

Materiais para Indústria Química

Aula 2

Conceitos e Análises de Falhas

Falha Mecânica



Histórico de Falhas

Nos últimos cem anos ocorreram inúmeros casos de fraturas de estruturas metálicas / estruturas de aço soldadas

- **pontes**
- **reservatórios de óleo**
- **navios**
- **Caldeiras**
- **etc**

Ex.:

- **Titanic em 1912**
- **navios "Liberty" em 1940**
 - **1289 apresentaram falhas estruturais**
 - **De 4694 navios "Liberty" construídos**
 - **233 catastróficas, ocasionando a perda total do navio**
- **navios "Merchand" entre 1942 e 1946**
- **aviões "De Havilland" entre 1953 e 1954**
- **reservatório de estocagem de óleo cru no Canadá em 1980**

Mecanismos causadores de falhas em plantas industriais

Mecanismo	%
Corrosão	29
Fadiga	25
Fratura frágil	16
Sobrecarga	11
Corrosão em alta temperatura	7
Corrosão sob tensão/fadiga, fragilização por H	6
Fluência	3
Desgaste	3

Alexander, W.O., Davies, G.J., Reynoldas, K.A., Bradbury, E.K (1985)

Mecanismos causadores de falhas em componentes aeronáuticos

Mecanismo	%
Fadiga	61
Sobrecarga	15
Corrosão sob tensão	15
Desgaste excessivo	11
Corrosão	8
Oxidação em alta temperatura	6

Alexander, W.O., Davies, G.J., Reynoldas, K.A., Bradbury, E.K (1985)

Origens das falhas em componentes metálicos

Origem	%
Seleção incorreta de materiais	38
Defeitos de fabricação	15
Tratamento térmico incorreto	15
Falha de projeto	11
Condições imprevistas de operação	8
Controle inadequado das condições de trabalho	6
Impropriedades na inspeção ou controle de qualidade	3
Troca equivocada de materiais	2

Alexander, W.O., Davies, G.J., Reynoldas, K.A., Bradbury, E.K (1985)

Processos que conduzem às falhas em serviço

- **Processos mecânicos:**
 - **Deformação permanente, com ou sem ruptura;**
 - **Fratura frágil;**
 - **Fluência, com ou sem ruptura;**
 - **Fadiga;**
 - **Desgaste excessivo.**
 - **Fadiga associada à corrosão;**
 - **Corrosão sob tensão;**
 - **Corrosão-erosão;**
 - **Fragilização e outros danos causados pelo hidrogênio.**

- Modos de Falha

- Fratura, Fadiga, Fluência

Fratura: Consiste na separação do material em 2 ou mais partes devido à aplicação de uma carga estática à temperaturas relativamente baixas em relação ao ponto de fusão do material.

- Modos de Fratura

- Dúctil, Frágil, Intergranular, Transgranular

- **Dúctil** a deformação plástica continua até uma redução na área para posterior ruptura (É OBSERVADA EM MATERIAIS CFC)
- **Frágil** não ocorre deformação plástica, requerendo menos energia que a fratura dúctil que consome energia para o movimento de discordâncias e imperfeições no material (É OBSERVADA EM MATERIAIS CCC E HC)

O tipo de fratura que ocorre em um dado material depende da temperatura

Mecanismos de Deformação

a) Deformação elástica

- A deformação elástica ocorre no nível atômico
- Variação no espaço interatômico - equilibrar as cargas externas
- Movimentos de átomos reversíveis na rede cristalina
- Arranjo inicial - restaurado após a retirada da carga externa

b) Deformação plástica ou permanente

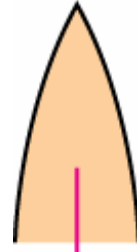
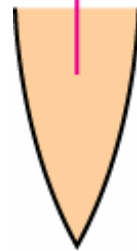
- Deformação plástica ou permanente
- Ocorre no nível do cristal (ou do grão)
- Deslocamentos de átomos de suas posições de equilíbrio – novas posições quando a carga externa é removida.

- **Em baixas temperaturas o fenômeno da deformação plástica ocorre praticamente dentro do cristal (transgranular ou intragranular)**
- **Em altas temperaturas pode ocorrer basicamente escorregamento dos contornos dos grãos (intergranular)**
- **Temperatura equicoesiva - abaixo da mesma ocorre predominantemente deformação dentro do grão e acima ocorre predominantemente escorregamento de contornos de grão**
- **A taxa de deformação tende também a influenciar os mecanismos de deformação e fratura de maneira inversa quando comparada com a temperatura.**

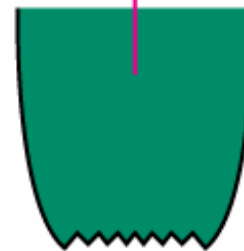
Falha Dúctil vs Frágil

Comportamento:
da Fratura

Muito
Dúctil



Ductile



Frágil



%RA or %AL

Larga

Moderada

Pequena

- Fratura Dúctil é geralmente mais desejável que fratura frágil.

Dúctil:

