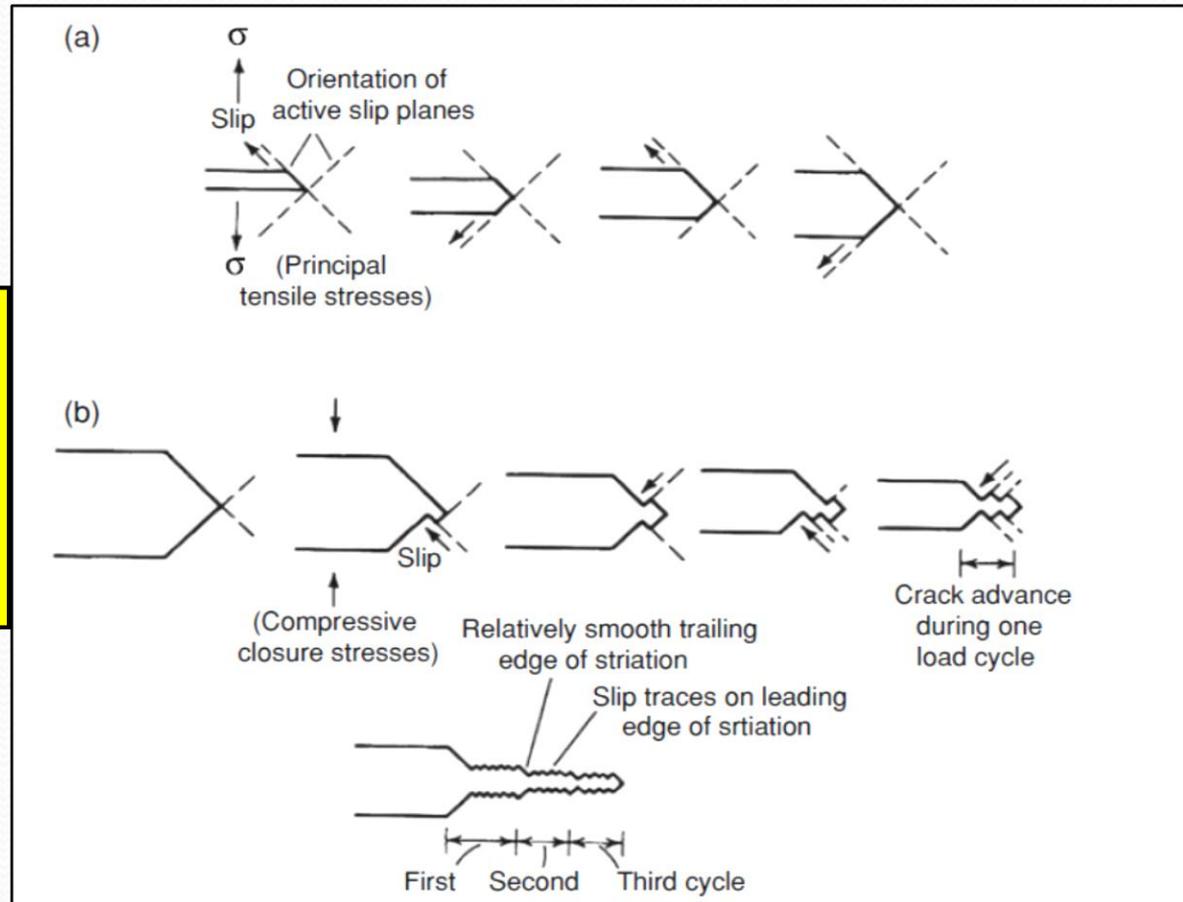
Fig. 10.6. Alternating slip model for stage II crack growth under fully reversed cyclic loads. The figures on the top row show tensile loading stages, and those on the bottom pertain to unloading stages. (After Neumann, 1969.)

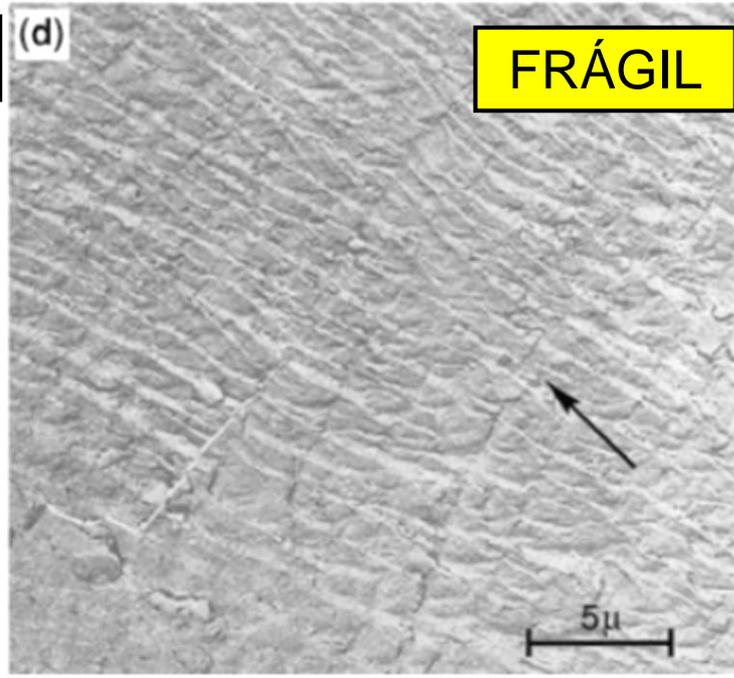
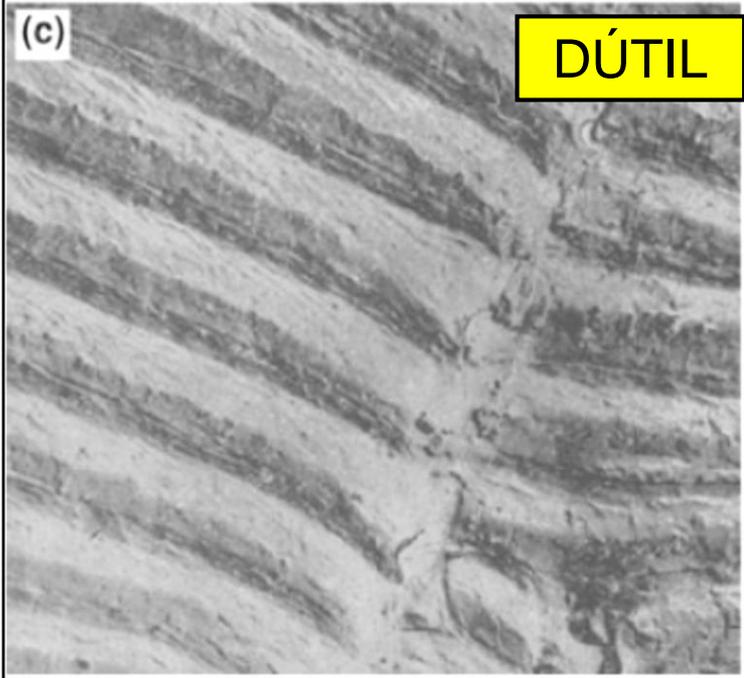
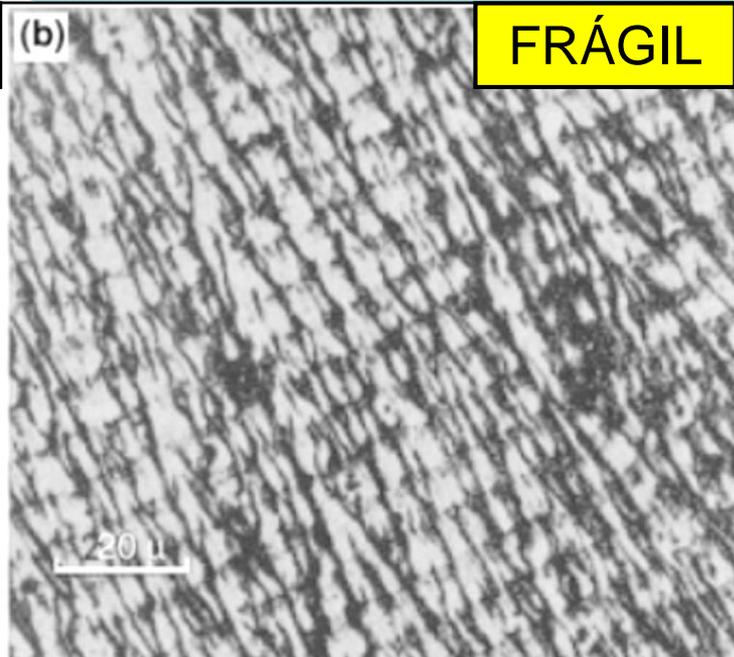
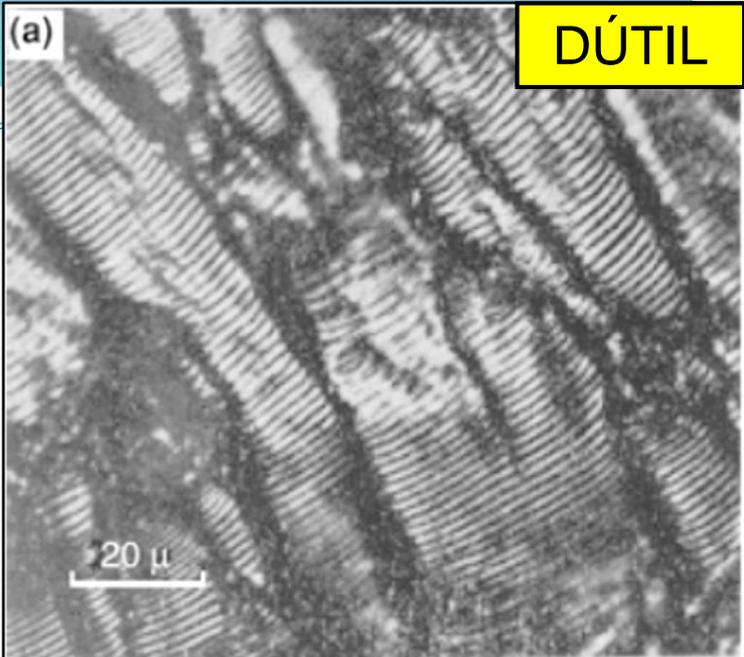
# ESTRIAS DÚTEIS

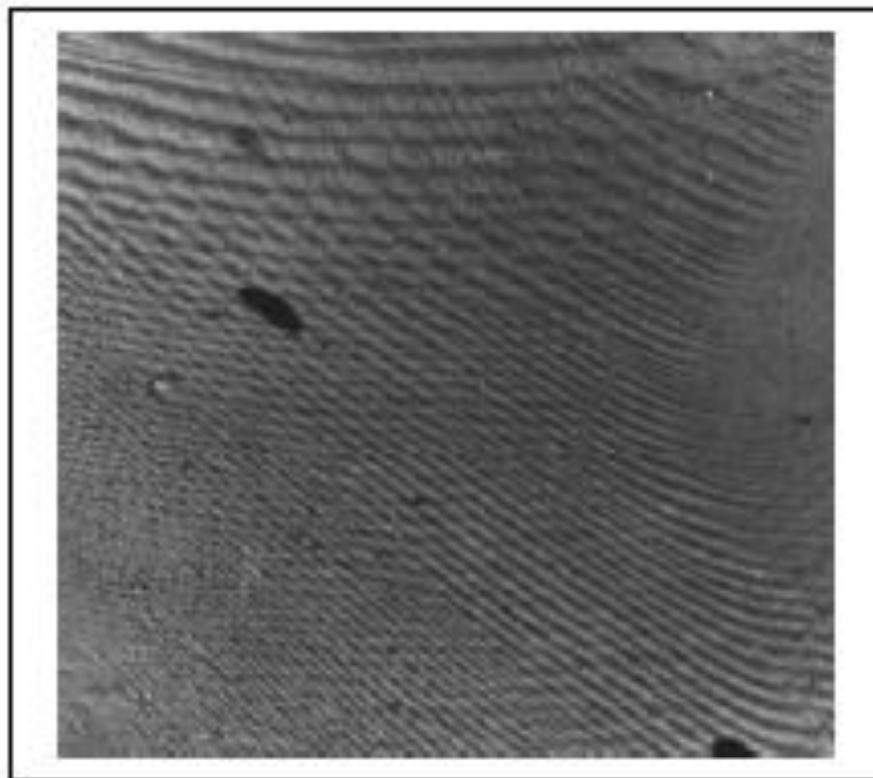


**TEORIA DA FORMAÇÃO DE ESTRIAS FRÁGEIS – RELACIONADA À FRAGILIZAÇÃO: PARTÍCULAS DURAS, HIDROGÊNIO E OUTROS. GERADAS POR LINHAS DE DISCORDÂNCIAS NOS PLANOS DE DESLIZAMENTO, GERALMENTE NOS PLANOS BASAIS (100). APARÊNCIA PLANA, SEM DEFORMAÇÃO PLÁSTICA MACROSCÓPICA.**

