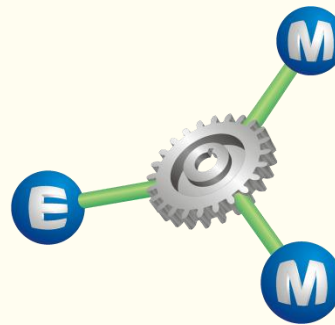




EESC-USP

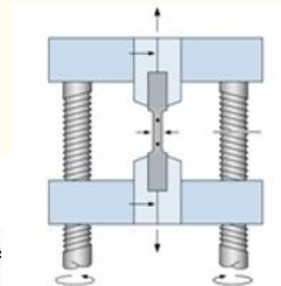
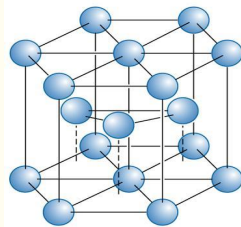
USP



NEMAF
Núcleo de ensaios de
materiais e análise de falhas

FADIGA DOS MATERIAIS: INTRODUÇÃO E METODOLOGIA S-N

Prof. Dr. Cassius Terra Ruchert





EESC-USP

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*



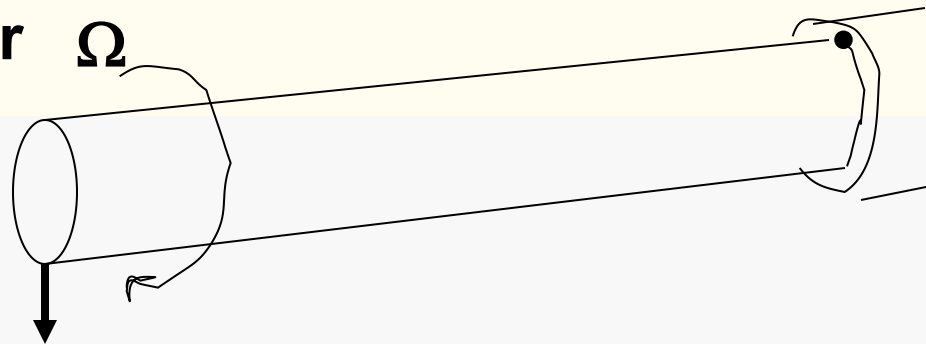
EESC-USP

Repetição ou Variação de Carga

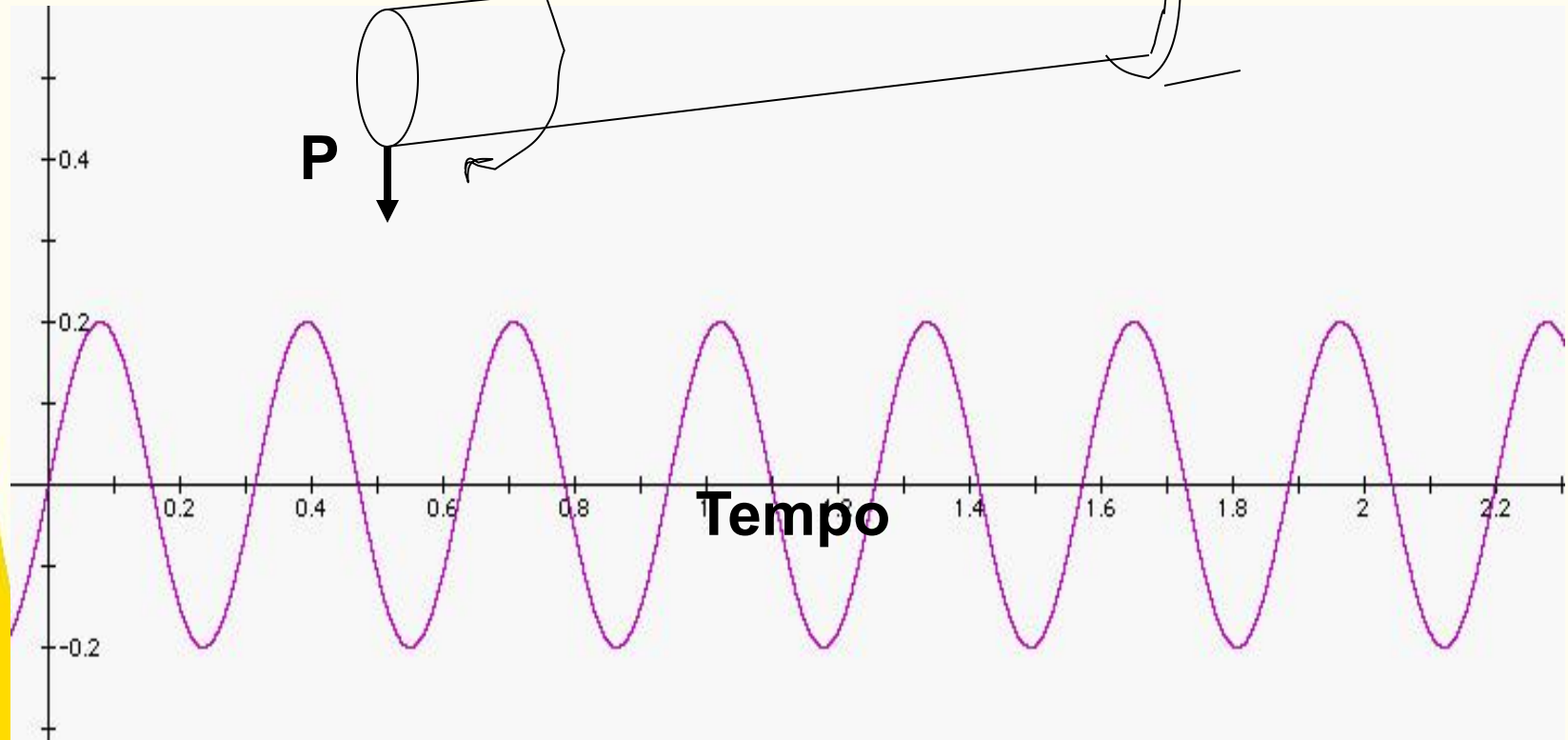
Veloci//
angular Ω

A

P



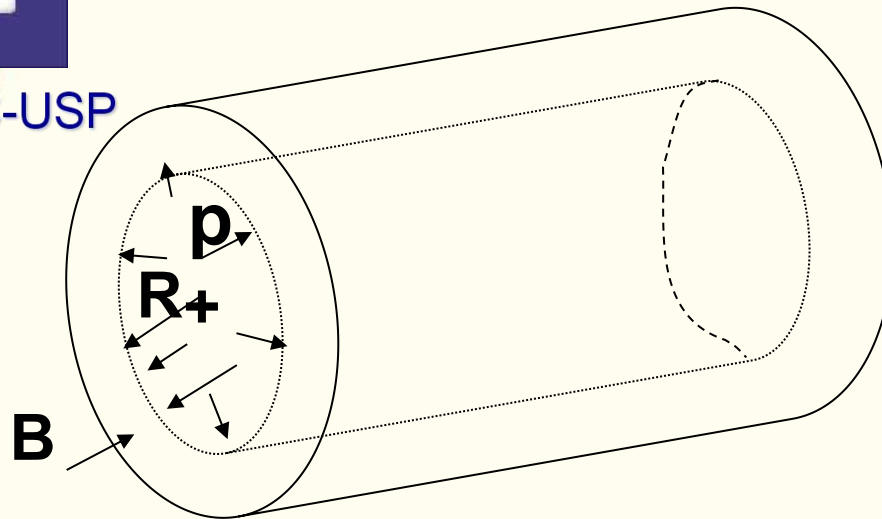
Tensão em A





EESC-USP

Repetição ou Variação de Carga



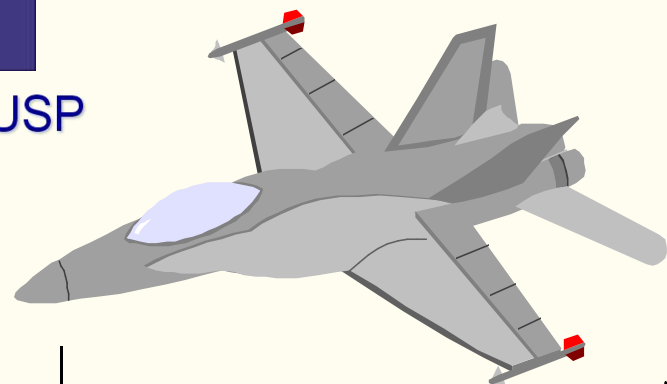
**Pressurização e
descompressão
uma vez ao dia**





EESC-USP

Repetição ou Variação de Carga



Tensão

Cargas em solo

Carregamento em vôo

Vôo médio

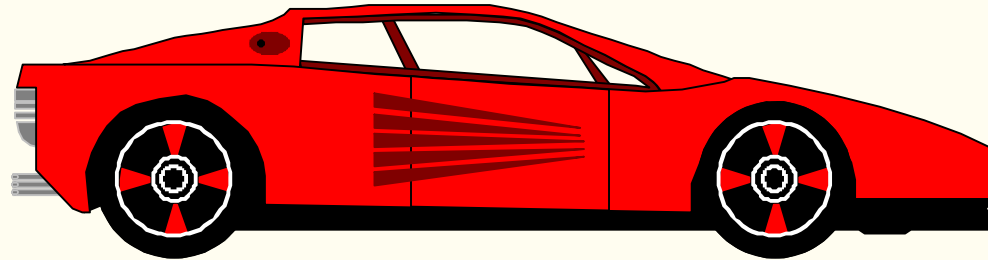
Média em terra

Tempo



EESC-USP

Repetição ou Variação de Carga



Carga

Típica história de tempo x carga para o eixo da roda

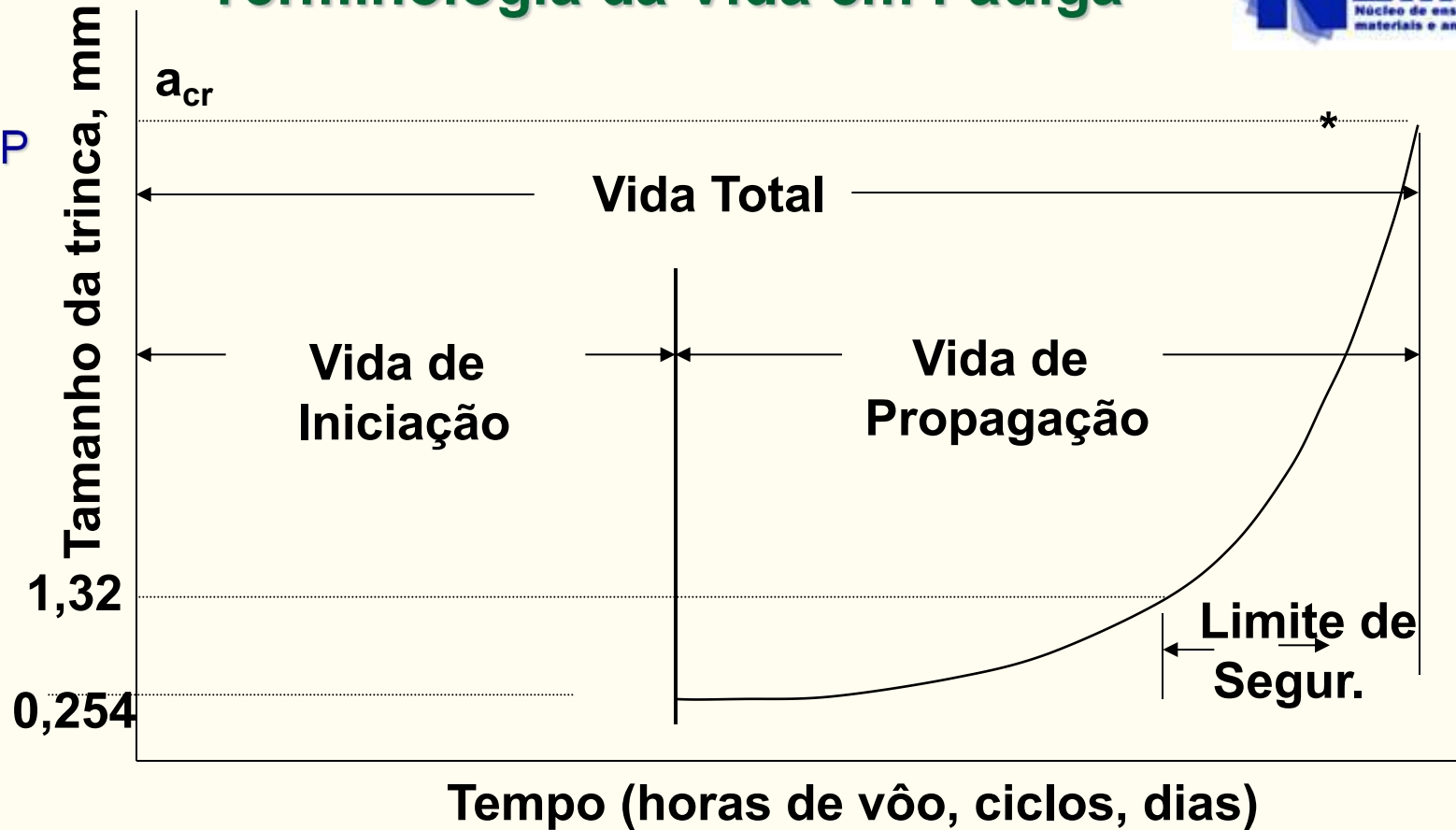


Tempo



EESC-USP

Terminologia da Vida em Fadiga



- **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



EESC-USP



Aspectos Macro e Microscópicos da Fratura por Fadiga em Metais

A fadiga é responsável por quase 80% das falhas mecânicas

Em 28 de Abril 1988, um avião Boeing 737 da Aloha Airlines sofreu uma descompressão brusca em voo e a perda da parte superior da fuselagem



O acidente foi devido a **propagação por fadiga de múltiplas trincas**, nas juntas sobrepostas longitudinais. Estas, inicialmente eram muito pequenas para serem detectadas nas inspeções normais.





EESC-USP

Falha por Fadiga



O processo de falha por fadiga é caracterizado por três etapas distintas:

- Iniciação da trinca (pequena trinca se forma)
- Propagação da trinca (avança em incrementos a cada ciclo de tensão)
- Fratura final (quando a atinge a_{crit} , a trinca caminha muito rapidamente)

0 (vida muito curta)

$$N_{total} = N_i + N_p + N_{ff}$$

Logo:

$$N_{total} = N_i + N_p$$

As proporções da duração de N_i e N_p dependem do material e condições de carregamento

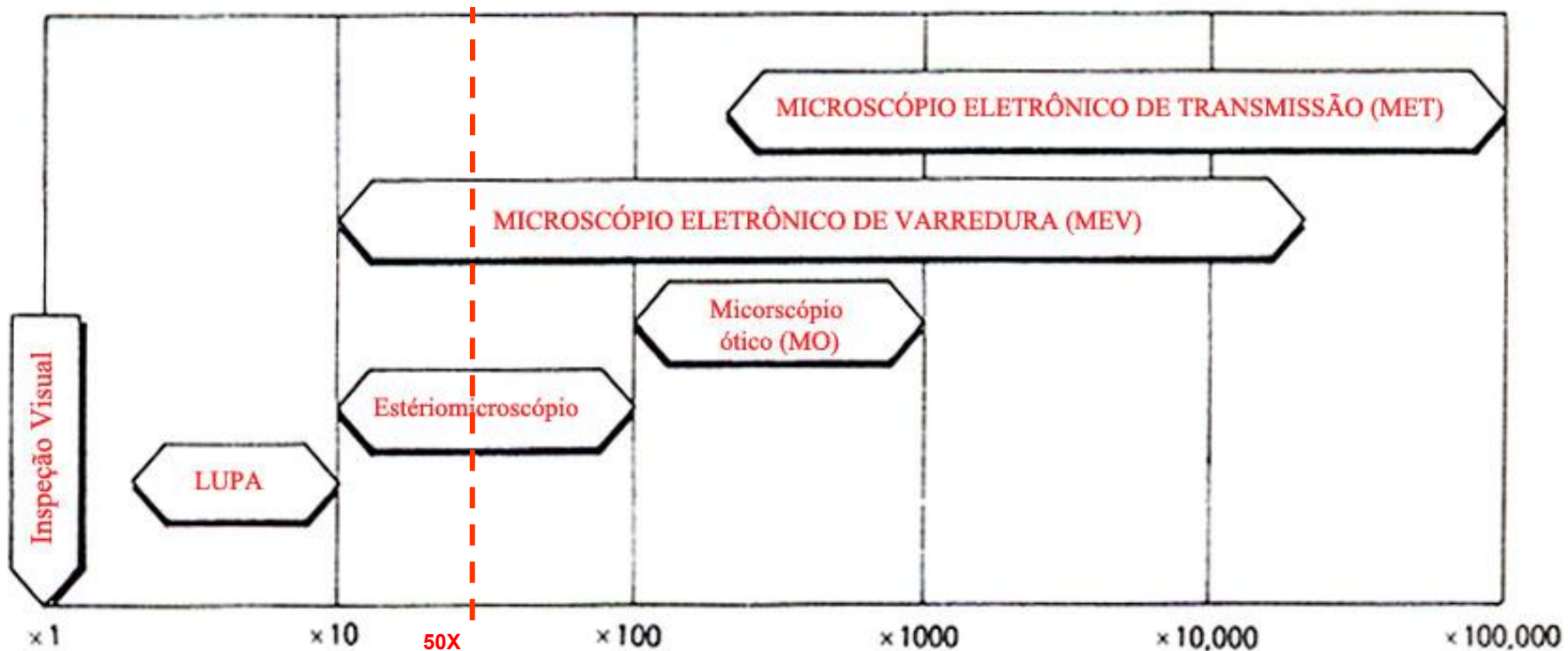
- ❑ Quando $N_i \gg \gg N_p$ – fadiga de alto ciclo (níveis baixos de tensão)
- ❑ Quanto $N_p \gg \gg N_i$ - fadiga de baixo ciclo (níveis altos de tensão)



Modo Macroscópico de Falha por Fadiga

Porquê chama-se macroscópico??

EESC-IISD



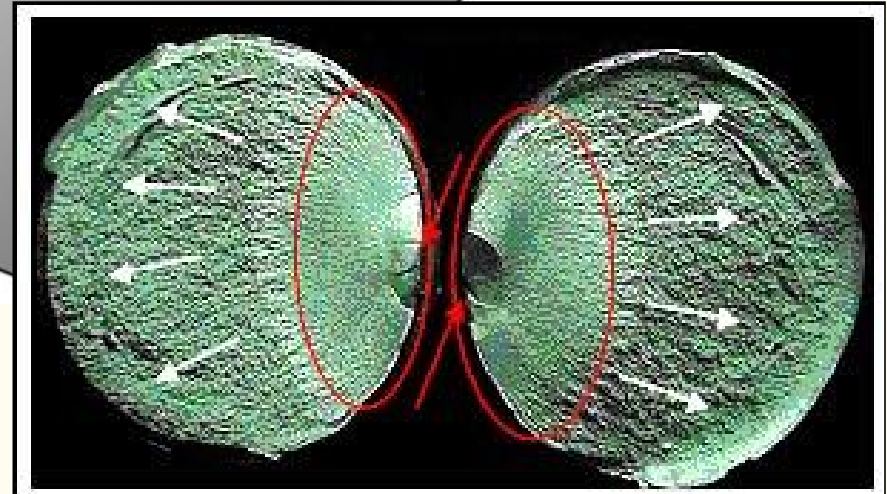
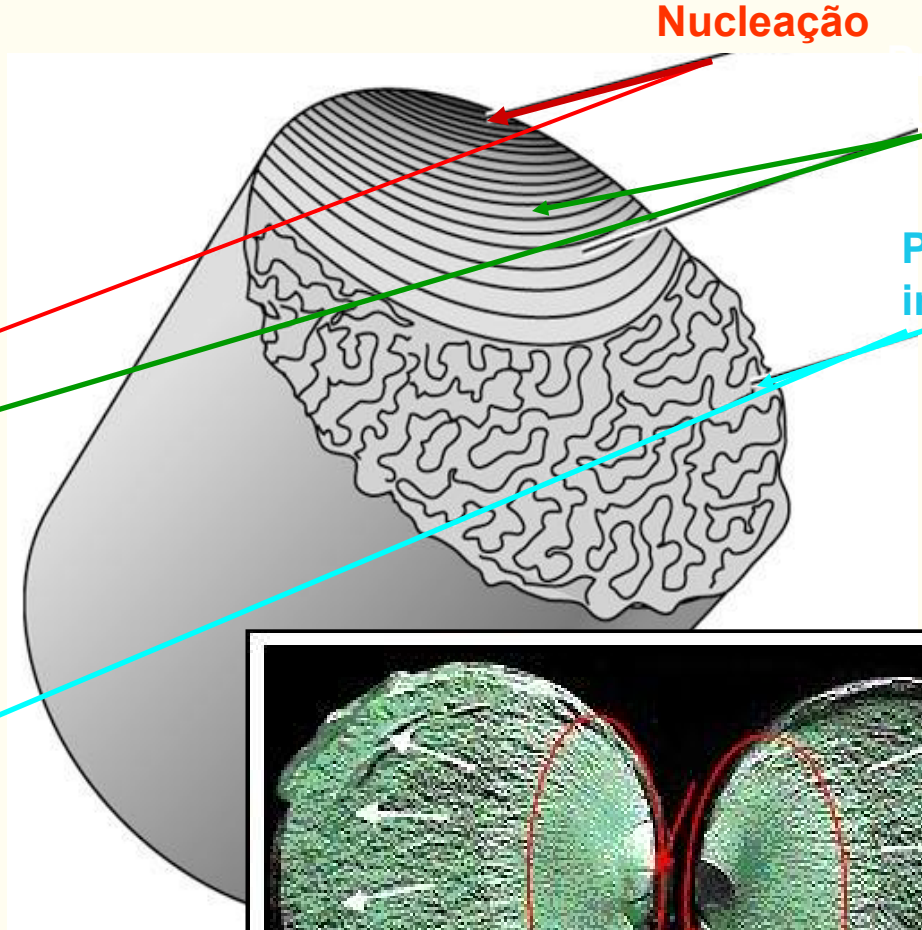
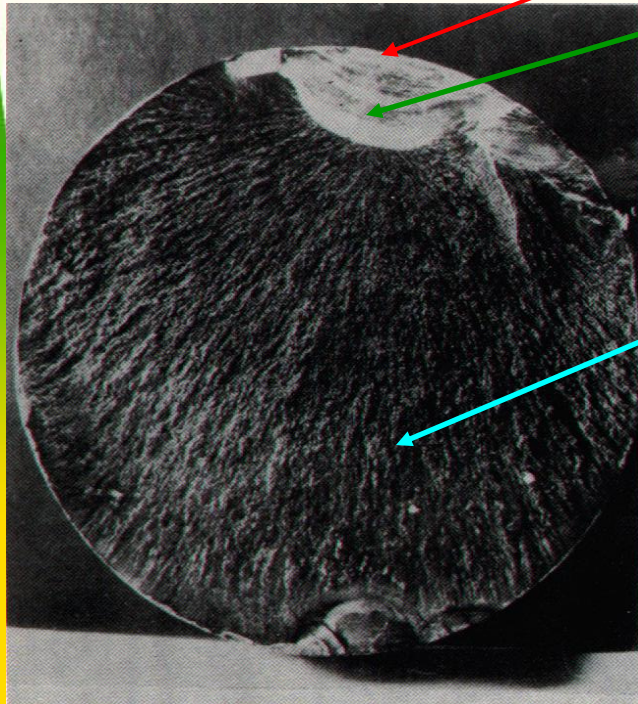
Approximate ranges of magnification for instruments used to study fracture surfaces and microstructure.