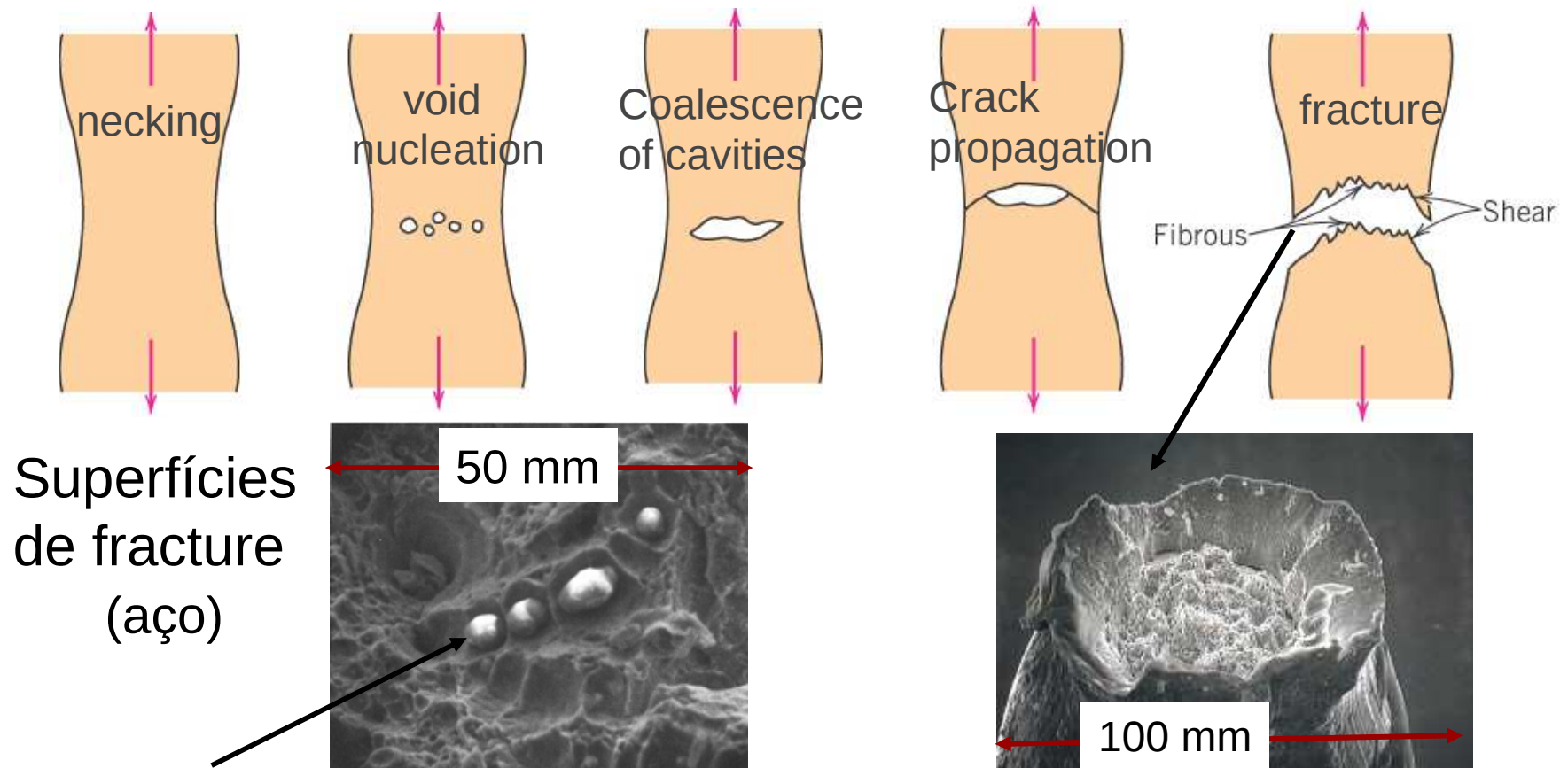
Sinaliza antes da
fratura

Brittle:

Nenhum
Sinal

Falha Ductil

- Evolução da falha:

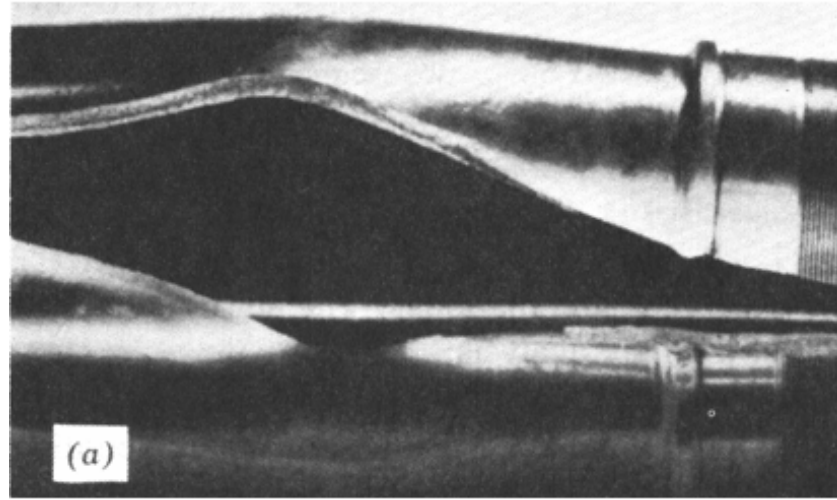


Superfícies
de fracture
(aço)

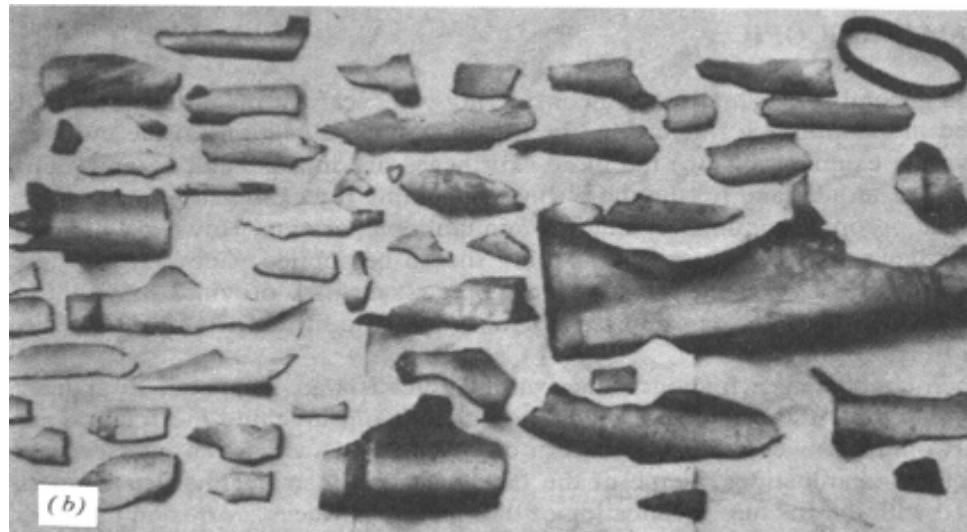
partículas
servem como sítios
de nucleação de vazios.