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





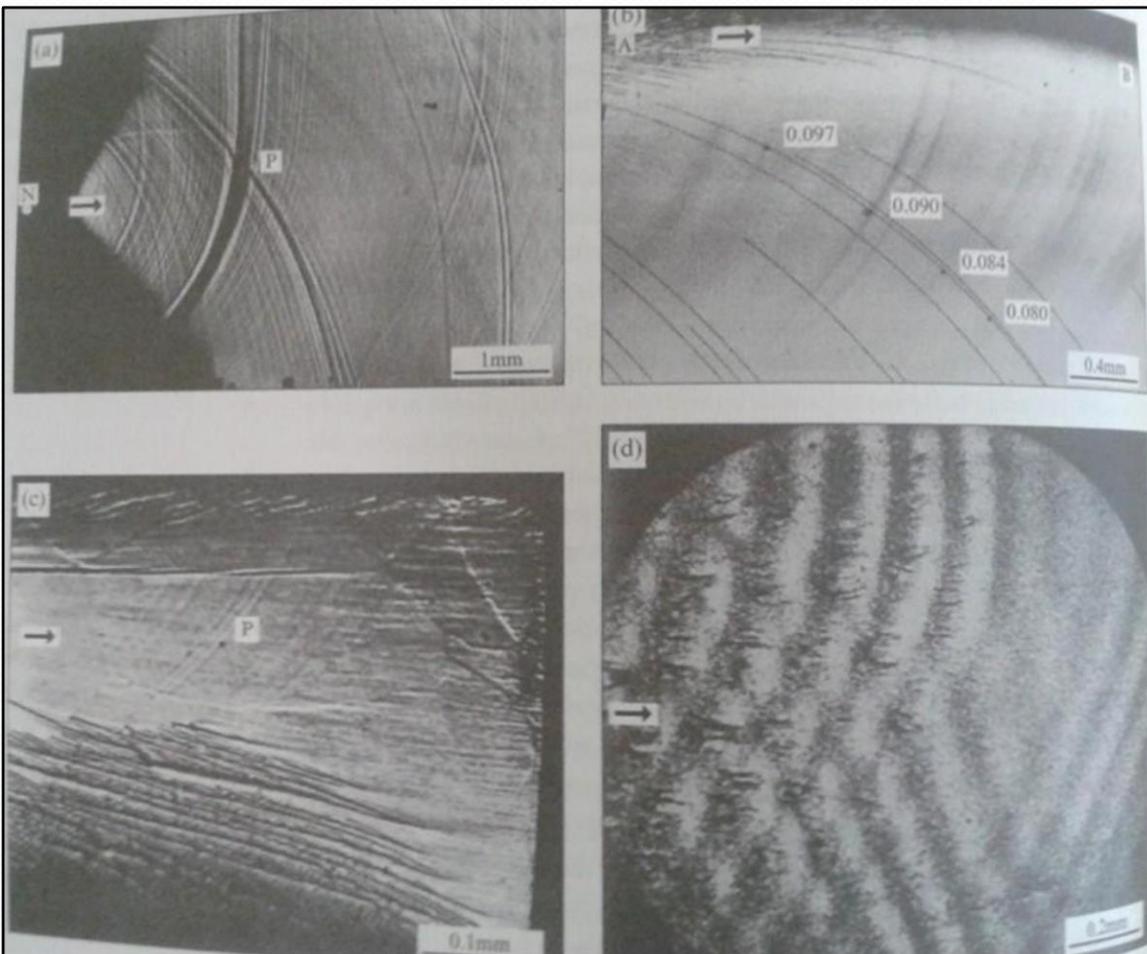


Linhas de Wallner

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 discontinuidades 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

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

$$C_s = 0,4 C_d$$



# **Metodologias de Projeto em Fadiga**

# Filosofias de Projeto

## Vida Infinita

Este critério exige que as tensões atuantes estejam abaixo da tensão limite de fadiga.

## Vida Finita

Condições de carregamento sensivelmente imprevisíveis, ou ao menos, não constantes. A vida selecionada para o projeto deve incluir uma margem de segurança para levar em consideração o carregamento

## Falha Segura

Este critério considera a possibilidade de ocorrência de trincas de fadiga, porém, sem levar ao colapso as estruturas antes destas fissuras serem detectadas e reparadas.

## Tolerante ao Dano

Este critério é um refinamento do anterior, porém, levando em consideração a existência de uma trinca, o projeto da estrutura é executado para que esta trinca não cresça, evitando a falha do componente.

- Em estruturas e equipamentos de engenharia, as **peças e componentes** devem apresentar **resistência à fadiga**;
- Componentes são :
  - Fabricados com **diferentes materiais**,
  - Submetidos a **diferentes ciclos de carregamento**,
  - Demandam **diferentes exigências de segurança**, etc.
- Estes **diferentes cenários** fazem com que o critério de projeto e análise da resistência à fadiga tenha que ser **específico** para cada caso.

- Os **critérios de projeto** relacionados à **fadiga** foram sendo aperfeiçoados com o **aprofundamento do conhecimento do fenômeno**;
- Ainda assim, muitos **critérios antigos** ainda são **válidos**, em certas situações **específicas**;
- Os **principais critérios** de projeto são descritos a seguir, e serão **apresentados** com uma certa **ordem cronológica de desenvolvimento**.

# PROJETO PARA VIDA INFINITA

- Os **primeiros projetos** mecânicos, considerando a fadiga, eram baseados no dimensionamento dos componentes para **vida infinita**;
- Este critério exige que as **tensões atuantes** estejam **abaixo da tensão limite de fadiga**. Ainda hoje, muitas peças que operam com um carregamento cíclico aproximadamente constante durante vários milhões de ciclos, devem ser dimensionadas para vida infinita (virabrequim).
- Este é o **enfoque** mais **clássico** da análise de fadiga, usando os conceitos da curva de **Woehler** e da **tensão limite de fadiga**, tendo sido proposta ainda no **século passado**.

# PROJETO PARA VIDA FINITA

- Em muitas ocasiões as condições de carregamento são sensivelmente **imprevisíveis**, ou, ao menos, **inconstantes**;
- Assim, **se** um componente for projetado para a **carga máxima esperada**, as **dimensões, peso, custo**, etc., serão **excessivos, desnecessários**, pois a carga máxima ocorrerá apenas algumas poucas vezes ao longo da vida útil do equipamento;
- Assim, a **opção por uma vida finita** como critério de projeto, é plenamente justificável;
- A **vida selecionada** para o projeto deve incluir uma **margem de segurança** para levar em consideração a grande **dispersão da vida de fadiga** (relações de vida máxima, vida mínima da ordem de 10 : 1 podem ser facilmente encontradas nos ensaios de fadiga) bem como outros fatores não conhecidos ou não considerados.

- Dimensionamento ou análise pode ser tanto feito com base nas relações tensão-vida (S - N), deformação vida (e - N).

### ***EXEMPLOS:***

- Mancais de rolamento;
- Reservatórios Pressurizados;
- Componentes automobilísticos;
- Motores a jato.

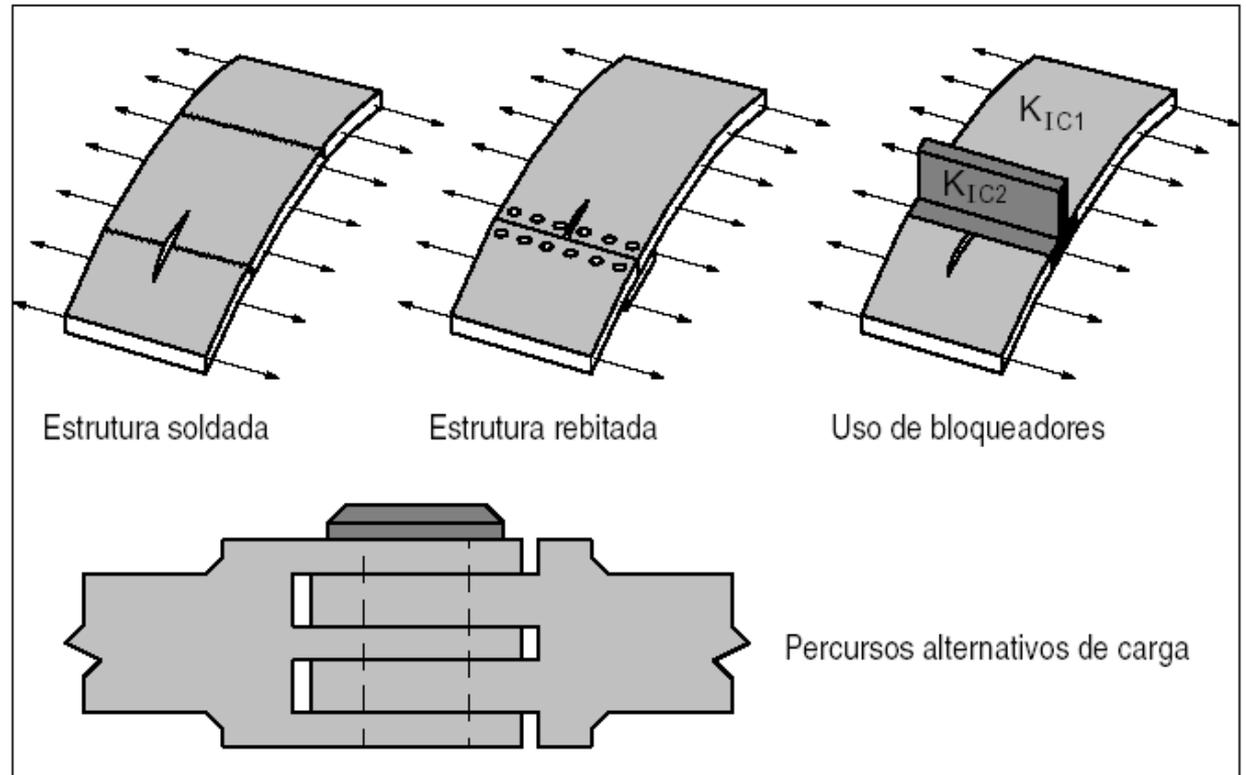
## PROJETO PARA FALHA SEGURA PFS (FAIL SAFE)

- Este critério foi desenvolvido pelos **engenheiros aeronáuticos**, já que estes não podem tolerar o **peso adicional** requerido por um coeficiente de segurança **alto**, nem o **risco** de falha implícito por um coeficiente **muito baixo**;
- O **critério** para falha segura considera a possibilidade de **ocorrência de trincas** de fadiga e dispõem a estrutura de modo que as **trincas não a levem ao colapso** antes de serem **detectadas e reparadas**.