Modo de exame da superfície de fratura de fadiga em baixo aumentos (até 50X)



EESC-USP

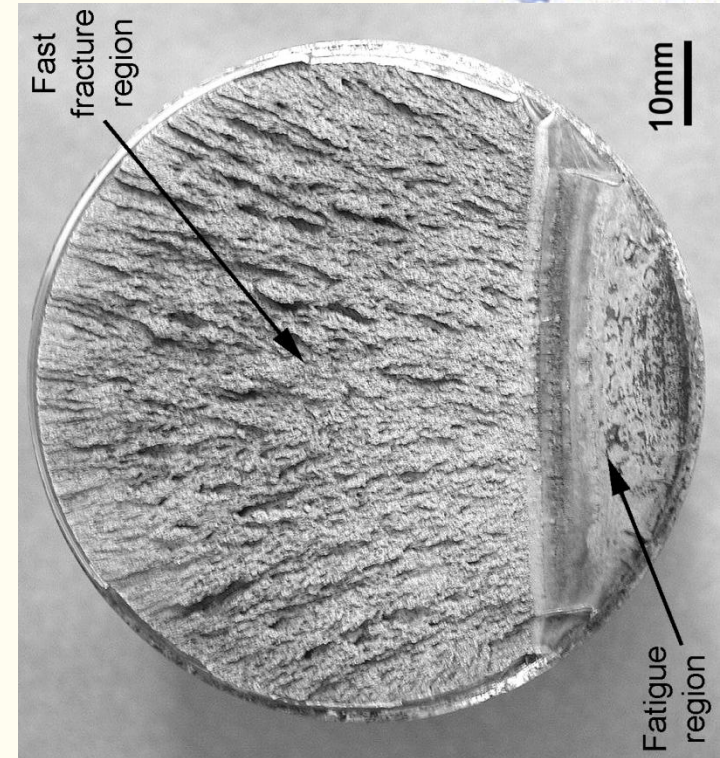
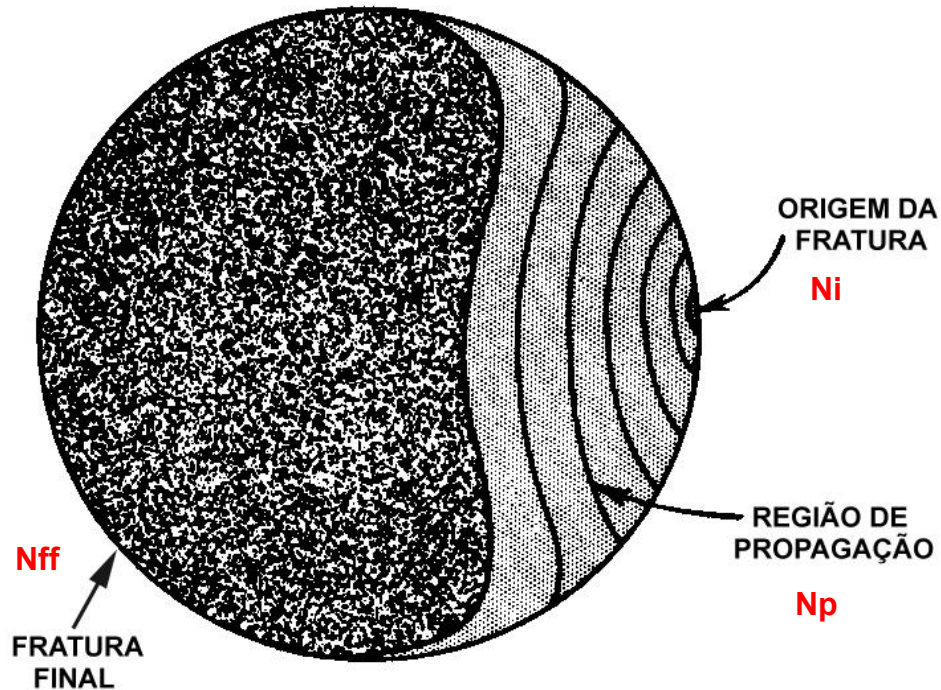
Características Macroscópicas



Características macroscópicas gerais de uma fratura por fadiga.



Modo Macroscópico de Propagação de Trinca por Fadiga



A superfície de uma fratura por fadiga apresenta duas regiões distintas:

- Região de propagação estável da trinca (aspecto polido, devido ao atrito das faces da trinca com possíveis marcas de progressão da trinca;
- Corresponde à área de fratura final não tendo ação do atrito (grosseiro, irregular, texturizado) – fratura frágil ou dúctil

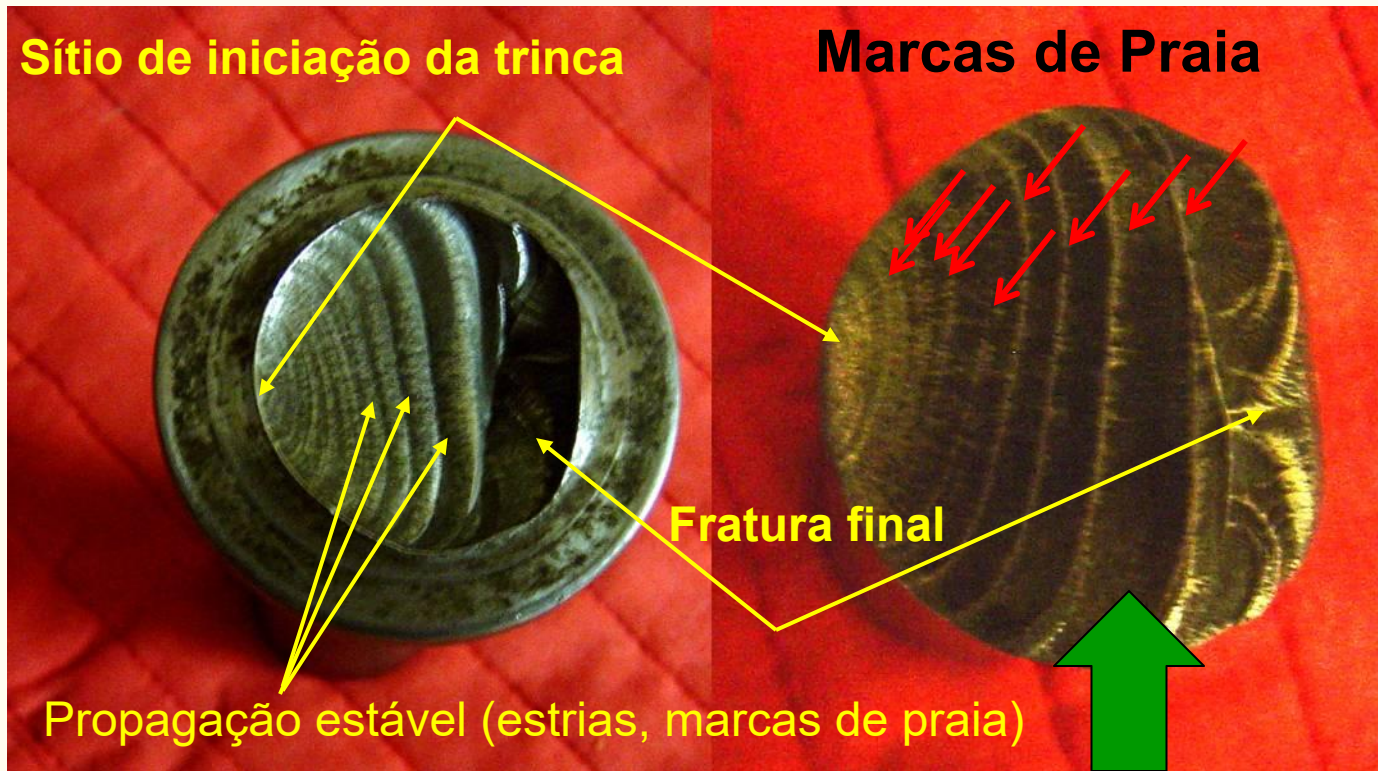


EESC-USP

Características Macroscópicas Comuns em Superfícies de Fratura por Fadiga



- ✓ Marcas de Praia (beach marks)
- ✓ Linhas radiais ou nervuras
- ✓ Marcas de catraca (ratchet lines)



Aumento de Velocidade com aumento ΔK

Resultado de paradas ou diminuição na taxa de crescimento da trinca devido a uma eventual queda momentânea da carga ou devido a uma sobrecarga que encrua localmente o material e que retarda o crescimento

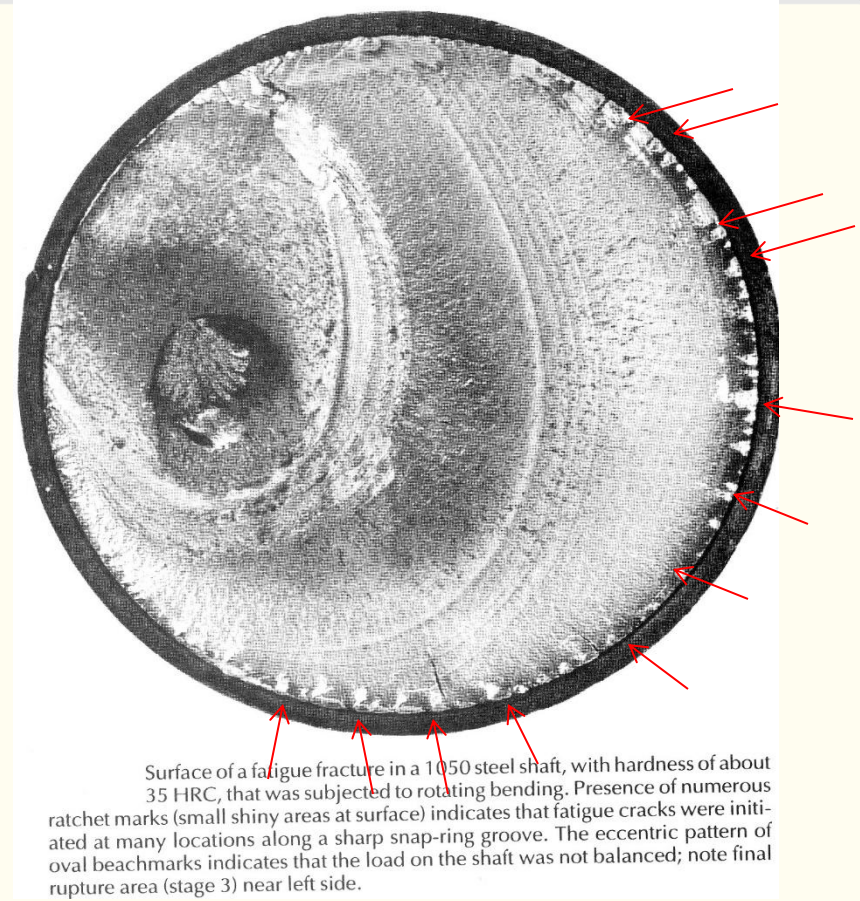


EESC-USP

Marcas de catraca (ratchet lines)

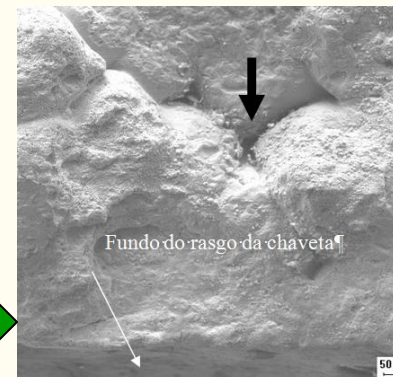
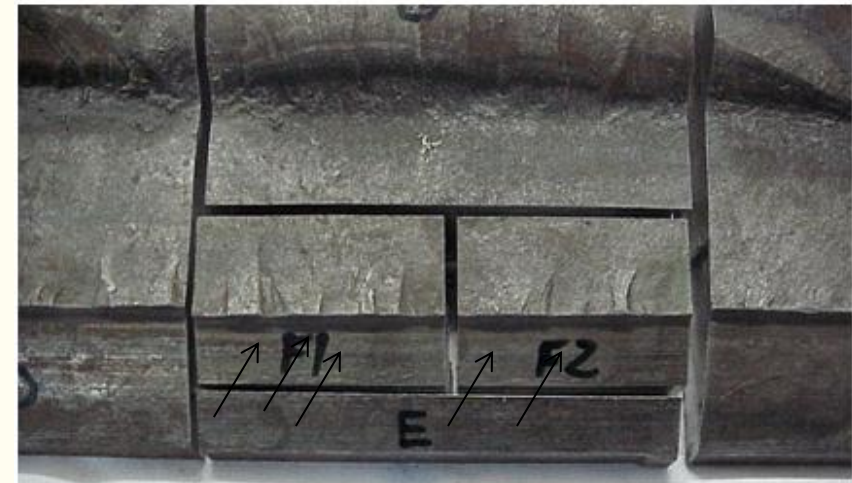
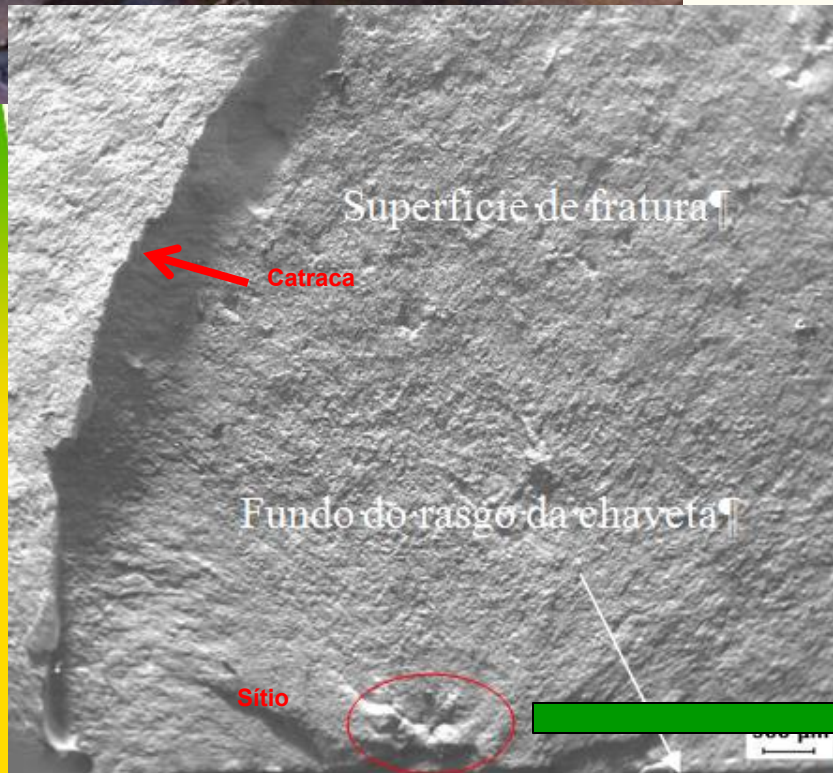
Marcas de Catraca: Nucleação da trinca em diversos pontos de um componente propagando-se num mesmo plano ou em planos paralelos que poderão ligar-se entre si. A formação desses degraus chama-se *marcas de catraca*.

Cada marca de catraca separa duas frentes de propagação de trinca por fadiga.

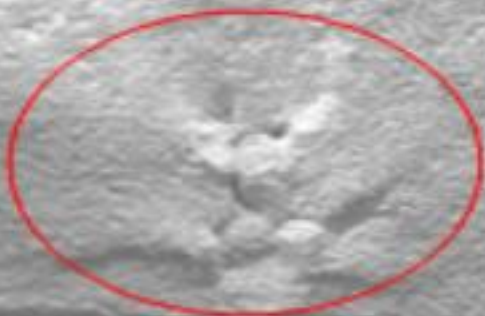


Surface of a fatigue fracture in a 1050 steel shaft, with hardness of about 35 HRC, that was subjected to rotating bending. Presence of numerous ratchet marks (small shiny areas at surface) indicates that fatigue cracks were initiated at many locations along a sharp snap-ring groove. The eccentric pattern of oval beachmarks indicates that the load on the shaft was not balanced; note final rupture area (stage 3) near left side.

Falha de um Rodete de Engrenagem (catracas de fadiga)

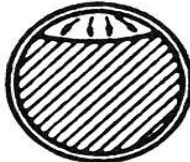
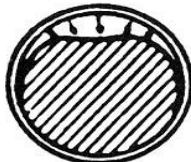
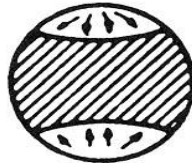
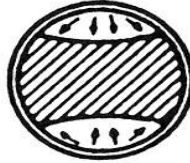
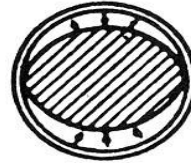
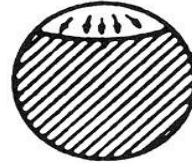
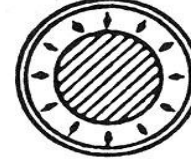


Catraca 2



480 μm

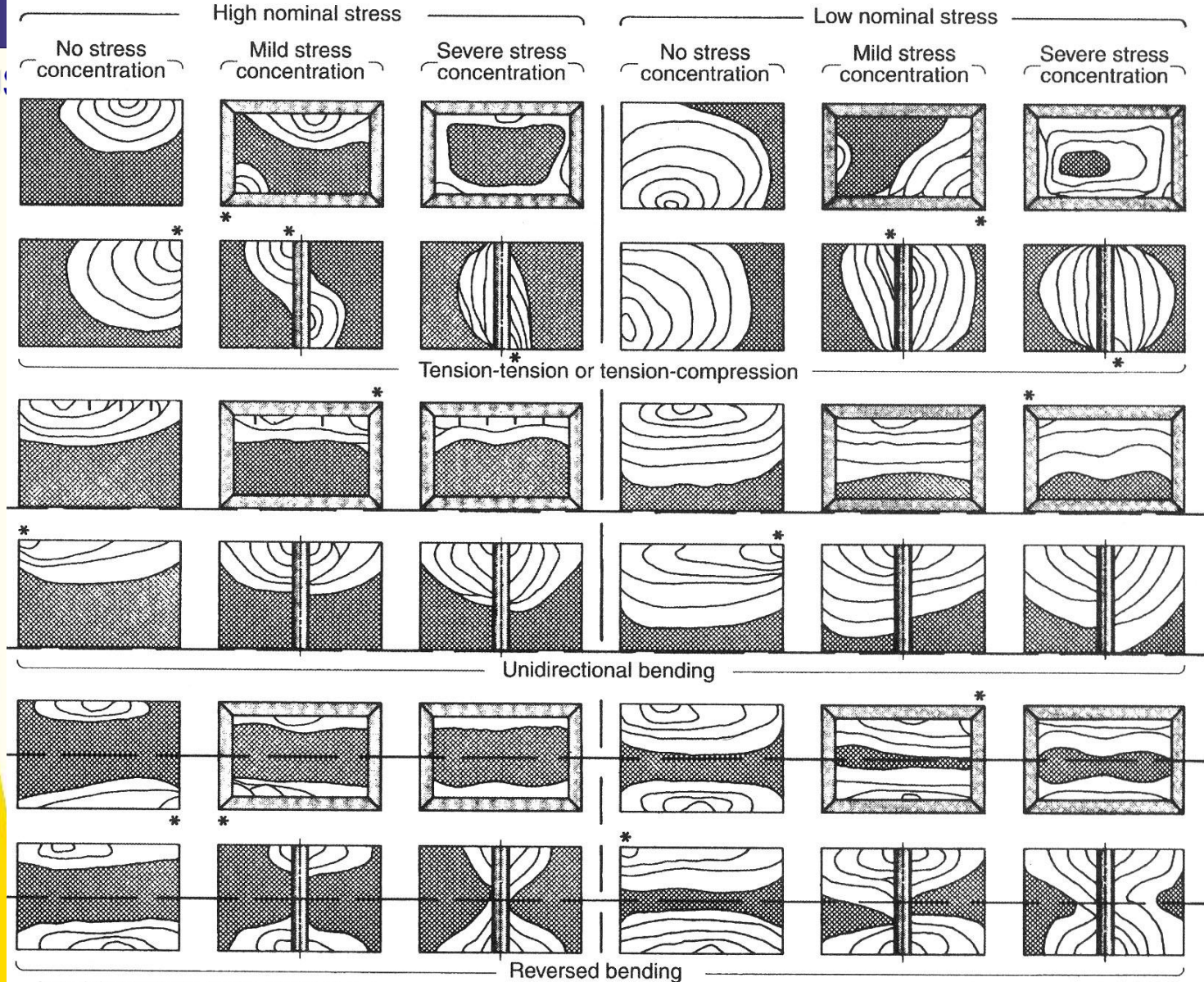
Superfície de fratura de fadiga esquemática para carregamento axial e flexão

High nominal stress			Low nominal stress		
Smooth	Mild notch	Sharp notch	Smooth	Mild notch	Sharp notch
					
Tension and tension—compression					
					
Unidirectional bending					
					
Reversed bending					
					
Rotating bending					
					

(a)

Superfície de fratura de fadiga esquemática para carregamento axial e flexão

EESC-U



* Asterisk indicates crack origin at a corner.

Corner initiation is favored by the presence of machining burrs.