Exemplo: Falhas em Tubos

- **Falha Dúctil :**
 - Um pedaço
 - Grandes deformações



- **Falha Frágil :**
 - muitos pedaços
 - Pequenas deformações



Falha Dúctil vs Frágil

ASPECTO MACROSCÓPICO



(a)

Fratura
Taça e cone

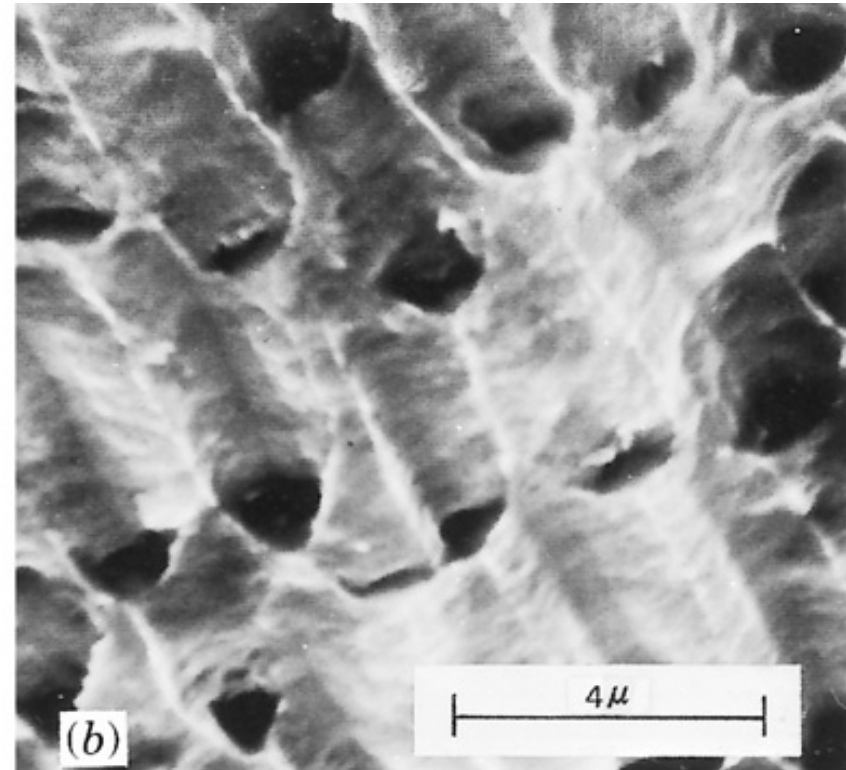
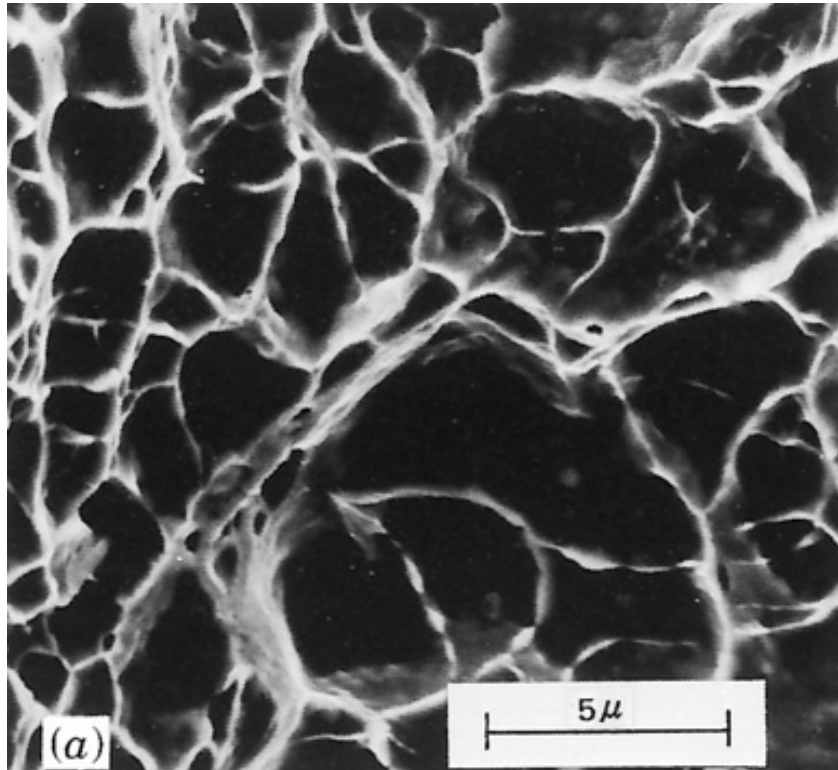


(b)