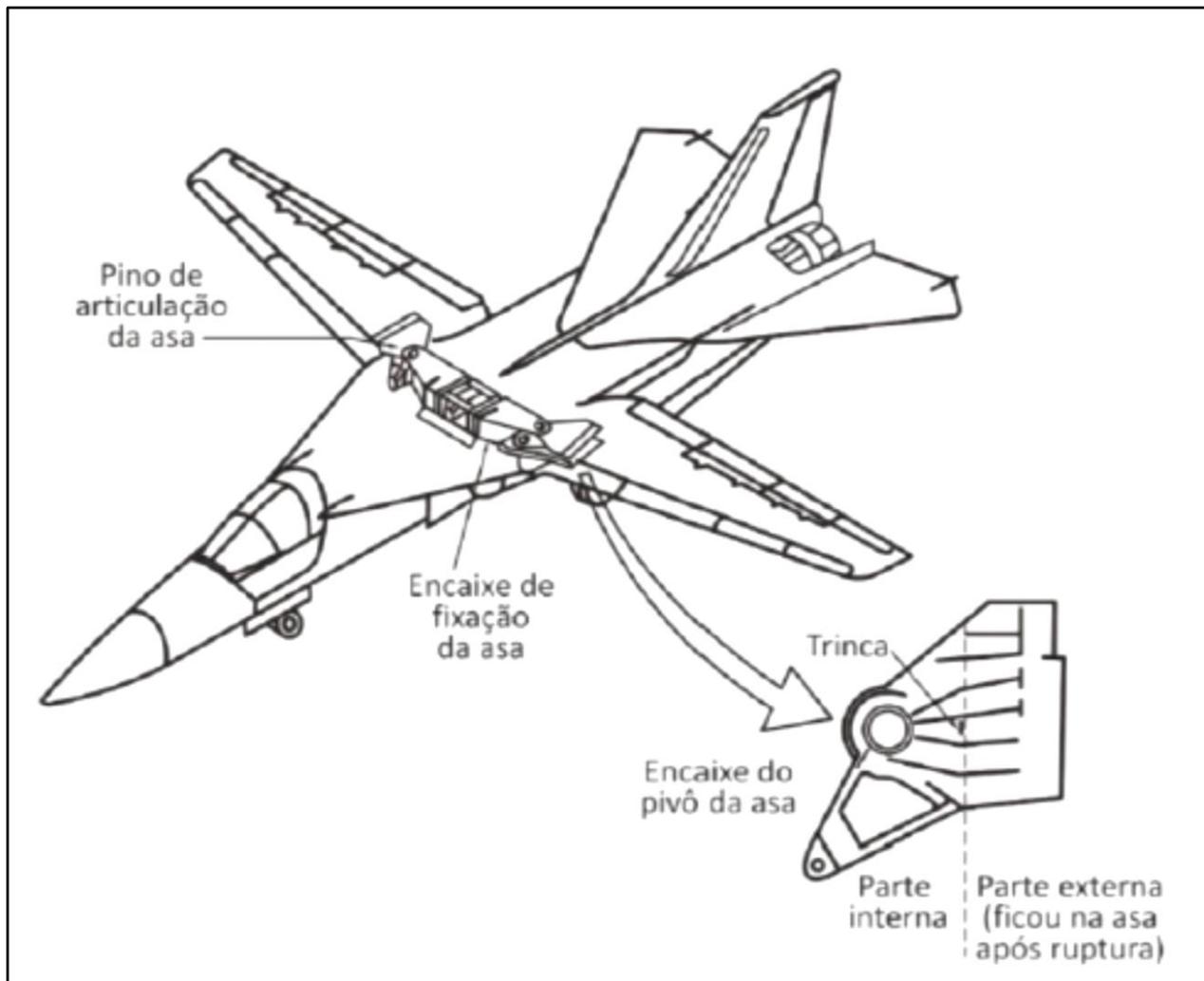
Alguns meios de possibilitar o comportamento "fail safe" em uma estrutura são: **introduzir bloqueadores de propagação**, ou elementos para impedir a propagação da trinca (crack arresters), usar uniões **rebitadas ou parafusadas** ao invés de soldadas, etc..

■ **EXEMPLOS:**

- Fuselagens e asas de aviões
- Cascos de navios
- Pontes.



**Acidente com um caça F-111 com apenas 104 horas de voo (1969)-ano que o homem pisou na Lua –deflagrou o desenvolvimento de projetos com tolerância ao dano pela Força Aérea Americana-peça com defeito de forjamento, na asa.**



# PROJETO COM TOLERÂNCIA AO DANO

- Este critério é um **aperfeiçoamento** da filosofia "**fail safe**". Parte-se do **princípio** de que a estrutura **possui uma trinca**, seja por defeito de fabricação, seja devida à operação (fadiga, corrosão sob tensão, etc.), e com os conceitos da **Mecânica da Fratura** são desenvolvidos os projetos de modo que as **trincas** pré-existentes **não cresçam** até o **tamanho crítico**, antes que sejam **detectadas pelas inspeções periódicas**;
- Este critério é mais **adequado** a materiais com **baixa velocidade de propagação de trincas e com alta tenacidade**. O tamanho **inicial** do defeito pode ser **estimado** (ao menos o seu limite superior) através de um **ensaio prévio de sobrecarga**;
- Se o **componente sobrevive** ao ensaio está assegurado que **não existem** defeitos (trincas) **acima** de uma dada dimensão. É um critério que usa extensivamente as modernas metodologias de projeto.

# Metodologias Aplicadas para Vida em Fadiga

$$N = N_i + N_p$$

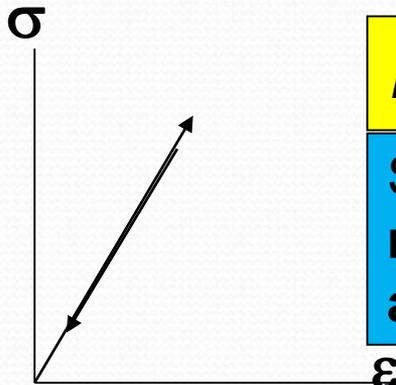
**Vida de Iniciação - Tempo para nucleação: uso da análise clássica de fadiga**

**Vida de Propagação – Tempo necessário para uma trinca crescer até tornar-se crítica: uso da Metodologia da MFEL**

**Análise Clássica da Fadiga**

**Metodologia Tensão-Vida**

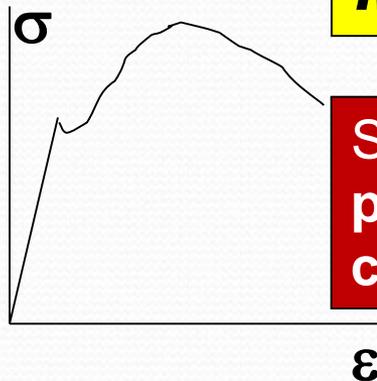
**Metodologia Def. - Vida**



**Metodologia Tensão-Vida**

Se as tensões forem sempre dentro do regime elástico (abaixo do LE): fadiga de alto ciclo ou controlada pela tensão

**Metodologia Def. - Vida**

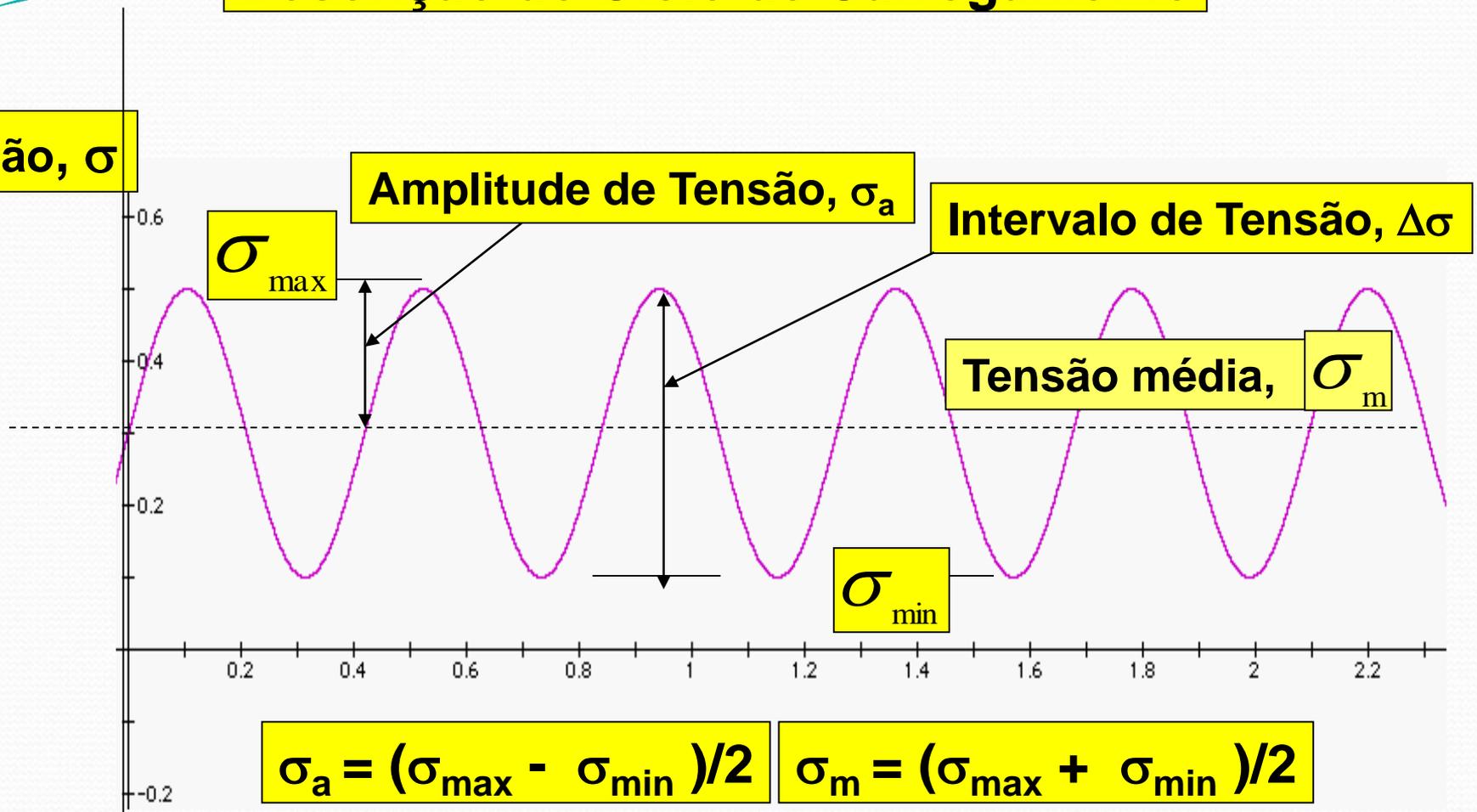


Se as tensões levarem a deformações plásticas (acima do LE): fadiga de baixo ciclo ou controlada pela deformação.

