

TM336

Introdução aos Materiais

Capítulo 8 – Falha

Prof. Rodrigo Perito Cardoso

Onde estamos?

- **Comportamento mecânico:**
 - Mecanismos de endurecimento
 - Resistência mecânica e dureza
 - **Impacto**
 - **Fadiga**
 - **Fluência**
- Mecanismos de deformação
- Recozimento de recristalização
- Metalurgia da conformação
- Diagramas de fase
- Solidificação
- Metalurgia da fundição

O que era importante lembrar da aula anterior

- Como a deformação pode ocorrer
 - Discordância (tensão de cisalhamento)
 - Planos e direções (sistemas de escorregamento)
 - Macla
- Mecanismos de endurecimento
 - Redução do tamanho de grão (como ocorre)
 - Solução sólida
 - Encruamento
 - Por precipitação
- O que é recuperação, recristalização e crescimento de grão
- Trabalho a quente e a frio

- Prova dia 31/03 – 18:30 – 20:30h
- Aula normal dia 31/03 21:00-23:00h

Roteiro da aula

- Introdução
- Fratura
 - Dúctil
 - Frágil
- Mecânica da fratura
- Ensaios de Impacto
- Fadiga
- Fluência

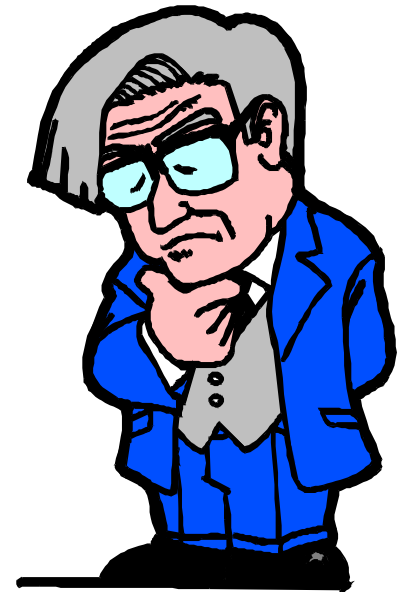


Falha





Por que estudar



Introdução



An oil tanker that fractured in a brittle manner by crack propagation around its girth.

(Photography by Neal Boenzi. Reprinted with permission from *The New York Times*.)

- Causas de falha:
 - Seleção inadequada de material
 - Projeto inadequado
 - Mal uso
- Engenheiro deve:
 - Evitar ou antecipar a falha
 - Caso esta ocorrer, entende-la e propor medidas para que ela não volte a ocorrer



Introdução

Liberty Ships – 2ª Guerra Mundial

- O casco dos Liberty Ships fraturavam sem aviso, Principalmente no Atlântico Norte.
- Houveram 2751 Liberty Ships fabricados entre 1941- 1945. Trincas apareceram em 400 deles, sendo 145 falhas catastróficas;



Introdução Liberty Ships

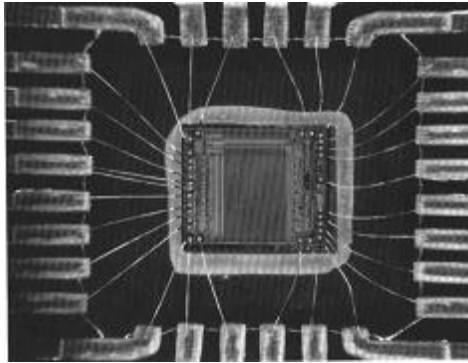
- A baixa temperatura do Atlântico Norte tornou o aço frágil.
- Foram os primeiros navios produzidos em massa por soldagem.



- O problema pode ser solucionado empregando aços de melhor qualidade e melhorando o projeto dos navios

Quem lembra de um filme ?

Introdução



**Processador de computador
carga térmica cíclica.**

Adapted from Fig. 22.30(b), *Callister 7e*.
(Fig. 22.30(b) is courtesy of National
Semiconductor Corporation.)



**Implante de fêmur
carga cíclica devido ao caminhar**

Adapted from Fig. 22.26(b),
Callister 7e.

Fratura

- Fratura: separação de um corpo em dois sob ação de uma tensão à temperatura baixa se compara a fusão do material (Vamos discutir casos de cargas de tração)
- Fratura dúctil
 - Ocorre com deformação plástica (grande absorção de energia)
- Fratura frágil
 - Ocorre sem deformação plástica (baixa absorção de energia)
 - Catastrófica

Fratura

- Fratura depende de:
 - Estado de tensão
 - Temperatura
 - Taxa de carregamento
- Etapas: formação e propagação de trincas
 - Trinca em material dúctil (lenta) – Estável (avança com esforço adicional)

Fratura Dúctil X Frágil

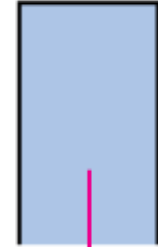
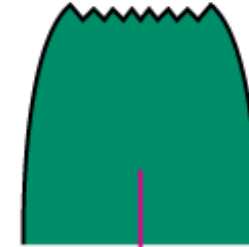
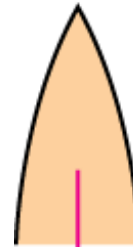
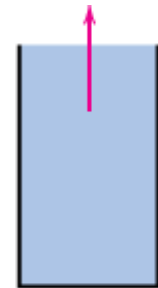
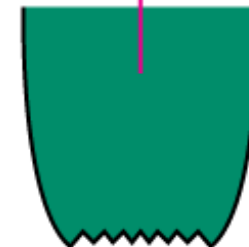
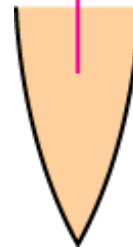
- Classificação:

Fratura
comportamento:

Muito
Dúctil

Moderadamente
Dúctil

Frágil



Adapted from Fig. 8.1,
Callister 7e.

RA% ou AL%

Grande

Moderado

Pegueno

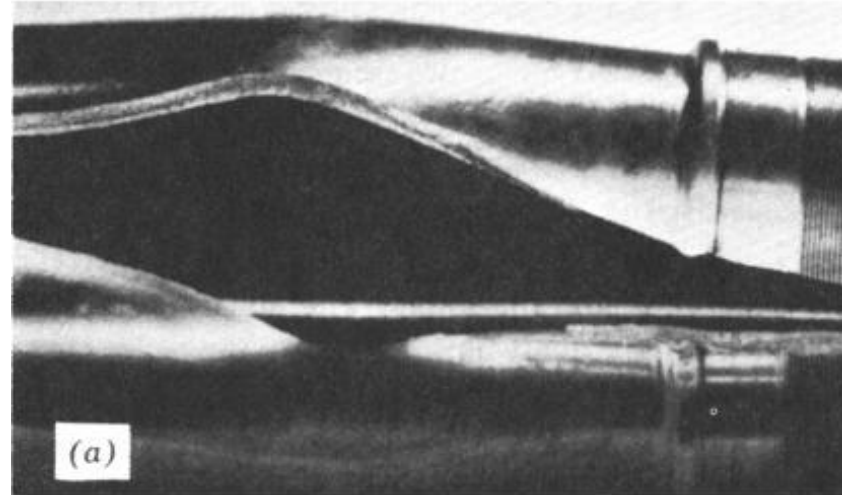
- Dúctil
Tipo de fratura
desejada!

Dúctil:
Avisos de fratura

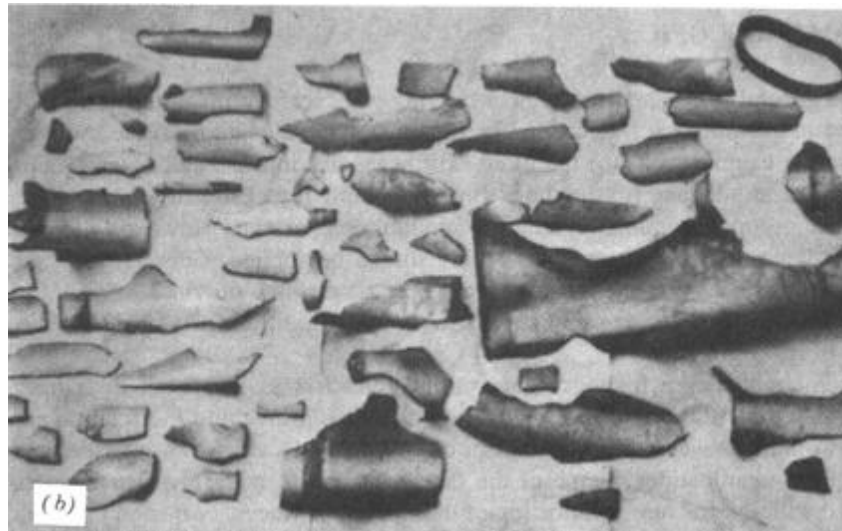
Frágil:
Sem
aviso

Ex: Falha de um tubo

- Falha **Dúctil**:
 - Uma parte
 - Grande deformação



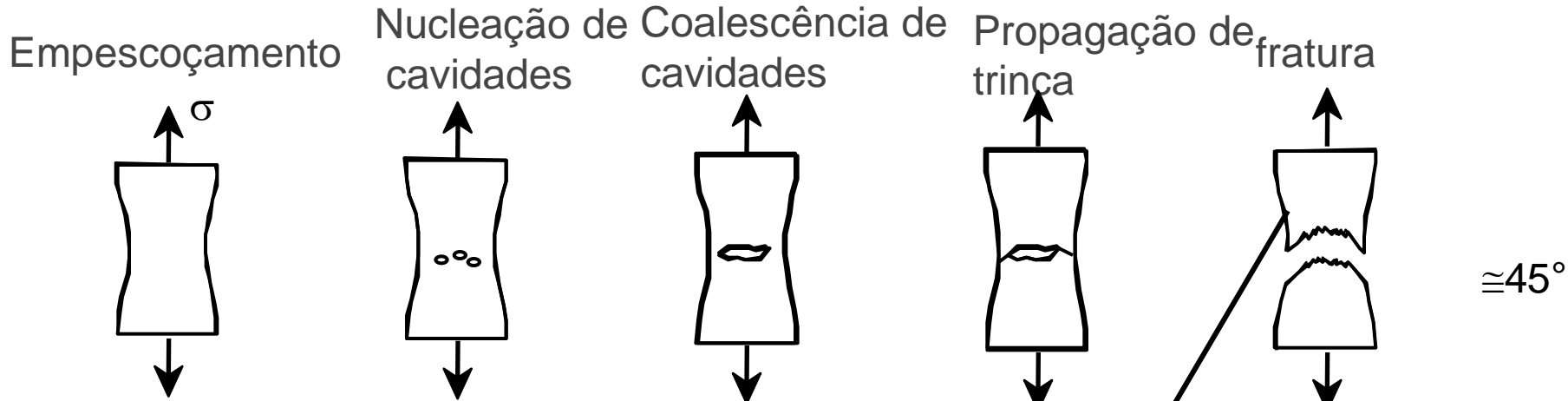
- Falha **Frágil**:
 - Muitas partes
 - pequena deformação



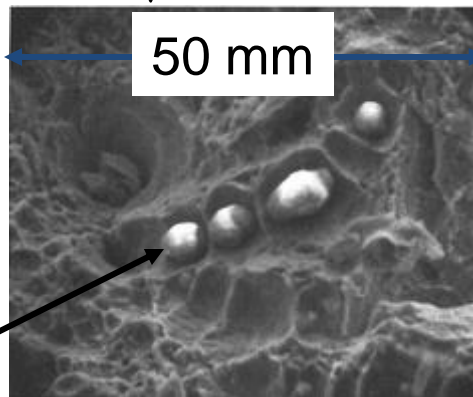
Figures from V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Fig. 4.1(a) and (b), p. 66 John Wiley and Sons, Inc., 1987. Used with permission.

Fratura moderadamente Dúctil

- Evolução da falha:

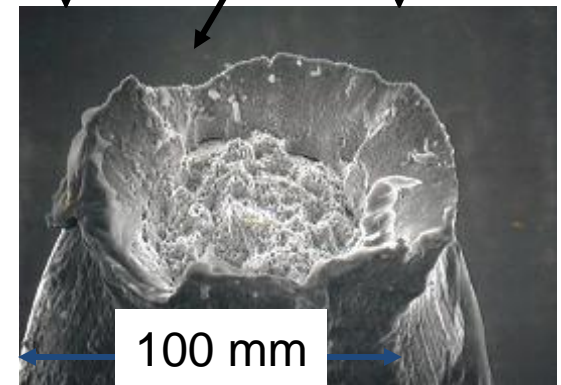


- Superfície de fratura (aço)



- Partículas servem de nucleadoras de cavidades.

From V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Fig. 11.28, p. 294, John Wiley and Sons, Inc., 1987. (Orig. source: P. Thornton, *J. Mater. Sci.*, Vol. 6, 1971, pp. 347-56.)



Fracture surface of tire cord wire loaded in tension. Courtesy of F. Roehrig, CC Technologies, Dublin, OH. Used with permission.

Fratura frágil

- Sem deformação apreciável
 - Rápida propagação de trinca (perpendicular a força)
 - Superfícies relativamente planas
- Marcas em “V”, linhas
- Clivagem (ruptura de ligações em um plano)

Fratura Dúctil X Frágil



Fratura tipo taça e cone
(Al)

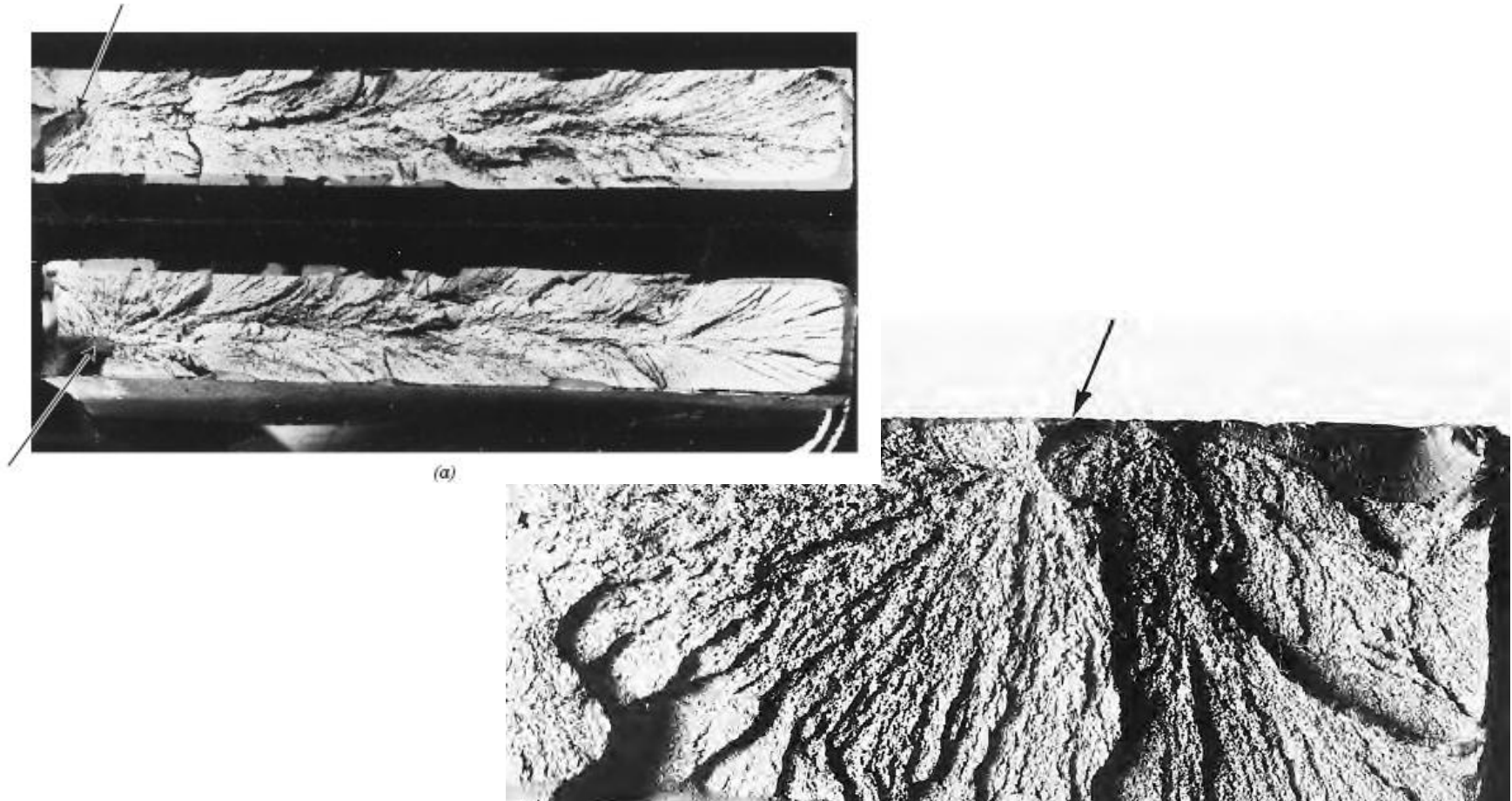


Fratura frágil
(aço)

Adapted from Fig. 8.3, *Callister 7e*.