Fast-fracture zone

Stress-concentration notch

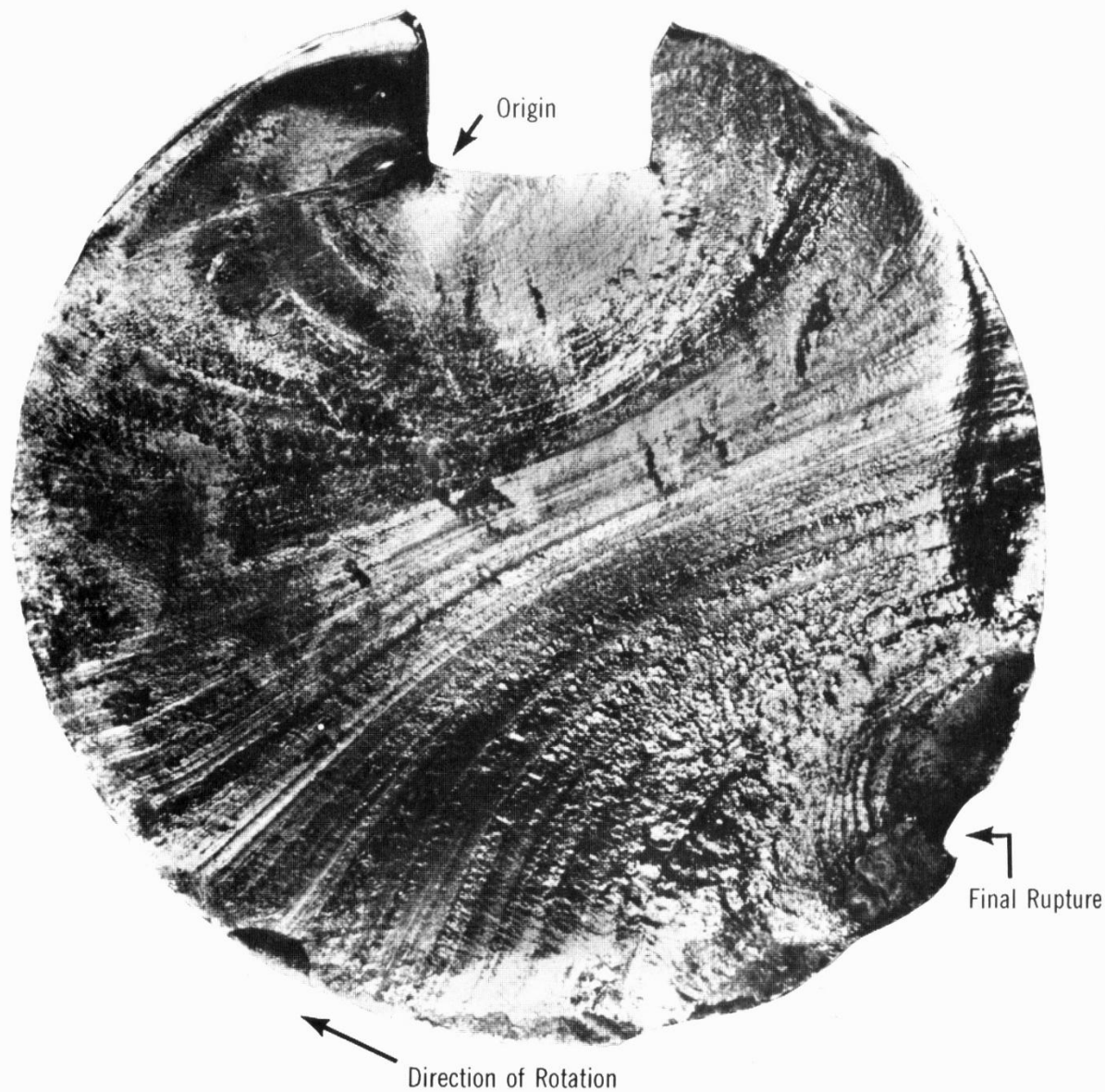


EESC-USP





EESC-USP



Fadiga Rotativa



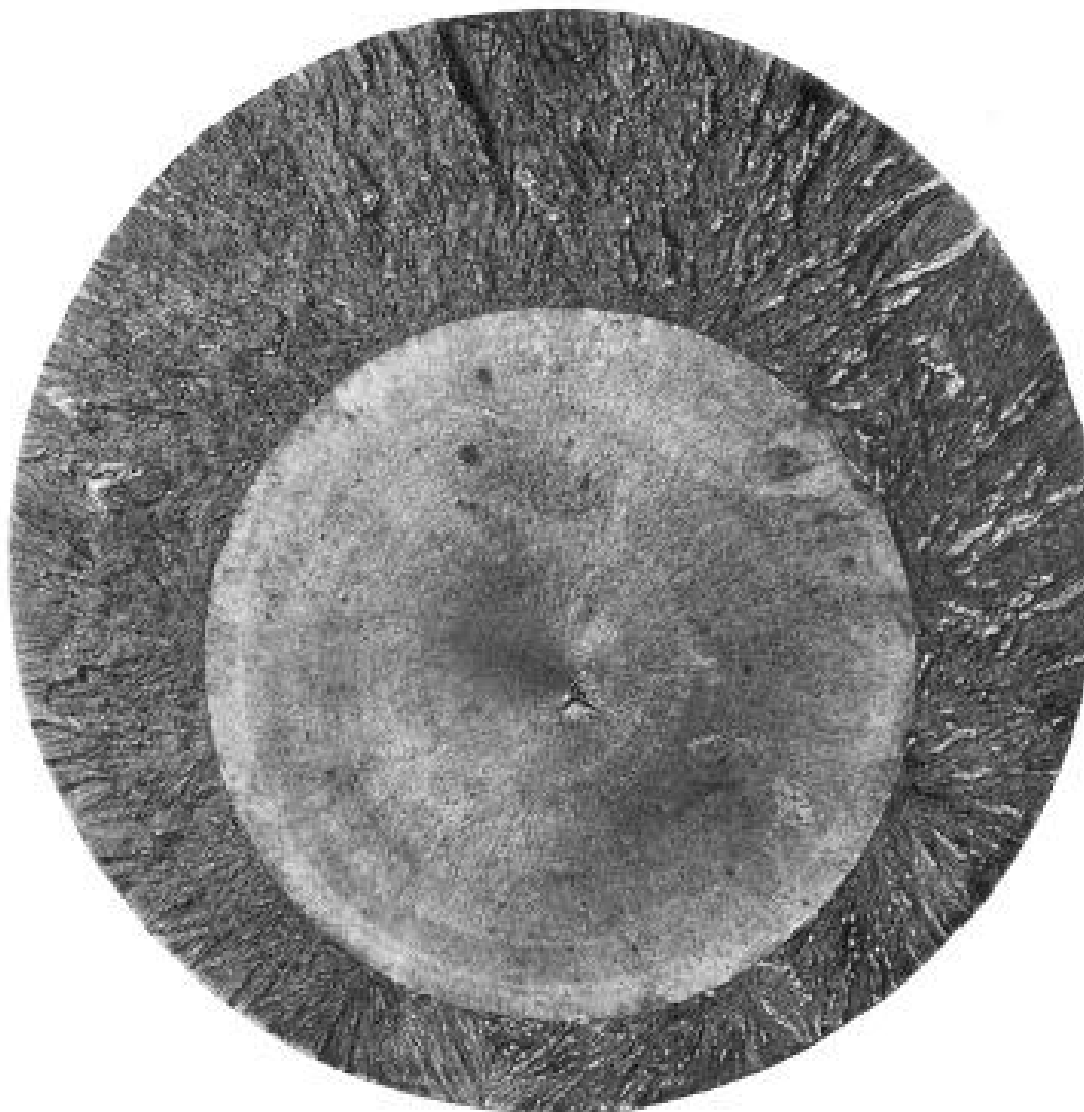
EESC-USP

**Fadiga acarretada
Flexão reversa. A simetria
revela que ambos os lados
sofreram as mesmas
amplitudes de carregamentos
e numero de ciclos.**





EESC-USP



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



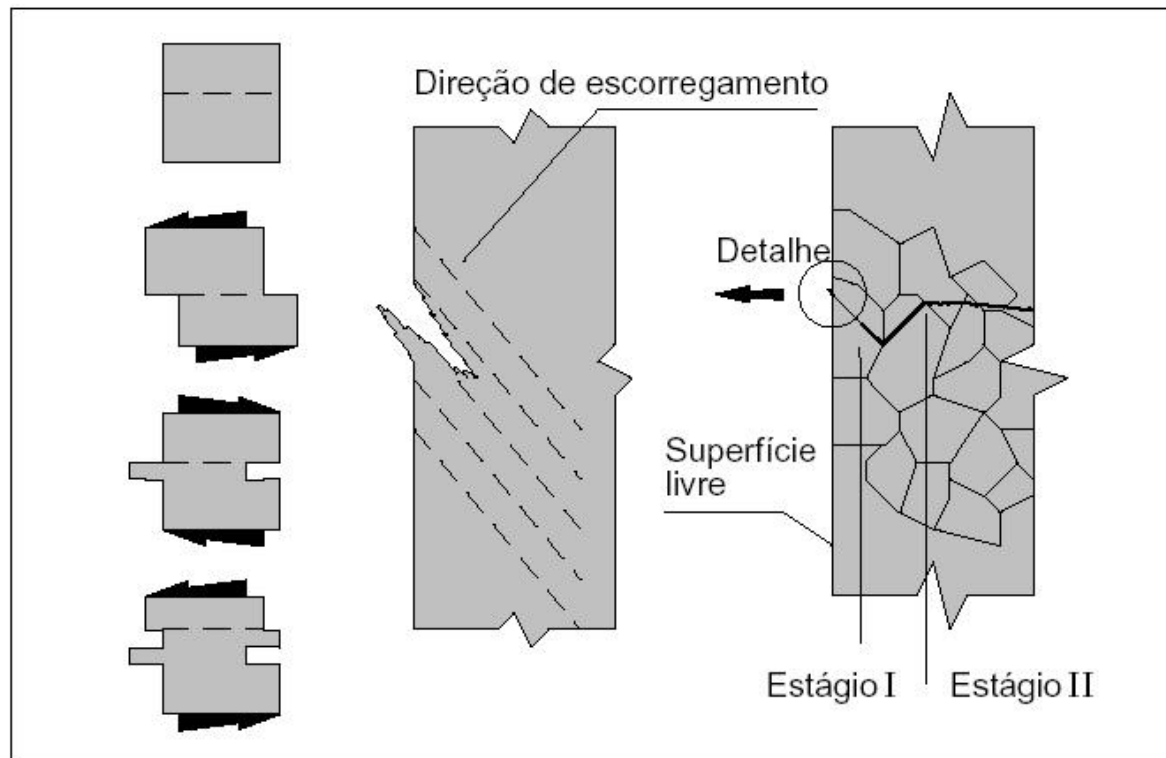
EESC-USP

Mecanismos de Fadiga e Características Microscópicas



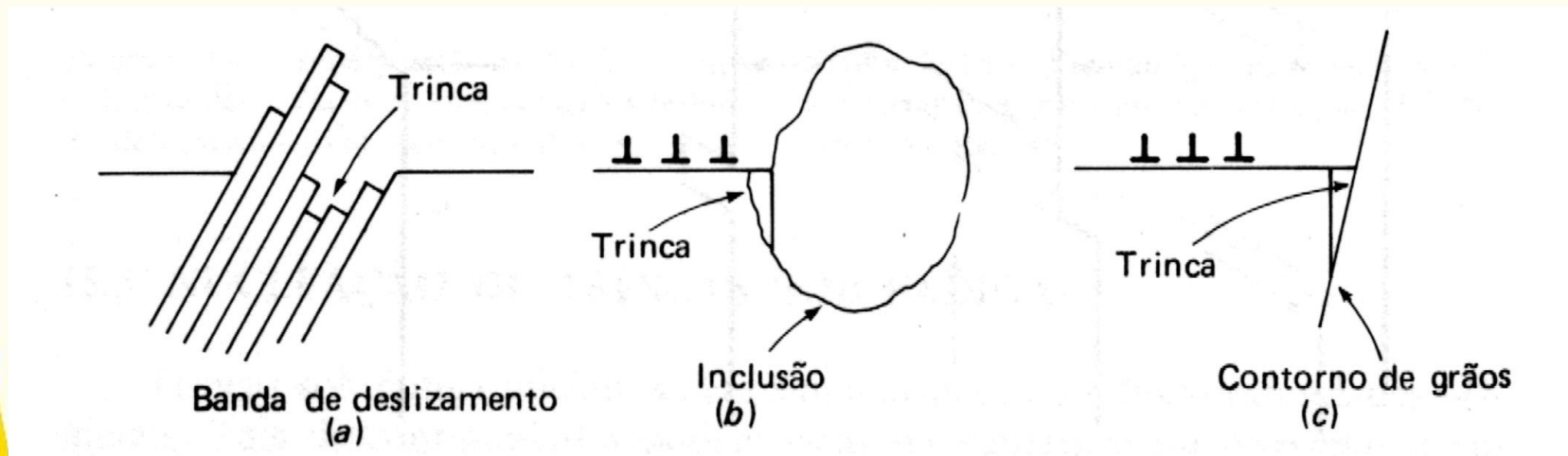
NUCLEAÇÃO DE TRINCAS

- A falha por fadiga está geralmente ligada a deformações plásticas e, estas, associadas com tensões cisalhantes.
- No caso dos materiais dúteis, a nucleação de trincas ocorre pela formação de planos de deslizamento, provenientes da deformação plástica no grão mais desfavoravelmente orientado. Ocorre já nos primeiros ciclos do carregamento.



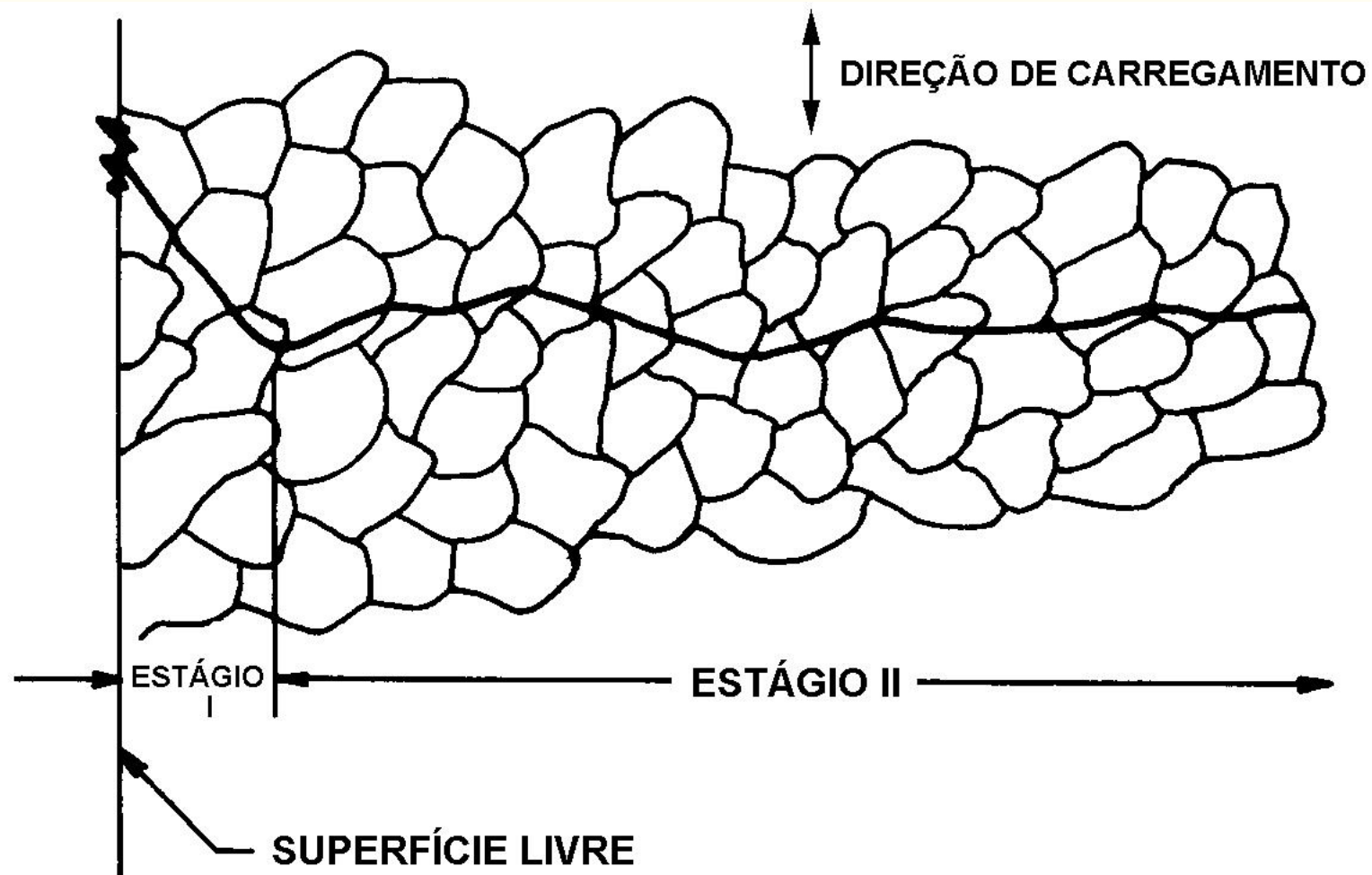


- No caso de materiais frágeis ou duros, como as ligas de alta resistência de alumínio e os aços tratados para uma alta dureza, a nucleação das trincas inicia na interface entre a matriz e as inclusões existentes, já que a matriz não chega a ser deformada plasticamente.
- Desta forma não surgem as bandas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





EESC-U





EESC-USP

PROPAGAÇÃO DE TRINCAS

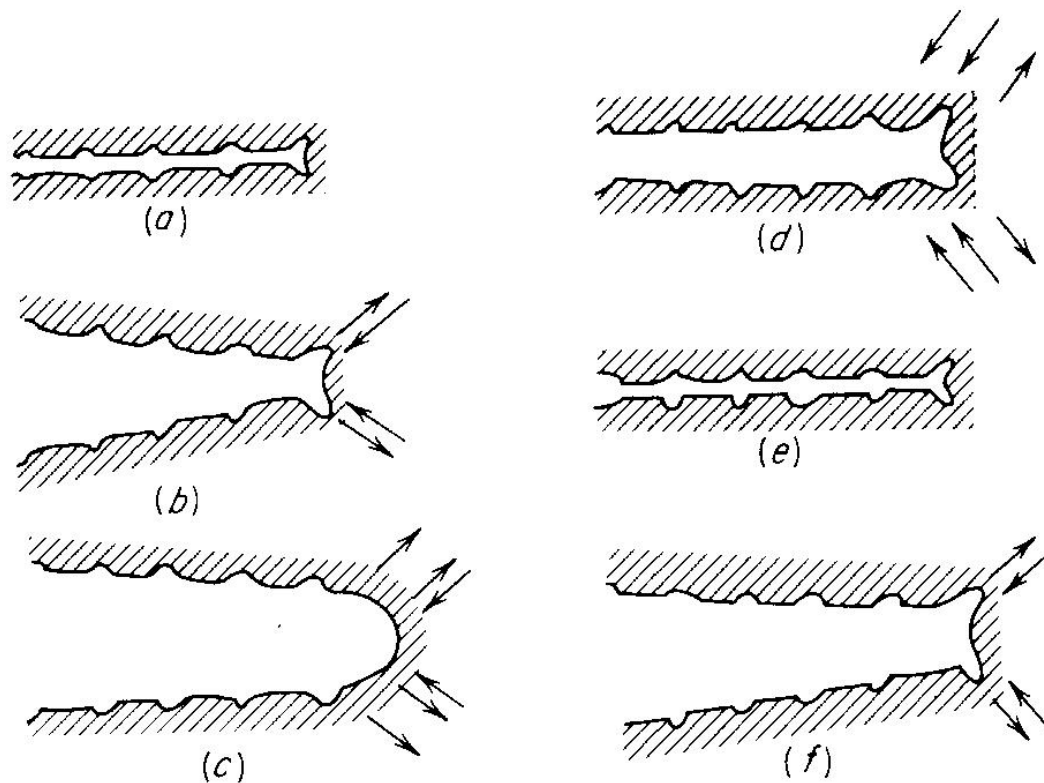
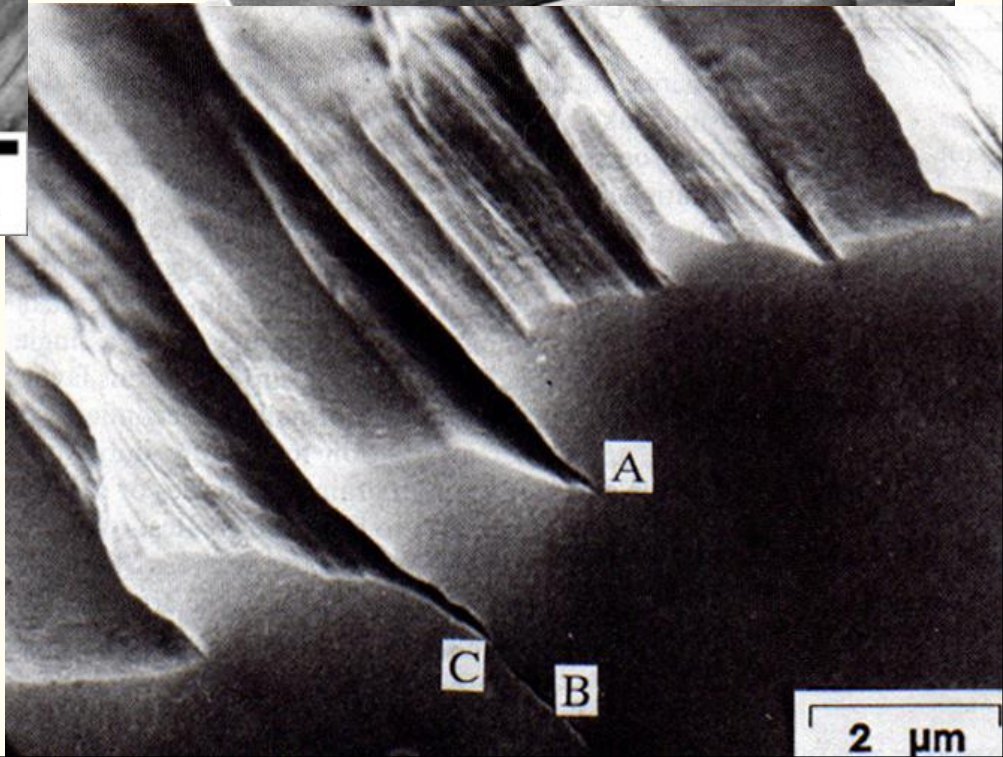
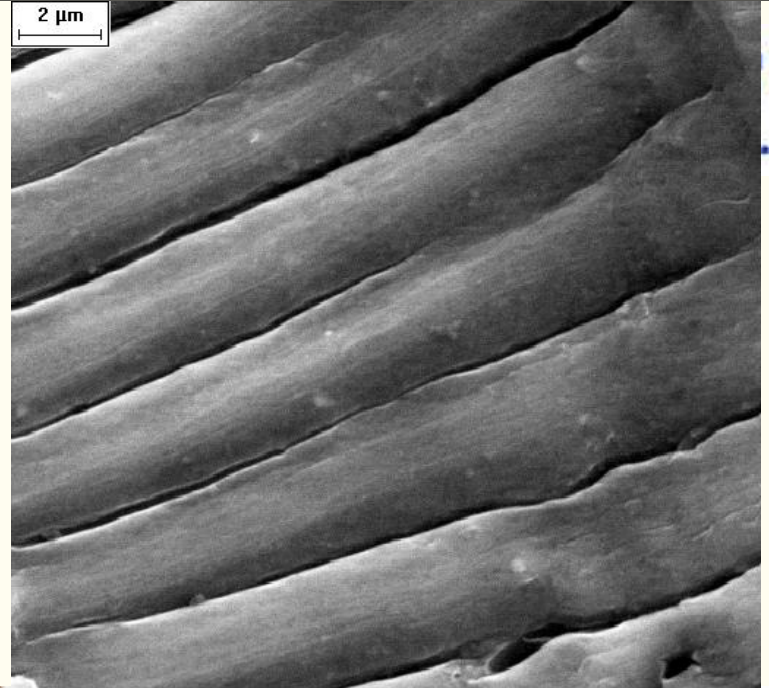
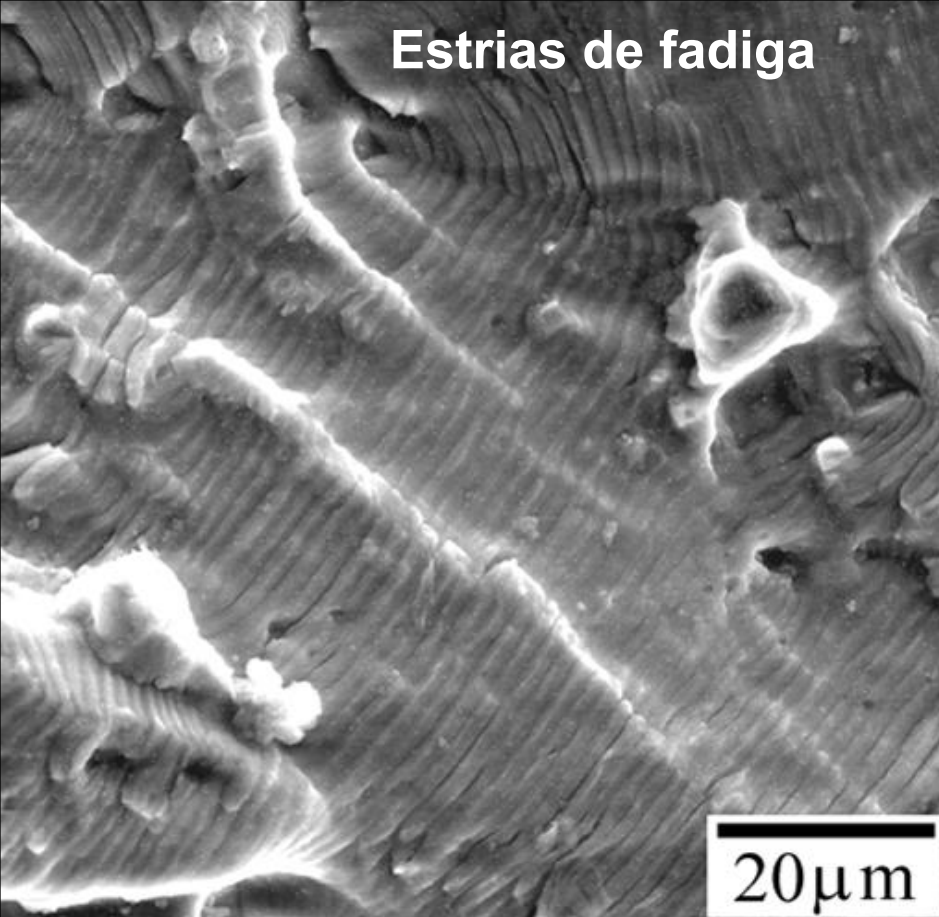


Figure 12-17 Plastic blunting process for growth of stage II fatigue crack. (From C. Laird, *ASTM Spec. Tech. Publ.* 415, p. 136, 1967.)