# DEFINIÇÕES E CONCEITOS

## Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão,  $\sigma$



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

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

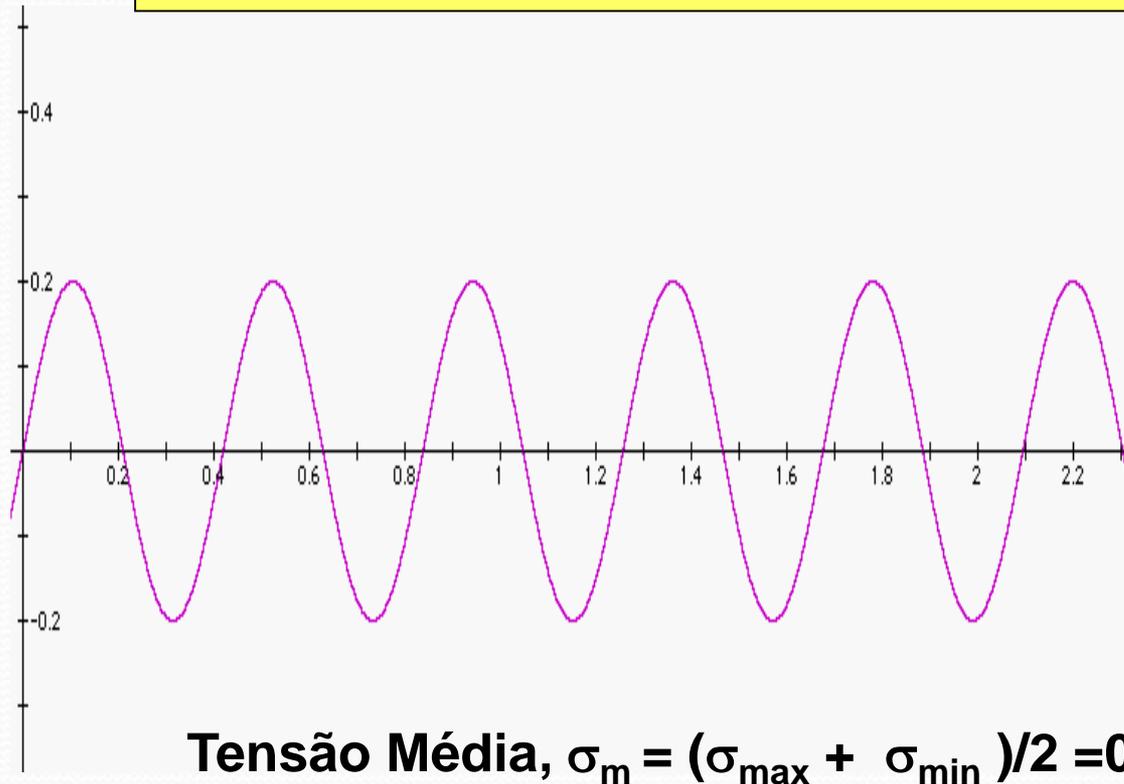
$$\Delta\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

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

RAZÃO DE AMPLITUDE

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$

## Carregamentos completamente reversos

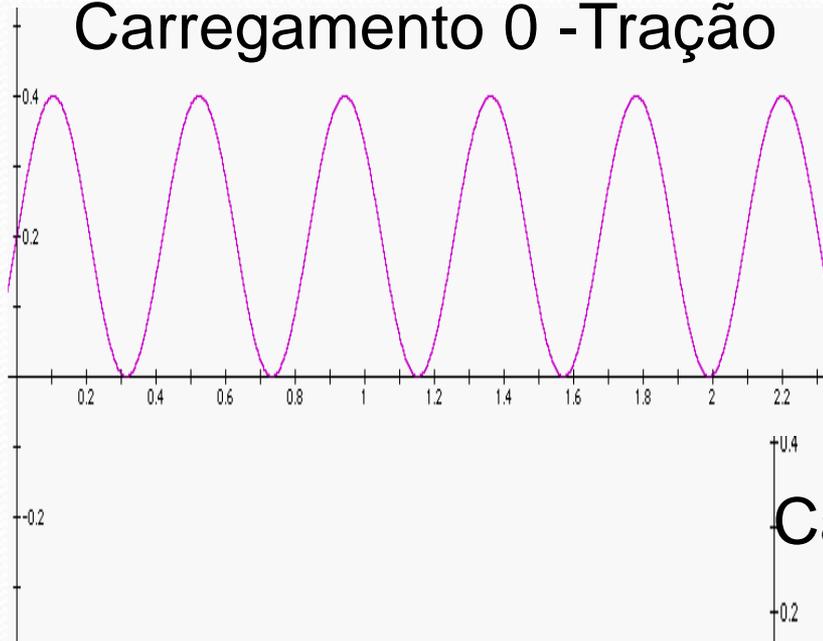


Razão de Tensões,  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$  ←

Razão de Amplitudes,  $A = \sigma_a / \sigma_m = \infty$

UTILIZADO NAS  
HOMOLOGAÇÕES  
DE PEÇAS  
AUTOMOTIVAS

## Carregamento 0 - Tração



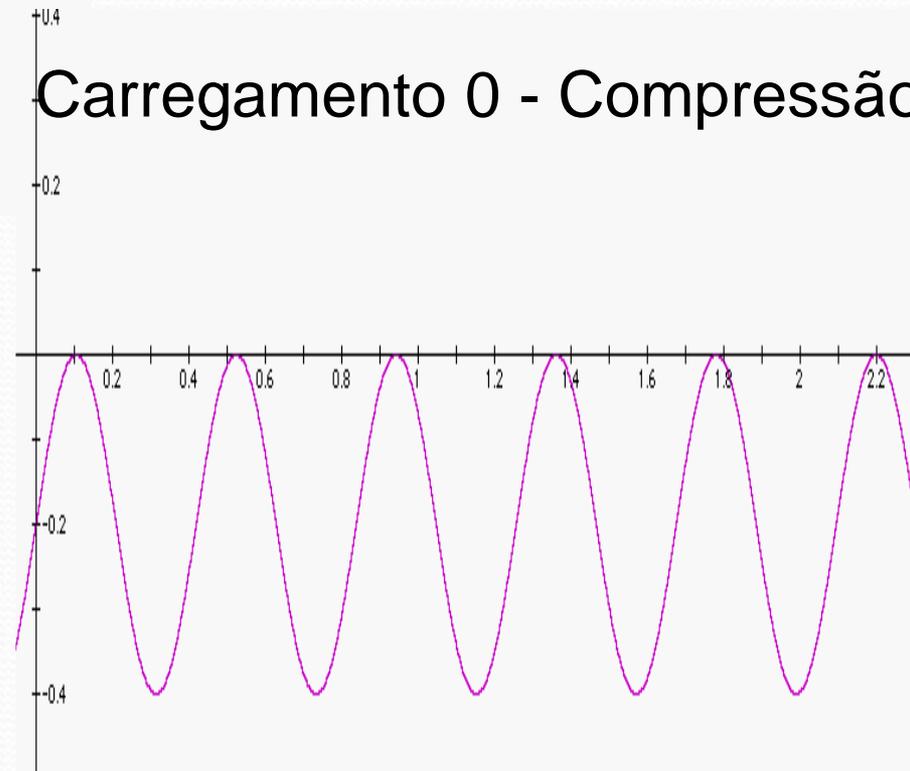
$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0$$

$$A = \sigma_a / \sigma_m = 1$$

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

$$A = \sigma_a / \sigma_m = 1$$

## Carregamento 0 - Compressão



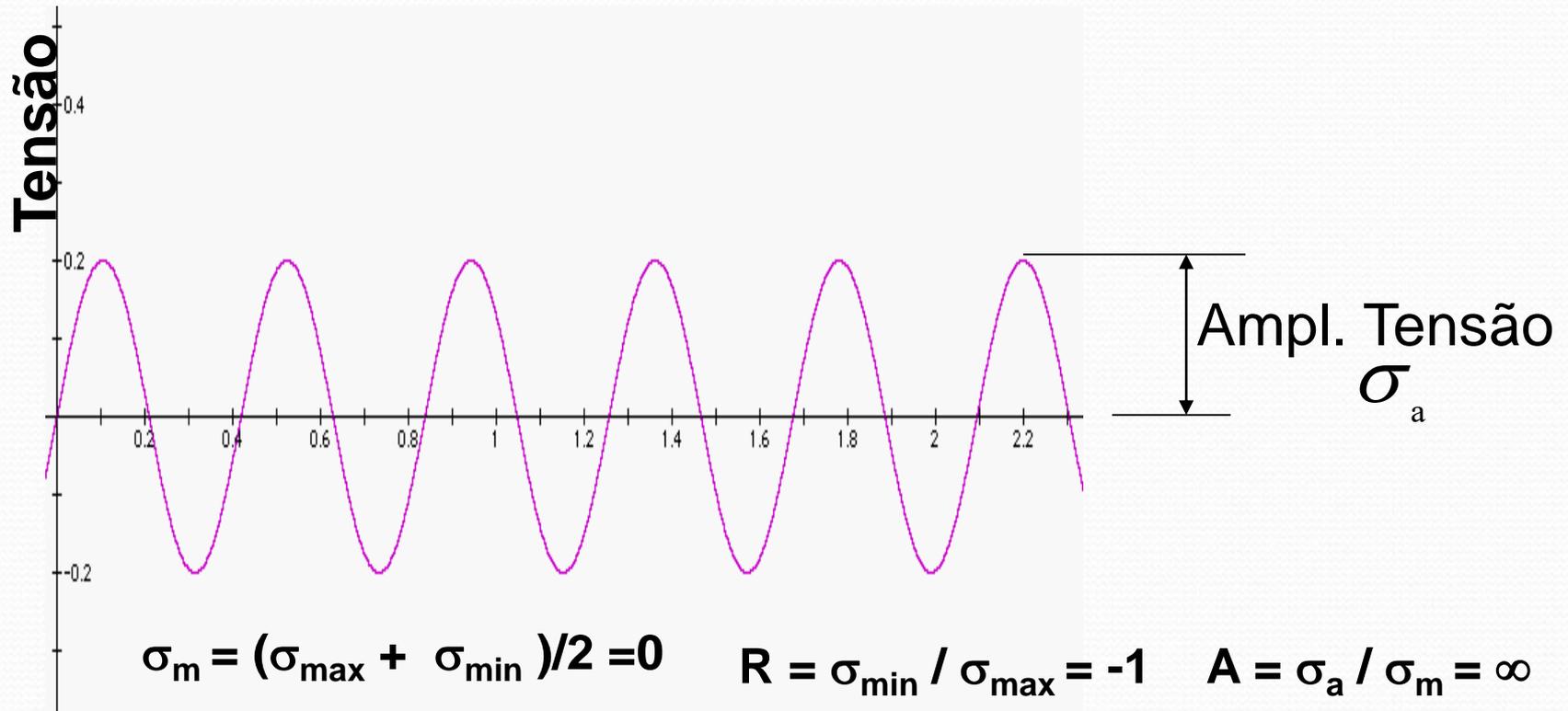
# Método Tensão - Vida

- Esta metodologia pode ser usada quando os **níveis de tensão** são muito **inferiores** ao **limite de escoamento** do material.
- É também conhecida como **Fadiga de Alto Ciclo, FAC** ou **Fadiga em Baixa Tensão, FBT**.
  - **Dados S-N**
  - **Limite de Fadiga**
  - **Resistência à Fadiga**
  - **Vida Finita**
  - **Efeitos da Tensão Média**
    - **Modelos**
      - **Vida infinita**
      - **Vida finita**