Fratura frágil

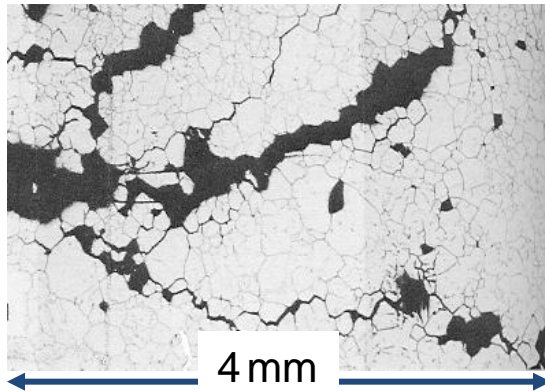
Flechas indicam o ponto de início da fratura



Adapted from Fig. 8.5(a), *Callister 7e*.

Superfície de fraturas frágeis

- Inter-granular
(entre grãos)



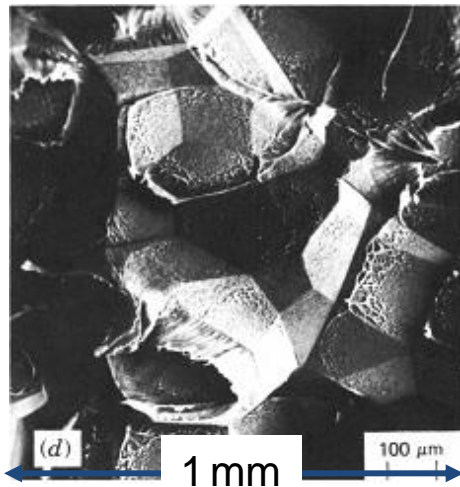
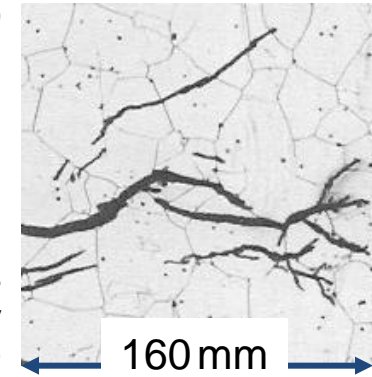
304 S. Aço (metal)

Reprinted w/permission from "Metals Handbook", 9th ed, Fig. 633, p. 650. Copyright 1985, ASM International, Materials Park, OH. (Micrograph by J.R. Keiser and A.R. Olsen, Oak Ridge National Lab.)

- Intra-granular
(dentro de grão)

316 S. Aço (metal)

Reprinted w/ permission from "Metals Handbook", 9th ed, Fig. 650, p. 357. Copyright 1985, ASM International, Materials Park, OH. (Micrograph by D.R. Diercks, Argonne National Lab.)

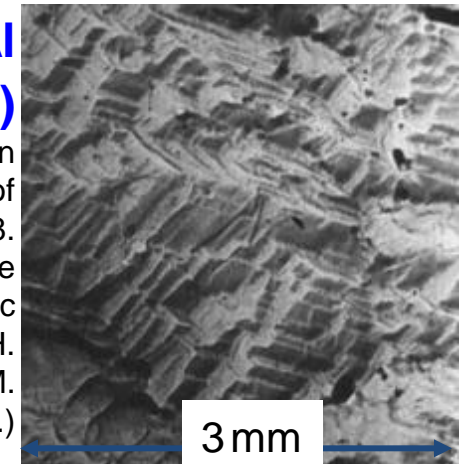


Polipropileno (polímero)

Reprinted w/ permission from R.W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", (4th ed.) Fig. 7.35(d), p. 303, John Wiley and Sons, Inc., 1996.

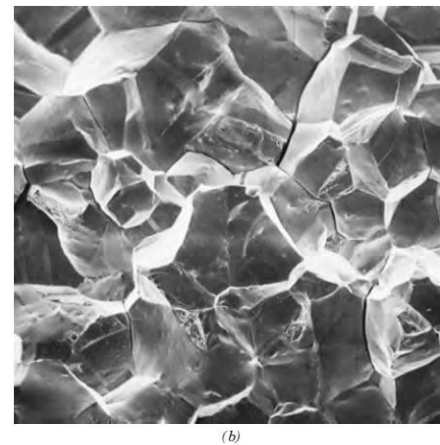
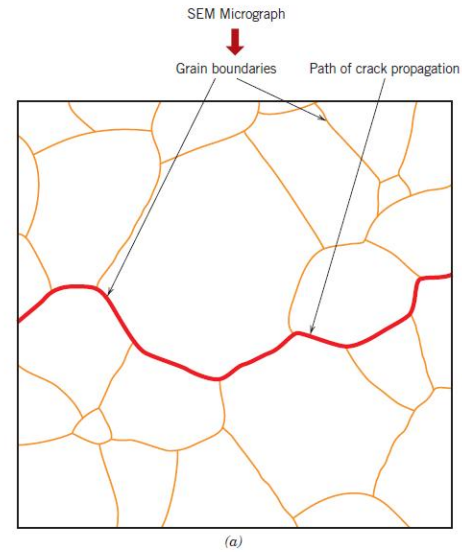
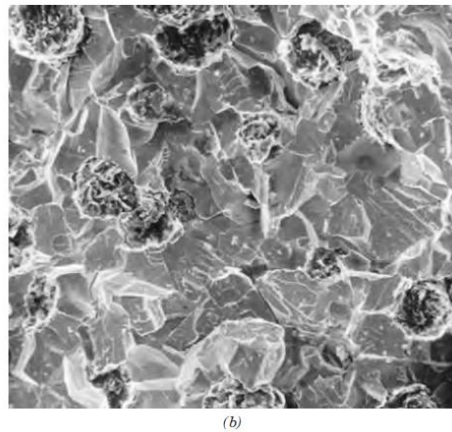
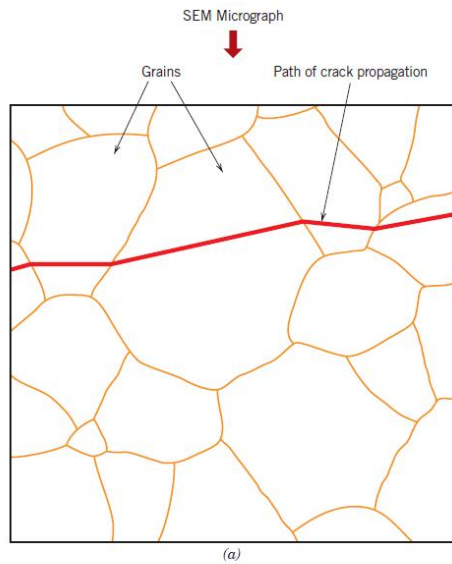
Óxido de Al (ceramico)

Reprinted w/ permission from "Failure Analysis of Brittle Materials", p. 78. Copyright 1990, The American Ceramic Society, Westerville, OH. (Micrograph by R.M. Gruver and H. Kirchner.)



(Orig. source: K. Friedrich, *Fracture* 1977, Vol. 3, ICF4, Waterloo, CA, 1977, p. 1119.)

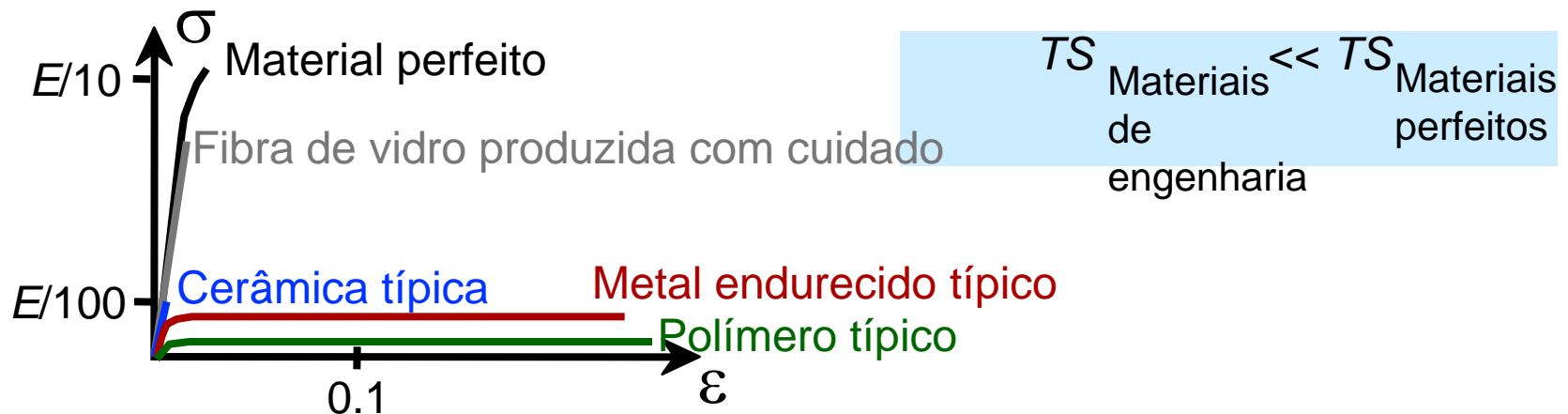
Fratura trans e inter-granular



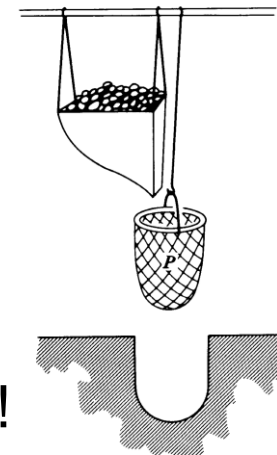
PROVA 02 – ATÉ AQUI !!!!!

Material **real** X **ideal**

- Comportamento tensão deformação (Temperatura ambiente):



- DaVinci (500 anos atrás!) observou...
 - Quanto maior o arame menor sua carga para fratura.
- Razão:
 - Defeitos causa falha prematura.
 - Corpos maiores contêm mais defeitos!



Reprinted w/
permission from R.W.
Hertzberg,
"Deformation and
Fracture Mechanics of
Engineering
Materials", (4th ed.)
Fig. 7.4. John Wiley
and Sons, Inc., 1996.

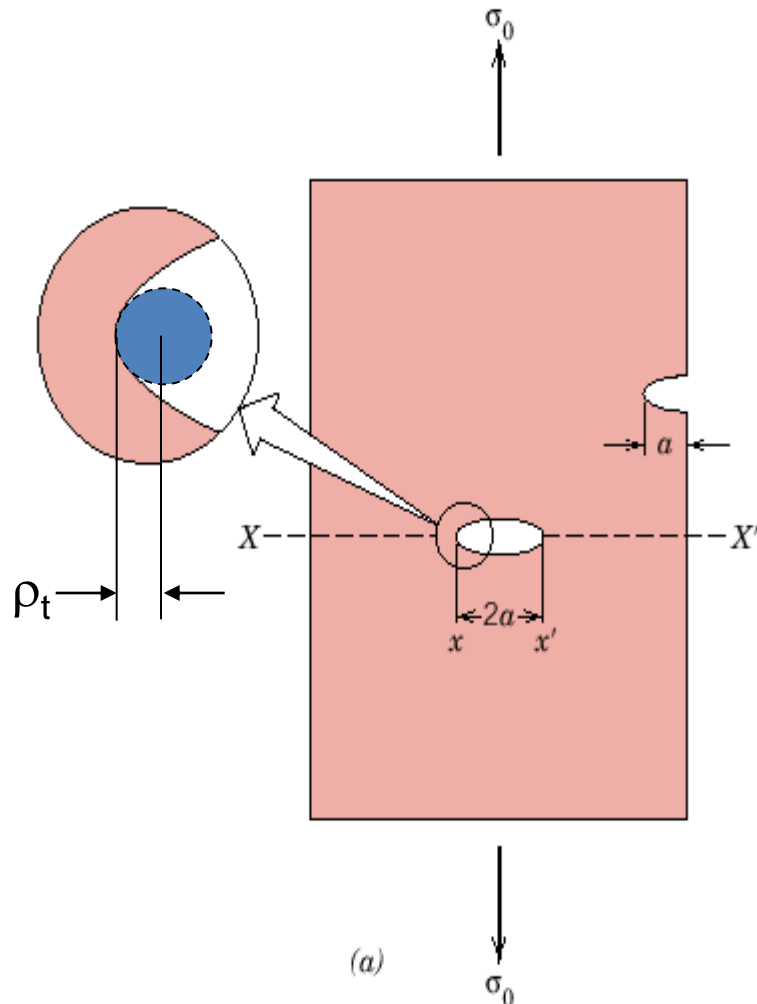
Princípios da Mecânica da Fratura

- Fratura frágil de materiais dúcteis (Libert Ships)
 - Entender o mecanismo
- Mecânica da Fratura
 - Nível de tensão
 - Presença de defeitos – gerador de trincas
 - Propagação de trinca

Concentradores de Tensão

- Resistência teórica $E/10$ (materiais frágeis)
- Prática entre 10 e 1000 vezes menor
- Em 1930 , A. Griffith-> causa defeitos e trincas microscópicas na superfície e no interior

Defeitos e a concentração de tensão



Resultados de propagação de trincas

- Trincas de Griffith

$$\sigma_m = 1 + 2\sigma_o \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

Fator de concentração de tensão

$$\sigma_m = 2\sigma_o \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} = K_e \sigma_o$$

Trinca longa
Raio pequeno

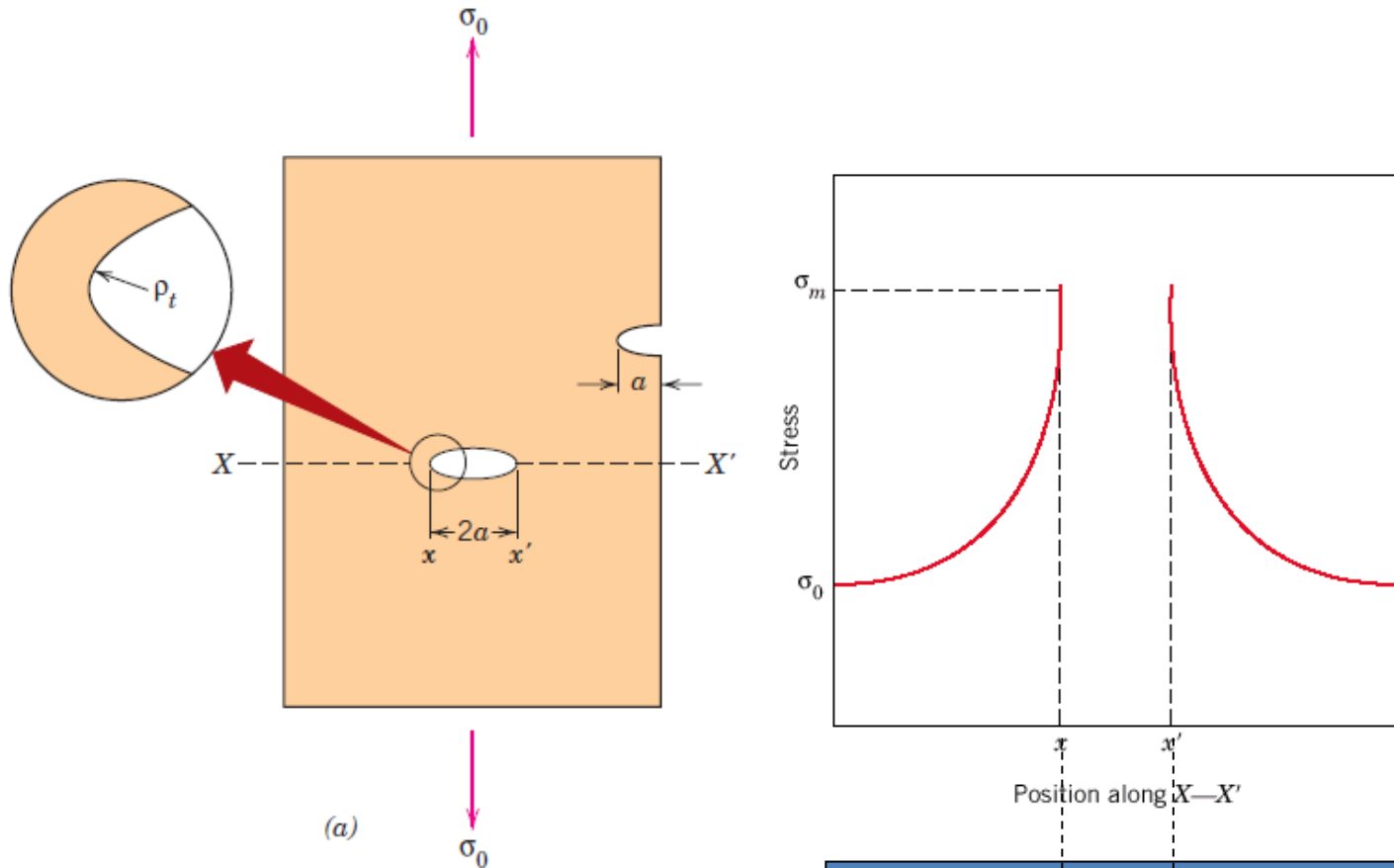
onde

ρ_t = raio de curvatura

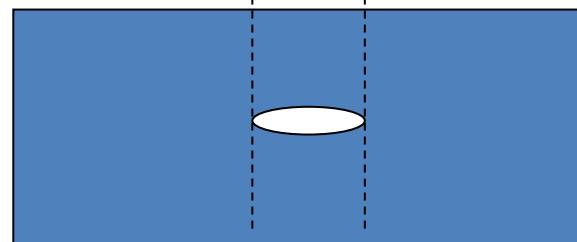
σ_o = tensão aplicada

σ_m = tensão na ponta trinca

Distribuição de tensões

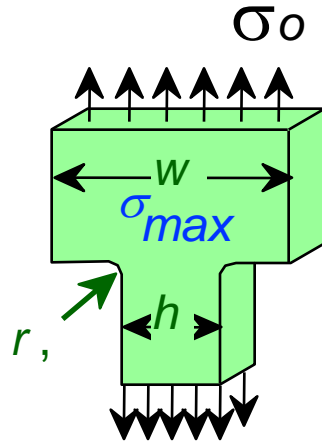


Fatores de concentração de tensões
(K_e)