Fratura frágil

Falha Dúctil

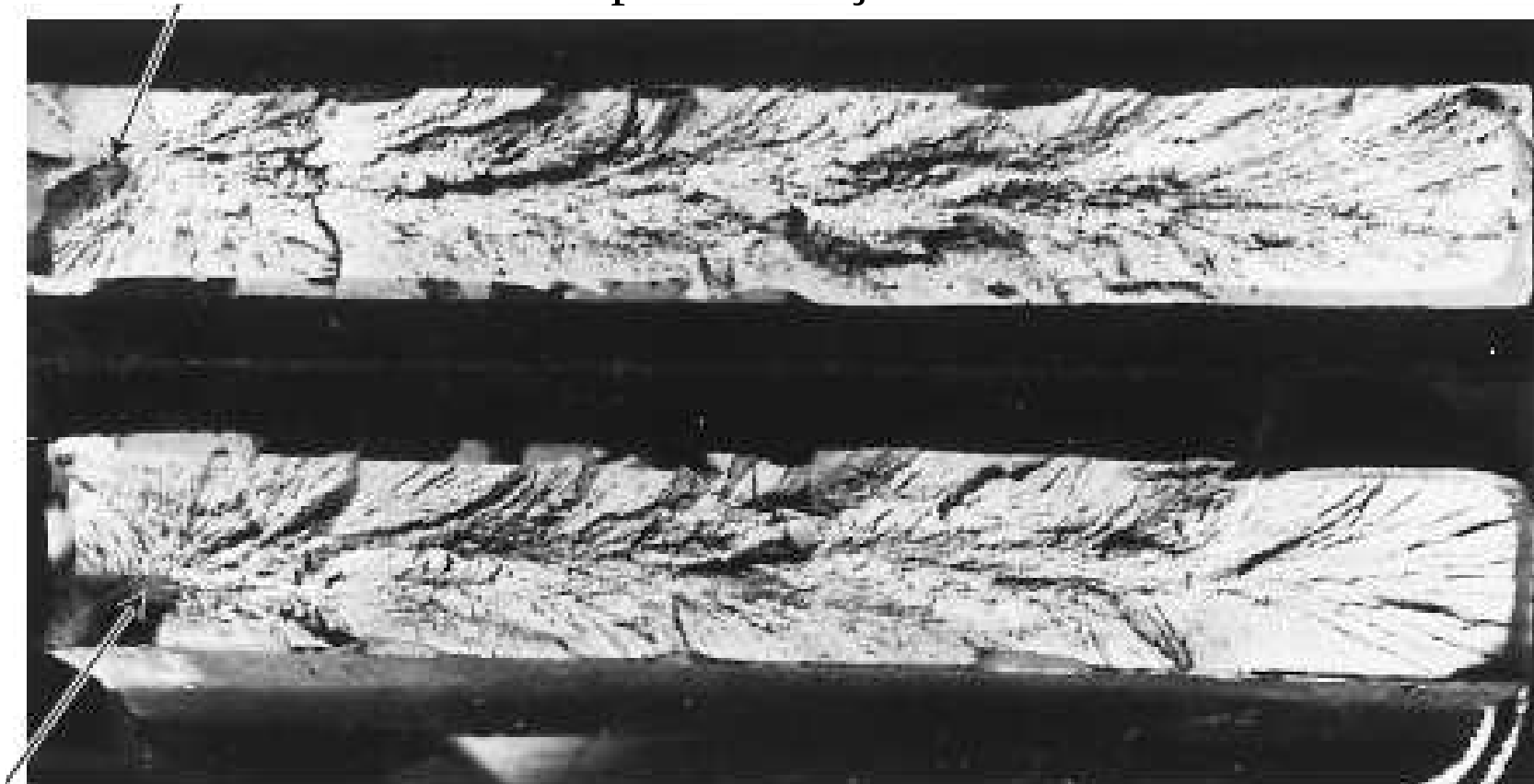
ASPECTO MICROSCÓPICO



(a) Imagem MEV mostrando dimples esféricos resultantes de carga de tração uniaxial. (b) Imagem MEV de dimples parabólicos de cargas de cisalhamento.

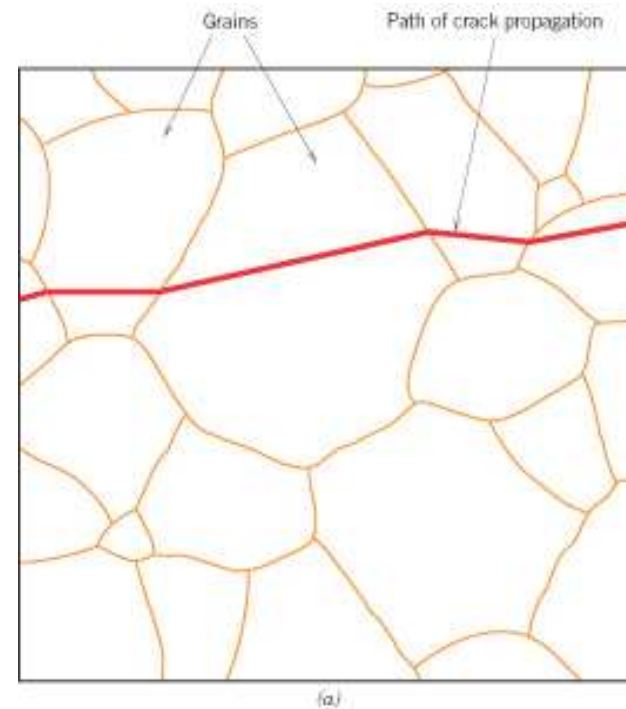
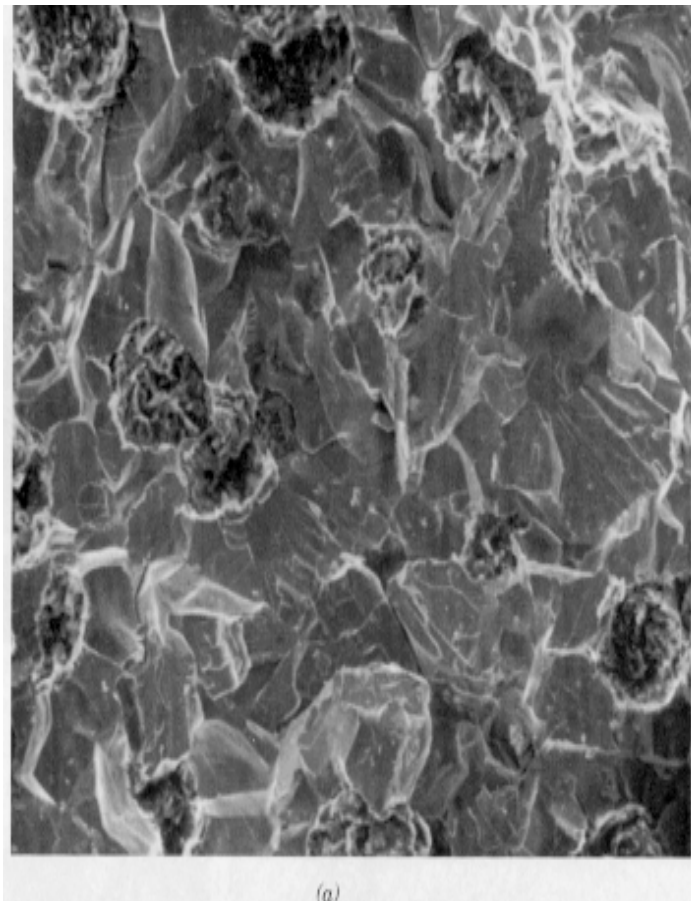
FRATURA FRÁGIL ASPECTO MACROSCÓPICO