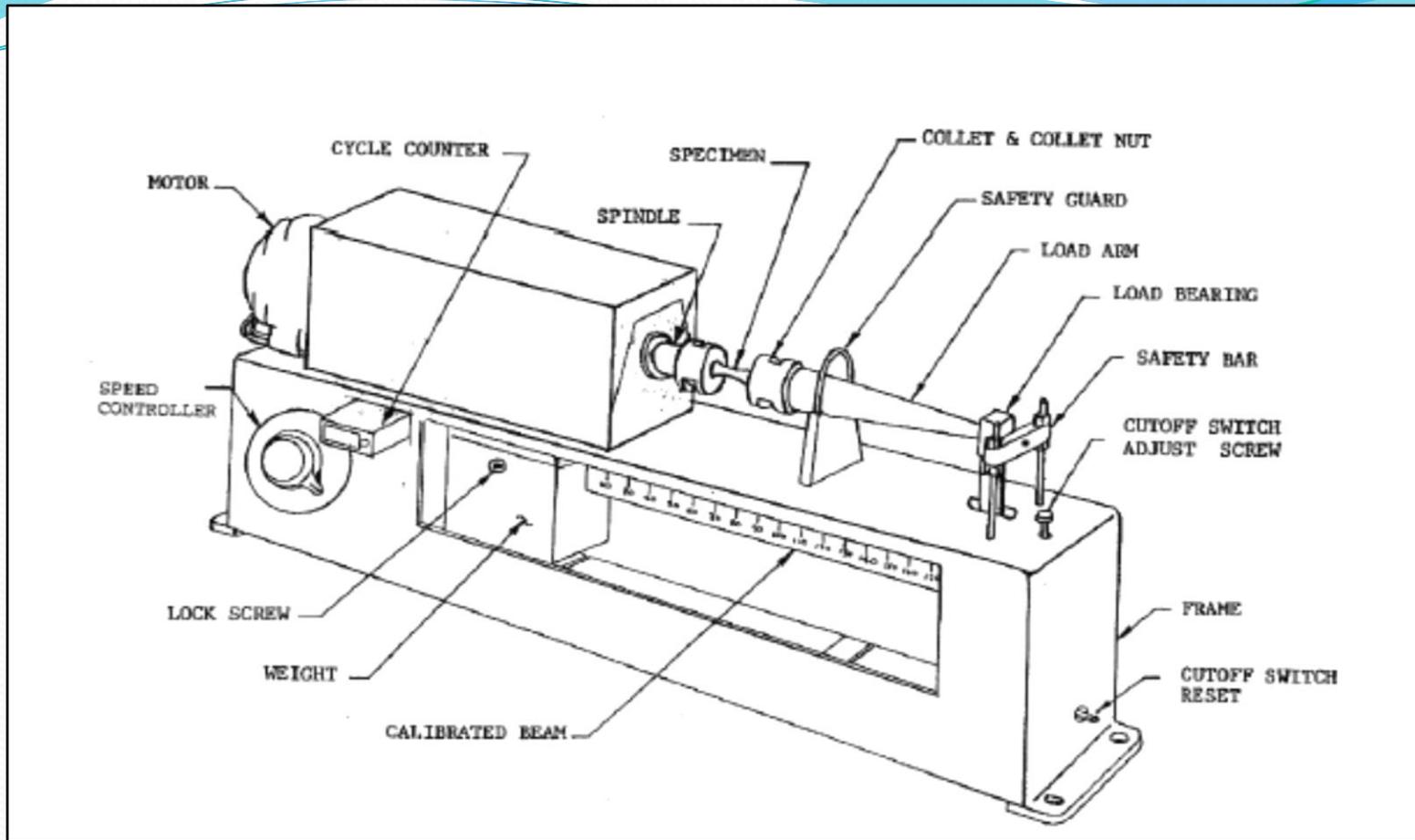
# Propriedades de Fadiga

Os dados de fadiga são comumente apresentados:

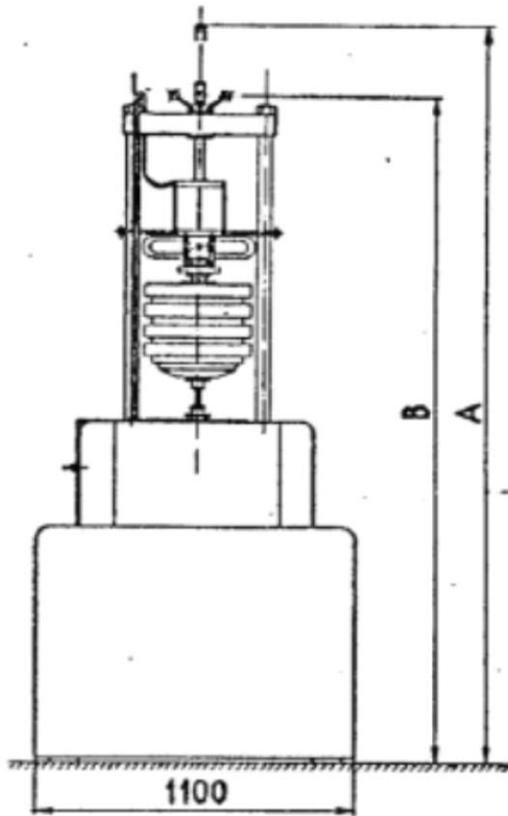
- para CP polidos;
- Sob flexão reversa.



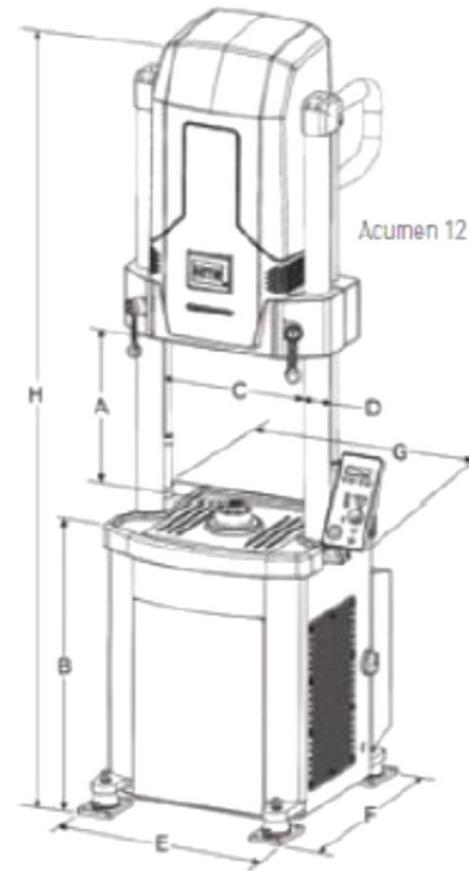
# FADIGA



•Wöhler (1852) – Conclui, entre outras que o fenômeno da fadiga de alto ciclo é dependente de condições macroscópicas e microscópicas o que leva a uma dispersão estatística, aleatória.



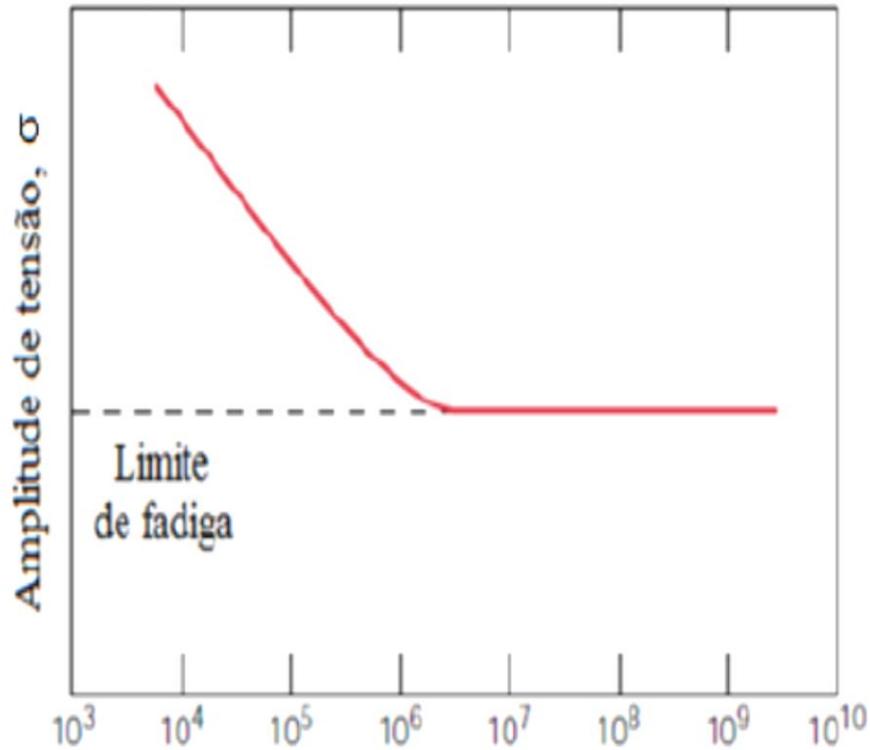
(a)



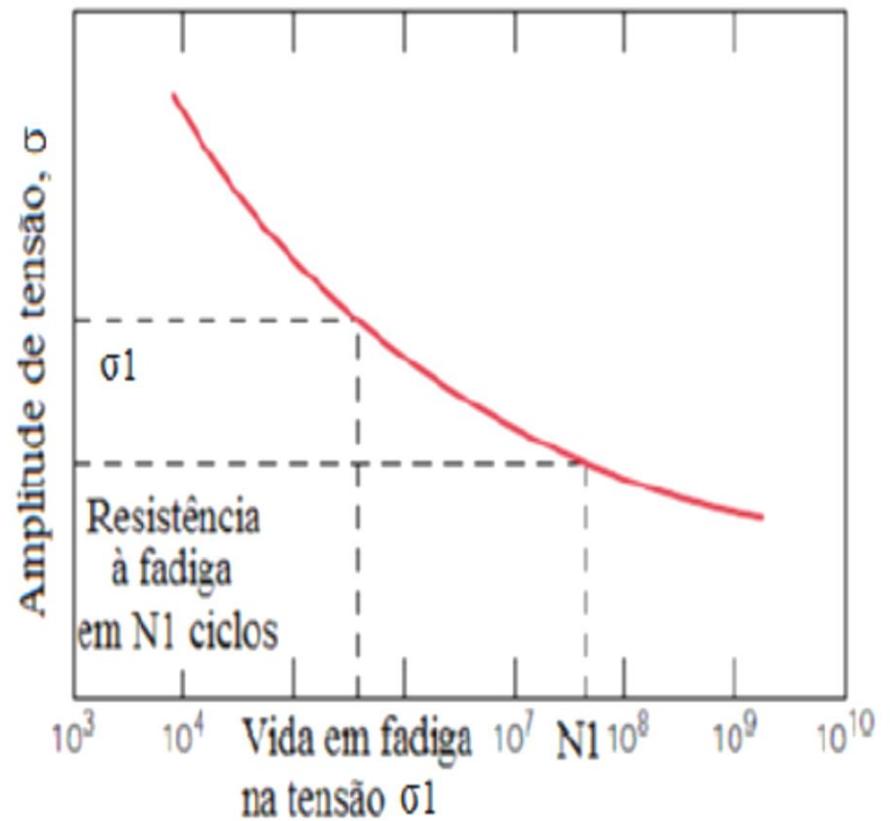
(b)

Figura 8.23 Máquinas de fadiga axiais: (a) vibróforo; (b) máquina eletrodinâmica.