Estrias de fadiga





EESC-USP



Metologias de Projeto em Fadiga



- Estruturas e equipamentos de engenharia onde as peças e componentes devem resistir a fadiga são os mais diversos.
- Fabricados de diferentes:
 - materiais,
 - ciclos de carregamento,
 - exigências de segurança, etc.,
- Estas diferentes realidade faz com que o critério de projeto e análise da resistência à fadiga tenha que ser também diferente para cada caso.



EESC-USP

- Os critérios para projeto de fadiga foram sendo substancialmente alterados com o melhor conhecimento dos problemas de fadigas.
- Muitos destes critérios são ainda válidos, pois existem situações onde os critérios, mesmo os mais antigos, ainda são aplicáveis.
- Os principais critérios de projeto, colocados aproximadamente em uma ordem cronológica de desenvolvimento, são descritos a seguir.



EESC-USP

PROJETO PARA VIDA INFINITA

- Os primeiros projetos mecânicos, levando em conta a fadiga, eram baseados em uma segurança quanto à falha quase ilimitada, com os componentes dimensionados para uma 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.
- 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.



EESC-USP

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.
- Logo o projeto para vida finita sob a ação destas cargas 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.



EESC-USP

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

EXEMPLOS:

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



EESC-USP

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 em segurança 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.

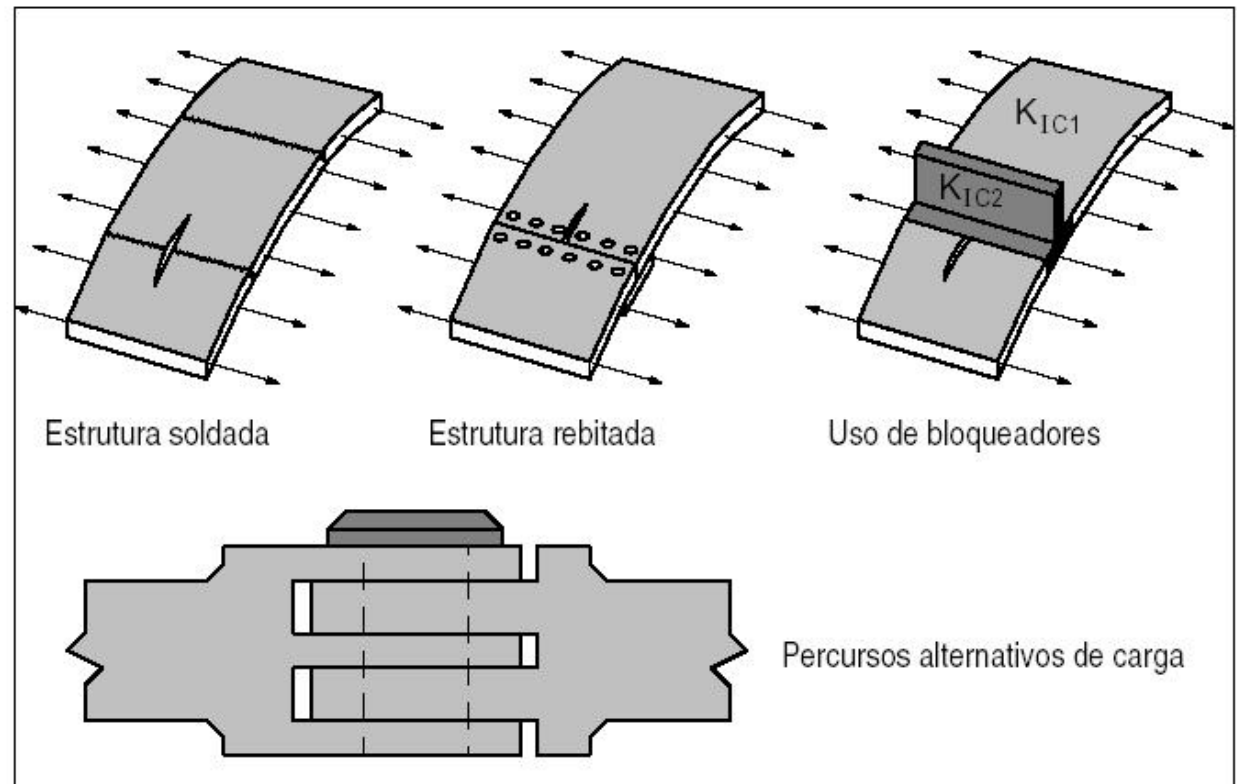


EESC-USP

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

EXEMPLOS:

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





PROJETO COM TOLERÂNCIA AO DANO



EESC-USP

- *Este critério é um refino da filosofia anterior de projeto. Partimos 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 a um tamanho tal que leve à falha, antes que sejam detectadas pelas inspeções periódicas.*
- *Este critério aplica-se melhor 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.*



EESC-USP

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***

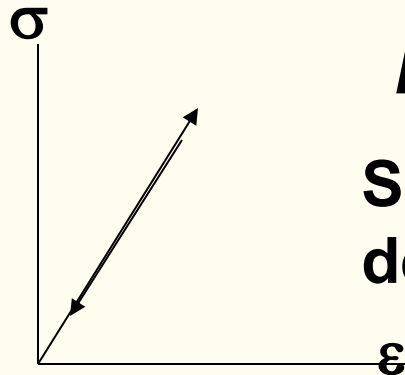


EESC-USP

Análise Clássica da Fadiga

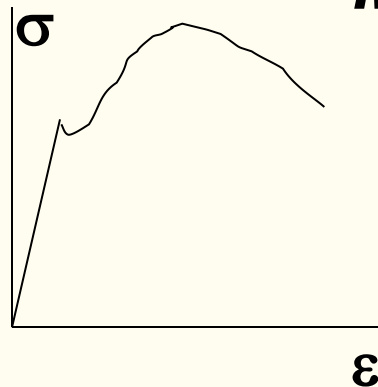
Metodologia Tensão-Vida

Metodologia Def. - Vida



Metodologia Tensão-Vida

Se as tensões forem sempre dentro do regime elástico



Metodologia Def. - Vida

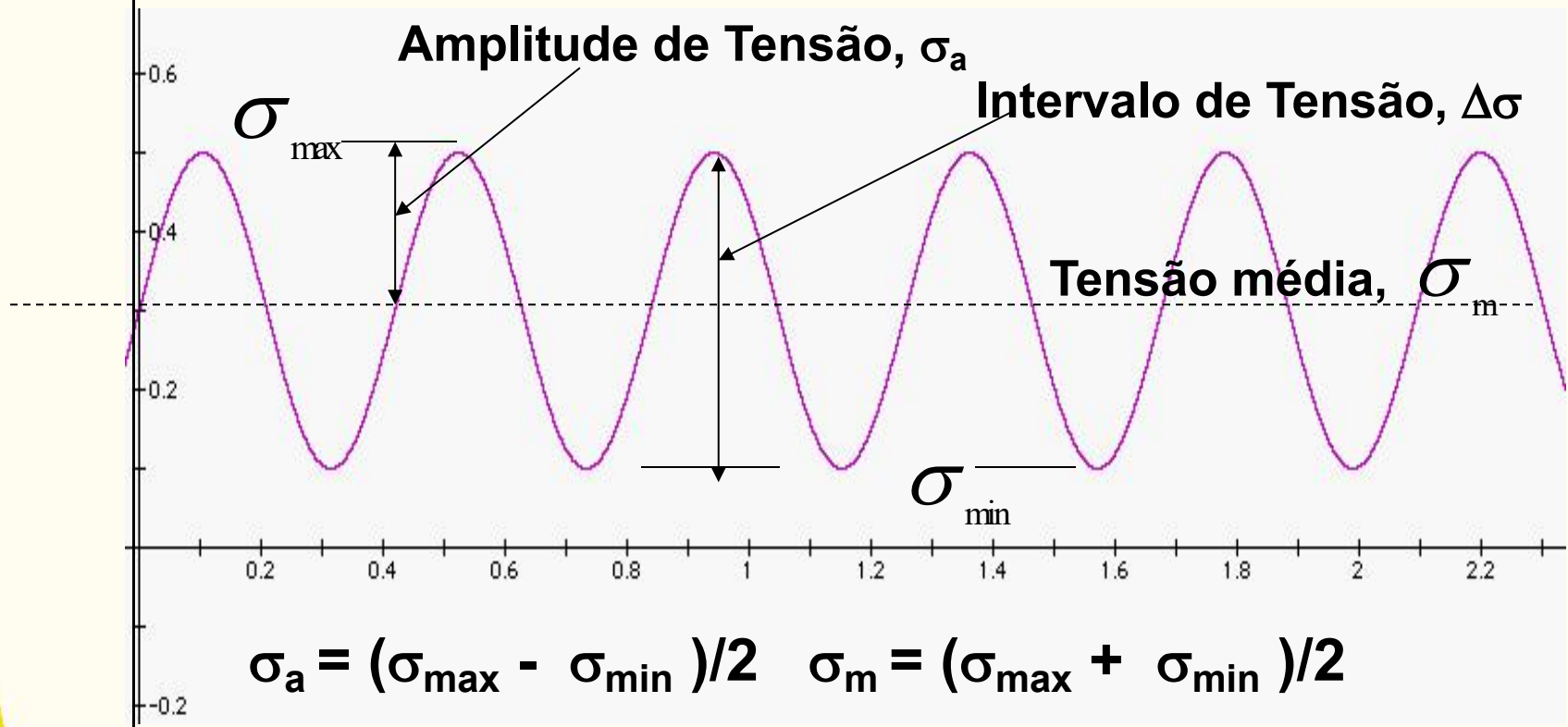
Se as tensões envolverem plasticidade e assim deformações permanentes.



- Descrição do Ciclo de Carregamento

EESC-USP

Tensão, σ



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

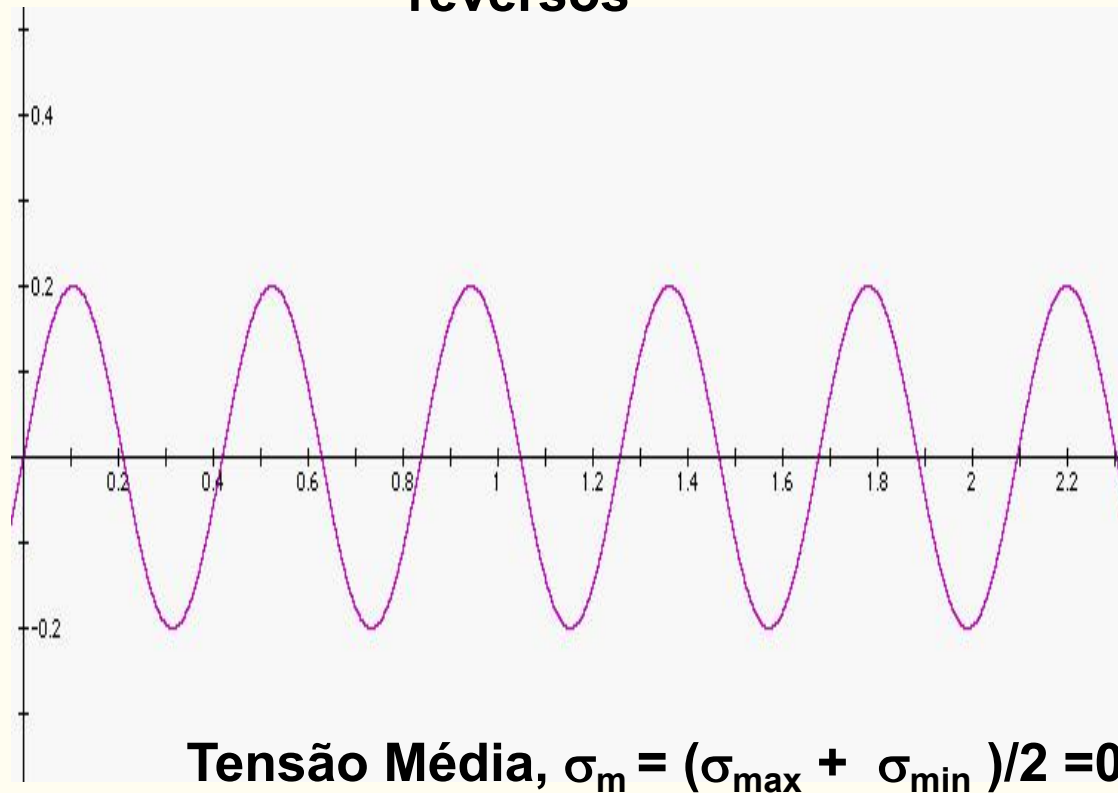
$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$$

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$



EESC-USP

Carregamentos completamente reversos



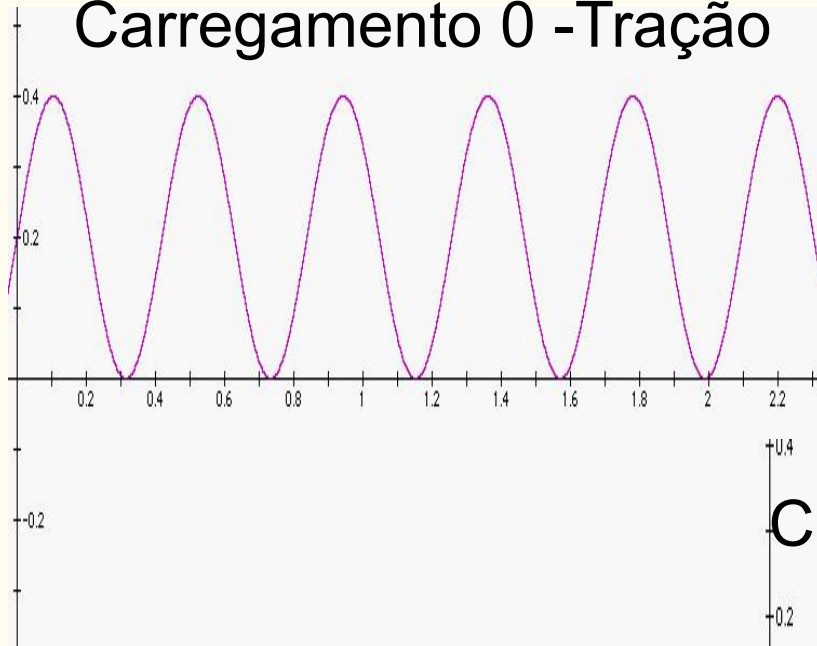
Razão de Tensões, $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = -1$

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



EESC-USP

Carregamento 0 - Tração



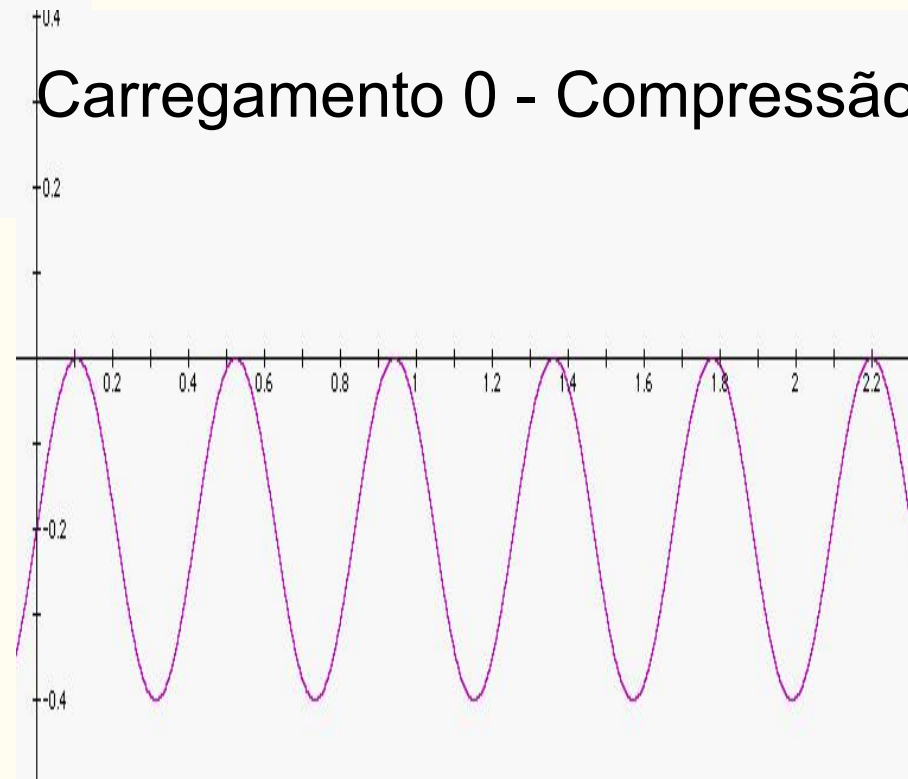
$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0$$

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

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

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

Carregamento 0 - Compressão





EESC-USP

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 a Fadiga
 - Vida Finita
 - Relação entre Prop. Estática & Fadiga
 - Efeitos da Tensão Média
 - Modelos
 - Vida infinita
 - Vida finita

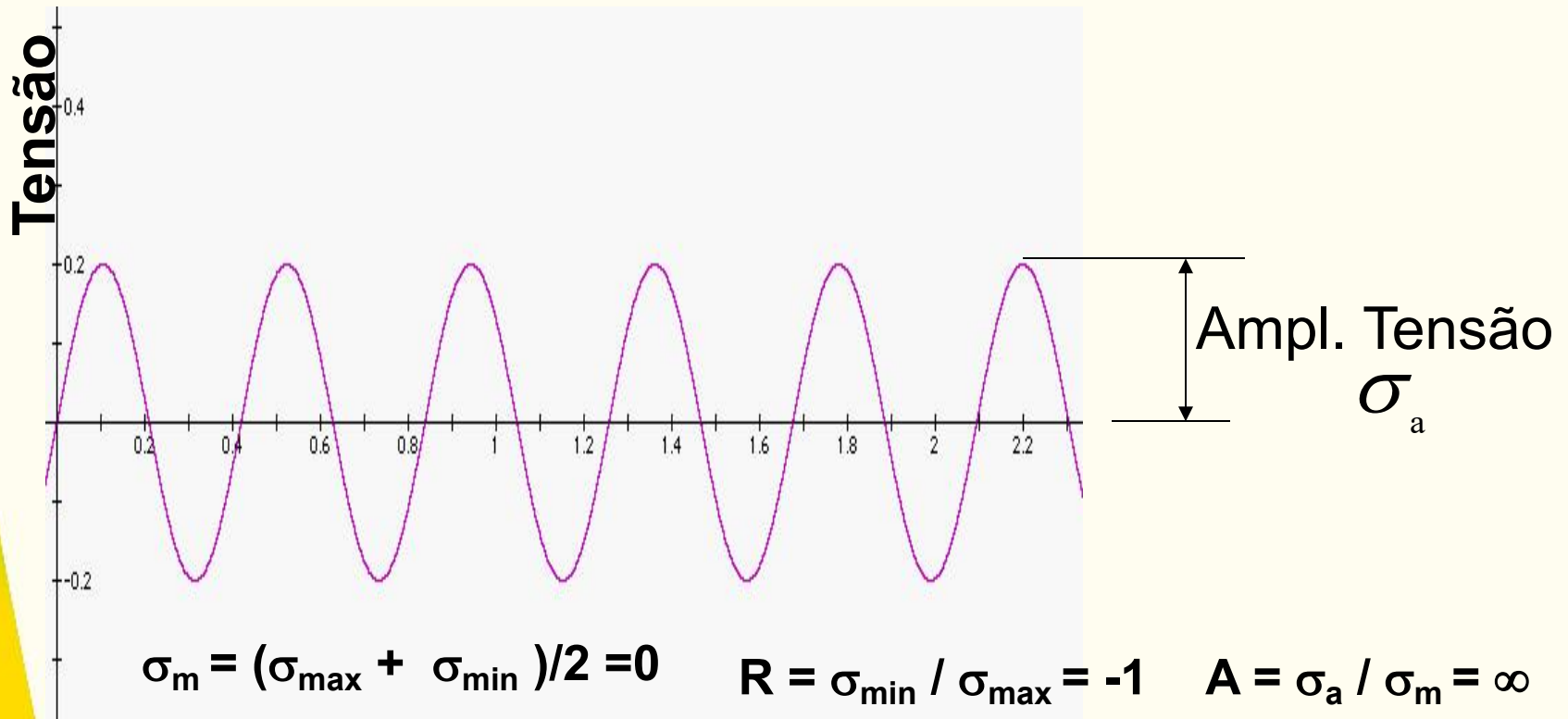


EESC-USP

Propriedades de Fadiga

Os dados de fadiga são comumente apresentados:

- para CP polidos
- Sob flexão reversa.