Início da fratura por formação de trinca



FRATURA TRANSGRANULAR E INTERGRANULAR

TRANSGRANULAR



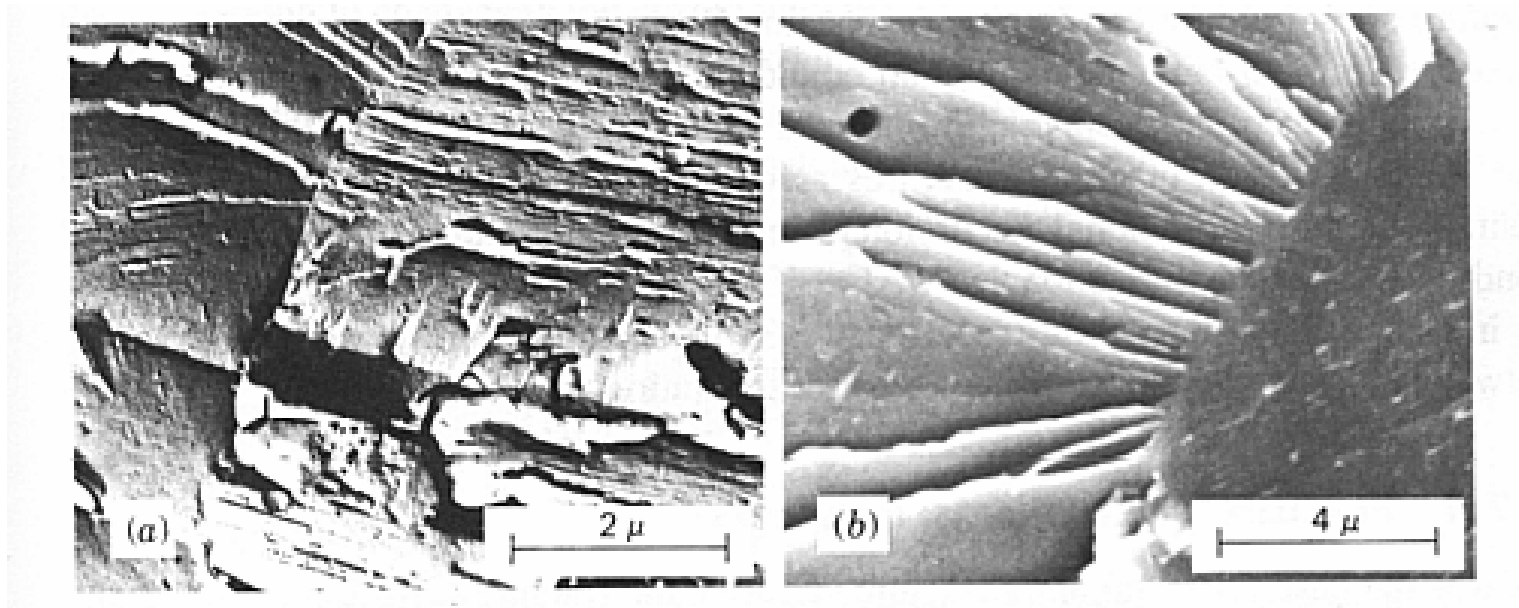
A fratura passa através do grão

Fratura Transgranular

Fratura por clivagem ocorre ao longo de planos cristalográficos bem definidos, e também sob certas condições, em metais e ligas com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado - CCC - (aços, ferro, cromo etc.) e em alguns com estrutura cristalina hexagonal compacta (zinco e berílio)

Os metais e ligas com estrutura cristalina cúbica de faces centradas - CFC - (alumínio, aço inoxidável austenítico, cobre etc.) normalmente não fraturam por clivagem.

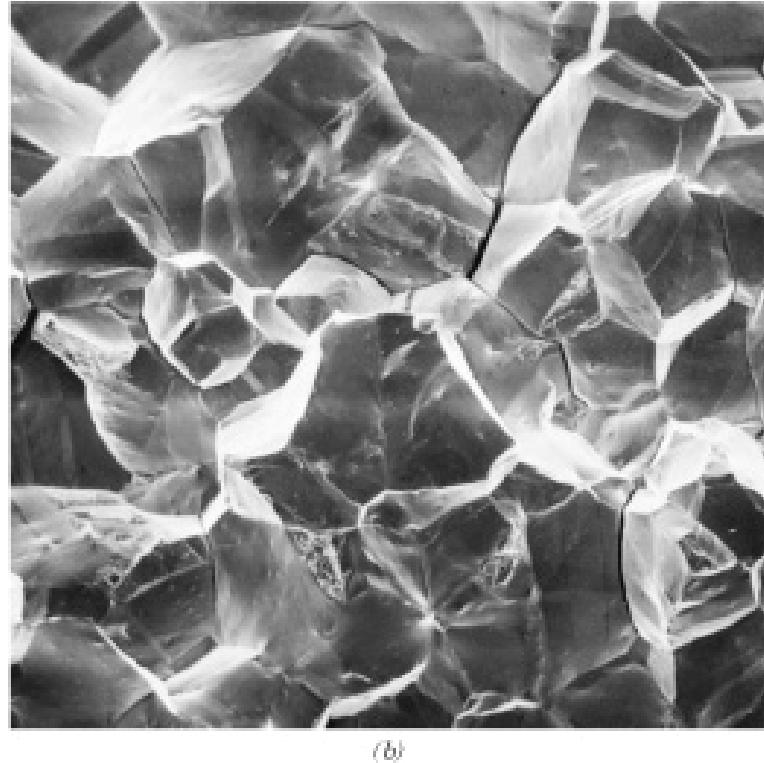
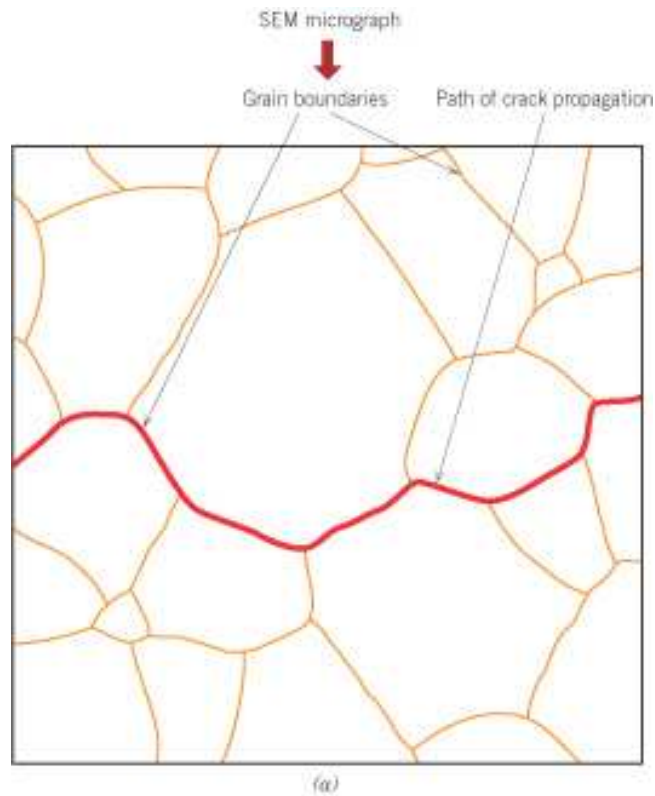
Fratura por clivagem em aço carbono. Nota-se patamares paralelos e “padrões de rios” indicando a propagação da trinca em planos de clivagem paralelos.