# FADIGA

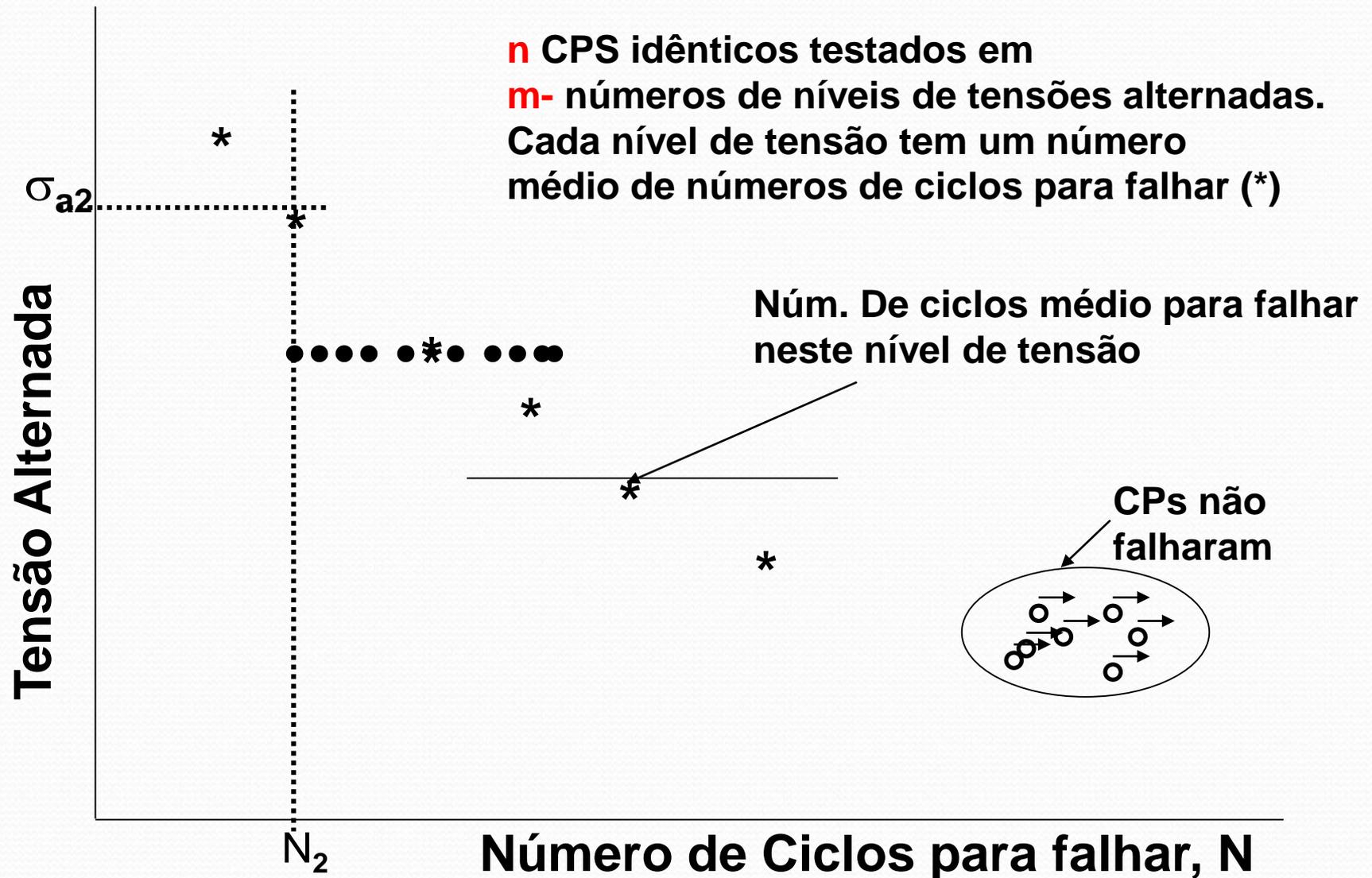


(a) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)

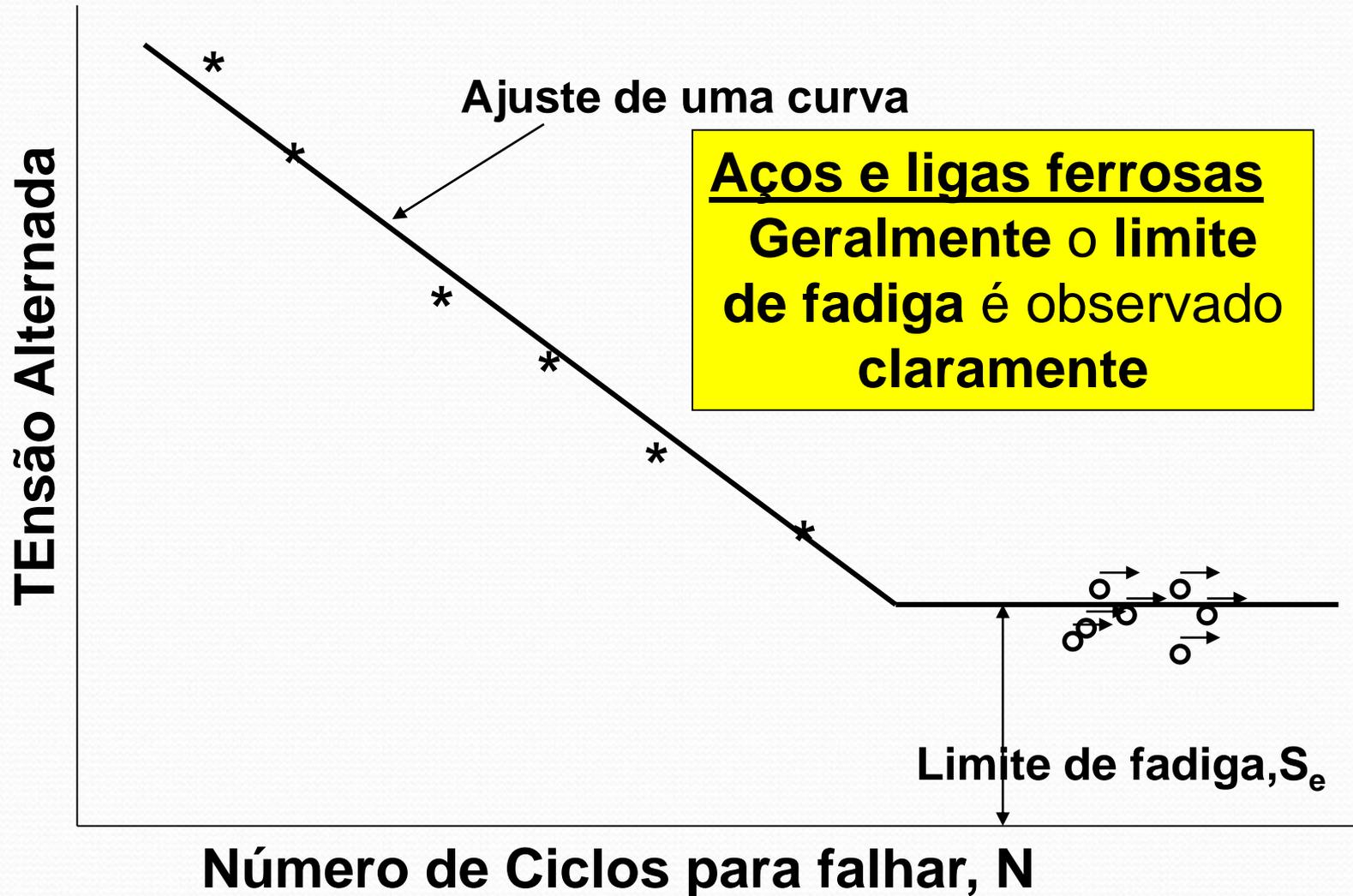


(b) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)

# Dados S-N - Espalhamento nos Resultados experimentais



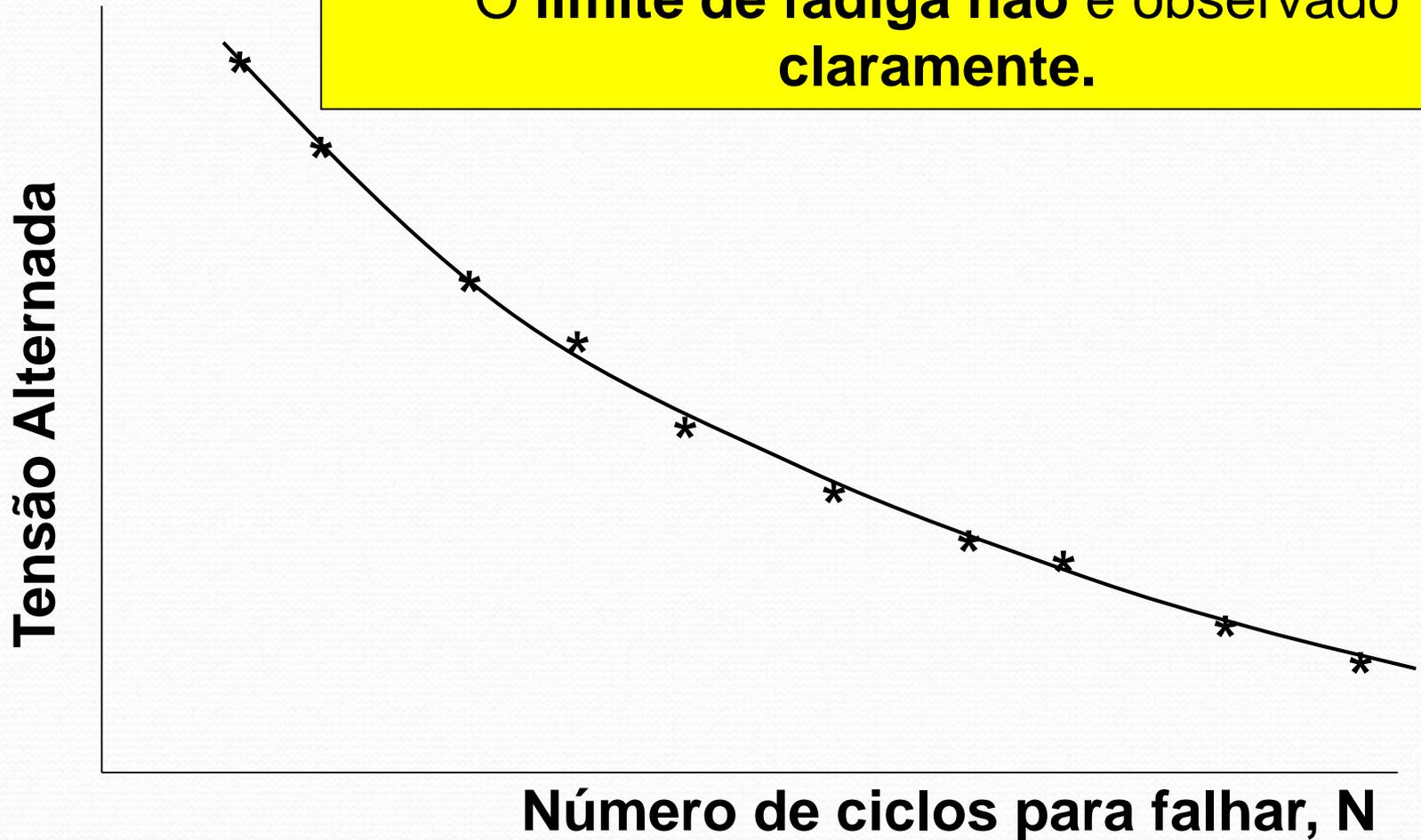
# Curva S-N & Limite de Fadiga



## Dados S-N sem o Limite de Fadiga

### Ligas não Ferrosas

O limite de fadiga não é observado claramente.