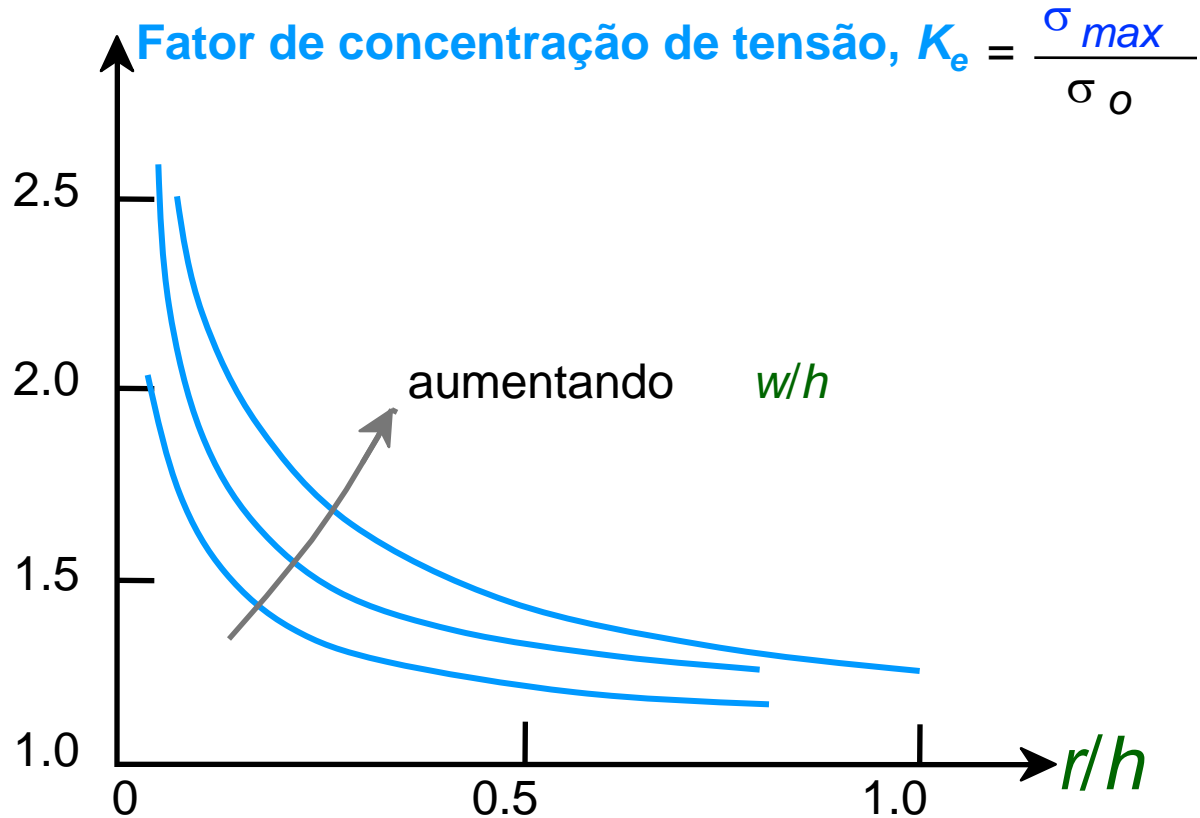
Concentradores de tensão

- Evitar cantos vivos!



raio

Adapted from Fig. 8.2W(c), *Callister 6e*.
(Fig. 8.2W(c) is from G.H. Neugebauer, *Prod. Eng.* (NY), Vol. 14, pp. 82-87 1943.)



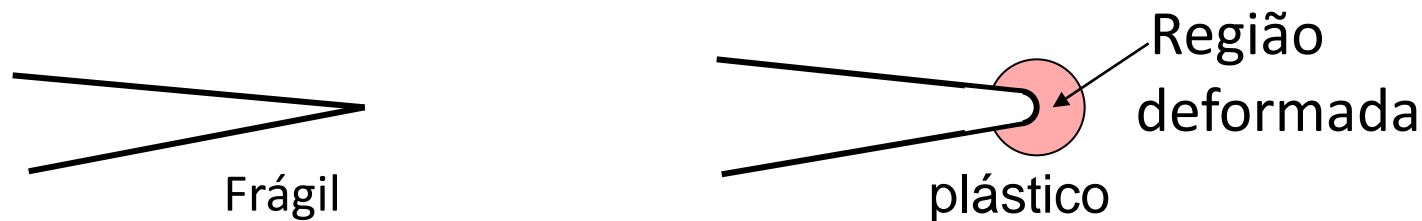
aumentando w/h

← Canto mais vivo

Propagação de trinca

Propagação devida a trinca (raio pequeno)

- Um material plástico deforma na ponta da trinca, “arredondando” a trinca.



Balanço de energia na trinca

- Energia elástica
 - Energia elástica armazenada no material quando ele deforma elasticamente
 - Esta energia é liberada quando a trinca se propaga
 - Criação de nova superfície necessita de energia

Quando uma trinca se propaga?

Trinca se propaga se a tensão exceder a

Tensão crítica

i.e., $\sigma_m > \sigma_c$

or $K_e > K_c$

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

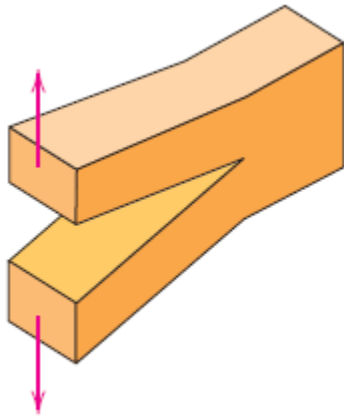
onde

- E = módulo de elasticidade
- γ_s = energia de superfície específica
- a = metade do comprimento da trinca
- $K_c = \sigma_c / \sigma_0$

Para materiais dúcteis=> substituir γ_s por $\gamma_s + \gamma_p$

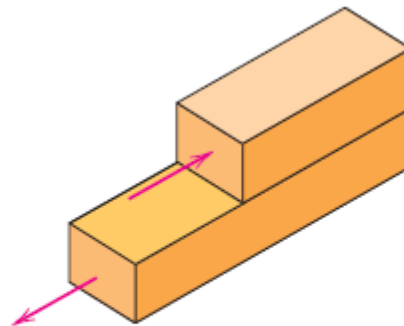
onde γ_p é a energia de deformação plástica

Modos de trinca



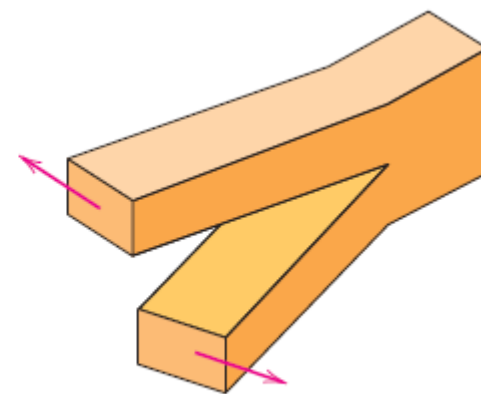
(a)

Abertura ou tração



(b)

Deslizamento



(c)

Rasgamento

Tenacidade à fratura

$$K_c = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}$$

- Menor valor de K

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Diminui com a taxa de deformação e com a diminuição de temperatura

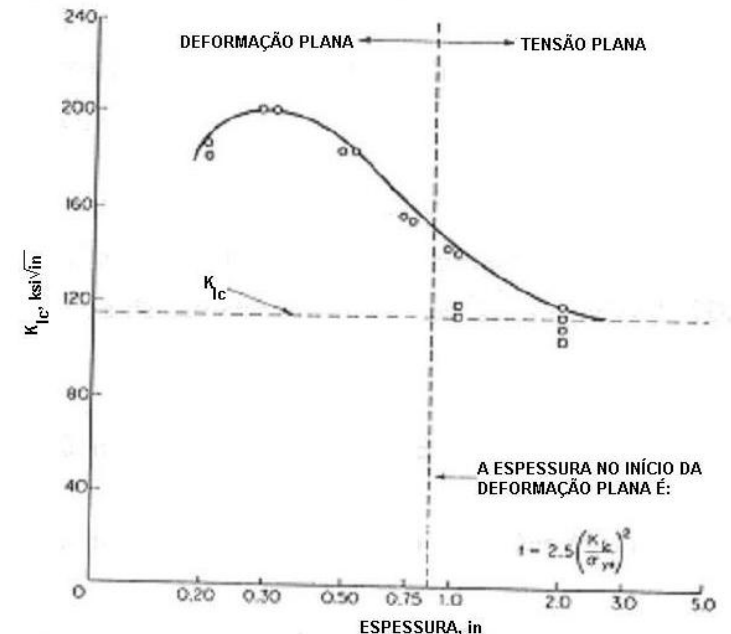
Diminui com encruamento, sol. Solida e precipitação

Aumenta com redução do tamanho de grão

Projeto com Mecânica da fratura

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{\pi a}}$$

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y} \right)^2$$



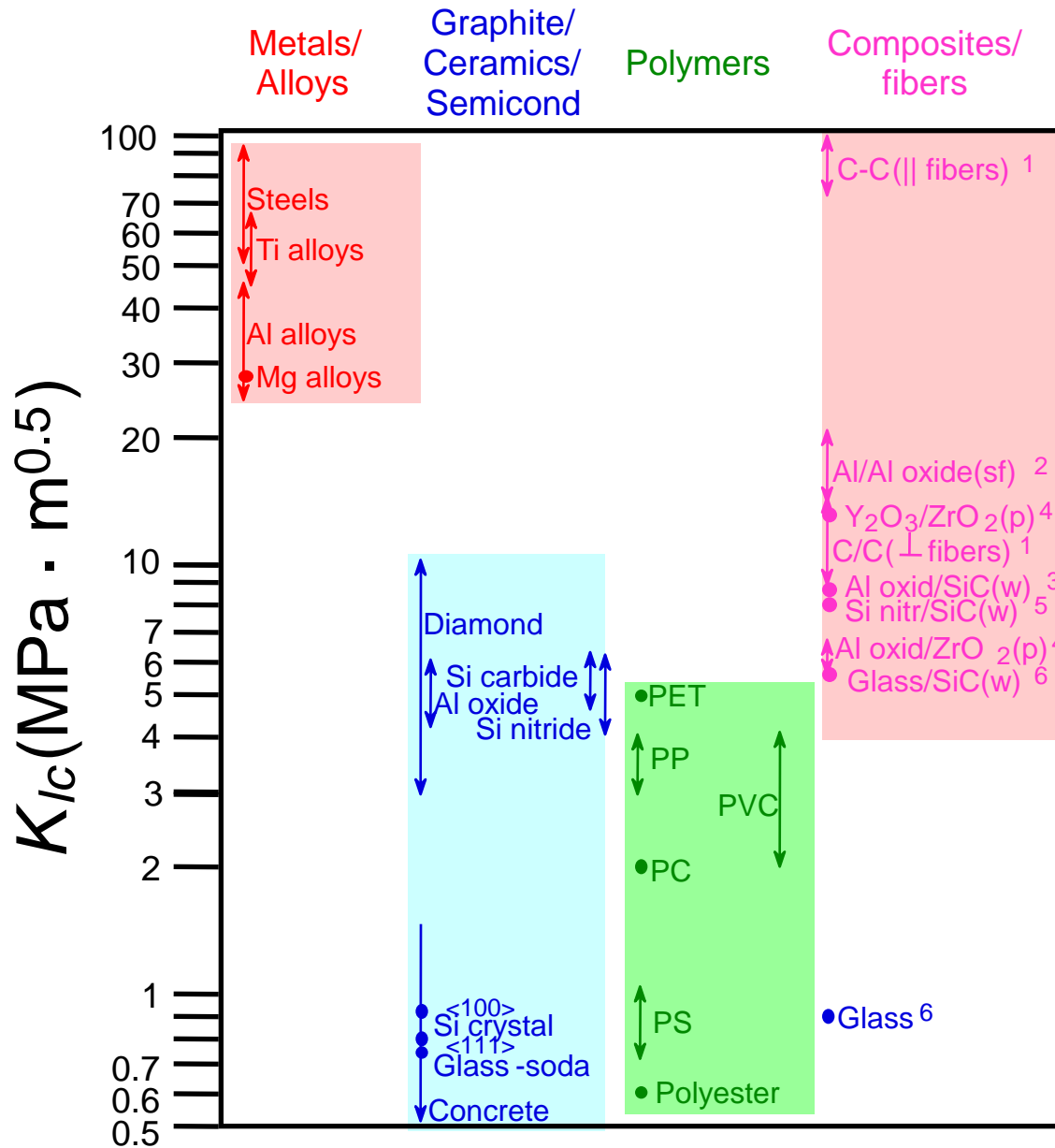
Alguns materiais

Table 8.1 Room-Temperature Yield Strength and Plane Strain Fracture Toughness Data for Selected Engineering Materials

<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		<i>K_{Ic}</i>	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa√m</i>	<i>ksi√in.</i>
Metals				
Aluminum Alloy ^a (7075-T651)	495	72	24	22
Aluminum Alloy ^a (2024-T3)	345	50	44	40
Titanium Alloy ^a (Ti-6Al-4V)	910	132	55	50
Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 260°C)	1640	238	50.0	45.8
Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 425°C)	1420	206	87.4	80.0
Ceramics				
Concrete	—	—	0.2–1.4	0.18–1.27
Soda-Lime Glass	—	—	0.7–0.8	0.64–0.73
Aluminum Oxide	—	—	2.7–5.0	2.5–4.6
Polymers				
Polystyrene (PS)	—	—	0.7–1.1	0.64–1.0
Poly(methyl methacrylate) (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	0.7–1.6	0.64–1.5
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	2.2	2.0

^a **Source:** Reprinted with permission, *Advanced Materials and Processes*, ASM International, © 1990.

Tenacidade a fratura

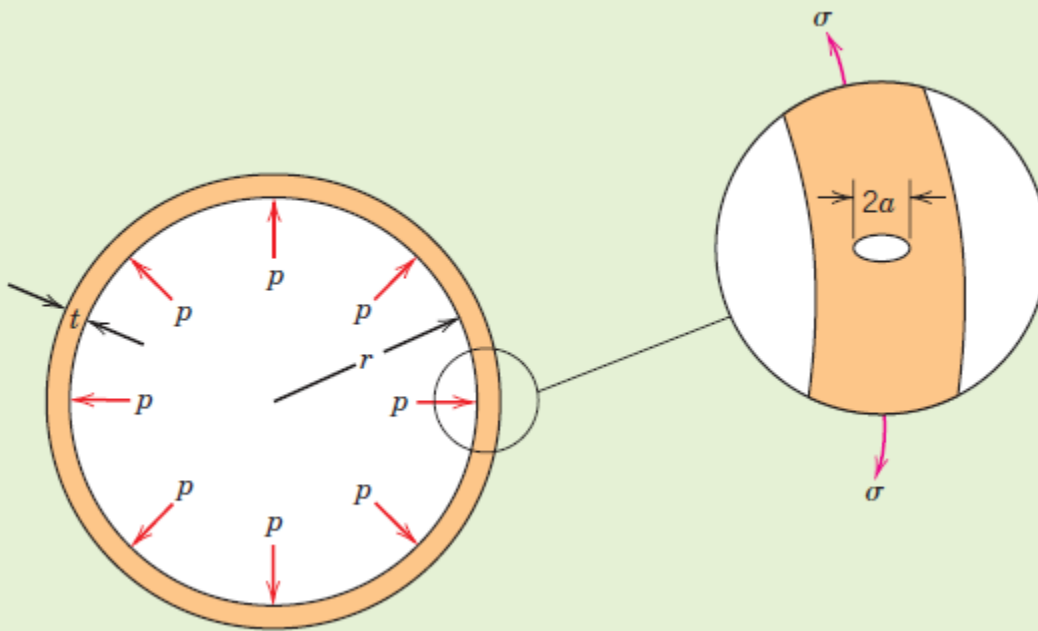


Based on data in Table B5,
Callister 7e.