(a) Microscopia Eletrônica de Transmissão,

(b) Microscopia Eletrônica de Varredura.

Fratura Intergranular

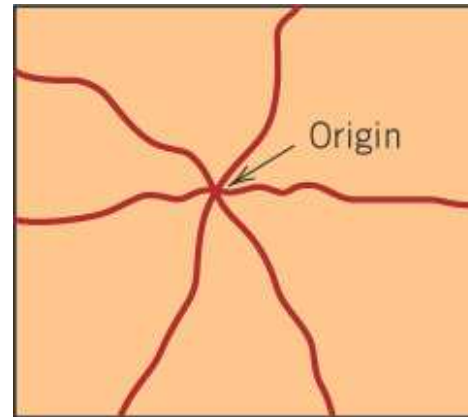


A fratura se dá no contorno de grão

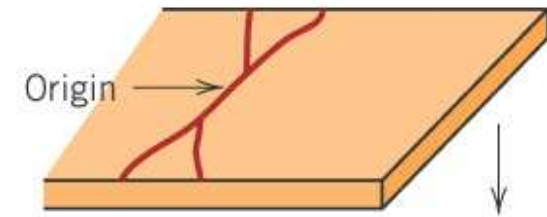
- Fratura intergranular é tipicamente um enfraquecimento no contorno de grão devido a um ataque químico, oxidação ou fragilização.

Fratura Frágil de Cerâmicas

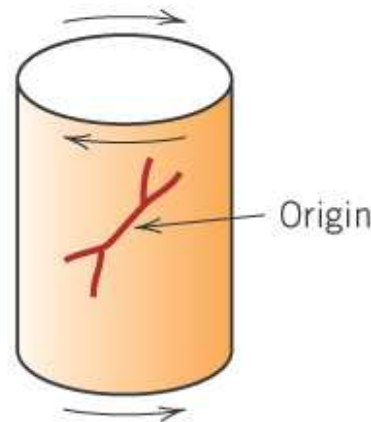
- A maioria das cerâmicas (na temperatura ambiente) a fratura pode ocorrer antes de qualquer deformação plástica.



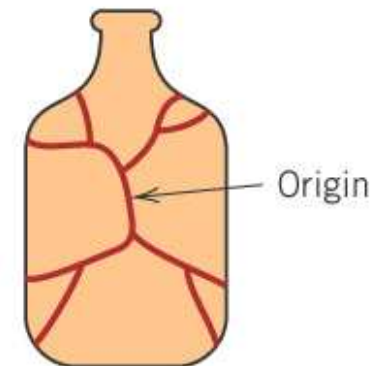
Impact or point loading
(a)



Bending
(b)



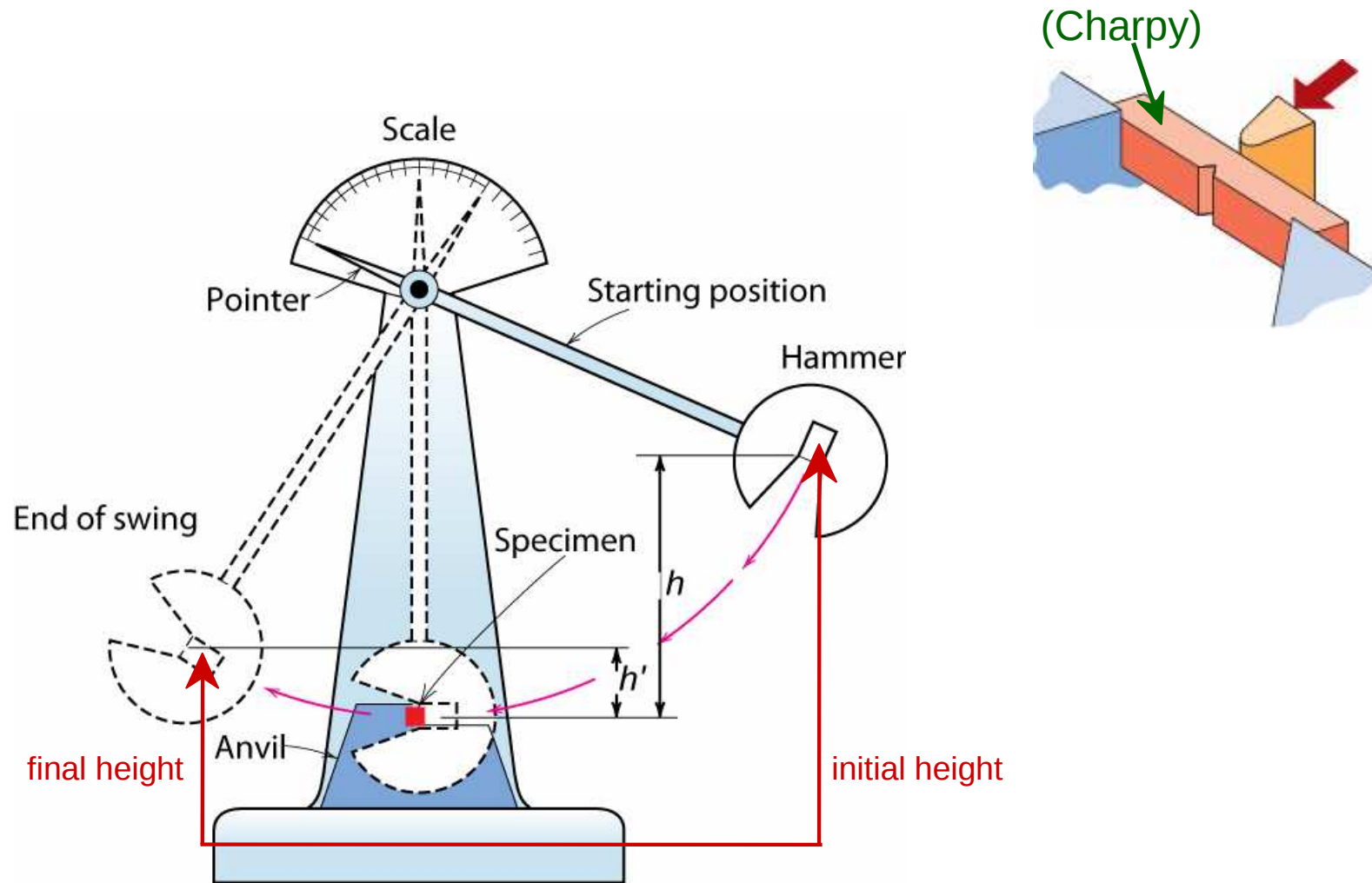
Torsion
(c)