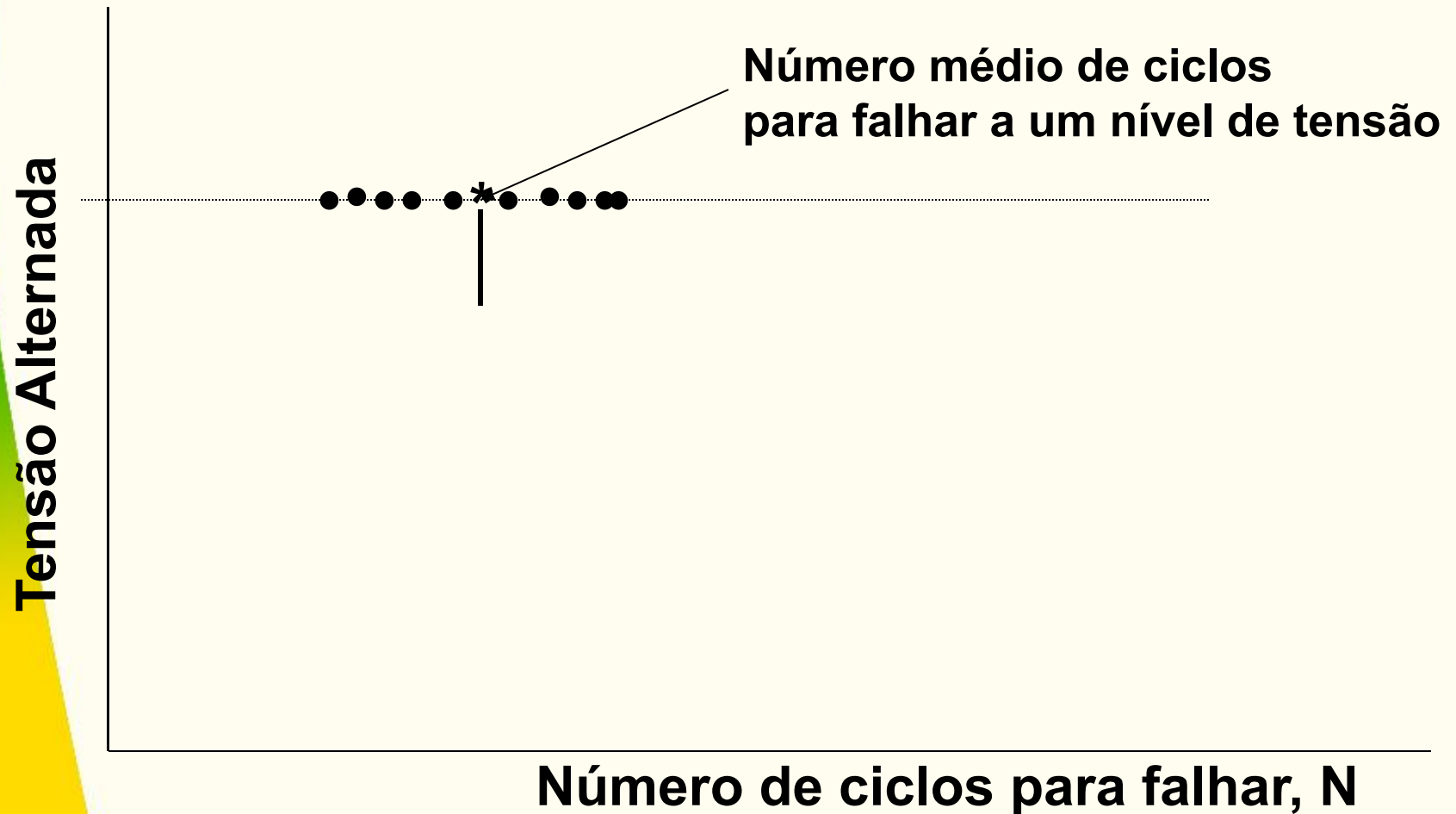




EESC-USP

Dados S-N

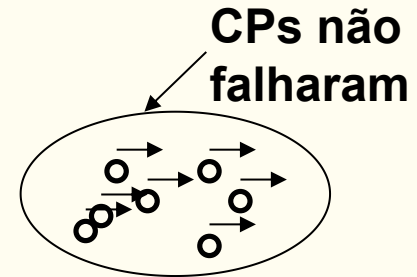
n CPs idênticos testados em uma dada tensão alternada que podem falhar em diferentes números de ciclos. (•)





OS NEMAF
Núcleo de ensaios de
materiais e análise de falhas

Tensão Alternada

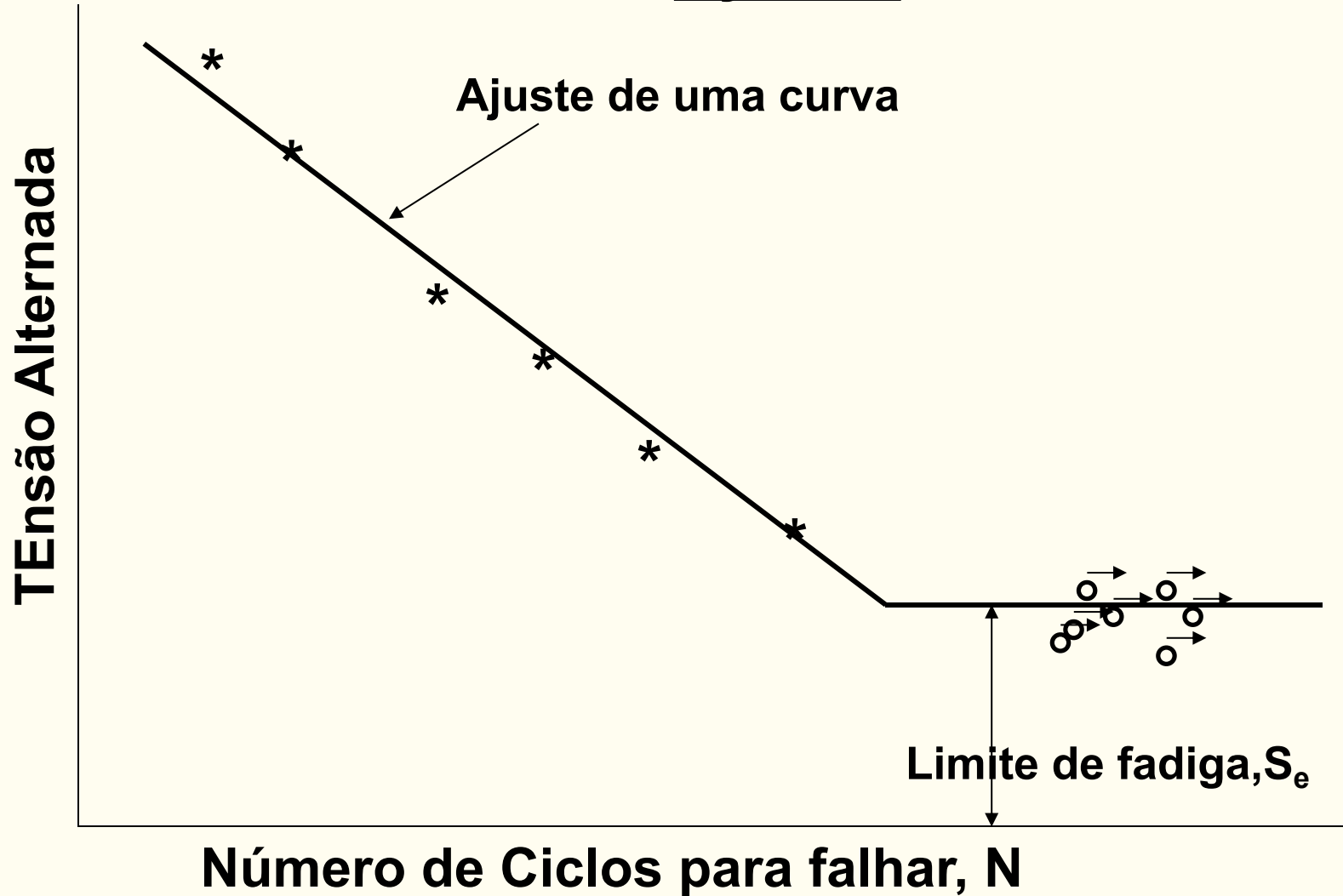




EESC-USP

Curva S-N & Limite de Fadiga

Aços CC





EESC-USP

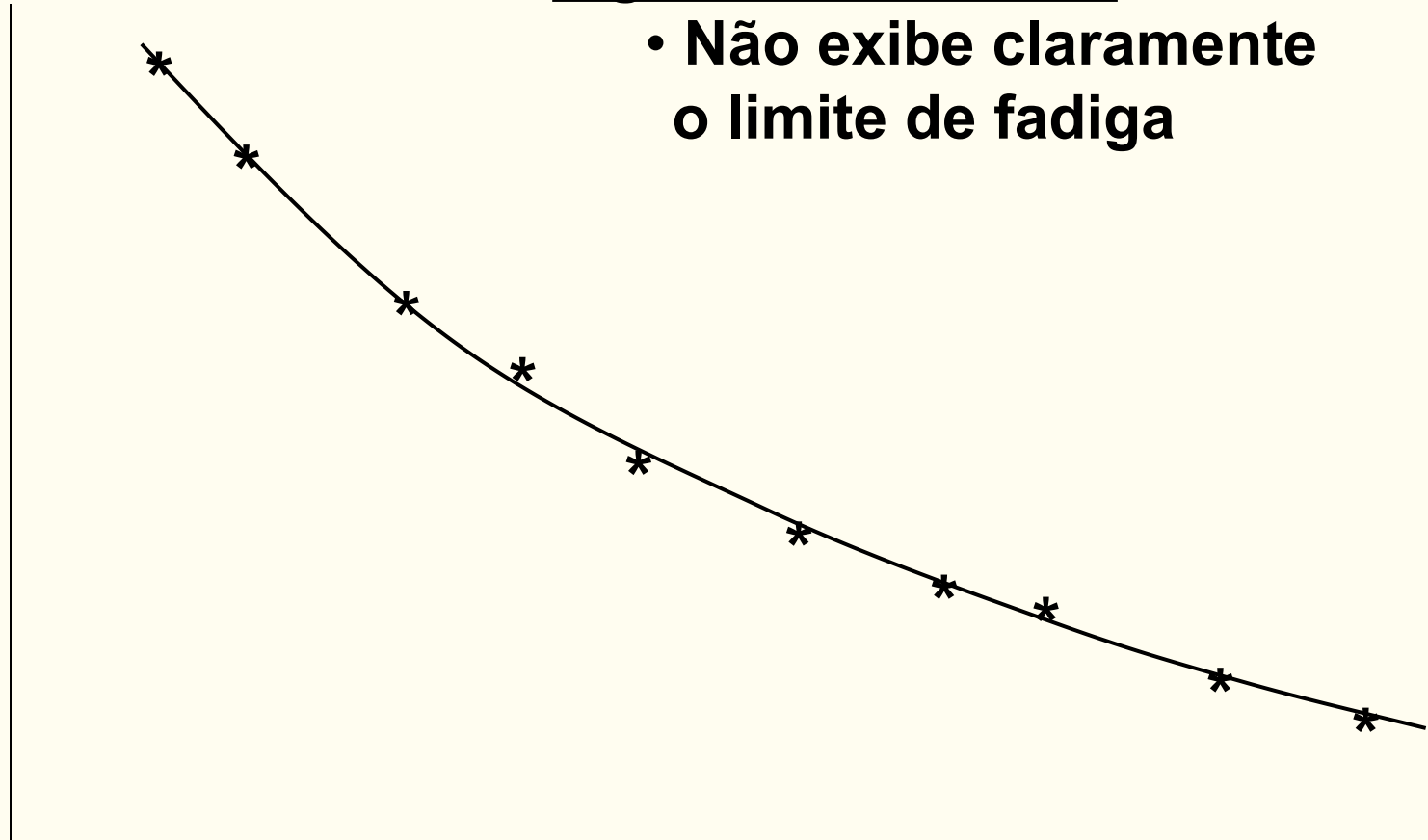
Dados S-N sem o Limite de Fadiga



Ligas não Ferrosas

- Não exibe claramente o limite de fadiga

Tensão Alternada



Número de ciclos para falhar, N



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 formam uma reta em escala Log-Log

$$\sigma_a = A N_f^B$$

- Podendo ser escrita de uma outra forma

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad \begin{aligned} A &= 2^b \sigma'_f \\ B &= b \end{aligned}$$



EESC-USP

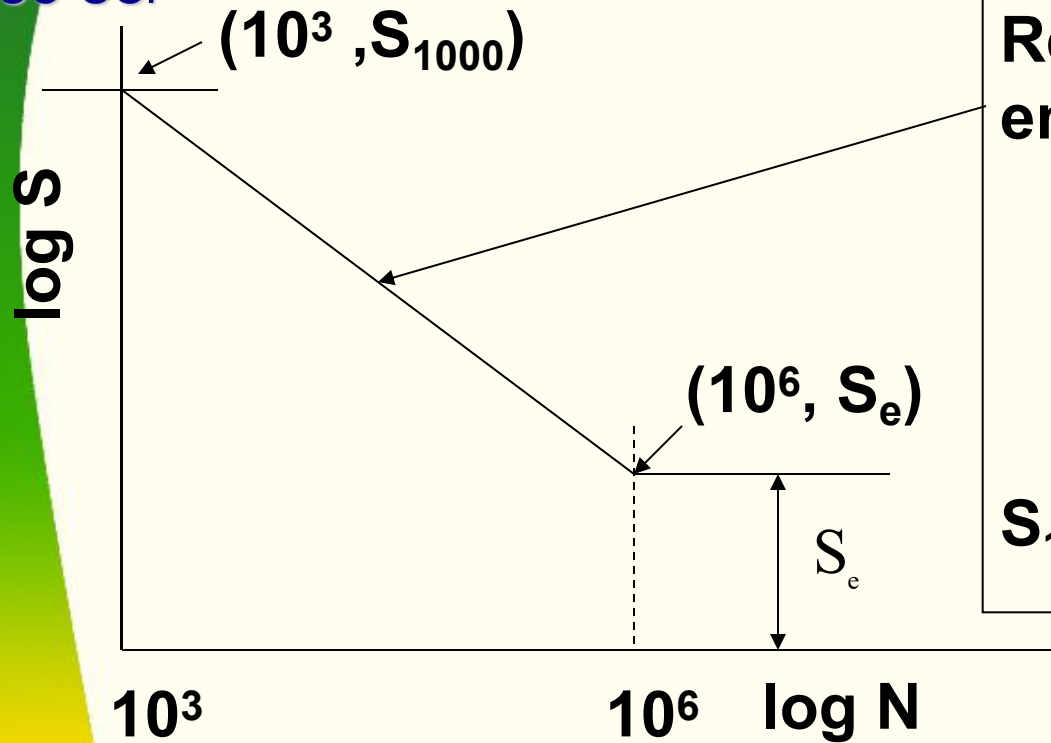
Constantes para a curva Tensão-Vida para alguns metais, ensaiados em fadiga com tensão média zero e corpos de prova não entalhados e carregamentos axiais

Material	Limite de escoamento	Limite de resistência	Tensão Verd. de fratura	$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b = A N_f^B$		
	σ_o	σ_u	$\tilde{\sigma}_{fB}$	σ'_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



EESC-USP



**Regime de vida finita
entre 10^3 - 10^6 ciclos**

$$S = 10^C N^b$$

$$N = 10^{-C/b} S^{1/b}$$

S_{1000} tensão de falha em 10^3

C e b são constantes do material

• Podem ser expresso em termos de S_{1000} & S_e



EESC-USP

$$\frac{S}{S_u} = \left(\frac{N}{N_f} \right)^b \approx \left(\frac{N}{N_f} \right)^{-0.085}$$

De maneira que, para Ligas Ferrosas
 $b \approx -0.085$, $C = \log_{10}(1.62 S_u)$

$$S = 1.62 S_u N^{-0.085}$$

$$\left(\frac{N}{N_f} \right)^{-0.085}$$

Ligas ferrosas



Relações Empíricas Entre Limite de Fadiga e Propriedades Estática



EESC-USP

Ligas Ferrosas

CP polido sob flexão reversa

Em termo de resistência, S_u :

$S_f = 0,5 S_u$ para $S_u \leq 1400$ MPa (200 ksi)

$S_f = 700$ MPa (100 ksi) para $S_u > 1400$ MPa (200ksi)

Em termos de dureza ~~BHN~~ ^{BH}inell,

$S_f = 0,25$ BHN for ~~BHN~~ ^{BH}400

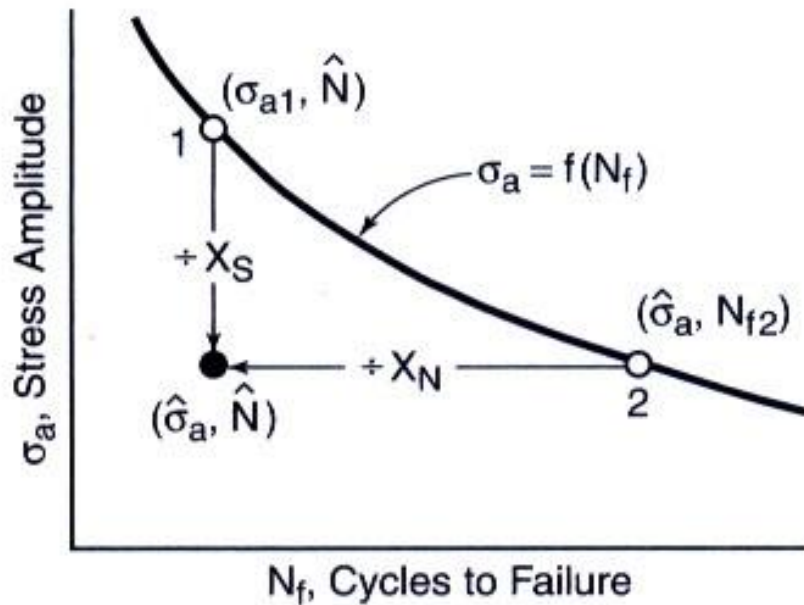
$S_f = 100$ ksi for ~~BHN~~ ^{BH}400

Note $S_u = 0,5$ BHN para unidade em ksi
3,45BHN para unidade em MPa



EESC-USP

Fator de Segurança para a curva S-N



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

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

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

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



EESC-USP

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.

σ_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 $\text{Log}(\sigma_a) \times \text{Log}(N_f)$



EESC-USP

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

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

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

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

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



EESC-USP

B) Nos ensaios de fadiga a tensão σ_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:

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

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

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

$$y = mx + c$$

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

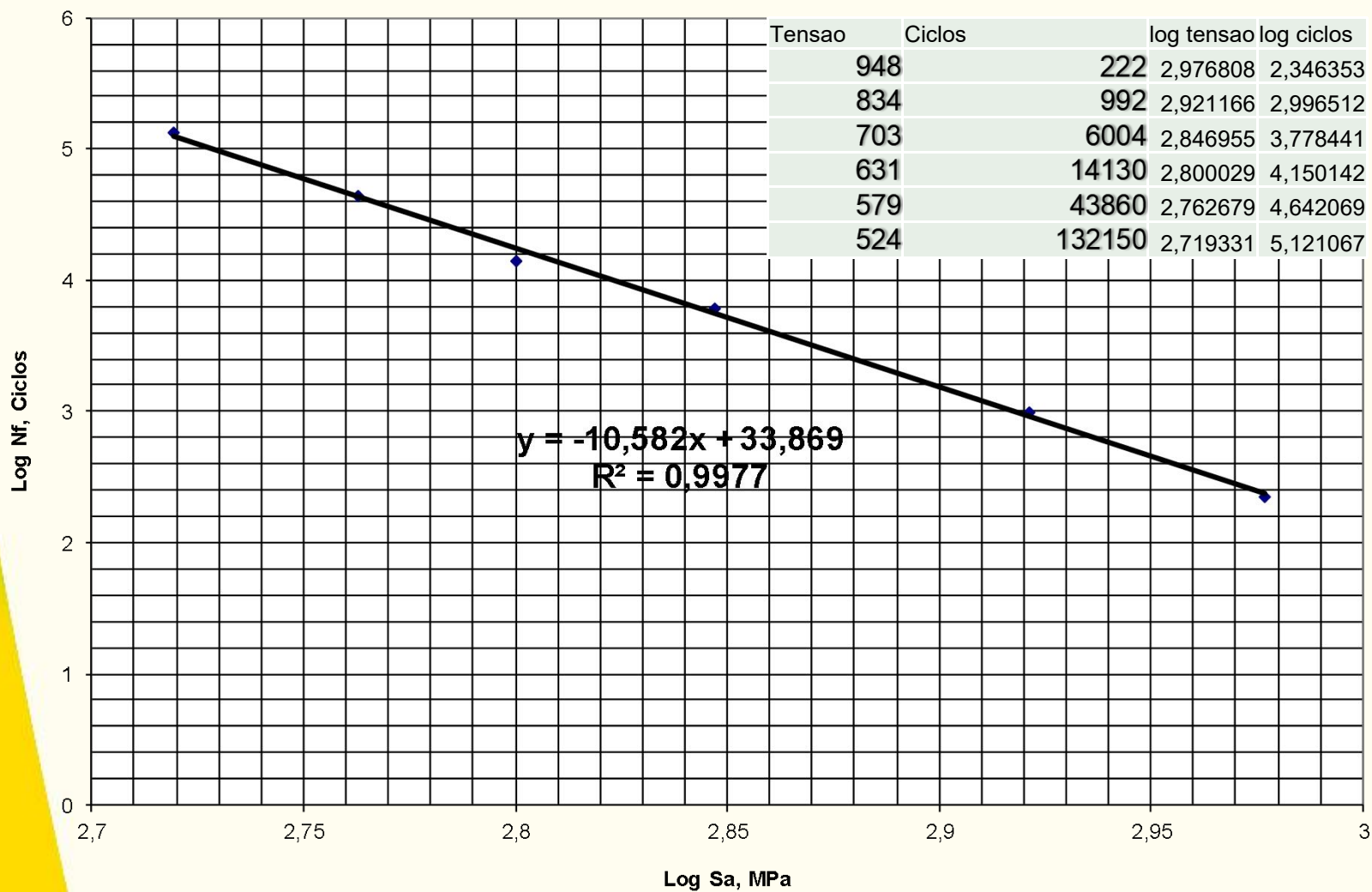
$$m = -10,582; \dots c = 33,87 - \text{Obtido do Grafico pag Seguinte}$$

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



EESC-USP

Curva S-N





EESC-USP

FATORES MODIFICADORES

- Efeito do tamanho
- Efeito do tipo de carregamento
- Acabamento superficial
- Tratamentos térmicos e termoquímicos
- Efeito da temperatura
- Efeito do meio ambiente
- Efeito da tensão média



EESC-USP

Fatores Modificadores



Os dados básicos de fadiga são gerados usando CPs polidos e de geometria padronizada em flexão reversa.