Composite reinforcement geometry is: f = fibers; sf = short fibers; w = whiskers; p = particles. Addition data as noted (vol. fraction of reinforcement):

- (55vol%) *ASM Handbook*, Vol. 21, ASM Int., Materials Park, OH (2001) p. 606.
- (55 vol%) Courtesy J. Cornie, MMC, Inc., Waltham, MA.
- (30 vol%) P.F. Becher et al., *Fracture Mechanics of Ceramics*, Vol. 7, Plenum Press (1986). pp. 61-73.
- Courtesy CoorsTek, Golden, CO.
- (30 vol%) S.T. Buljan et al., "Development of Ceramic Matrix Composites for Application in Technology for Advanced Engines Program", ORNL/Sub/85-22011/2, ORNL, 1992.
- (20vol%) F.D. Gace et al., *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 7 (1986) pp. 978-82.

Exercício



$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{\pi a}}$$

$$K_{Ic} = Y \left(\frac{\sigma_y}{N} \right) \sqrt{\pi a_c}$$

$$a_c = \frac{N^2}{Y^2 \pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2$$

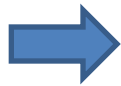
Material

Material	$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2$ (mm)
Medium carbon (1040) steel	43.1
AZ31B magnesium	19.6
2024 aluminum (T3)	16.3
Ti-5Al-2.5Sn titanium	6.6
4140 steel	5.3
(tempered @ 482°C)	
4340 steel	3.8
(tempered @ 425°C)	
Ti-6Al-4V titanium	3.7
17-7PH steel	3.4
7075 aluminum (T651)	2.4
4140 steel	1.6
(tempered @ 370°C)	
4340 steel	0.93
(tempered @ 260°C)	

Exercício

$$\sigma = \frac{pr}{2t}$$

$$t = \frac{pr}{2\sigma}$$



$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi t}$$



$$p = \frac{2}{Y^2\pi r} \left(\frac{K_{Ic}^2}{\sigma_y} \right)$$

Table 8.4 Ranking of Several Metal Alloys Relative to Maximum Allowable Pressure (Leak-Before-Break Criterion) for a Thin-Walled Spherical Pressure Vessel

<i>Material</i>	$\frac{K_{Ic}^2}{\sigma_y}$ (MPa-m)
Medium carbon (1040) steel	11.2
4140 steel (tempered @ 482°C)	6.1
Ti-5Al-2.5Sn titanium	5.8
2024 aluminum (T3)	5.6
4340 steel (tempered @ 425°C)	5.4
17-7PH steel	4.4
AZ31B magnesium	3.9
Ti-6Al-4V titanium	3.3
4140 steel (tempered @ 370°C)	2.4
4340 steel (tempered @ 260°C)	1.5
7075 aluminum (T651)	1.2

Como detectar trincas

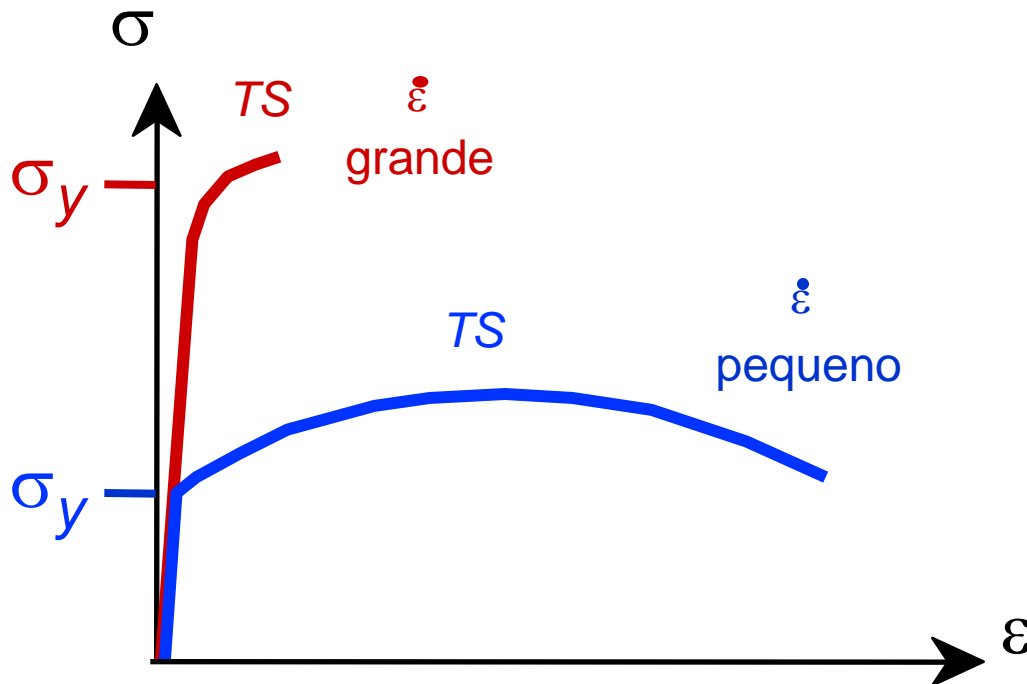
Ensaaios não destrutivos

Table 8.2 A List of Several Common Nondestructive Testing (NDT) Techniques

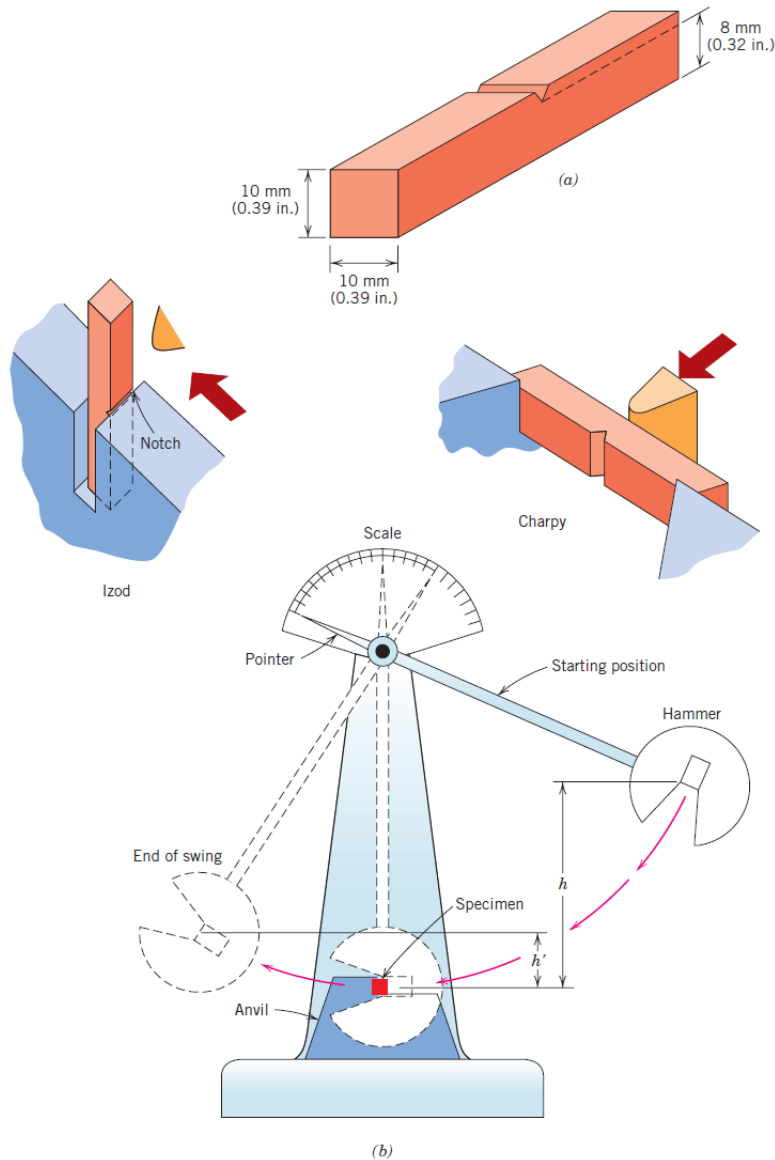
<i>Technique</i>	<i>Defect Location</i>	<i>Defect Size Sensitivity (mm)</i>	<i>Testing Location</i>
Scanning electron microscopy (SEM)	Surface	>0.001	Laboratory
Dye penetrant	Surface	0.025–0.25	Laboratory/in-field
Ultrasonics	Subsurface	>0.050	Laboratory/in-field
Optical microscopy	Surface	0.1–0.5	Laboratory
Visual inspection	Surface	>0.1	Laboratory/in-field
Acoustic emission	Surface/subsurface	>0.1	Laboratory/in-field
Radiography (X-ray/gamma ray)	Subsurface	>2% of specimen thickness	Laboratory/in-field

Taxa de carregamento

- Taxa de carregamento aumentada...
 - aumenta σ_y e TS
 - diminui % AL
- Porque?? Aumento da taxa de carregamento deixa pouco tempo para as discordâncias se mover e passar obstáculos

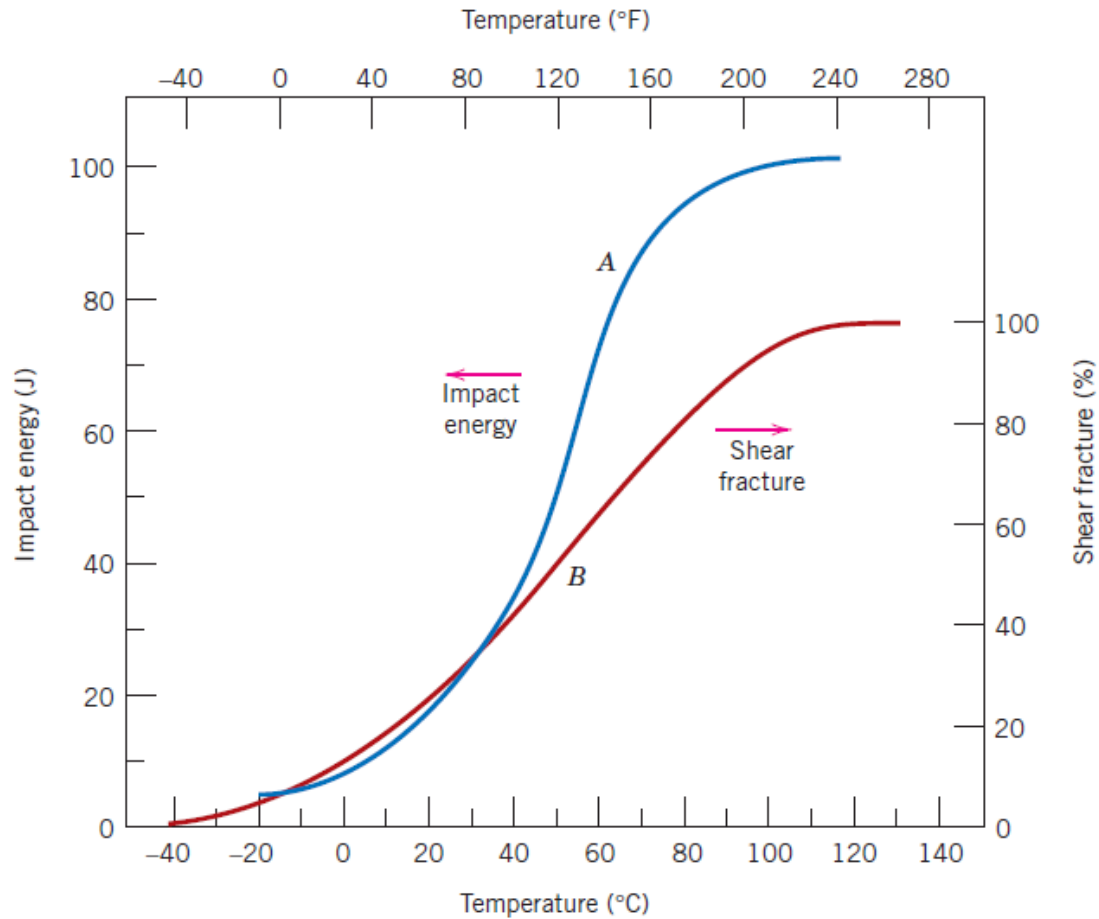


Teste de impacto



- Ensaios de impacto surgiram antes da mecânica da fratura
- Ensaio de tração não eram úteis em alguns casos (material normalmente dúctil podia romper de maneira frágil)
- Ensaio de impacto busca condição mais severa:
 - Temperatura baixa
 - Elevada taxa de deformação
 - Estado triaxial de tensões (entalhe)
- Dois tipos Charpy e Izod
 - Energia de impacto

Transição Dúctil-Frágil



Transição Dúctil-Frágil

Como definir a temperatura de transição?

Qual a escolha para projeto? (conservadora)

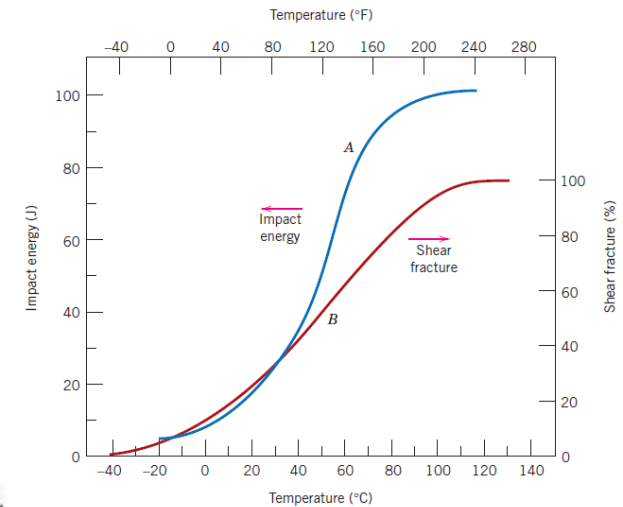
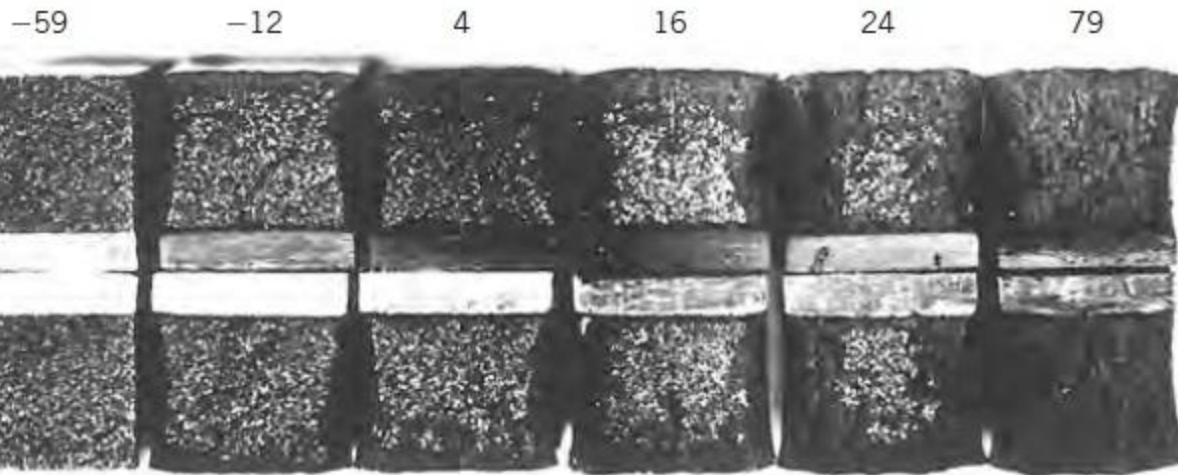
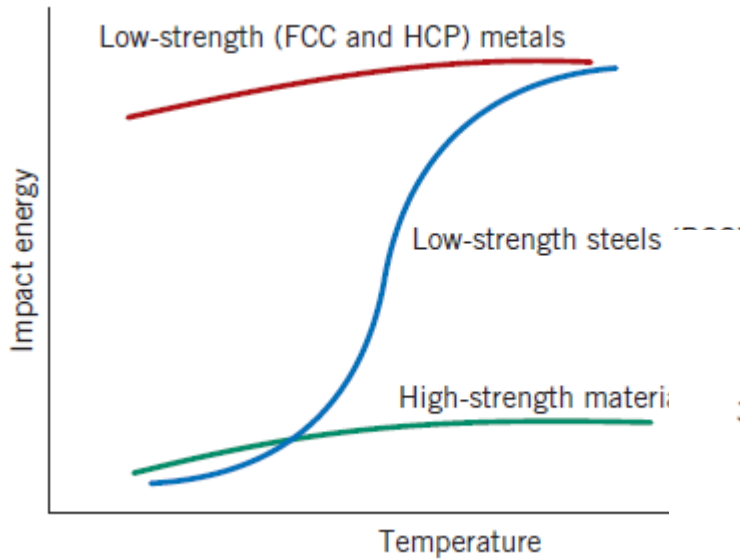