Internal pressure
(d)

- Configurações típicas de trincas para 4 tipos comuns de carregamento.

ENSAIO DE IMPACTO



CONSIDERAÇÕES

- Função do entalhe:
 - Direcionar a ruptura do CDP
 - Produzir um estado triaxial de tensão
- Quanto menor a energia absorvida mais frágil é o comportamento do material
- Altamente influenciado pela geometria e forma do entalhe
- O resultado é mais qualitativo
- O ensaio de impacto mede a susceptibilidade dos materiais à Fratura Frágil
- O principal emprego do ensaio de impacto (charpy) na engenharia é a seleção de materiais resistentes à fratura frágil, com base nas curvas de temperatura de transição

Fatores que influenciam para um comportamento frágil de materiais dúcteis

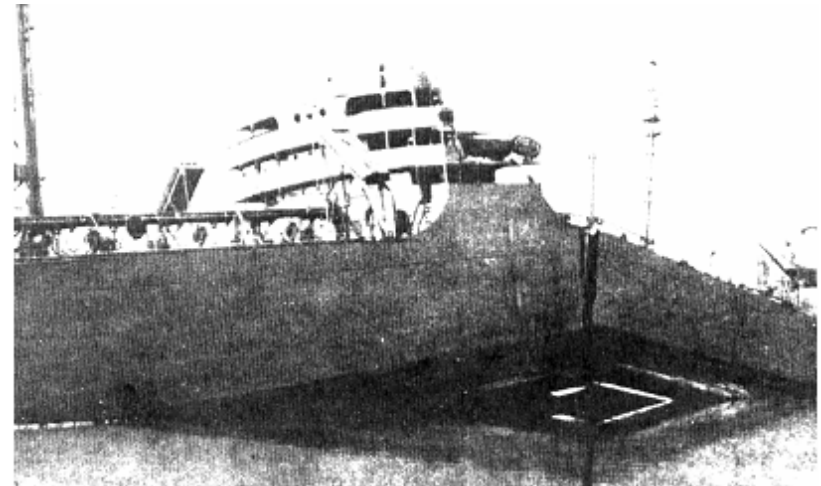
- Velocidade de aplicação de carga suficientemente alta (alta taxa de deformação).
- Trinca ou entalhe no material que induz a um estado triaxial de tensão.
- Uma temperatura baixa.

Temperatura de Transição Dúctil - Frágil (DBTT)