Na realidade, o projeto tem que levar em conta as variações nas condições ideais tais como:

- Tamanho (diferente do padrão)
- Tipo de carregamento
 - Tração, torção, tensão média diferente de zero
- Acabamento superficial
 - usinado, retificado, Forjado, estampado, jateado.
- Temperatura
- Meio ambiente



EESC-USP

Fatores Modificadores



Limite de Fadiga Modificado:

$$S_e = S_e' C_{\text{tam}} C_{\text{carga}} C_{\text{acab.sup.}}$$

onde,

S_e – é o limite de fadiga do CP real ou componente ou estrutura.

S_e' - é o limite de fadiga do CP padronizado e polido sob flexão reversa.

C_{tam} – Fator que leva em conta o tamanho

C_{carga} - Fator que leva em conta o carregamento diferente da flexão reversa

$C_{\text{acab.sup.}}$ - Fator que leva em conta o acabamento diferente do polido.



EESC-USP

Fatores Modificadores – *Efeito do Tamanho*



- O elo-mais-fraco controla as falhas em geral e em particular o fenômeno de fadiga.
- A probabilidade de achar um elo-mais fraco aumenta com o aumento de volume do componente.

Diâmetro (in)	Limite de fadiga (ksi)
0.3	33.0
1.5	27.6
6.75	17.3

Ref: Faupel and Fisher, Engineering design, 1981

- Ajustes Empiricos:

$$C_{\text{size}} = 1.0 \text{ if } d \leq 0.3 \text{ in (8 mm)}$$

$$C_{\text{size}} = 0.869 d^{-0.097} \text{ if } 0.3 \text{ in} \leq d \leq 10 \text{ in}$$

$$C_{\text{size}} = 1.189 d^{-0.097} \text{ if } 8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm}$$



EESC-USP

Fatores Controladores do *EFEITO DE TAMANHO*

- O fenômeno da fadiga depende da interação entre a tensão máxima e um defeito crítico.
- Efeito do tamanho – correlaciona com uma superfície fina submetida a 95% ou mais da tensão superficial máxima.
- Um componente grande terá um pequeno gradiente e assim mais material submetido a 95% da tensão máxima.
- Assim uma maior probabilidade de iniciar uma trinca.
- Na tração não possui gradiente -> Todo material experimenta a mesma tensão sem limitação do tamanho do componente.



EESC-USP

Fatores Modificadores – *Efeito de Carregamento*

- Gradiente de tensões na flexão e torção
- O caso da tração tem mais material (volume) submetido a tensões altas.
- Estimativas Conservativas Empíricas:

$$S_e(\text{axial}) \cong 0.7 S_e(\text{flexão})$$

$$\tau_e(\text{torção}) \cong 0.577 S_e(\text{flexão})$$

Exemplo: Para aços com S_u

$$S_e \cong 0.5 S_u (\text{Flexão})$$

$$S_e(\text{axial}) \cong 0.7 S_e(\text{flexão}) \cong 0.35 S_u$$

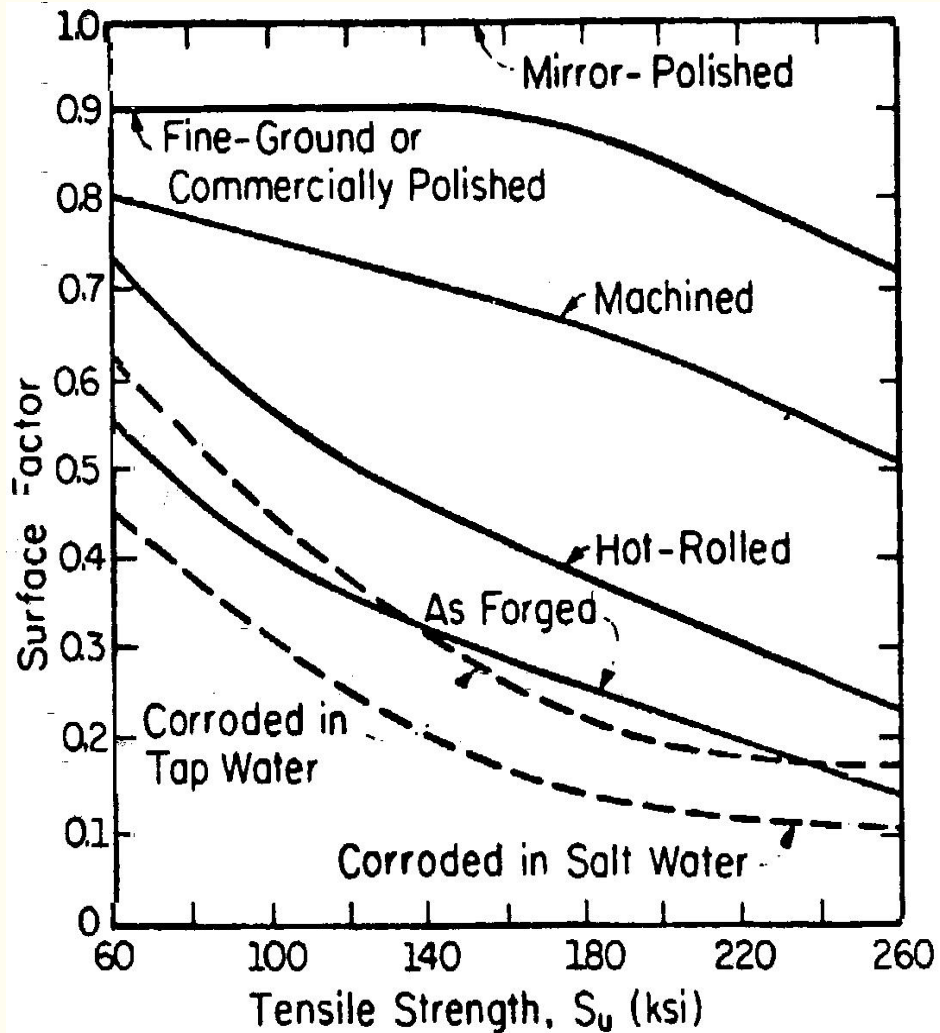
$$\tau_e(\text{torção}) \cong 0.577 S_e(\text{flexão}) \cong 0.2885 S_u$$



EESC-USP

Cacab.sup..

Fatores Modificadores – Acabamento Superficial



Riscos, pites e marcas de usinagem adicionados a concentradores de tensão Reduz a vida em fadiga

Figure 1.13 Surface finish factor: steel parts. (From Ref. 6.)



EESC-USP

Fatores Modificadores – Acabamento Superficial

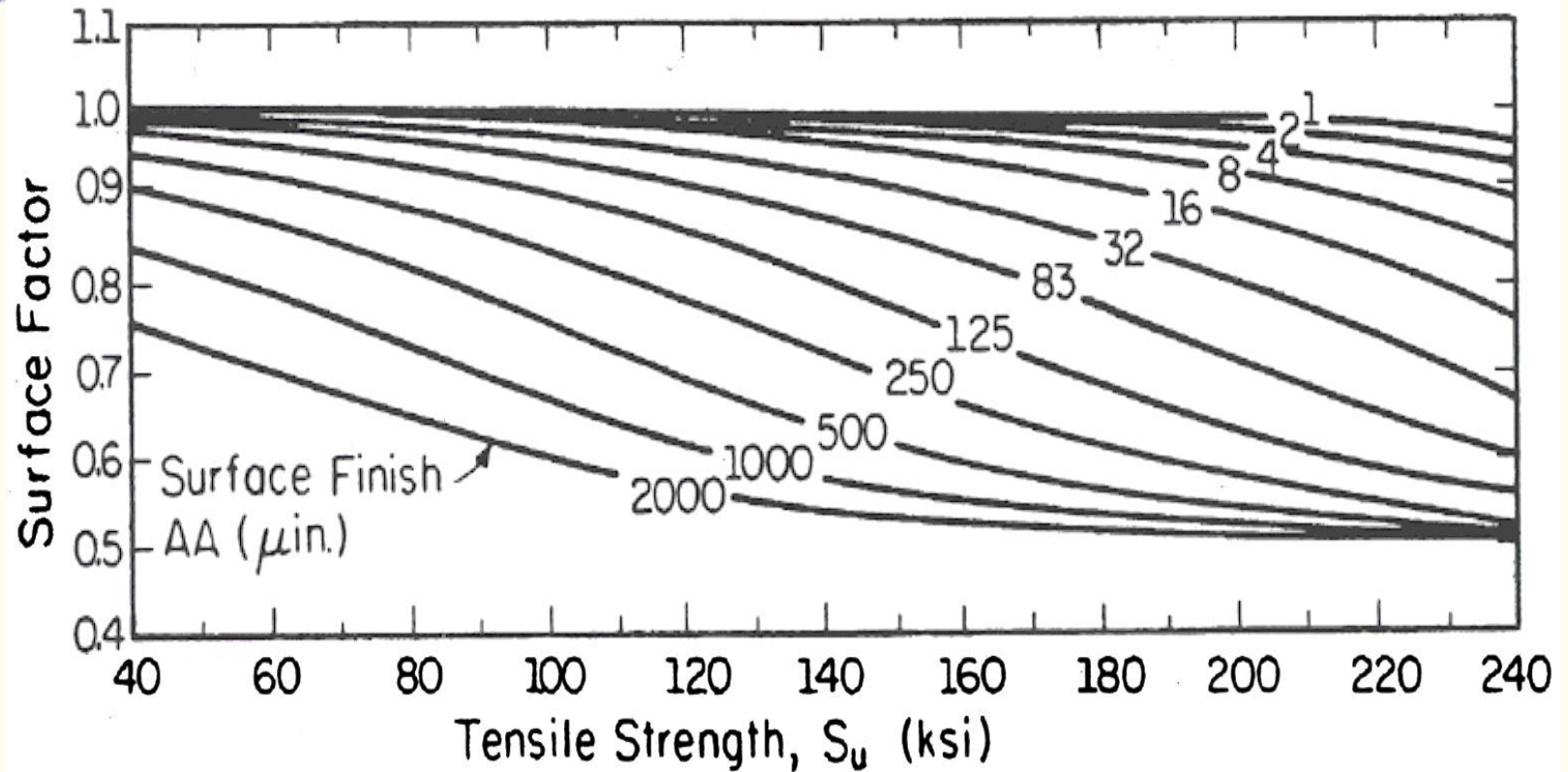


Figure 1.14 Surface finish factor versus surface roughness and strength: steel parts. (From Ref. 7.)



EESC-USP

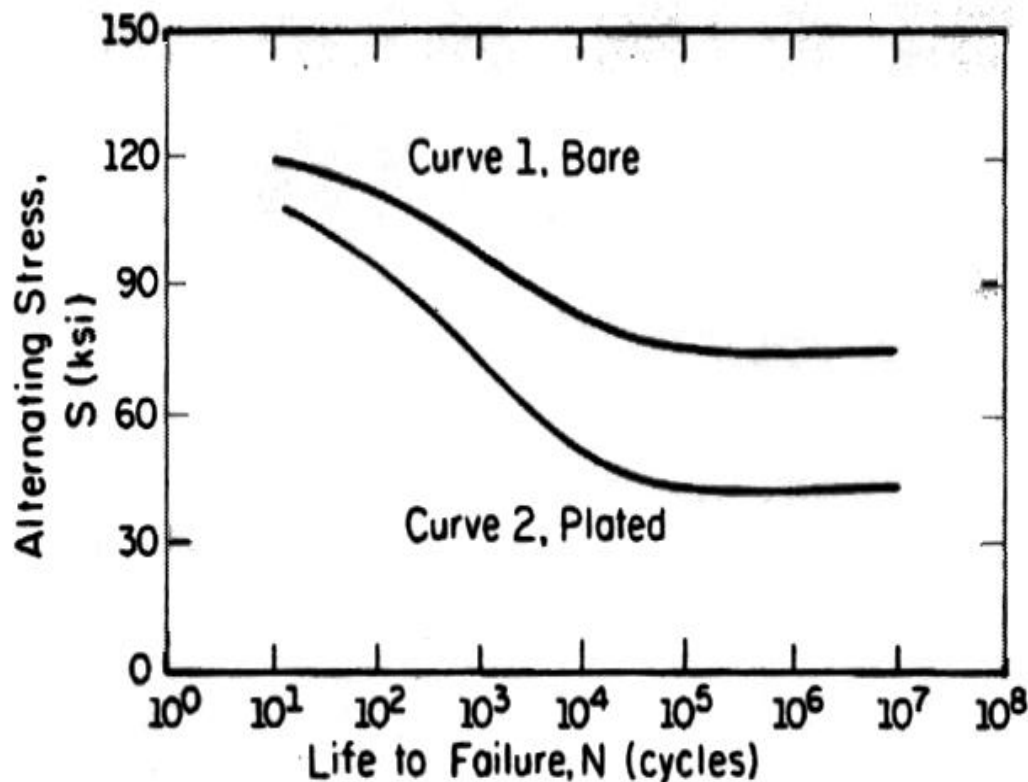
Fatores Modificadores – *Tratamento Térmico*

- **Trincas de fadiga iniciam na superfície do componente**
- **Plating, processos térmicos e mecânicos induzem tensões residuais na superfície.**
- **Se as tensões residuais são compressivas, elas serão benéficas**
- **Se as tensões residuais forem trativas, elas serão prejudiciais**
- **Tensões residuais não são permanentes; Elas podem desaparecer devido ao relaxamento de tensões devido altas temperaturas e sobrecargas.**



EESC-USP

Fatores Modificadores – Tratamento Superficial *Plating*



Plating introduz tensões residuais Trativas, que são prejudiciais.

Figure 1.17 Effect of chrome plating on $S-N$ curve of 4140 steel. (From Ref. 1.)



EESC-USP

Fatores Modificadores – Tratamento Superficial *Plating*

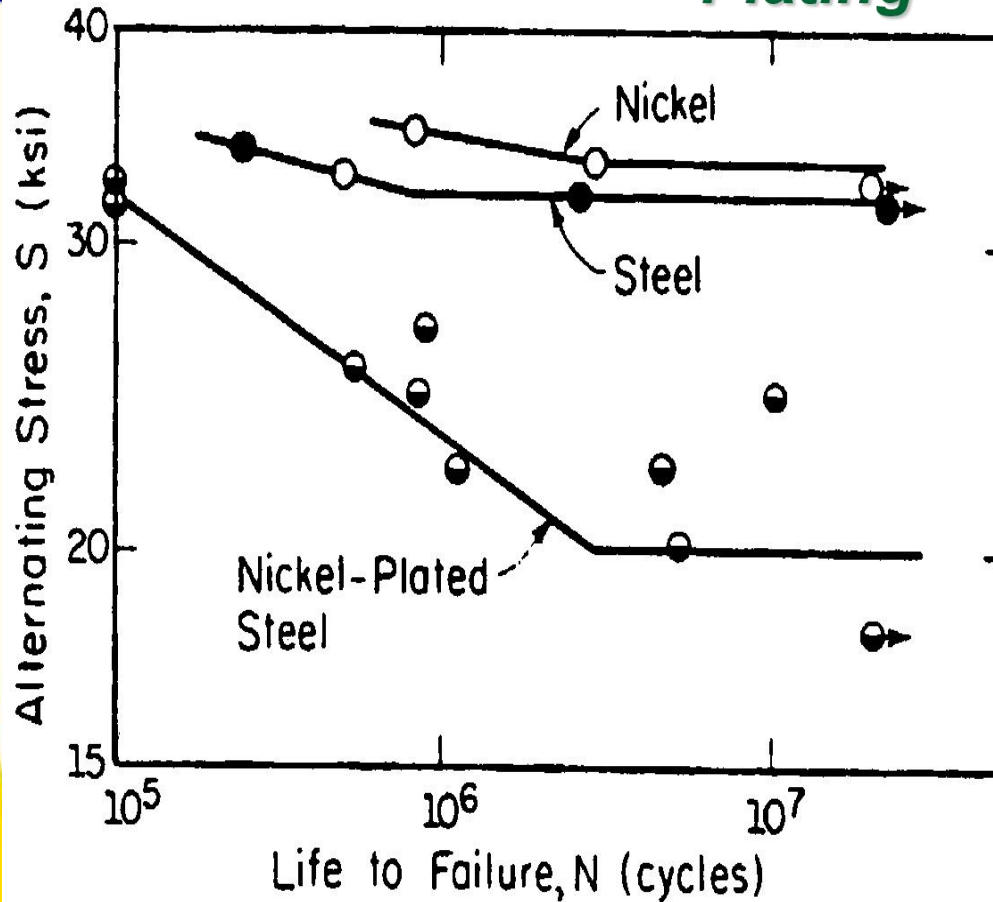


Figure 1.18 Effect of nickel plating on S - N curve of steel ($S_u = 63$ ksi). (From Ref. 9.)



Fatores Modificadores – Tratamento Superficial

Shot peening

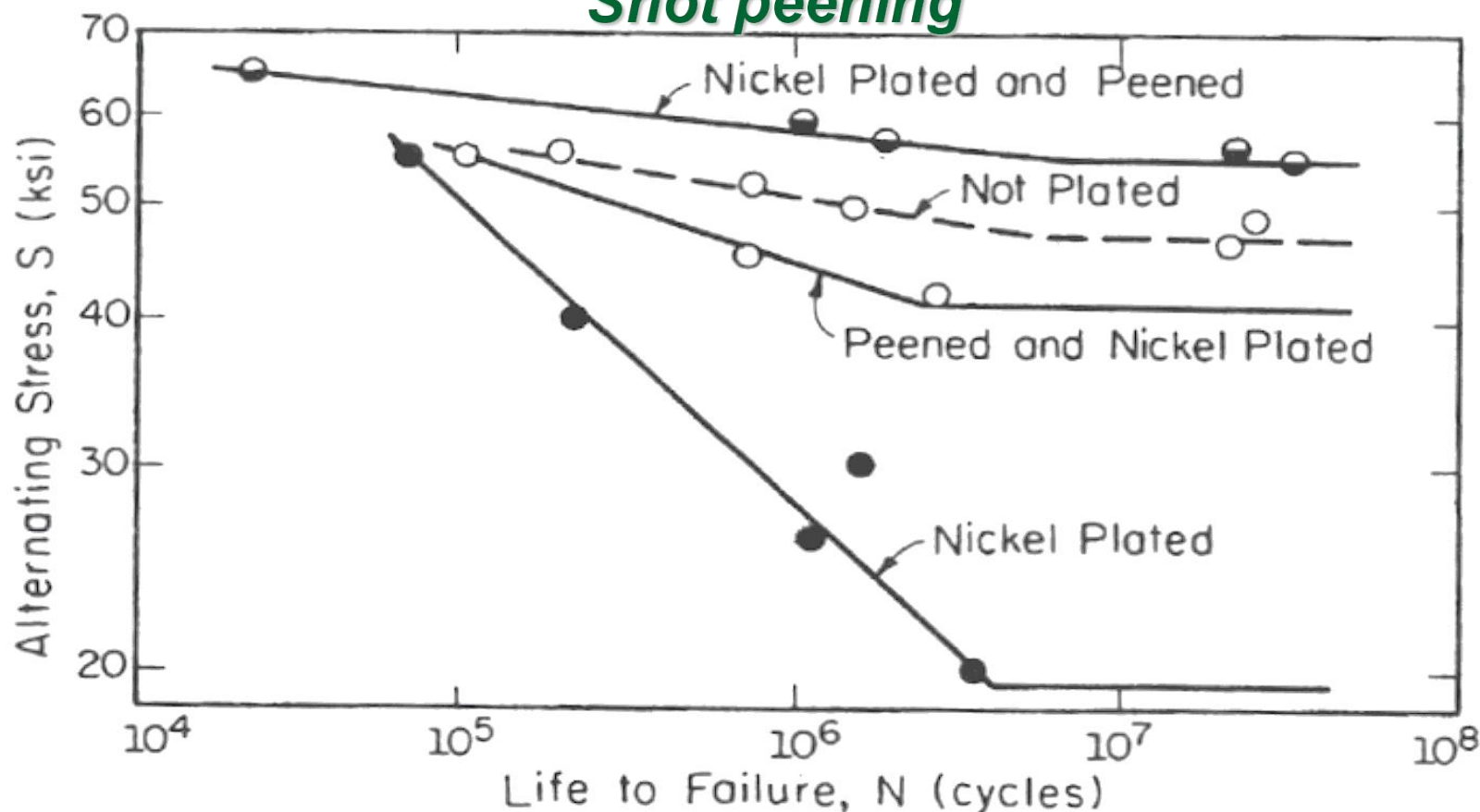


Figure 1.19 Effects of shot peening on S - N curve of nickel plated steel. (From Ref. 9.)



EESC-USP

Fatores Modificadores – Tratamento Superficial

Temperatura

Laminação e forjamento a quente causam “descarbonetação”

- ➡ Que causa abaixamento da resistência do material e tensões residuais trativas na superfície que são
- ➡ Prejudiciais a resistência a fadiga

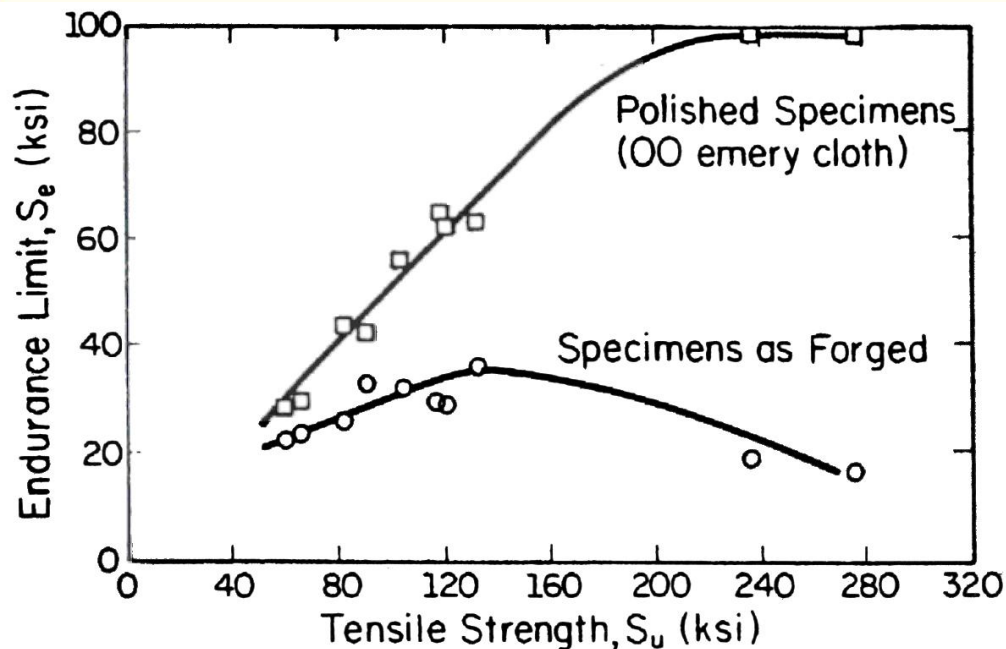


Figure 1.20 Effect of forging on the endurance limit of steels. (From Ref. 10.)