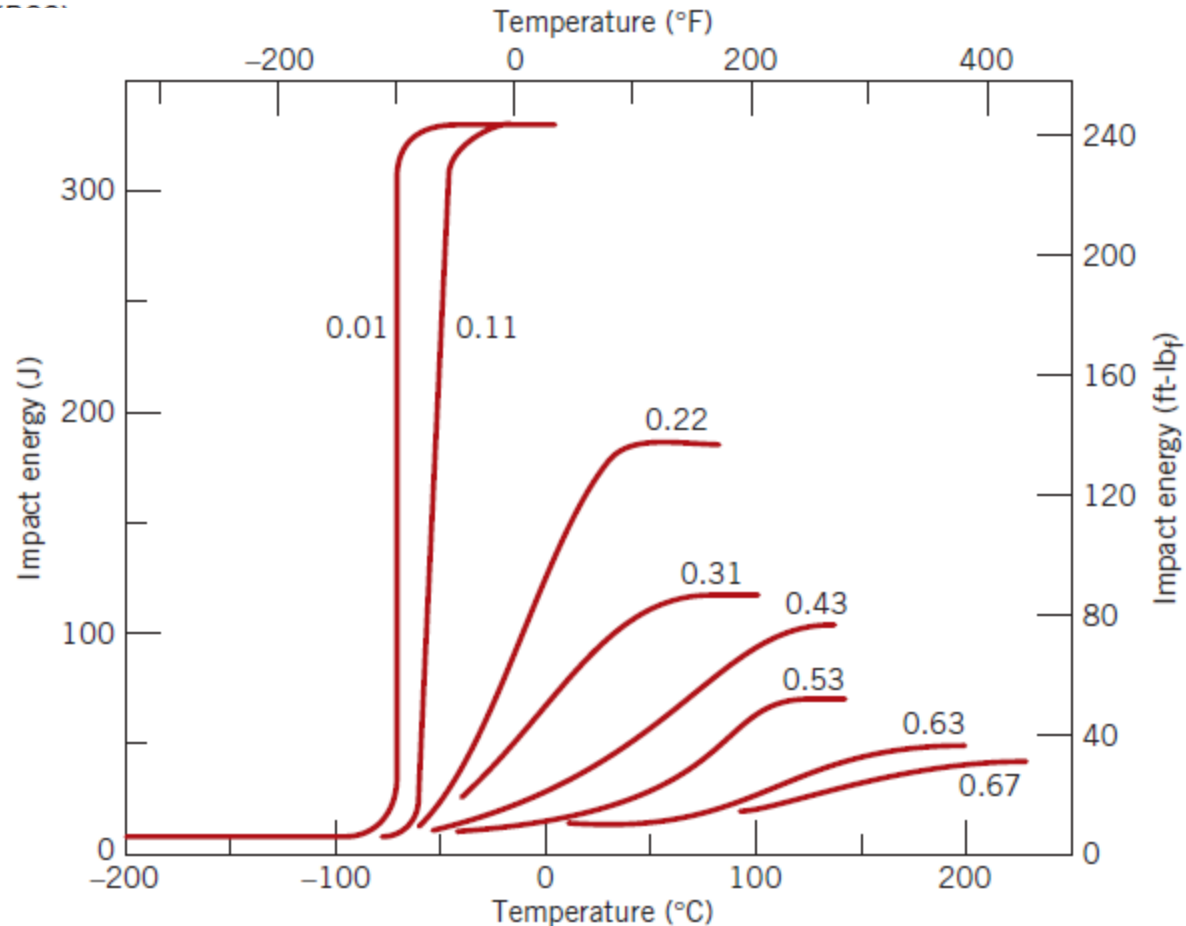
Figure 8.14 Photograph of fracture surfaces of A36 steel Charpy V-notch specimens tested at indicated temperatures (in °C). (From R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3rd edition, Fig. 9.6, p. 329. Copyright © 1989 by John Wiley & Sons, Inc., New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Transição Dúctil-Frágil



Depende da microestrutura:
 Tamanho de grão
 Teor de liga (carbono)

Para cerâmico a transição
 está acima de 1000 °C



Fadiga



Fadiga: é a forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes

Ex: pontes, aeronaves, componentes de máquina, etc

O componente falha sob tensão inferior à tensão de resistência e tensão de escoamento para uma carga estática

Ocorre após longos períodos (“fadiga”)

Representa \cong 90% das falhas de metais

Falha de natureza **FRÁGIL**

Iniciação e propagação de trincas (Fratura perpendicular)

Tensões cíclicas

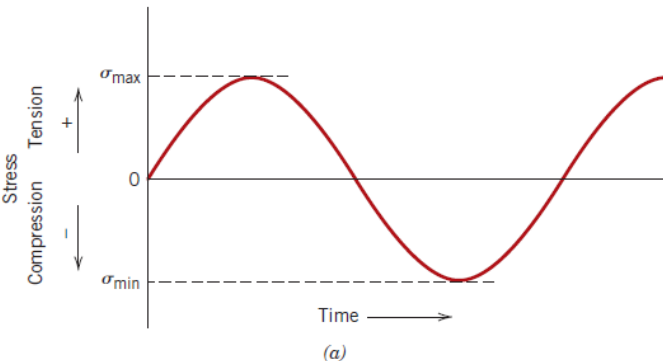
Definição tensão de **tração (+)** , **compressão (-)**

Tensões:

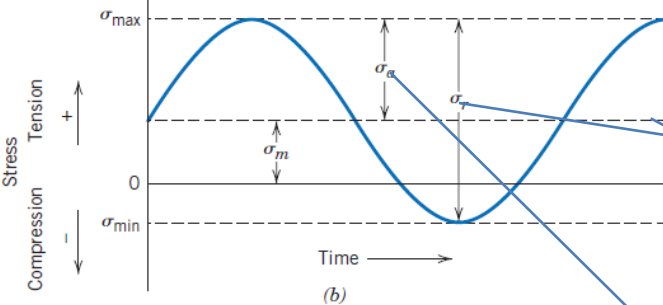
- Axial (Tração-compressão)
- Flexão (dobramento)
- Torcional (torção)

Ciclo:

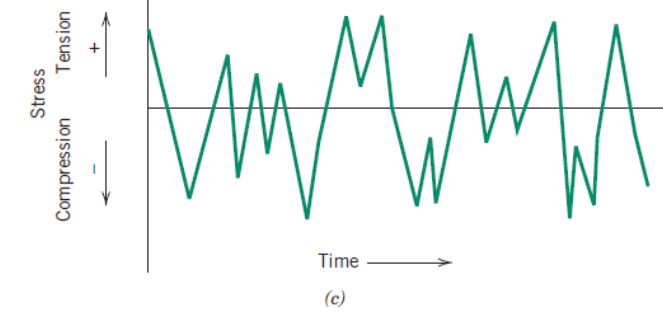
- Regular (senoidal)
- Irregular



(a) Ciclo de tensões alternadas



(b) Ciclo de tensões repetidas



(c)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Tensão Média

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Intervalo de Tensões

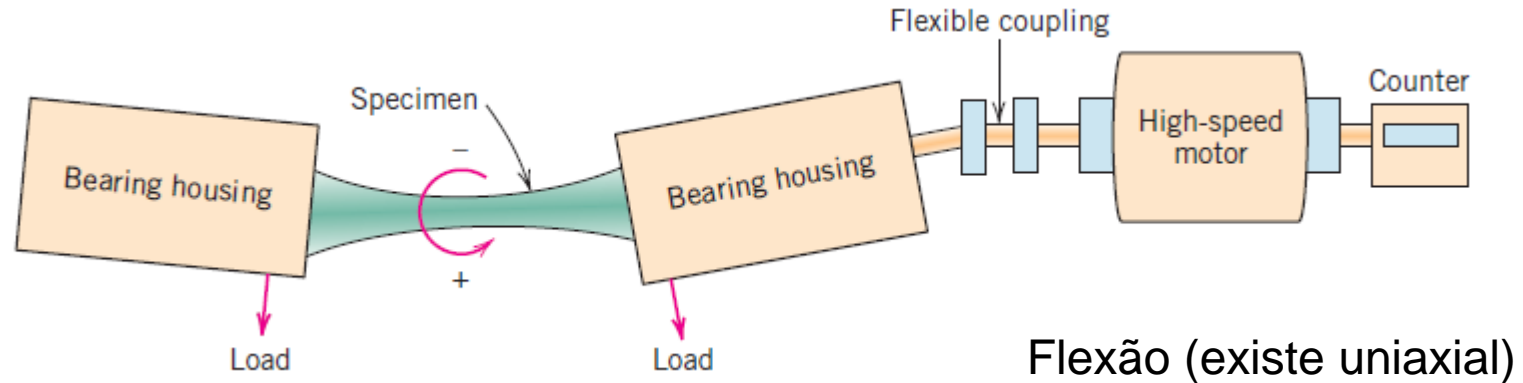
$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

Amplitude da Tensão

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

Razão de Tensões

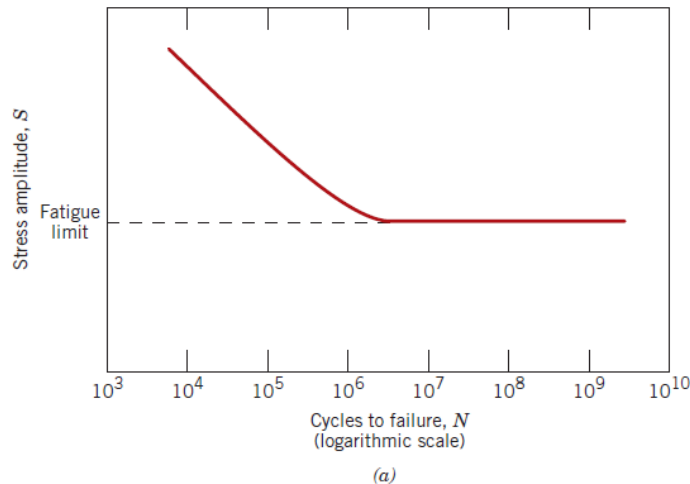
Curvas σ -N



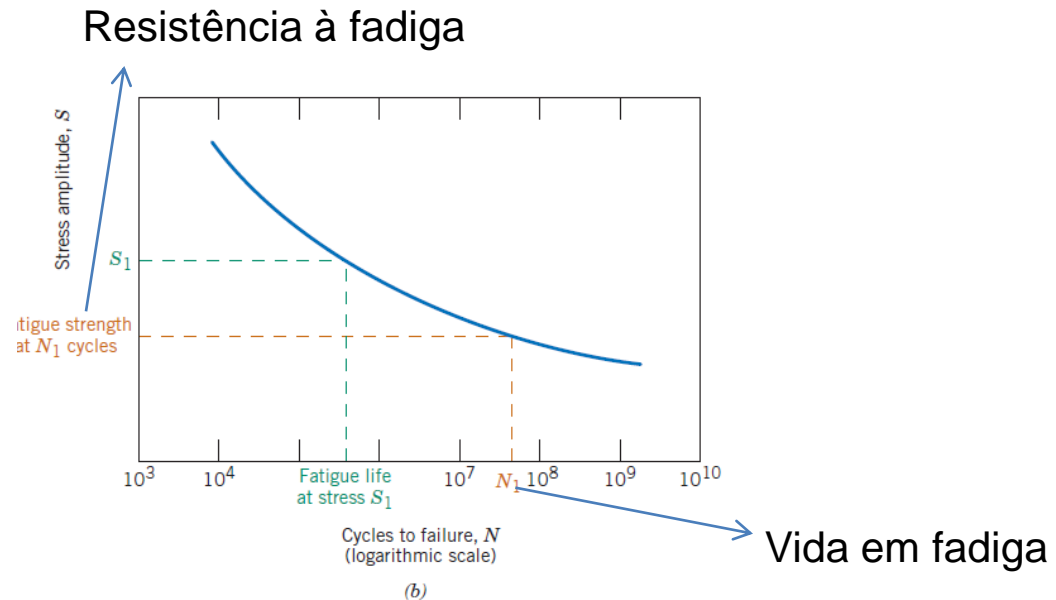
- Curva determinada por ensaios em laboratório (esforço, freqüência, padrão)
- Inicia por $\frac{2}{3}$ de σ_e e diminui a carga
- Plota-se $\sigma \times N$ (log)

Curvas σ -N

- Observa-se dois comportamentos distintos para as Curvas σ -N



Limite de resistência a fadiga
Ligas ferrosas e titânio



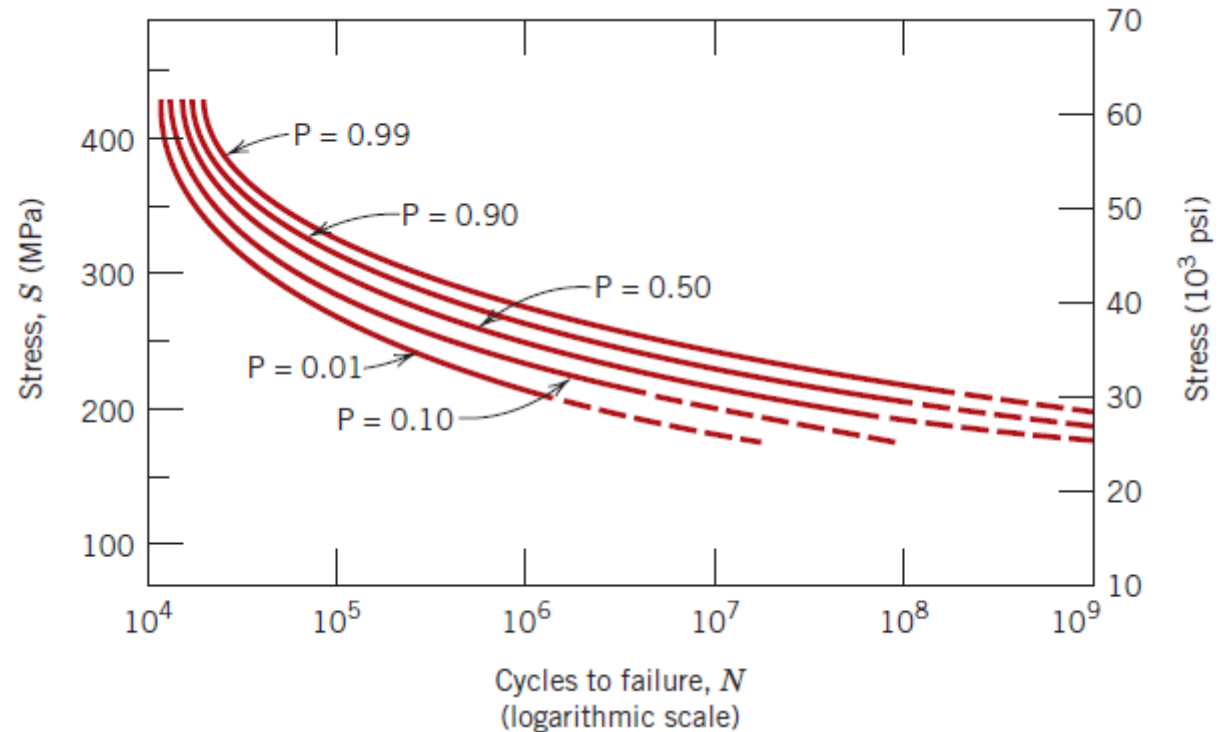
Limite de fadiga depende de N
Ligas não ferrosas (Al, Cu, Mg)

Quanto maior σ menor N e vice versa

Para aço o limite está entre 35 e 60% de σ_e

Curvas σ - N

- Vida real
- Dispersão
- O que fazer?
– Estatística



- **Fadiga de baixo ciclo** (menos de $10^4 - 10^5$ ciclos -deformação plástica)
- **Fadiga de alto ciclo** (mais de $10^4 - 10^5$ ciclos -deformação elásticas)