## Vida Finita – Relação Tensão - $N_f$

- $N_f$  varia rapidamente com o nível de tensão, sendo esta variação de várias ordens de magnitude.
- Por esta razão  $N$  é colocado em gráfico em escala logarítmica.
- Se os dados S-N formam uma reta em escala Log – Linear:

$$\sigma_a = C + D \log N_f$$

- Para dados que forma uma reta em escala Log-Log

$$\sigma_a = A N_f^B$$

- Podendo ser escrita de uma outra forma (clássica lei de Basquin)

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b$$

$$A = 2^b \sigma'_f$$

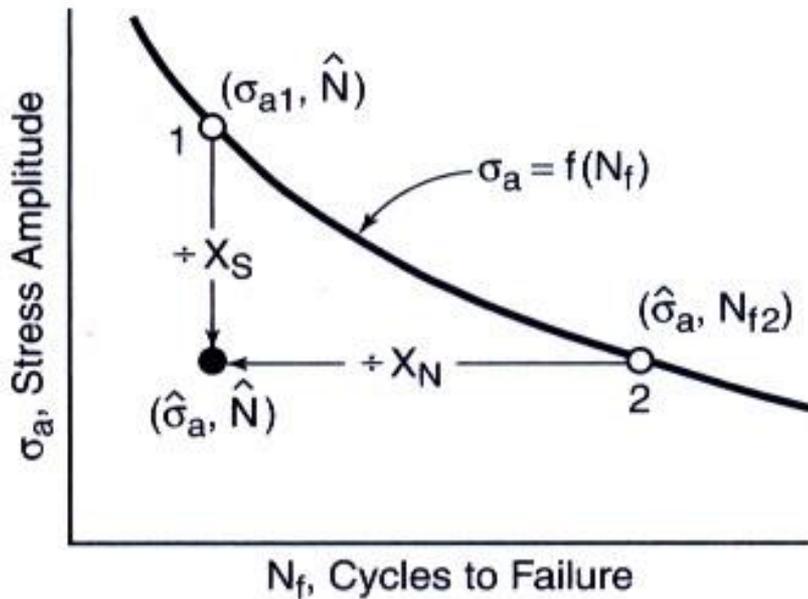
$$B = b$$

Constantes para a curva Tensão-Vida para alguns metais, ensaiados em fadiga com tensão média zero e corpos de prova não entalhados e carregamentos axiais

Material	Limite de escoamento	Limite de resistência	Tensão Verd. de fratura	$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b = AN_f^B$		
	$\sigma_o$	$\sigma_u$	$\bar{\sigma}_{fB}$	$\sigma'_f$	A	b = B
<i>(a) Steels</i>						
SAE 1015 (normalized)	228 (33)	415 (60.2)	726 (105)	1020 (148)	927 (134)	-0.138
Man-Ten (hot rolled)	322 (46.7)	557 (80.8)	990 (144)	1089 (158)	1006 (146)	-0.115
RQC-100 (roller Q & T)	683 (99.0)	758 (110)	1186 (172)	938 (136)	897 (131)	-0.0648
AISI 4142 (Q & T, 450 HB)	1584 (230)	1757 (255)	1998 (290)	1937 (281)	1837 (266)	-0.0762
AISI 4340 (aircraft quality)	1103 (160)	1172 (170)	1634 (237)	1758 (255)	1643 (238)	-0.0977
<i>(b) Other Metals</i>						
2024-T4 Al	303 (44.0)	476 (69.0)	631 (91.5)	900 (131)	839 (122)	-0.102
Ti-6Al-4V (solution treated and aged)	1185 (172)	1233 (179)	1717 (249)	2030 (295)	1889 (274)	-0.104

Os valores da tabela tem unidades em MPa (ksi) exceto para as unidades adimensionais b=B

# Fator de Segurança para a curva S-N

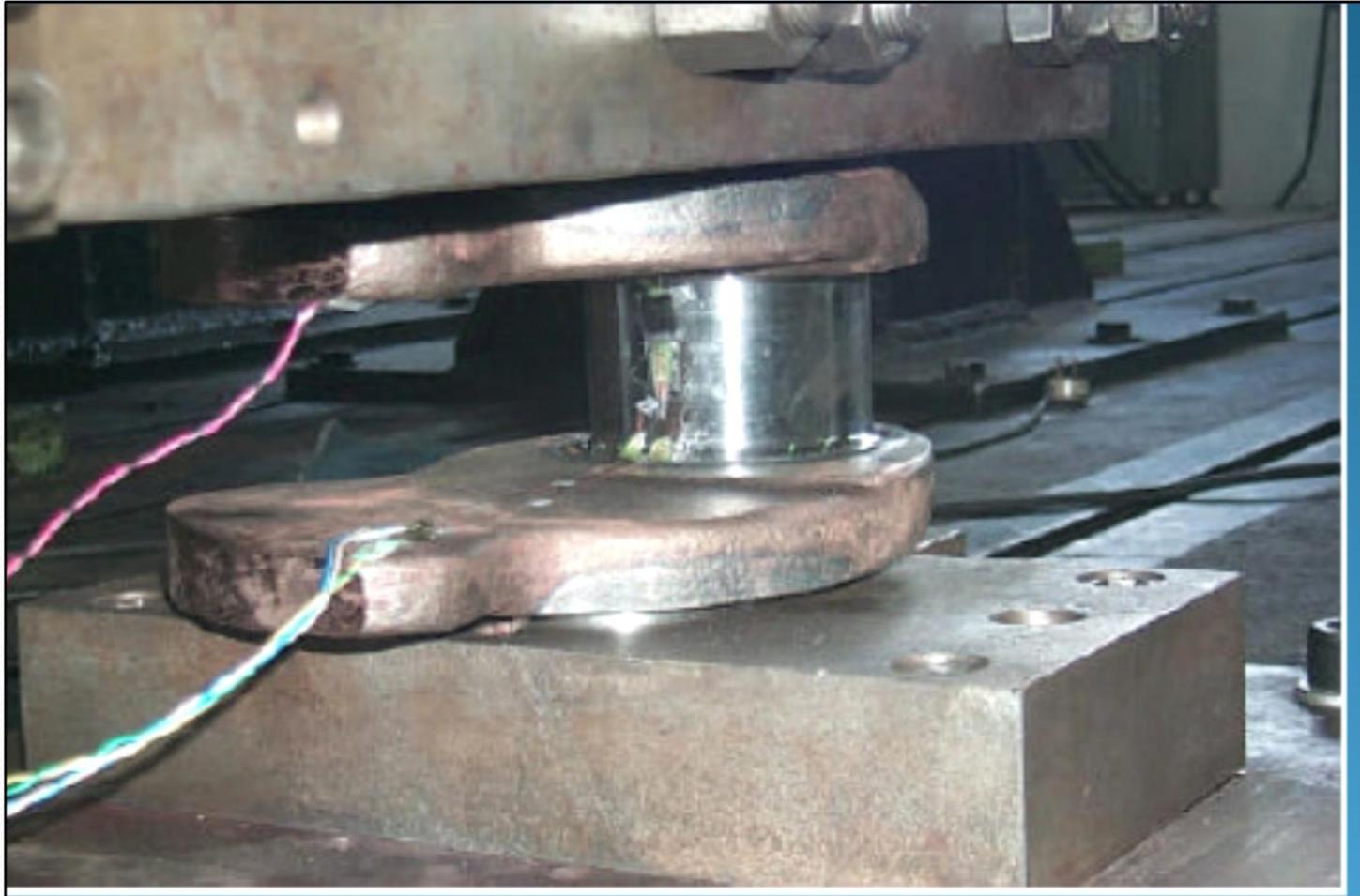


$$X_S = \frac{\sigma_{a1}}{\hat{\sigma}_a} \dots\dots\dots (N_f = \hat{N})$$

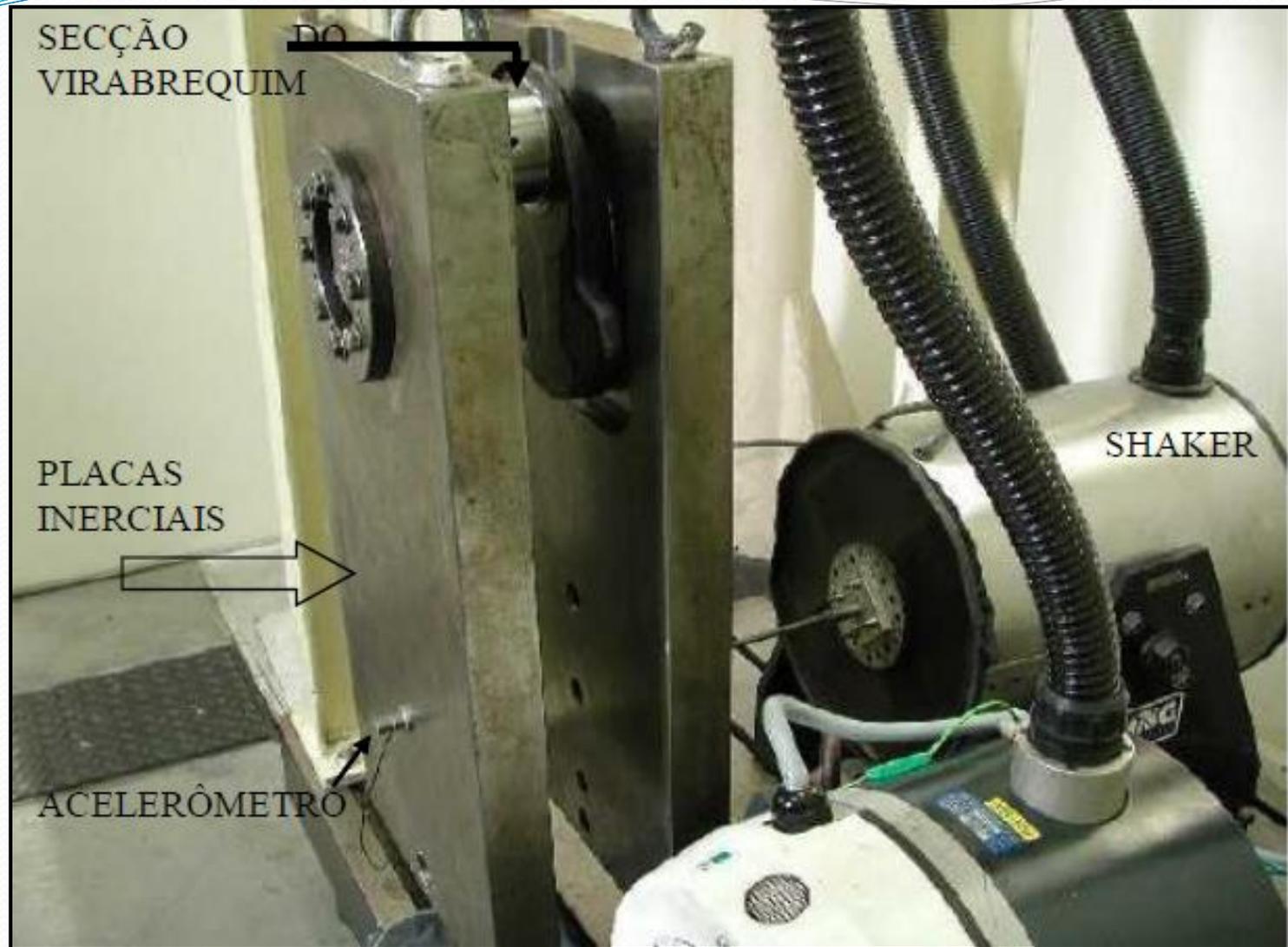
$$X_N = \frac{N_{f2}}{\hat{N}_a} \dots\dots\dots (\sigma_a = \hat{\sigma})$$

$$X_S = 1.5 \text{ a } 3$$

$$X_N = 5 \text{ a } 20 \text{ ou mais}$$



**DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS**



“SHAKER ELETROMAGNÉTICO”- RESONANT DWELL



**ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE LÍQUIDO PENETRANTE APÓS ENSAIO DE FADIGA PARA DETERMINAR LOCAL DA TRINCA.**