EESC-USP

Fatores Modificadores – Tratamento Superficial

Temperatura - Decarbonetação

Aço (AISI)	S_u	Limite de fadiga (ksi)			
		Normal		Descarbonetado	
		Suave	Entalhado	Suave	Entalhado
2340	250	122	69	35	25
2340	138	83	43	44	25
4140	237	104	66	31	22
4140	140	83	40	32	19



Fatores Modificadores – Tratamento Superficial

Trabalho Mecânico

EESC-USP

Tensões residuais compressivas podem ser introduzidas pelo trabalho mecânico tal como a laminação a frio e jateamento por granalha.

Laminação a Frio: Envolve a compressão de cilindros de aço Contra o componente.

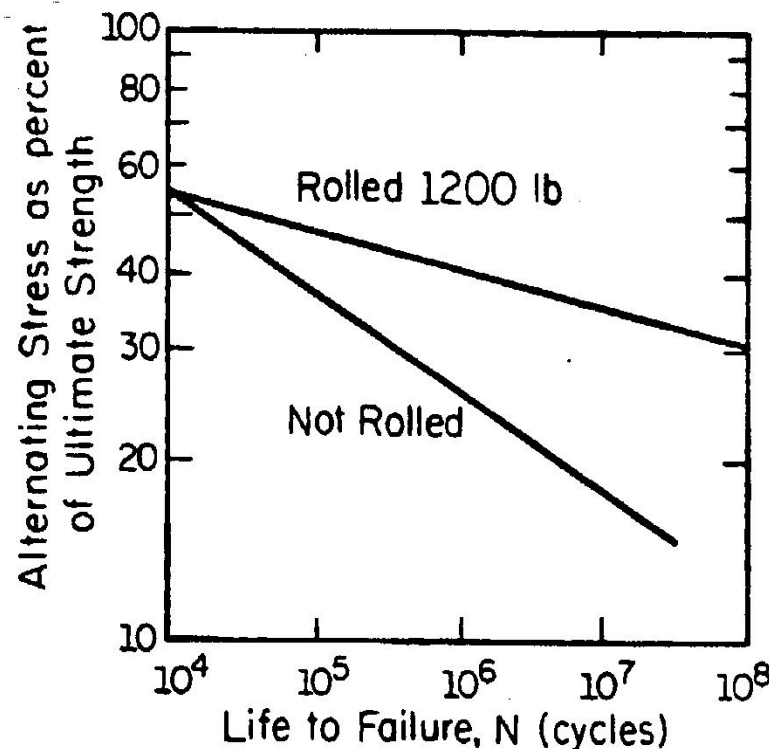


Figure 1.22 Effects of cold rolling on S-N curve of steel. (From Ref. 9.)



EESC-USP

Fatores Modificadores – Tratamento Superficial ***Trabalho a Frio***

Laminação a Frio de roscas tem muito melhor resistência a fadiga do que roscas usinadas.

Exemplo-

A resistência a fadiga (tensão alternada) em 10^5 ciclos para parafusos feitos de aço AISI8635

Roscas laminadas	74 ksi
Roscas usinadas	44 ksi



Fatores Modificadores – Tratamento Superficial

Trabalho Mecânico – Jateamento por Granalhas

EESC-USP

Jateamento por Granalhas envolve o sopro em alta velocidade de esferas de aço ou vidro contra a superfície do componente. Isto introduz no centro do material tensões residuais e na camada próxima a superfície ($\approx 1\text{mm}$ de profundidade) tensões residuais compressivas ($\approx 0.5 S_y$).

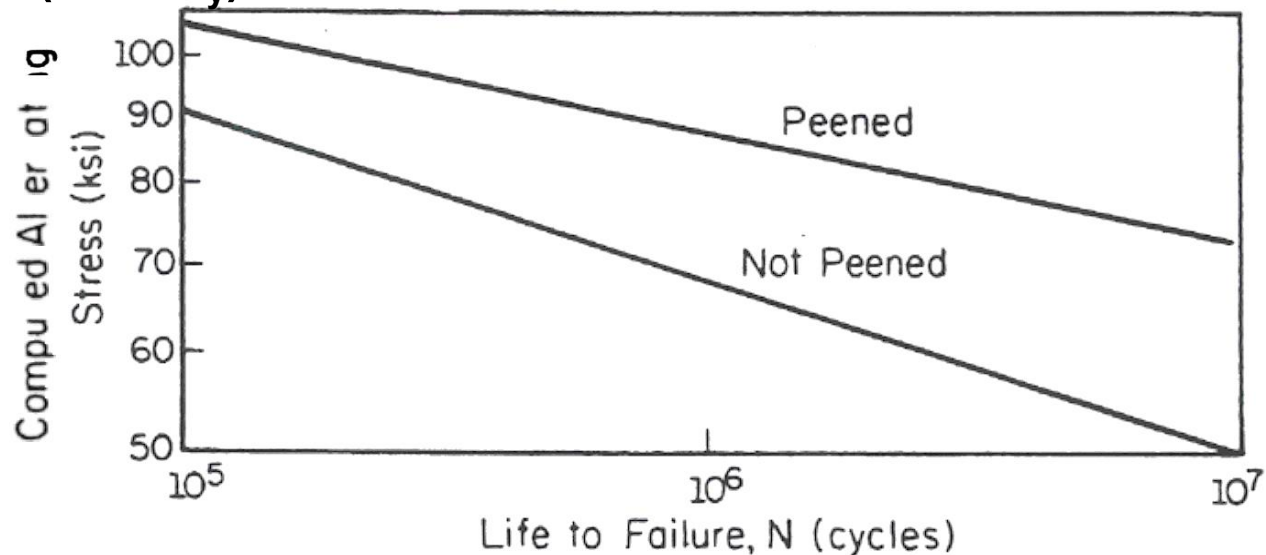


Figure 1.23 S-N curve of carburized gears in peened and unpeened conditions. (From Ref. 12.)



Fatores Modificadores – Tratamento Superficial

Trabalho Mecânico – Jateamento por Granalhas

EESC-USP

O Jateamento por Granalhas elimina a queda do limite de fadiga com o aumento do limite de resistência.

A razão de fadiga (S_e/S_u) de 0.5 pode ser estendida além de $S_u = 200$ ksi.

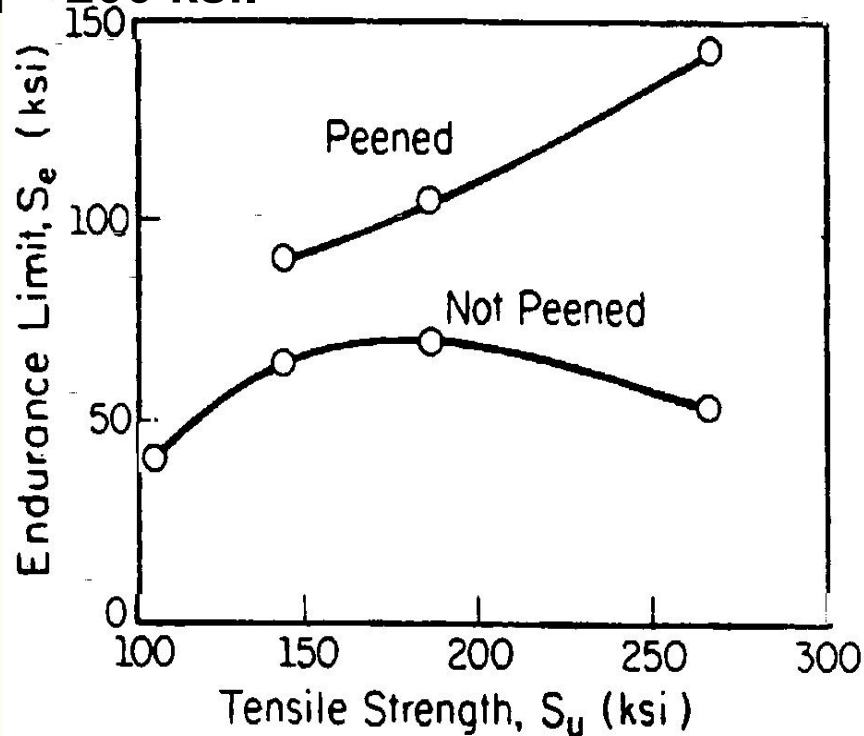


Figure 1.24 Effect of shot peening on endurance limit of high-strength steel. (From Ref. 13.)



Fatores Modificadores- Efeito da Temperatura

EESC-USP

Baixa Temperatura -

- Para aços, o limite de fadiga aumenta (como a resistência a carregamento estático)
- A tenacidade à fratura diminui quando o material torna-se frágil em baixa temperatura.

Temperaturas Elevadas -

- Para aços, o limite de fadiga “desaparece” devido ao bloqueamento das discordâncias.
- Em temp muito alta (> 0.5 PF), a fluência torna-se importante
 - A metodologia S-N não pode ser usada.



EESC-USP

Fatores Modificadores – Meio Ambiente **Corrosão Fadiga**

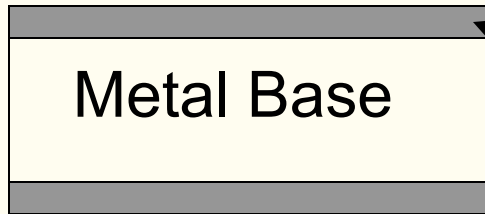
- O carregamento em fadiga se aplicado em um meio corrosivo, resulta em uma redução significativa na vida em fadiga.
- A interação entre a fadiga e a corrosão, referida como “Corrosão Fadiga” envolve mecanismos de falhas complexos e ainda não entendidos.
- Corrosão fadiga é muito difícil de ser quantificada.



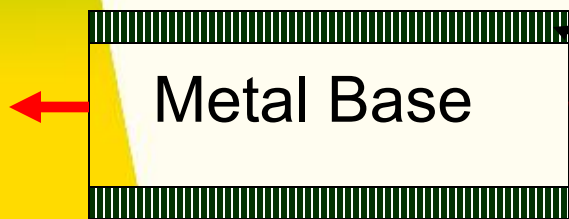
EESC-USP

Fatores Modificadores – *Meio Ambiente* *Corrosão Fadiga*

Descrição Qualitativa da Corrosão Fadiga



Filme óxido é formado sobre a superfície devido a corrosão
-Poderia atuar como uma barreira protetora se a fadiga não estivesse presente.



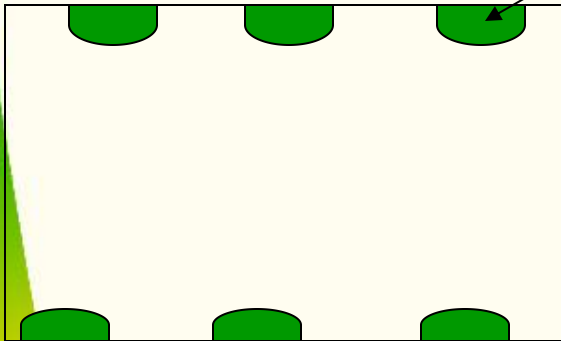
Sob carregamentos de fadiga, o filme óxido se quebra
• Estas trincas provêm acesso ao meio corrosivo e expõe o metal ao meio.



EESC-USP

Fatores Modificadores – *Meio Ambiente* *Corrosão Fadiga*

Descrição Qualitativa da Corrosão Fadiga - Pites



Pites superficiais são formados devido à corrosão.

- Podem atuar como concentradores de tensão e portanto eles afetam adversamente a vida em fadiga.

Pites crescem em tamanho com a aplicação de carregamentos cíclicos . A MF pode ser usada para prever a vida em fadiga.

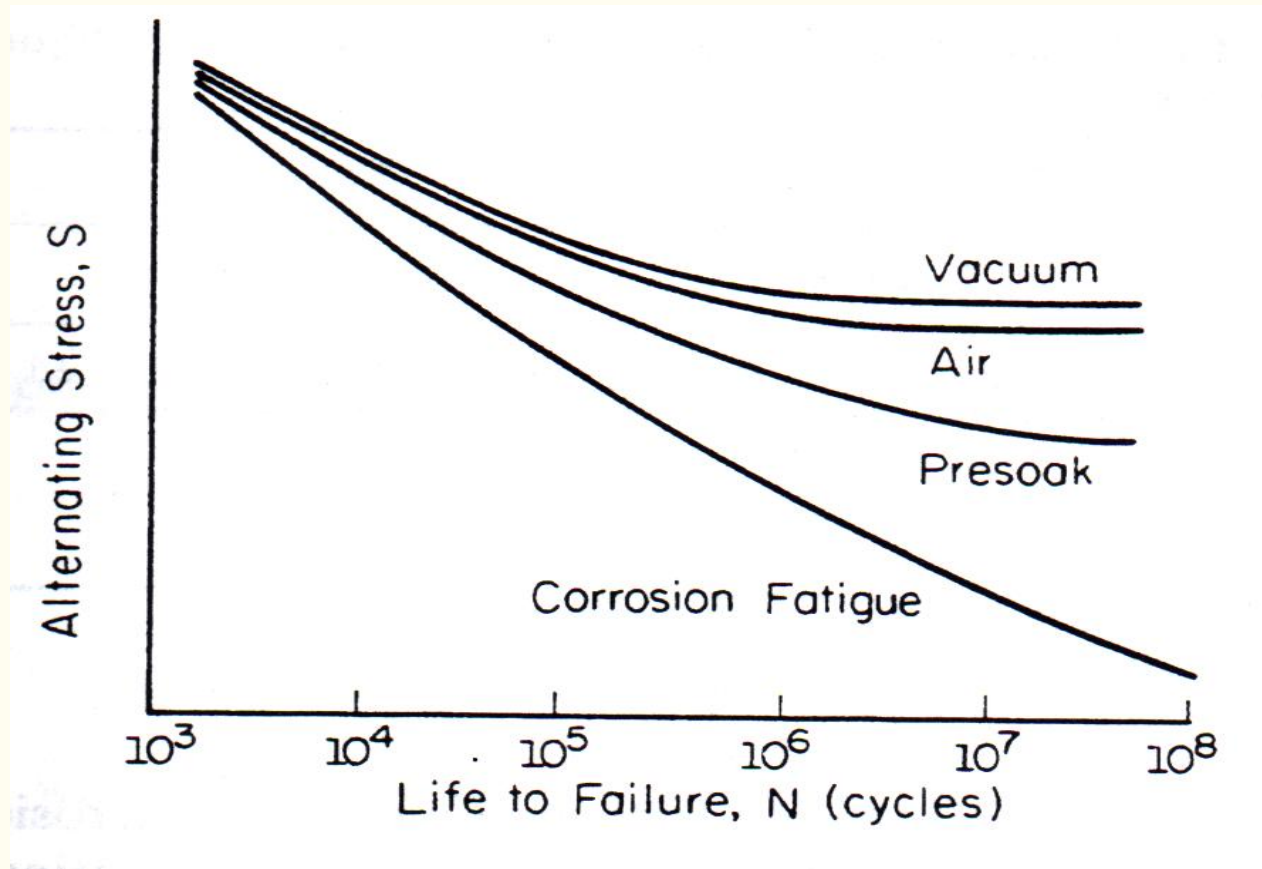


Fatores Modificadores – Meio Ambiente

Corrosão Fadiga

EESC-USP

A figura apresenta o efeito de vários meios sobre a curva S-N de aços.





EESC-USP

Fatores Modificadores – Meio Ambiente **Corrosão Fadiga**



- **Humidade e o Oxigênio** reduzem a vida em fadiga quando comparado com aquela em vácuo.
- **Premolhamento**: O aço é embebido em um meio corrosivo e então testado em ar ambiente. A redução na vida é devido à ação de pites que atuam como sítios concentradores de tensão.
- **Corrosão Fadiga**: Os aços são ensaiados em um meio corrosivo. Note o desaparecimento do limite de fadiga.



EESC-USP

Fatores Modificadores – Meio Ambiente **Corrosão Fadiga**



- No ar o S_e aumenta com a resist. a tração.
- Na água S_e não aumenta com a resist. a tração para os aços carbono comum.
- Aços alto Cr possuem melhor resistência fadiga que os aços carbono.
- Genericamente, materiais resistentes a corrosão também possuem uma boa resist. a corrosão fadiga.



EESC-USP

Parameters for Estimating Fatigue Limits

Parameter	Applicability	Juvinall (2000)	Shigley (2004)
Bending fatigue limit factor: m_e	Steels, $\sigma_u \leq 1460$ MPa	0.5	0.504
	High-strength steels	≤ 0.5	$\sigma_{erb} \leq 740$ MPa
	Cast irons; Al alloys if $\sigma_u \leq 325$ MPa	0.4	—
	Higher strength Al Magnesium alloys	$\sigma_{erb} = 130$ MPa 0.35	— —
Load type factor: m_t	Bending	1.0	1.0
	Axial	1.0	0.85
	Torsion	0.58	0.59
Size (stress gradient) factor: m_d	Bending or torsion ^{1,2,3}	1.0 ($d < 10$ mm)	$1.24d^{-0.107}$
		0.9 ($10 \leq d < 50$)	($3 \leq d \leq 51$ mm)
	Axial, concentric load	0.9 ($d < 50$)	1.0
	Axial, eccentric load	0.7 to 0.9 ($d < 50$)	1.0
Surface finish factor: m_s	Polished	1.0	1.0
	Ground ⁴	See Fig. 10.10	$1.58\sigma_u^{-0.085}$
	Machined ⁴	See Fig. 10.10	$4.51\sigma_u^{-0.265}$
Life for fatigue limit point: N_e , cycles	Steels, cast irons	10^6	10^6
	Aluminum alloys	5×10^8	—
	Magnesium alloys	10^8	—

Notes: ¹Diameter d is in mm units. ²For Juvinall, for $50 \leq d < 100$ mm, decrease the values of m_d by 0.1 relative to the values for $d < 50$ mm, and for $100 \leq d < 150$ mm decrease by 0.2. ³For Shigley, for bending and torsion, use $1.51d^{-0.157}$ for $51 < d \leq 254$ mm, and for nonrotating bending, replace d with $d_e = 0.37d$ for round sections, and with $d_e = 0.81\sqrt{ht}$ for rectangular sections (Fig. A.2). ⁴For Shigley, substitute σ_u in MPa.

Table 10.2 Estimates of the S - N Curve Point at 10^3 Cycles

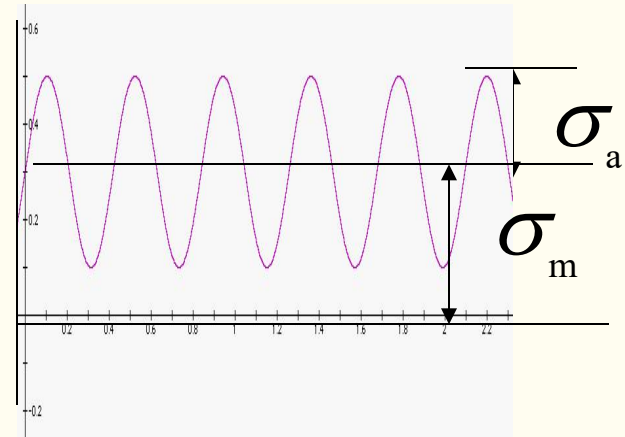
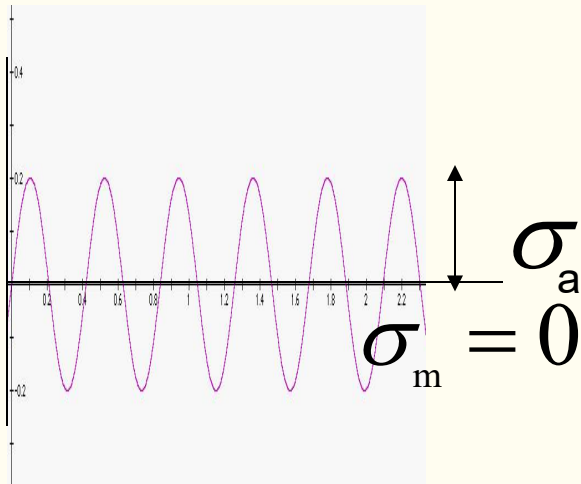
Juvinall (2000) ¹	$m' = 0.9, k'_f = k_f$ (bending; torsion with τ_u replacing σ_u)
	$m' = 0.75, k'_f = k_f$ (axial)
Shigley (2004) ² (steel only)	$m' = \frac{\sigma'_f(2000)^{b'}}{\sigma_u}, \quad b' = -\frac{\log(\sigma'_f/\sigma_{er})}{\log(2N_e)}$
	$k'_f = 1 + (k_f - 1)(-0.18 + 6.24 \times 10^{-4}\sigma_u - 9.47 \times 10^{-8}\sigma_u^2)$ (σ_u in MPa)

Notes: ¹Use the estimate $\tau_u \approx 0.8\sigma_u$ for steel, and $\tau_u \approx 0.7\sigma_u$ for other ductile metals. ²Use the estimate $\sigma'_f \approx \sigma_u + 345$ MPa for steel with $\sigma_u \leq 1700$ MPa.