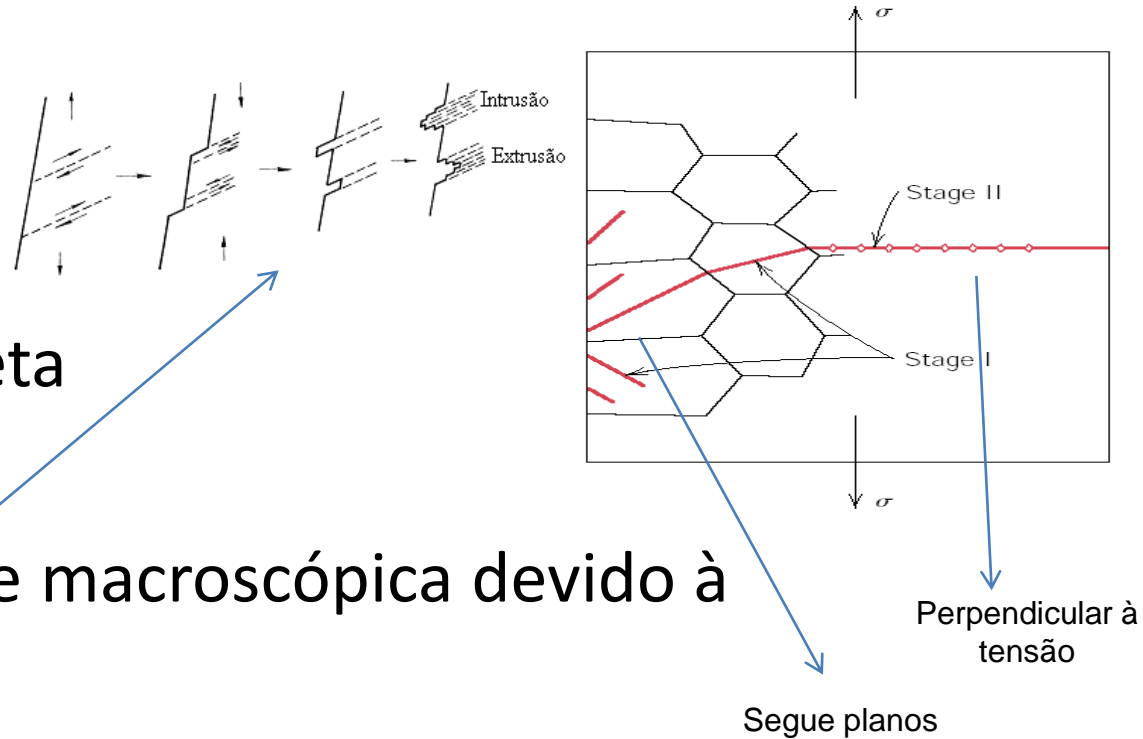
Nucleação e propagação de trincas

- Em fadiga – falha em 3 etapas:
 - Iniciação de trinca (concentrador de tensão)
 - Propagação (avança a cada ciclo)
 - Fratura final (Trinca crítica – rápida)
- Vida em fadiga N_f
$$N_f = N_i + N_p \text{ (iniciação + propagação)}$$
- Baixo ciclo N_p domina
- Alto ciclo N_i domina

Nucleação

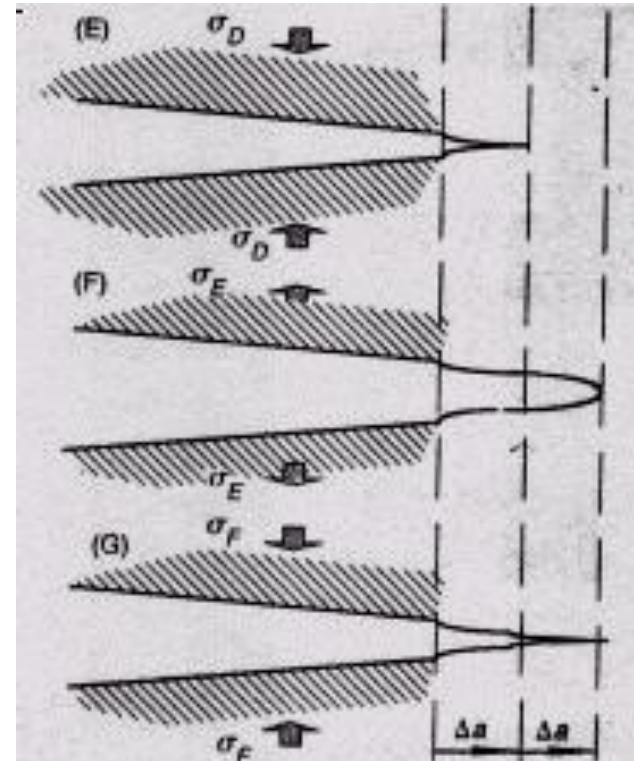
- Nucleação normalmente na superfície em concentradores

- Riscos
- Ângulos vivos
- Rasgos de chaveta
- Fios de rosca
- Descontinuidade macroscópica devido à deformação

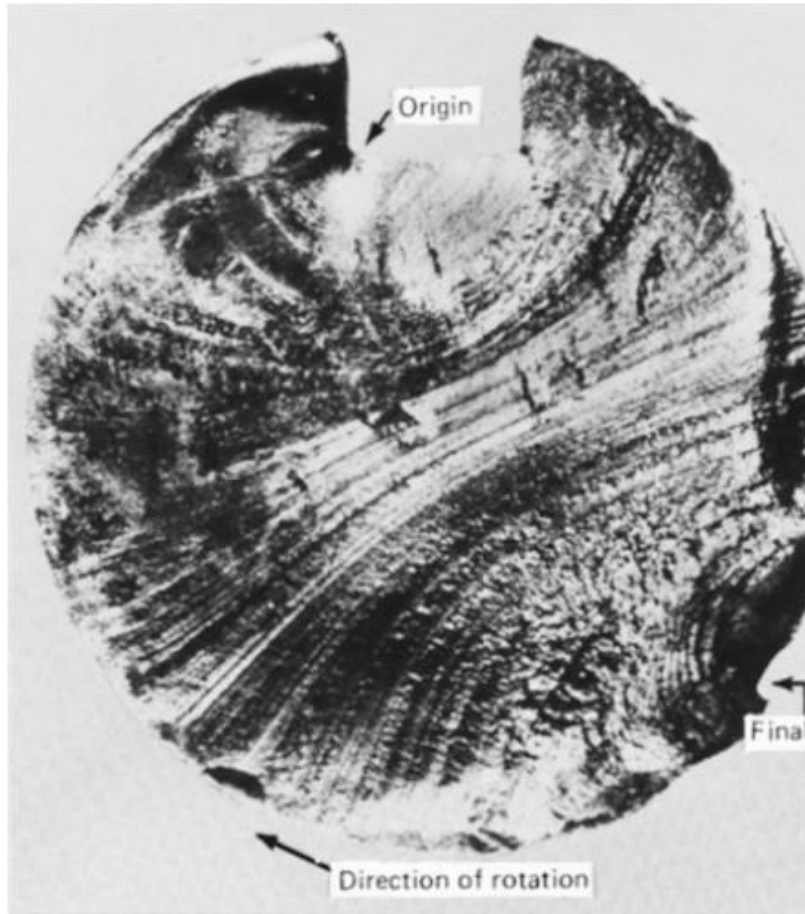


Propagação

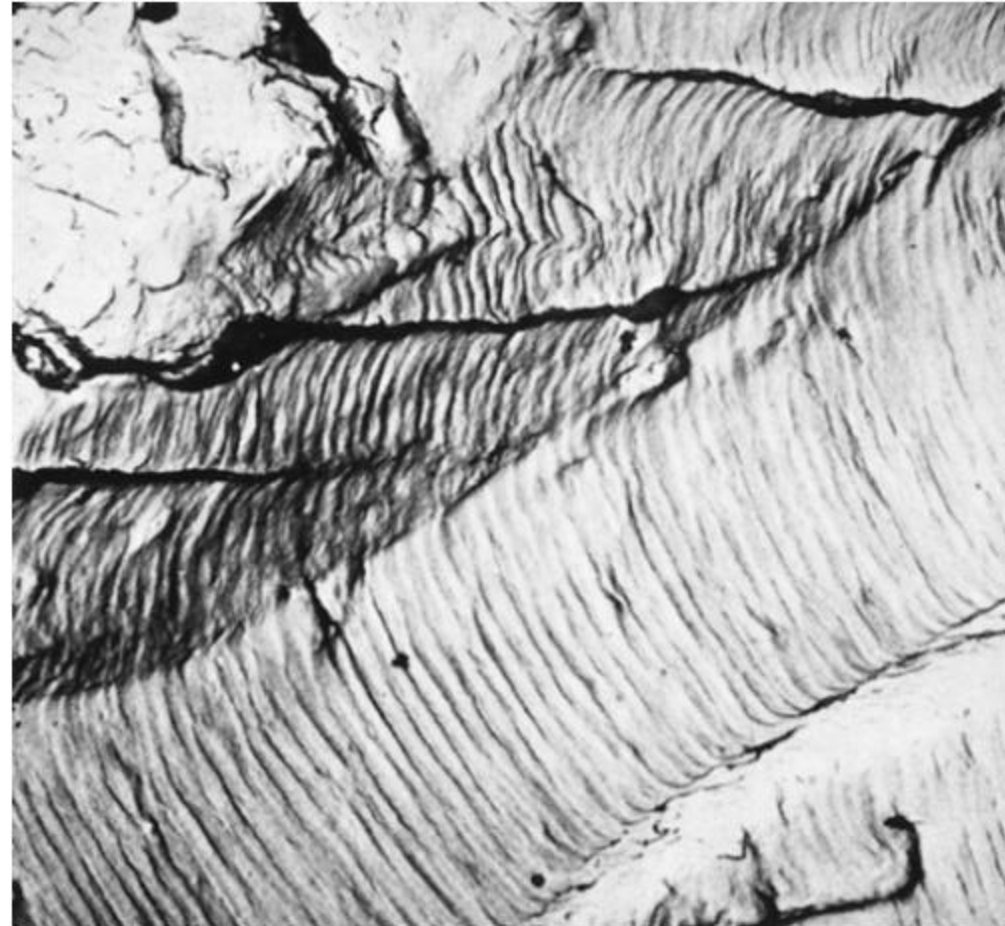
- No estágio II
 - Abaulamento plástico
 - Superfície
 - Marcas de praia
 - Macroscópico
 - Parada de máquina
 - Estrias
 - Microscópicas
 - Um ciclo de carregamento



Nucleação e propagação de trincas



Marcas de praia



Estrias (mev)

Nucleação e propagação de trincas

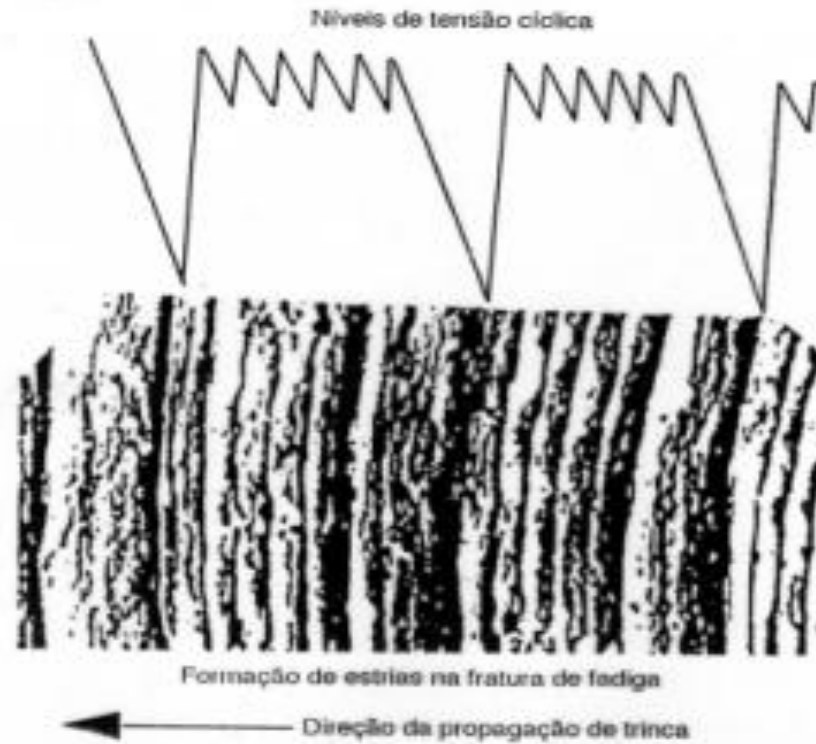
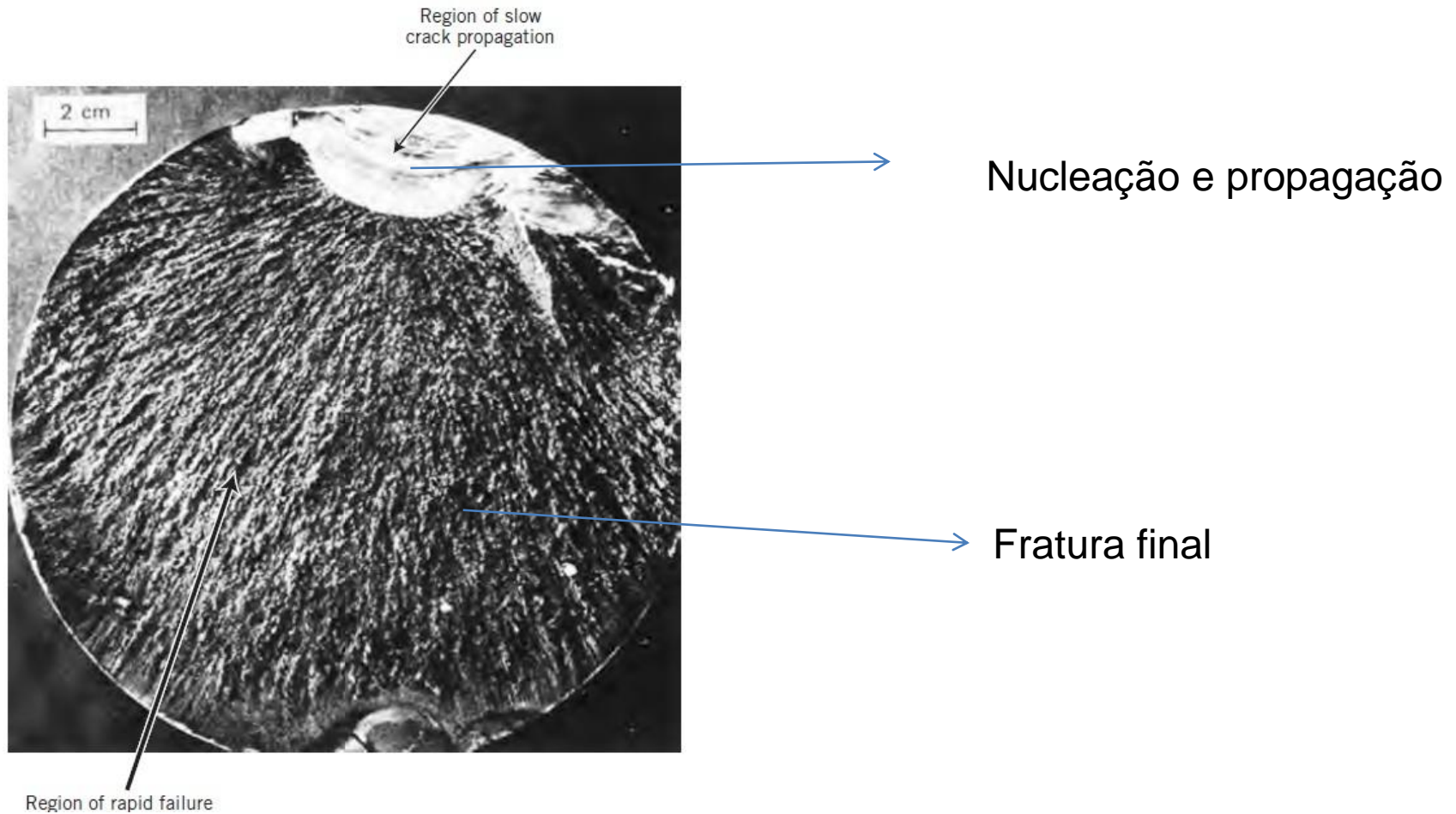