# FADIGA – ENSAIOS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

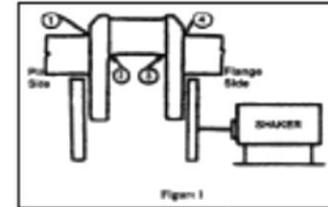
## Fatigue Tests Control Data Sheet

Testing Machine: \_\_\_\_\_

KR / heat code: \_\_\_\_\_

Customer: \_\_\_\_\_

Test Reason: \_\_\_\_\_



Test #	SAMPLE ID #	PIN #	Bending Moment (Nm)	Acceleration (G)	Frequency (Hz)	# of cycles	Date	Failure Location	Obs
1	1:1	1	3500,0	69,96	113,78	10.000.000	7/7/2009		
2	3:1	1	3600,0	76,20	114,67	198.236	8/7/2009	1	
3	4:2	2	3700,0	74,12	115,11	238.775	8/7/2009	3	
4	2:6	6	3600,0	72,04	115,09	10.000.000	13/7/2009		
5	4:6	6	3700,0	74,12	115,15	10.000.000	14/7/2009		
6	2:4	4	3600,0	76,20	115,32	2.734.528	15/7/2009	3	
7	4:4	4	3700,0	74,12	115,39	1.277.056	15/7/2009	1	
8	3:3	3	3600,0	72,04	115,19	10.000.000	17/7/2009		
9	1:5	5	3700,0	74,12	114,97	4.712.704	28/7/2009	3 - 4	
10	1:3	3	3600,0	72,04	114,98	10.000.000	29/7/2009		
11	5:1	1	3700,0	74,12	115,32	371.968	29/7/2009	3	
12	5:3	3	3600,0	72,04	115,18	10.000.000	31/7/2009		
13	6:2	2	3700,0	74,12	114,88	10.000.000	5/8/2009		
14	5:5	5	3600,0	76,20	114,39	279.335	5/8/2009	4	
15	6:6	6	3700,0	74,12	114,68	490.624	6/8/2009	4	
16	6:4	4	3600,0	72,04	114,74	1.159.936	6/8/2009	1	
17									
18									

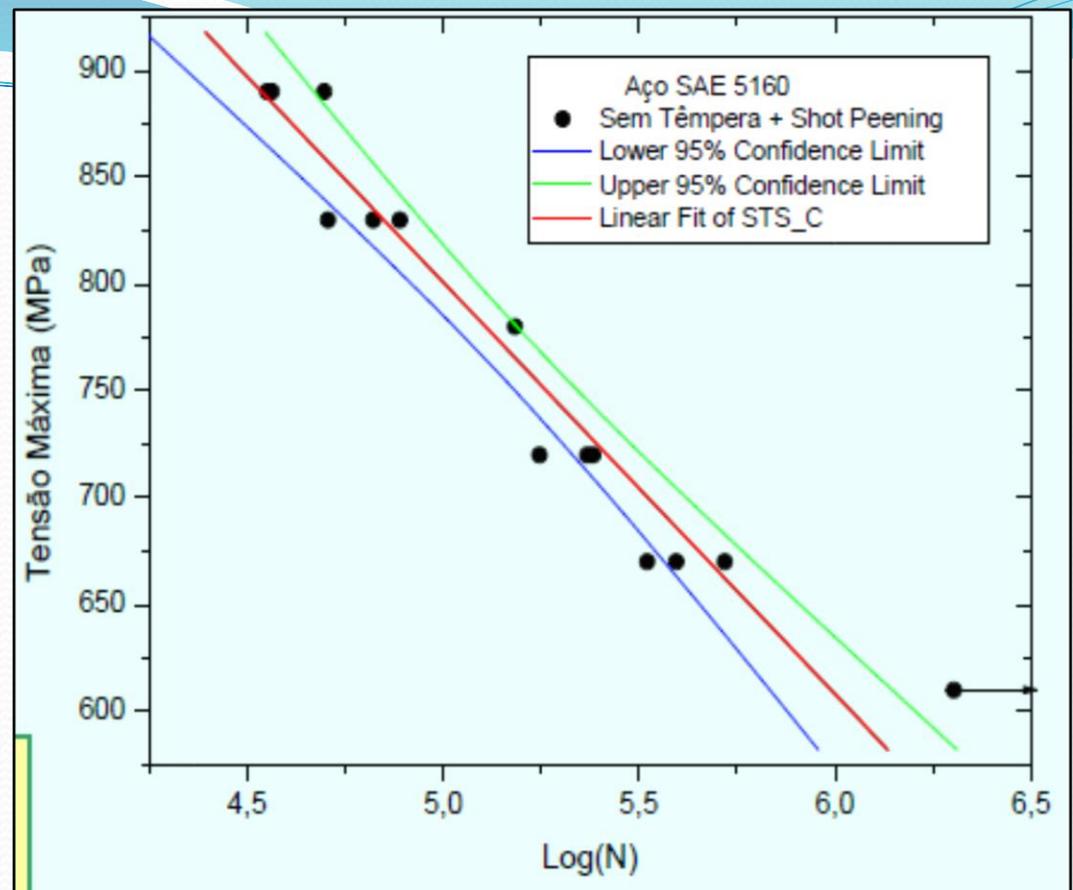
### Fatigue Limit (10.000.000 cycles)

50% (mean)	3772,2 Nm
95%	3719,5 Nm
std dev	68,7 Nm

### Stair Case Method According

Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments - McGraw Hill  
Lipson, C. and Sheth, N. J.  
Chapter 9 - Fatigue Experiments

Temos um nível de confiança de 95% de que a curva média de fadiga deste material esteja dentro do intervalo.



Exemplo: Um valor que pode ser usado em projeto de componentes é dado pelo **R95C90**, que significa que há 95% de probabilidade de sobrevivência, com nível de confiança de 90% para a solicitação em uma dada tensão.



# Exemplo

Alguns valores de amplitude de tensão e os ciclos correspondentes para falha em fadiga são dados na tabela abaixo para o aço AISI 4340. Estes ensaios foram realizados em corpos de prova não entalhados, carregados axialmente e com tensão média igual a zero.

$\sigma_a$ , MPa	$N_f$ , ciclos
948	222
834	992
703	6004
631	14130
579	43860
524	132150

- a) Coloque estes dados em gráfico de coordenadas Log-Log. Se estes valores representarem uma reta, obtenha os valores das constantes A e B a partir dos dois pontos mais separados;
- b) Obtenha os valores refinados de A e B usando a regressão linear dos mínimos quadrados a partir do gráfico  $\text{Log}(s_a) \times \text{Log}(N_f)$

$$\sigma_{a1} = A N_{f1}^B \quad \sigma_{a2} = A N_{f2}^B$$

$$\frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a2}} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^B$$

$$\log \left( \frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a2}} \right) = B \cdot \log \left( \frac{N_1}{N_2} \right)$$

$$B = \frac{\log \sigma_1 - \log \sigma_2}{\log N_1 - \log N_2} = \frac{\log(948) - \log(524)}{\log(222) - \log(132150)} = -0,0928$$

$$A = \frac{\sigma_1}{N_1^B} = \frac{948}{222^{-0,0928}} = 1565 \text{ MPa}$$

B) Nos ensaios de fadiga a tensão  $\sigma_a$  é escolhida em cada teste, é a variável independente e  $N_f$  é a dependente. Assim, para fazer o ajuste pelos mínimos quadrados a equação anterior transforma-se em:

$$\sigma_{a1} = A N_{f1}^B$$

$$N_f = \left( \frac{\sigma_a}{A} \right)^{1/B}$$

$$\log N_f = \frac{1}{B} \log \sigma_a - \frac{1}{B} \log A$$

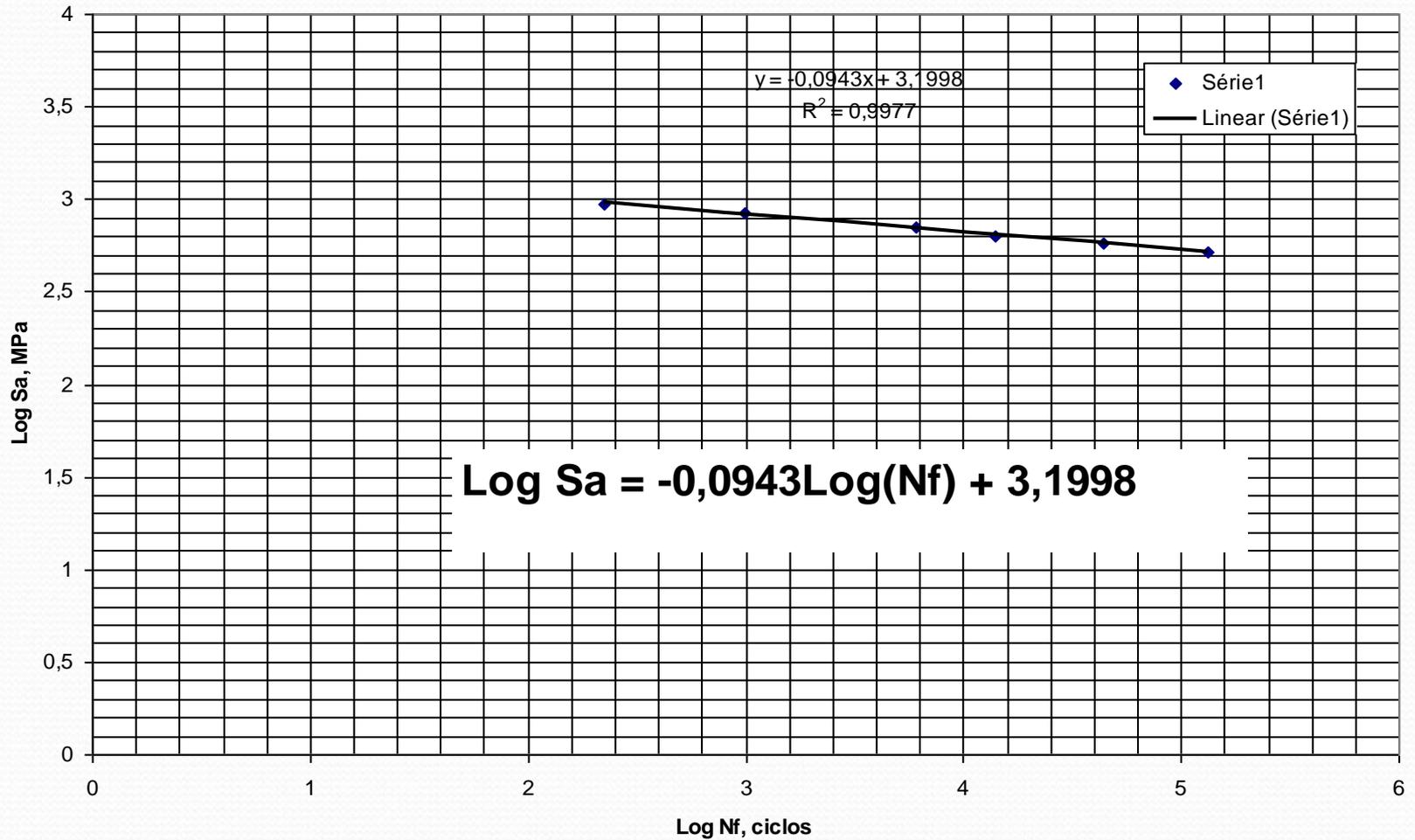
$$y = mx + c$$

$$y = \log N_f; \dots x = \log \sigma_a; \dots m = 1/B; \dots c = -\frac{1}{B} \log A$$

$$m = -10,582; \dots c = 33,87$$

$$B = 1/m = -0,0945; \dots A = 10^{-cB} = 1587$$

## Curva S-N





**FIM**