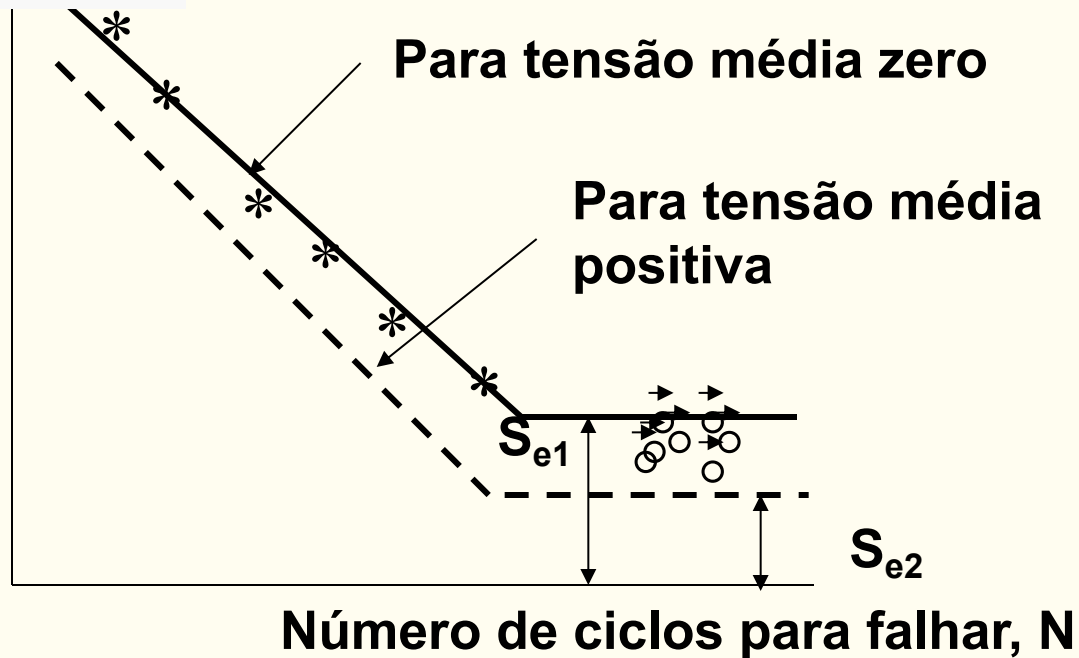


EESC-USP

Efeito da Tensão Média



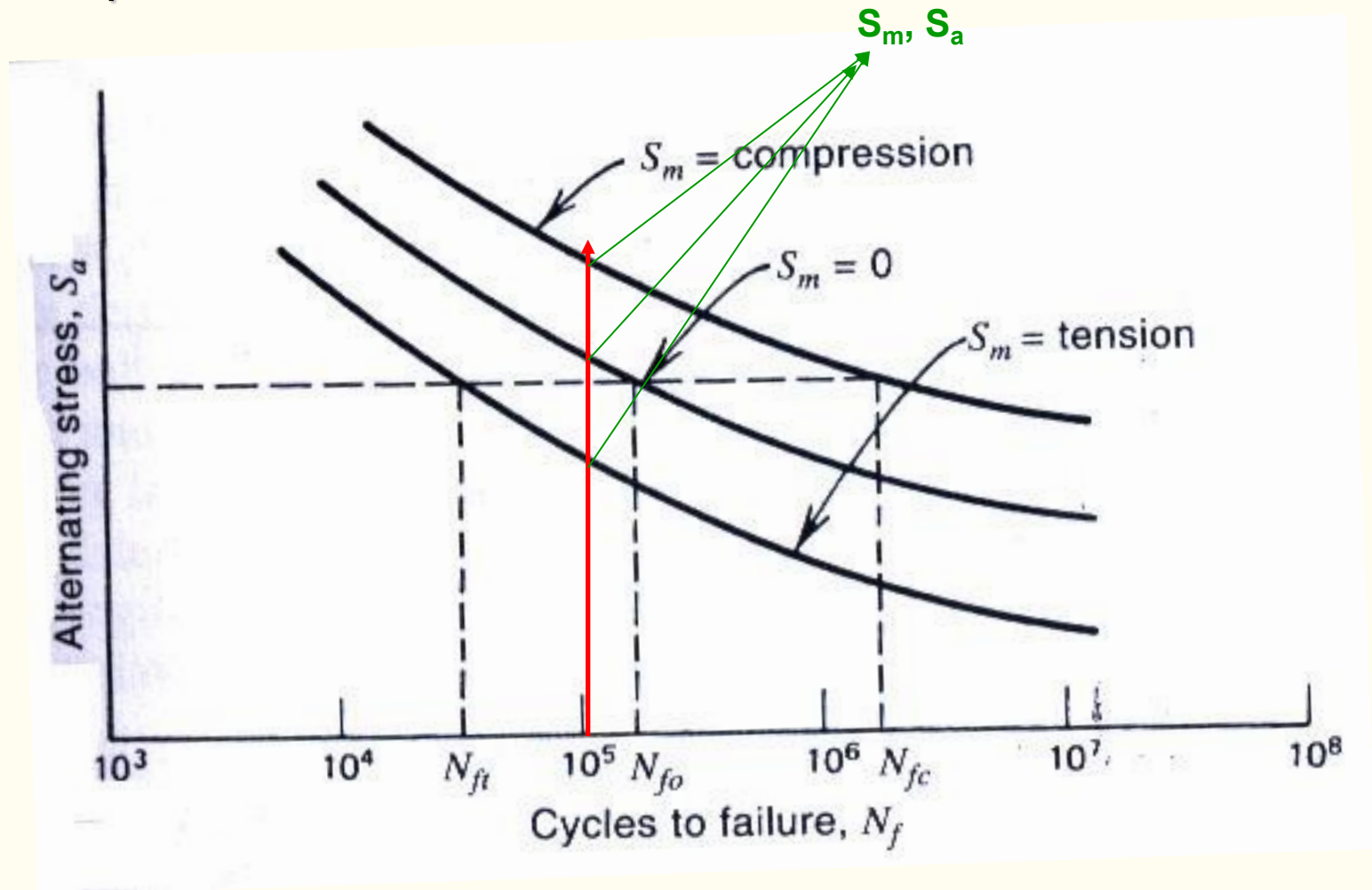
Tensão Alternada





EESC-USP

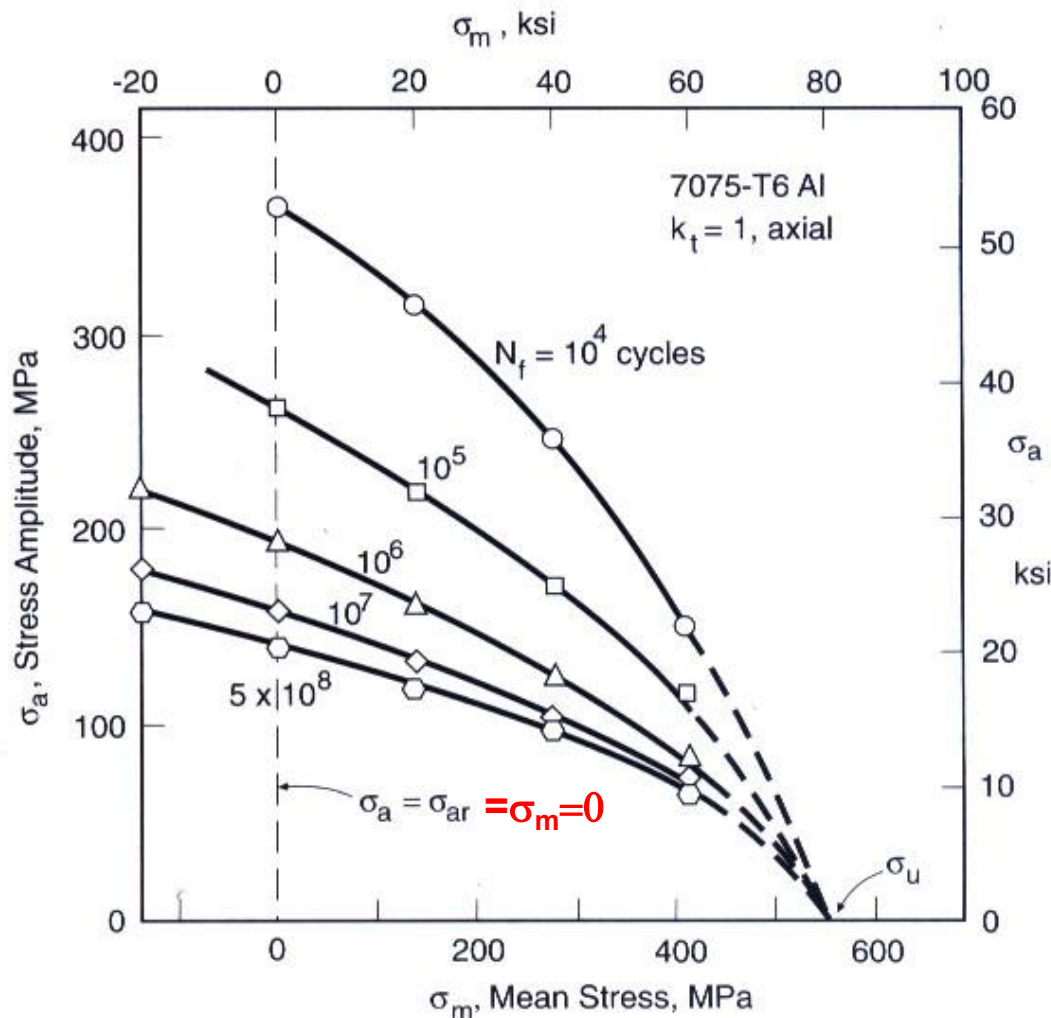
- Um procedimento para representar o efeito de σ_m é selecionar valores de σ_m e ensaiar em diferentes amplitudes.





EESC-USP

- Uma outra forma de apresentar esta mesma informação é o uso do diagrama de vida constante.
- Considere que a amplitude de tensão para um caso com $\sigma_m = 0$ ou seja σ_{ar} .



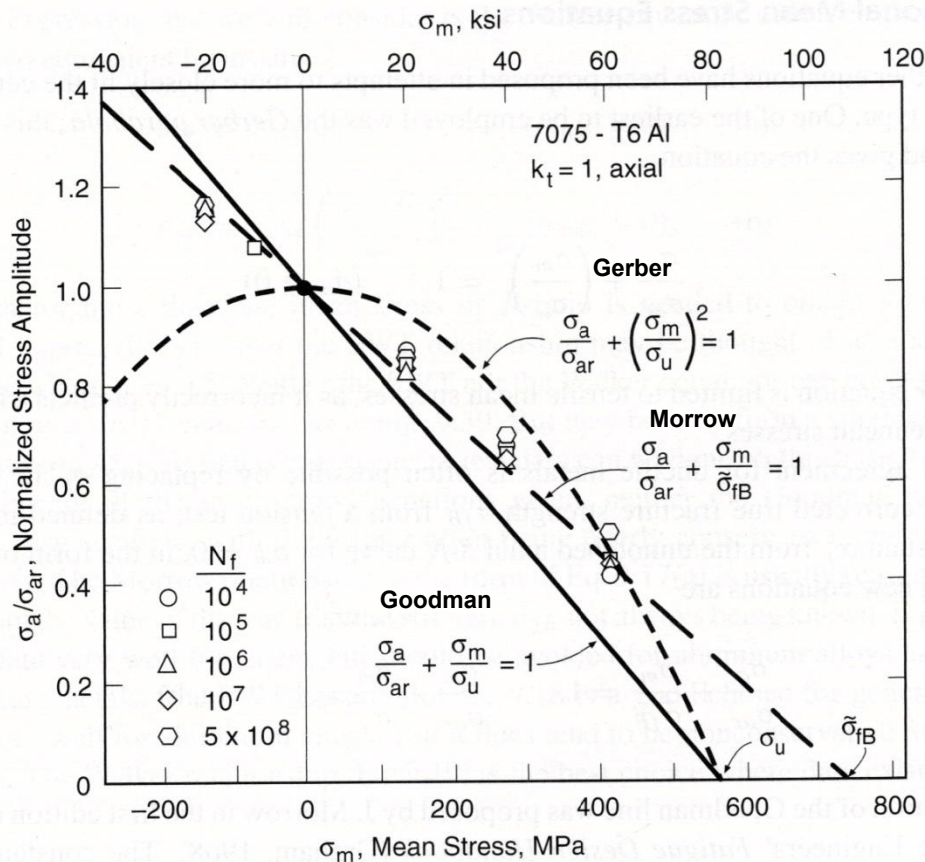


EESC-USP

Diagrama de Ampl. De Tensão Normalizado – Tensão Média



- Este gráfico pode ser normalizado em uma forma muito útil, colocando em gráfico os valores de σ_a/σ_{ar} versus σ_m .



$\tilde{\sigma}_{fB}$ = resistência a fratura verdadeira

σ_m = Tensão média

σ_a = Amplitude de tensão

σ_{ar} = Amplitude de tensão p/ $\sigma_m = 0$

- $\sigma_m = 0$ quando $\sigma_a/\sigma_{ar} = 1$. σ_a/σ_{ar} versus σ_m , existindo uma tendência a obtenção de uma única curva.
- Quando o valor de $\sigma_a = 0$ o valor de $\sigma_m = \sigma_u$.



Diagrama de Fadiga Mestre

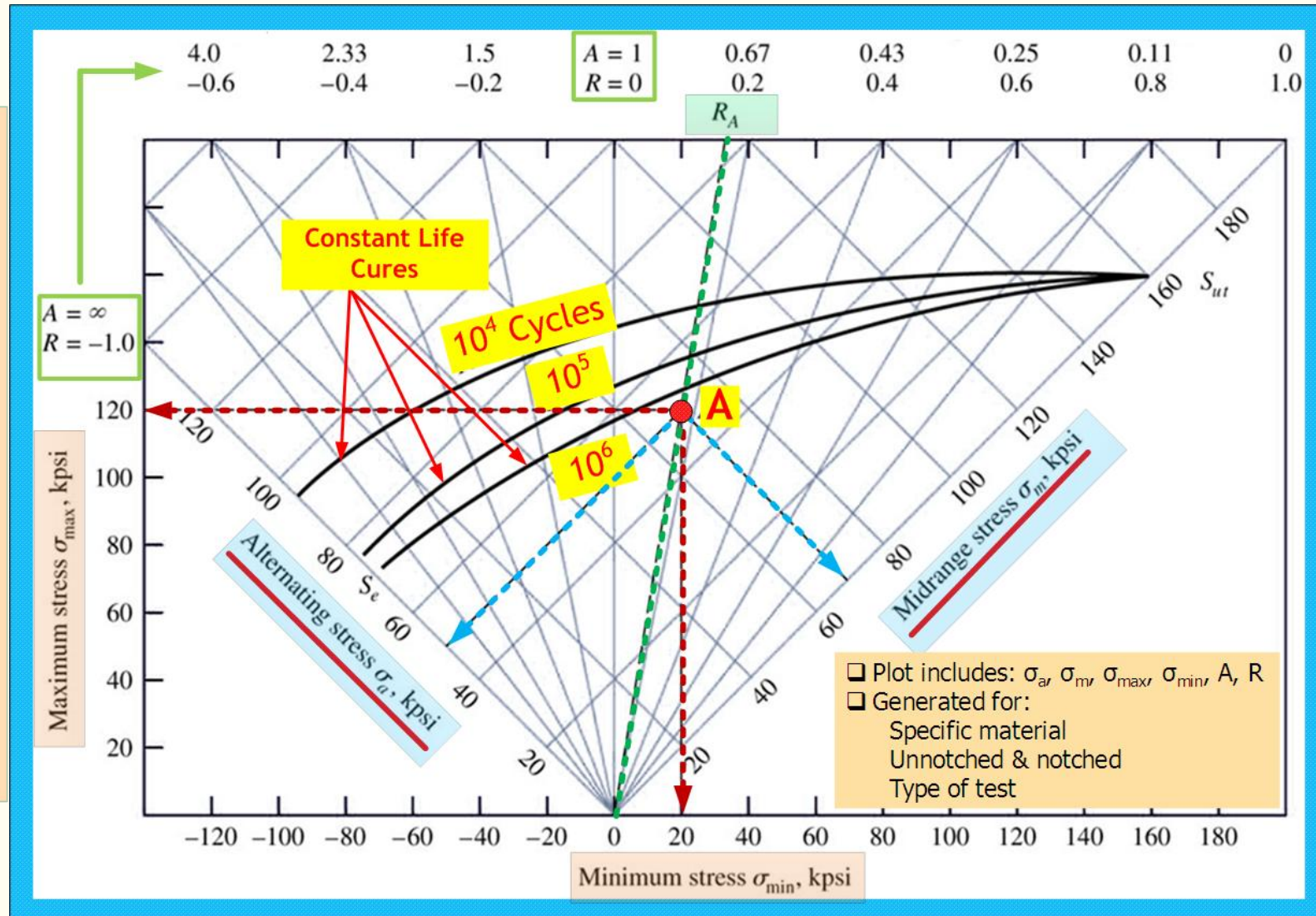
EESC-USP

Diagrama de fadiga mestre para o aço AISI 4340 com $S_{ut} = 158$
 $S_y = 147$ kpsi.

A componente de tensões em A são:

$\sigma_{min} = 20$,
 $\sigma_{max} = 120$,
 $\sigma_m = 70$,
 $\sigma_o = 50$
 $R=0,1667$

Todos em kpsi





Equações Adicionais para Tensão Média

EESC-USP

Uma variedade de equações tem sido proposta para obtenção de curvas normalizadas. Uma das primeiras foi a parábola de Gerber :

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \dots\dots\dots (\sigma_m \geq 0)$$

- No caso de metais dúteis é possível substituir o valor de σ_u na equação de Goodman modificada, pelo valor da tensão de fratura verdadeira ou pelo valor de σ_f' (Morrow):

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f'} = 1 \Leftrightarrow \frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\tilde{\sigma}_{fB}} = 1$$



Uma equação adicional que é frequentemente empregada é a relação de Smith-Watson-Topper (SWT):

$$\sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a} \dots\dots\dots (\sigma_{\max} > 0)$$

$$\sigma_{ar} = \sigma_{\max} \sqrt{\frac{1-R}{2}} \dots\dots\dots (\sigma_{\max} > 0)$$

- Note que $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$
- A expressão final que considera o efeito da tensão média é a expressão de Walker que emprega a constante do material γ .

$$\sigma_{ar} = \sigma_{\max}^{1-\gamma} \sigma_a^{\gamma} \dots\dots\dots (\sigma_{\max} > 0)$$

$$\sigma_{ar} = \sigma_{\max} \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\gamma} \dots\dots\dots (\sigma_{\max} > 0)$$

Dados para mais de um valor de R são necessários para obter-se o valor de γ e será apresentado quanto for tratado o efeito de entalhes. Note que a equação de SWT é um caso especial para $\gamma = 0,5$



EESC-USP

Determinação da Vida com Tensão Média



- Considere que a seguinte equação possa ser reescrita como:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} = 1$$

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}}$$

- Substituindo os valores de σ_a e σ_m obtem-se a amplitude de tensão σ_{ar} , que seria a amplitude de tensão equivalente se considerada uma $\sigma_m = 0$.
- Substituindo σ_{ar} na curva tensão-vida para uma tensão média igual a zero, fornece então a vida estimada para a combinação σ_a e σ_m .



- Por exemplo, assuma que a curva S-N para um carregamento completamente reverso é conhecida e tem a forma da equação:

$$\sigma_a = \sigma_{ar} = \sigma'_f (2 N_f)^b$$

- Combinando a equação acima com a do slide anterior, obtém-se uma equação mais geral para S-N que pode ser aplicada para uma σ_m diferente de zero.

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

- Qualquer uma das equações anteriormente apresentadas podem ser similarmente empregada para obtenção da equação S-N. Como um novo exemplo tomemos a equação de SWT

$$\sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a} = \sigma'_f (2 N_f)^b \dots\dots\dots (\sigma_{\max} > 0)$$

$$\sigma_{\max} \left(\frac{1-R}{2} \right)^\gamma = \sigma'_f (2 N_f)^b \dots\dots\dots (\sigma_{\max} > 0)$$

$$N_f = \infty \dots\dots\dots (\sigma_{\max} \leq 0)$$



EESC-USP

Exemplo

- Um aço AISI 4340 é submetido a um carregamento cíclico com tensão média de 200 MPa.
 - a) Qual é a vida esperada se a amplitude de tensão for de 450 MPa?
 - b) Estime também a curva S-N para esta tensão média.



EESC-USP

Representação dos dados de S-N, para $\sigma_m=0$

Constantes para a curva S-N para materiais estruturais

-CPS ensaiados com tensão média igual a zero e sem entalhe e carregamento axial(Ref: Dowling)



Materiais	S_y	S_u	$S = \sigma'_f (2N_f)^b = A(N_f)^b$			$\sigma_a = C + D \log N_f$	
			σ'_f	A	b	C	D
<u>Aços</u>							
AISI 1015 (N)	227	415	976	886	-0.14	545	-69.6
Man-Ten (HR)	322	557	1089	1006	-0.115	703	-83.0
RQC-100 (R Q&T)	683	758	938	897	-0.0648	780	-68.9
AISI 4142 (Q&T, 450 HB)	1584	1757	1937	1837	-0.0762	1529	-148
AISI 4340 (qualidade aeronáutica)	1103	1172	1758	1643	-0.0977	1247	-137
<u>Liga de Al</u>							
2024-T4	303	476	900	839	-0.102	624	-69.9
<u>Liga de Ti</u>							
Ti-6Al-4V (Solubilizada e envelhecida)	1185	1233	2030	1889	-0.104	1393	-157

(N) Normalizada, (HR) laminado a quente. S_y , S_u , σ'_f , A, C e D estão em MPa. Os dados são para fadiga de alto ciclo $10^3 < N < 10^6$



- Assim, $\sigma'_f = 1758 \text{ MPa}$ e $b = -0,0977$

$$\sigma_{ar} = \sigma'_f (2 N_f)^b = 1758 (2 N_f)^{-0,0977} \dots \text{MPa}$$

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}} = \frac{450}{1 - \frac{200}{1758}} = 507,8 \text{ MPa}$$

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ar}}{\sigma'_f} \right)^{1/b} = \frac{1}{2} \left(\frac{507,8}{1758} \right)^{1/(-0,0977)} = 166.000 \text{ ciclos}$$

- Note que este valor poderia ser obtido diretamente

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

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f - \sigma_m} \right)^{1/b} = \frac{1}{2} \left(\frac{450}{1758 - 200} \right)^{1/(-0,0977)} = 166.000 \text{ ciclos}$$



EESC-USP

- Uma outra alternativa é usar $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a = 650 \text{ MPa}$

a)

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a}}{\sigma'_f} \right)^{1/b} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{650 \times 450}}{1758} \right)^{1/(-0,0977)} = 86.900 \text{ ciclos}$$

b)

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$$

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{(200 + \sigma_a) \sigma_a}}{1758} \right)^{1/(-0,0977)}$$

Logo colocar em gráfico o N_f em função de σ_a e montar a curva S-N para tensão média de 200 MPa.



EESC-USP

Exercício



Os dados de fadiga para CPs carregados axialmente com diferentes valores de σ_m , são apresentados na Tabela abaixo, para o mesmo aço 4340, cujo os dados para um ensaio com $\sigma_m = 0$ foram apresentados anteriormente. Coloque em gráfico σ_a versus N_f para os dados obtidos considerando (a) a equação de Goodman e (b) de Morrow com σ'_f . Em cada gráfico mostre a reta S-N considerando as constantes da tabela anterior. Comente o sucesso de cada equação na correlação destes dados.

σ_a , MPa	σ_m , MPa	N_f , ciclos
379	621	73780
345	621	83810
276	621	567590
517	414	31280
483	414	50490
414	414	84420
345	414	437170
345	414	730570
310	414	445020
552	207	45490
483	207	109680
414	207	510250
586	-207	208030
552	-207	193220
483	-207	901430