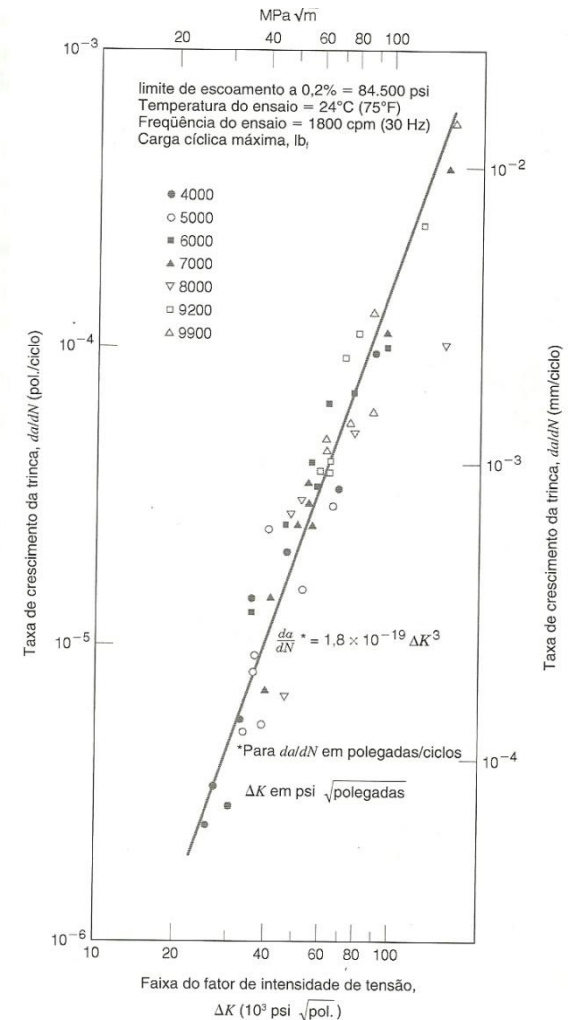
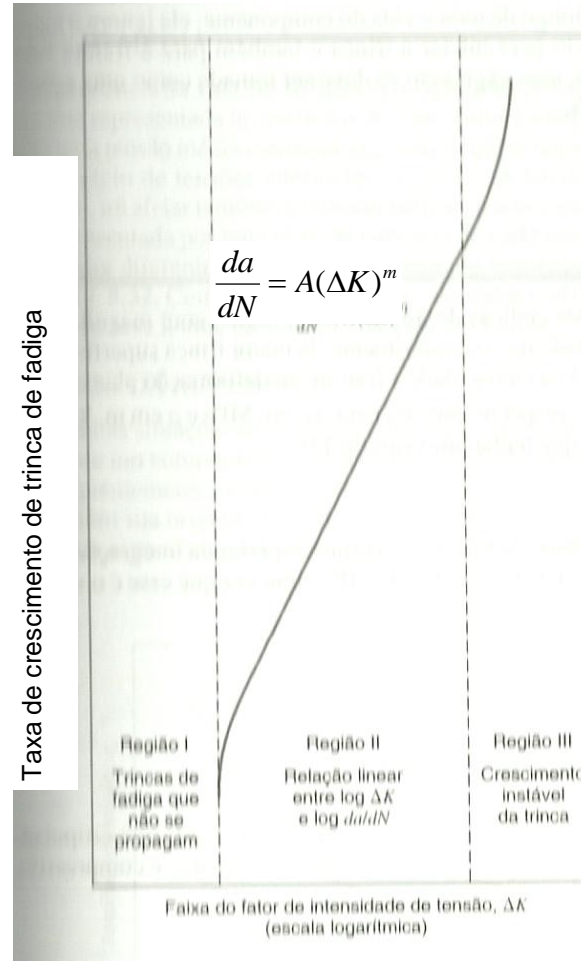
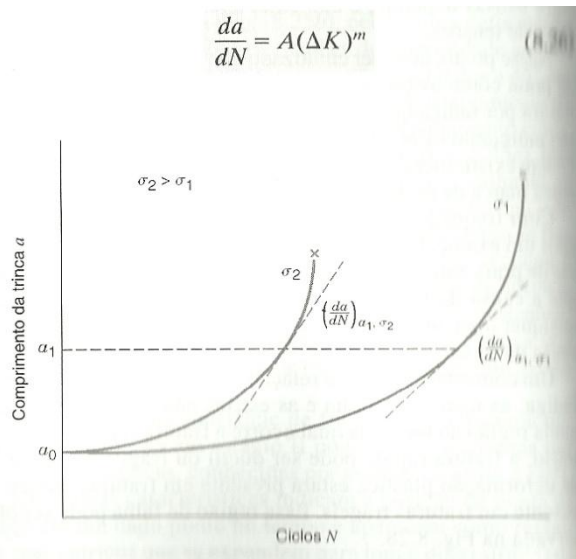
Fig. 8.19 Esboço da formação de estrias na propagação de trinca em fadiga.

Nucleação e propagação de trincas



Taxa de Propagação de Trinca

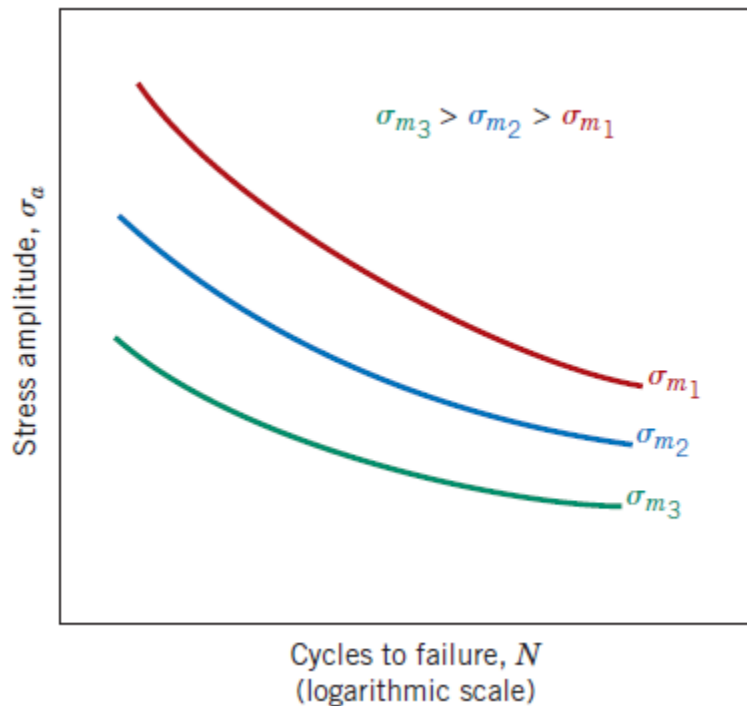
- Estágio II



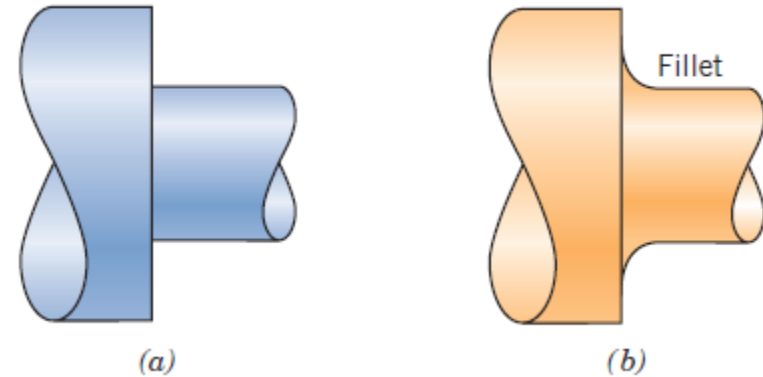
Objetivo: Prever a vida do componente

Fator que influencia a vida em fadiga

Tensão média



Efeitos de Superfície
(Variáveis de projeto)

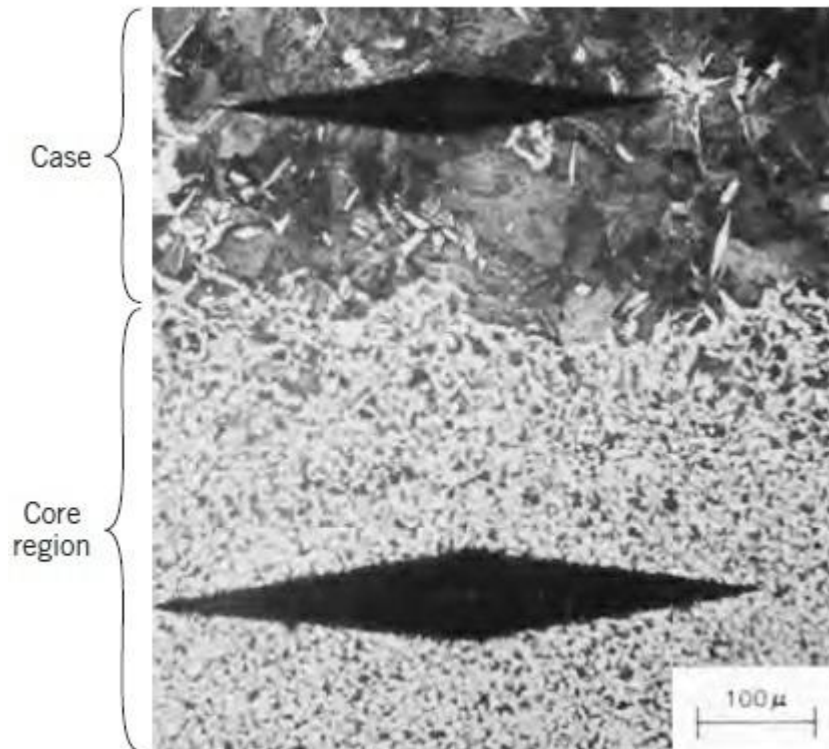


Concentradores de tensão

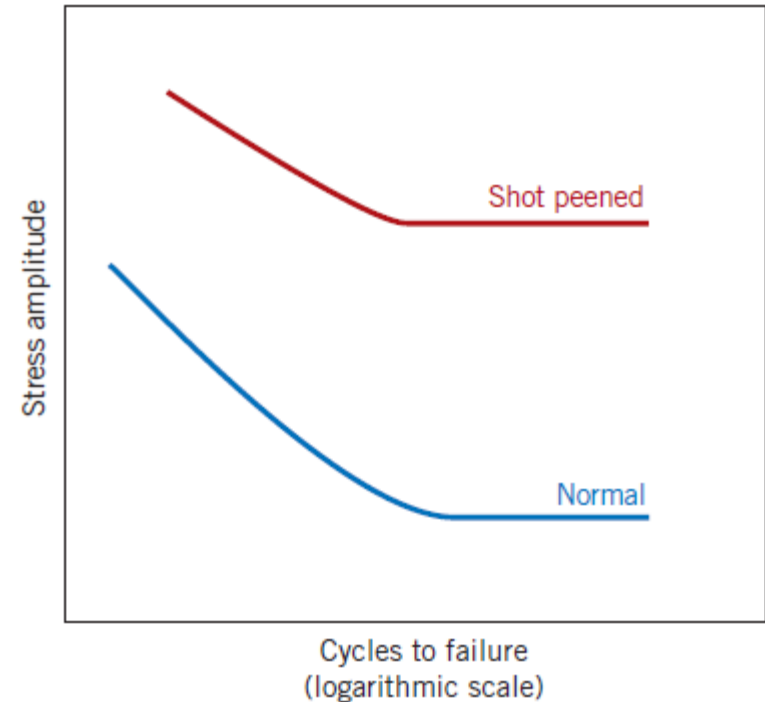
Fator que influencia a vida em fadiga

Acabamento superficial

Efeitos de Superfície
(Tratamento de superfície)



Efeitos de Superfície
(Tratamento de superfície)



Tensão residual compressiva

Tensão residual compressiva + resistência

Fator que influencia a vida em fadiga

- Efeito do ambiente

- Fadiga térmica: flutuação de temperatura

- Sem tensão externa

$$\sigma = \alpha_1 E \Delta T$$

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

- Dilatação + Restrição

- Fadiga associada a Corrosão

- Concentradores
 - Avanço mais rápido – Ataque

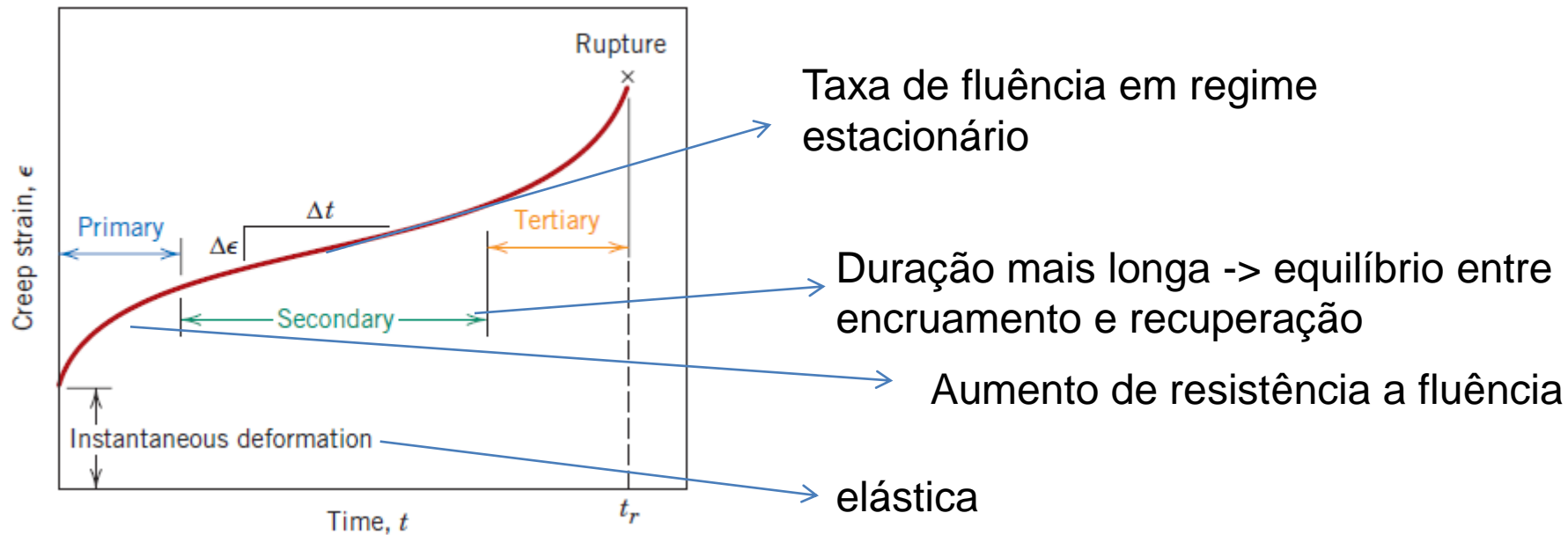
Fluência

Fluência é deformação permanente e dependente do tempo sob carga estática a temperatura elevada

Ex: rotor de turbina, geradores de vapor, linhas de vapor, etc.

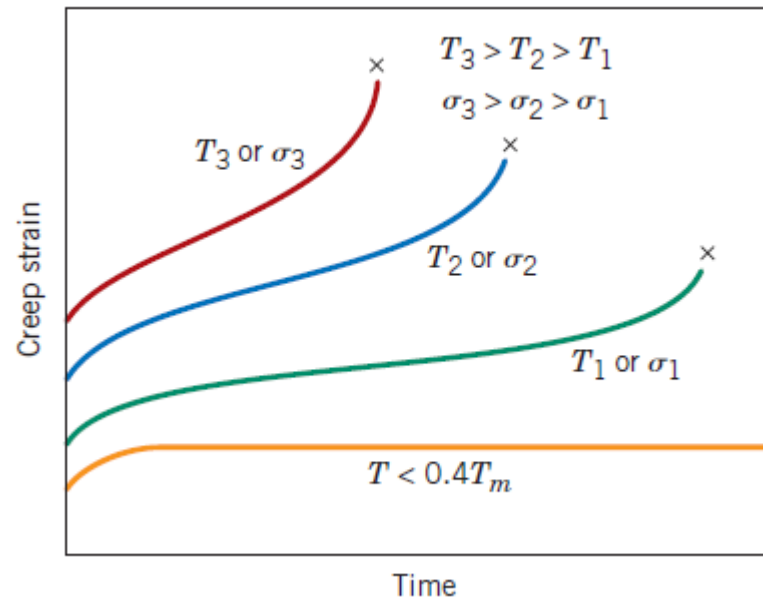
Importante para temperaturas maiores que $0,4T_f$ (temperatura de fusão em K)

Ensaio de laboratório (T e carga constantes)

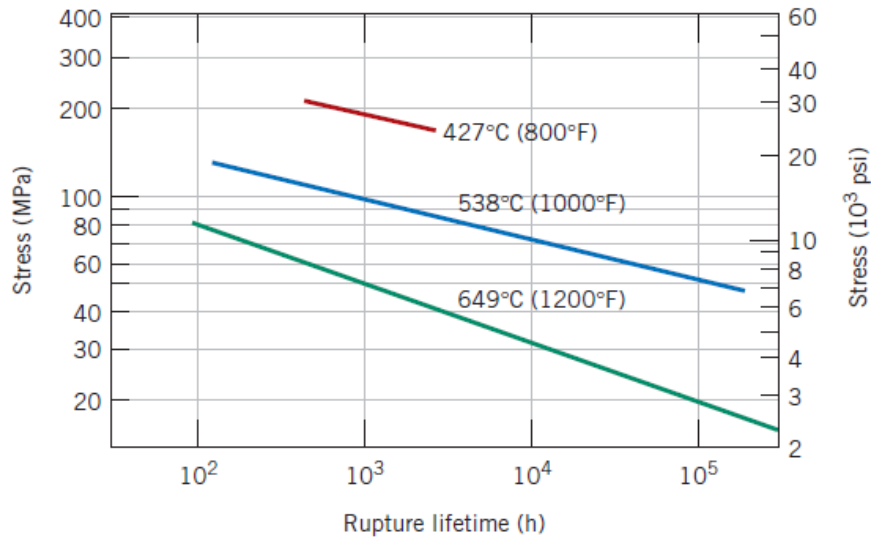


Fluência

- Mecanismos
 - Difusão de vazios, difusão em contorno de grão, movimento de discordâncias, escorregamento de contornos de grão
- Efeito da temperatura e tensão

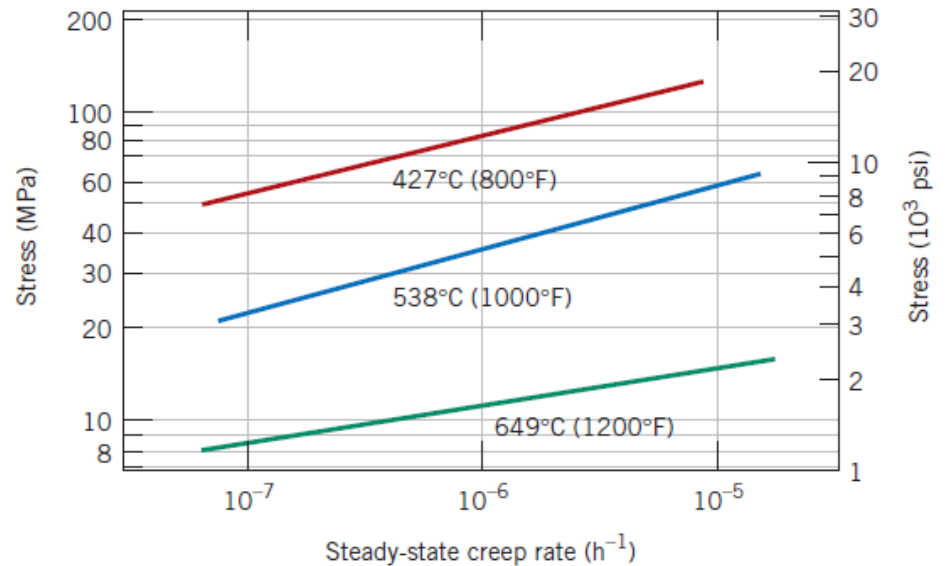


Fluência

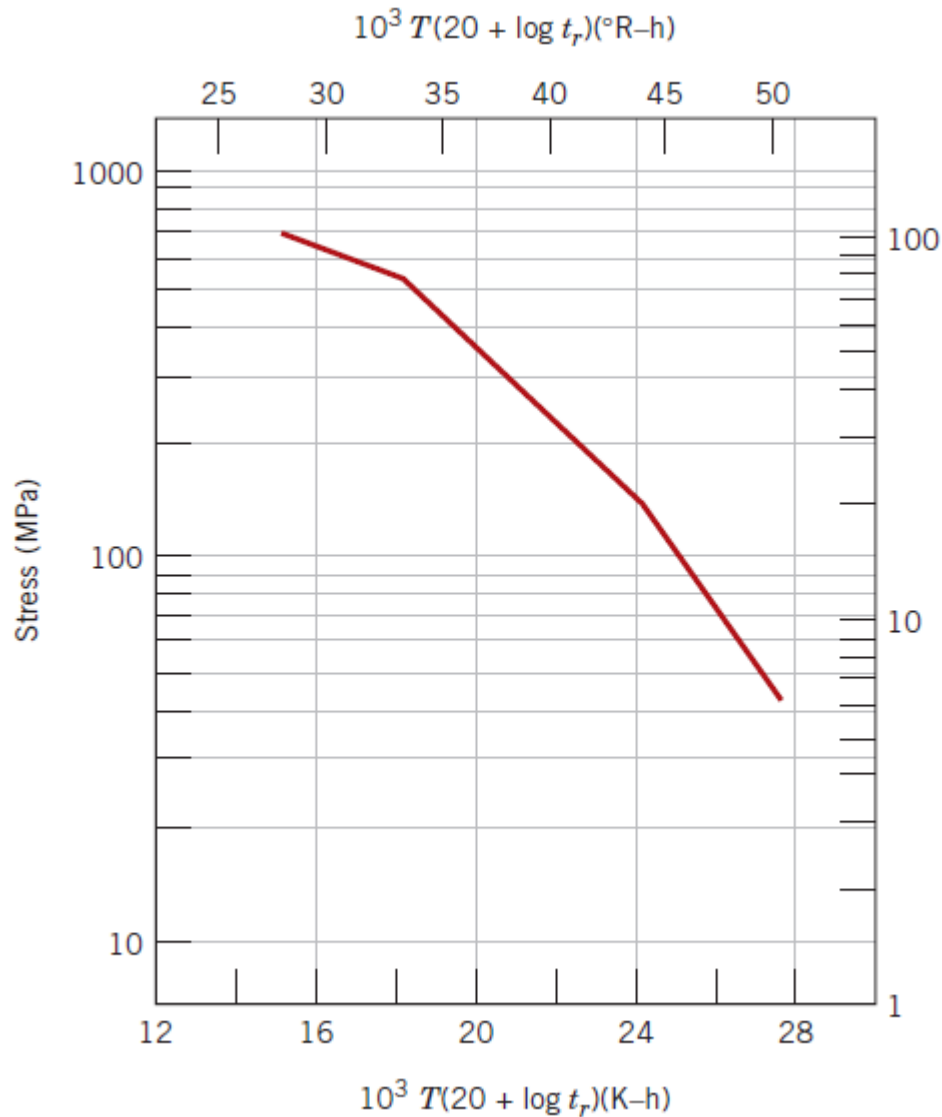


$$\dot{\epsilon}_r = K_1 \sigma^n$$

$$\dot{\epsilon}_r = K_2 \sigma^n e^{\left[-\frac{Q_f}{RT} \right]}$$



Fluência



Para tempos longos, dificuldade de realizar experimentos (extrapolar)

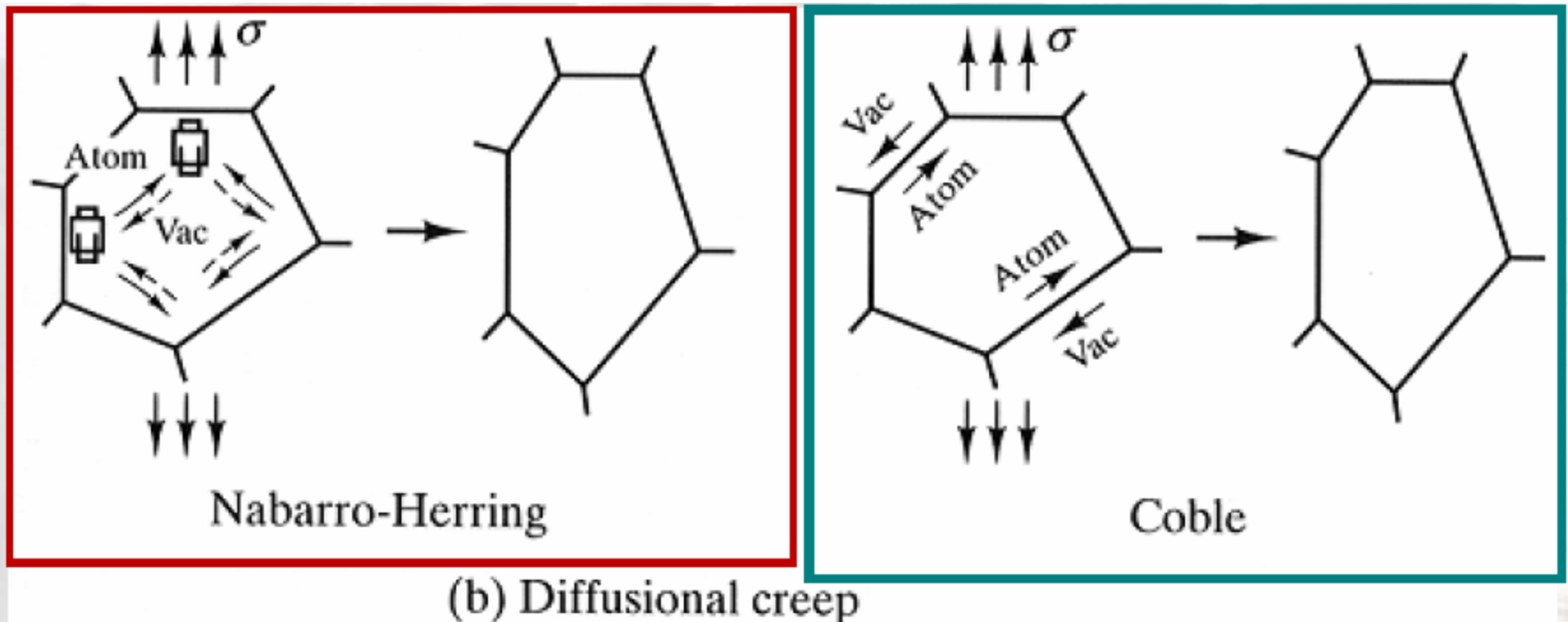
$T(C + \log t_r)$ Parâmetro de Larson-Miller

Mecanismos de fluência

- Difusão de átomos e lacunas pelo interior dos grãos (Nabarro-Herring)
- Difusão de átomos e lacunas pelos contornos de grão (Coble);
- Deslizamento de discordâncias;
- Movimentação de discordâncias por escalagem;
- Deslizamento de contornos de grão.

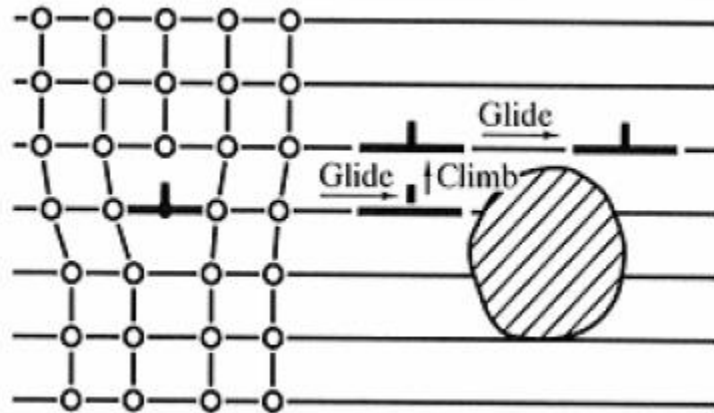
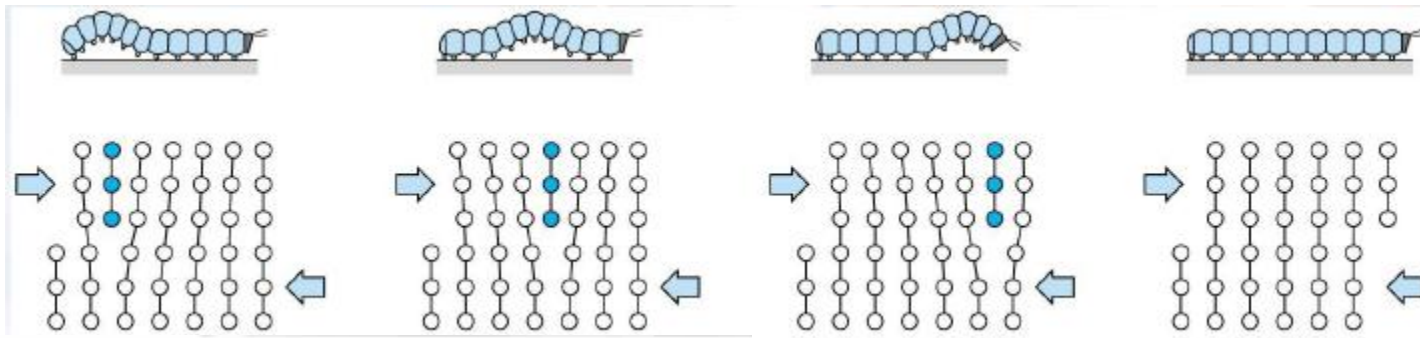
Mecanismos de fluência

- Difusão de átomos e lacunas pelo interior dos grãos (Nabarro-Herring)
- Difusão de átomos e lacunas pelos contornos de grão (Coble);

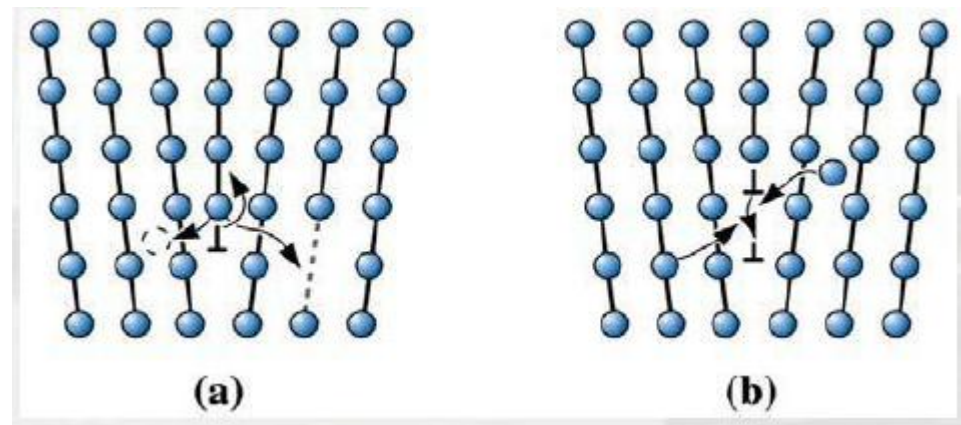


Mecanismos de fluência

- Deslizamento de discordâncias;
- Movimentação de discordâncias por escalagem;



escalagem

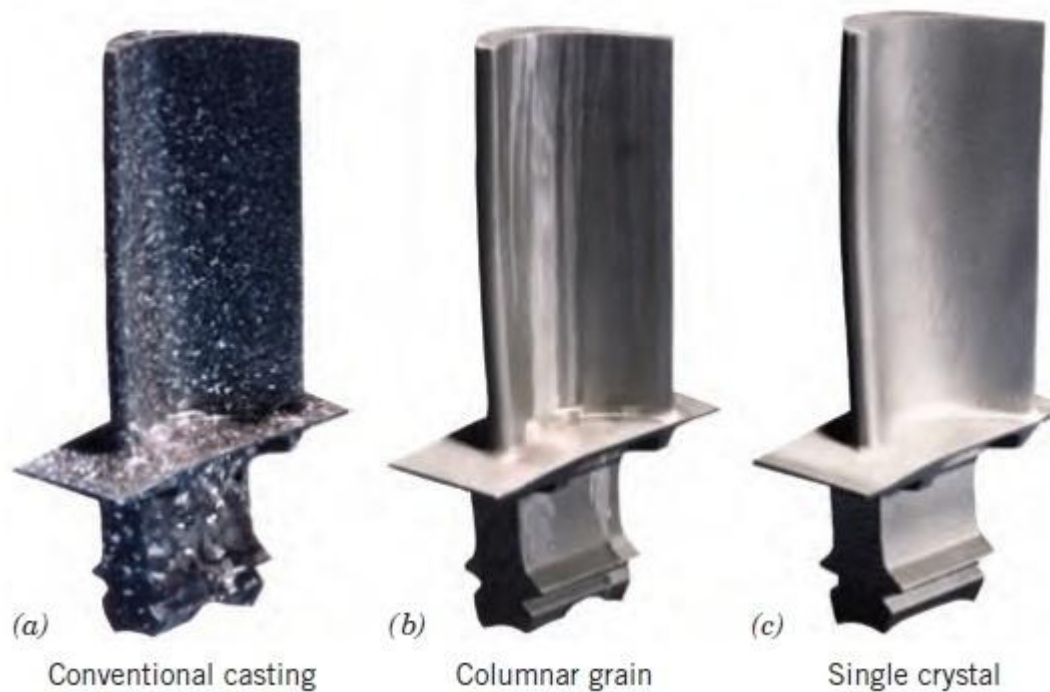


Rápida movimentação de lacunas

Ligas de alta temperatura

Parâmetros que influem: T_f , E e tamanho de grão

Aços inoxidáveis, metais refratários e super ligas



É importante lembrar

- Fratura dúctil X frágil
 - Características
 - Formas (Macro e micro)
- Trinca estável e catastrófica
- Concentradores de tensão
- Propagação de trinca (Balanço de energia)
- K_{IC}
 - materiais dúcteis e frágeis
 - parâmetros de projeto
- Ensaio de Impacto
 - Temperatura de transição dúctil frágil

É importante lembrar

- Fadiga
 - O que é?
 - Curvas σ -N
 - Limite de resistência a fadiga
 - Vida em fadiga
 - Resistência à fadiga
 - Alto ciclo e baixo ciclo
 - Estágios (nucleação e propagação)
 - Marcas de praia e Estrias
 - Fatores de influência
 - Tensão média
 - Concentradores de tensão (macro)
 - Acabamento superficial (concentradores micro)
 - Tensões residuais
 - Endurecimento da superfície

É importante lembrar

- Fluência
 - Definição
 - Curva de fluência (3 regiões)
 - Dependência da temperatura e da tensão
 - Mecanismos
 - Características das ligas resistentes à fluência