O Titanic

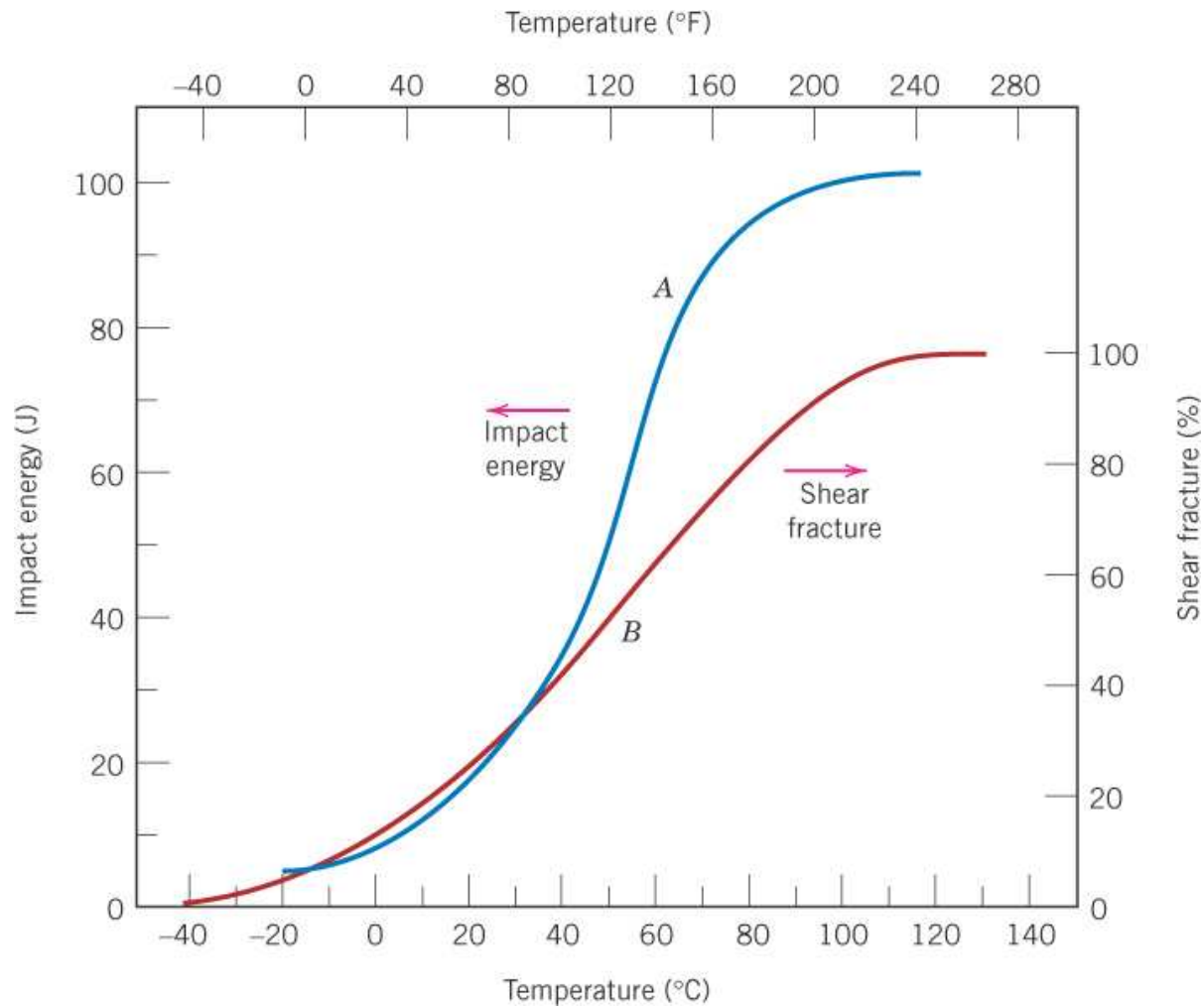


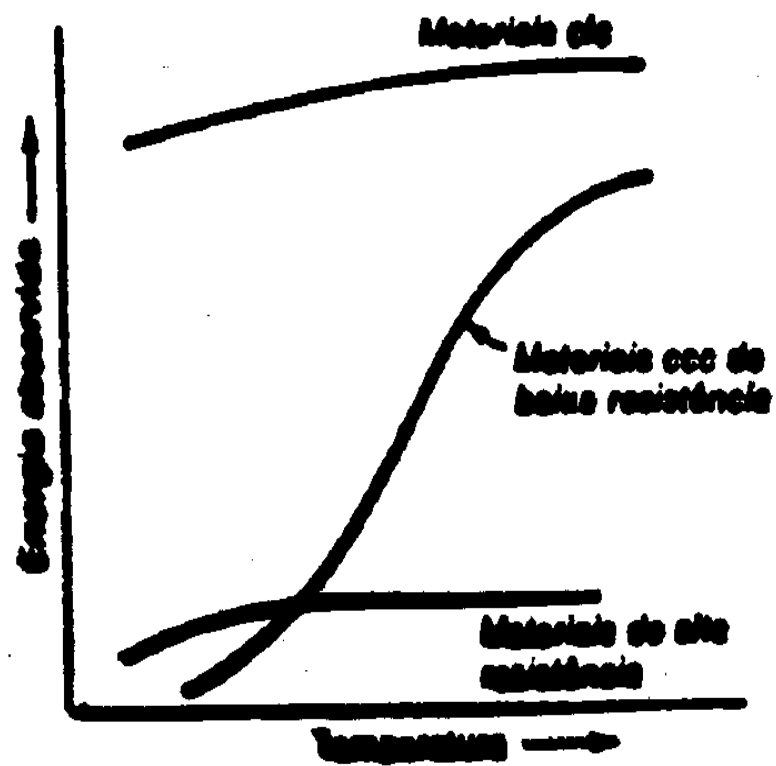
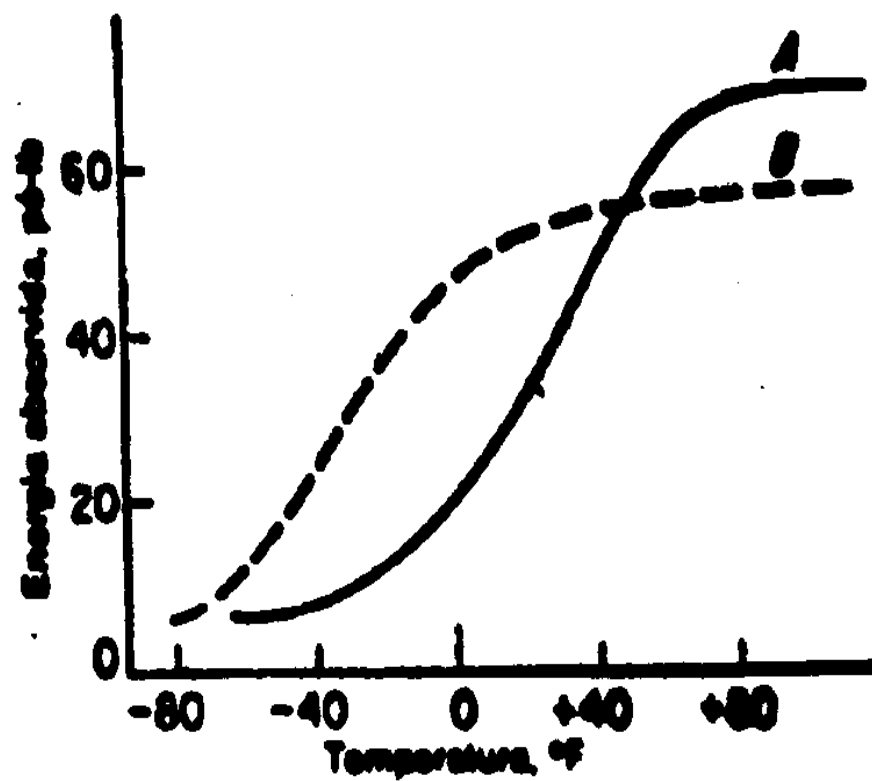
Navios Liberty



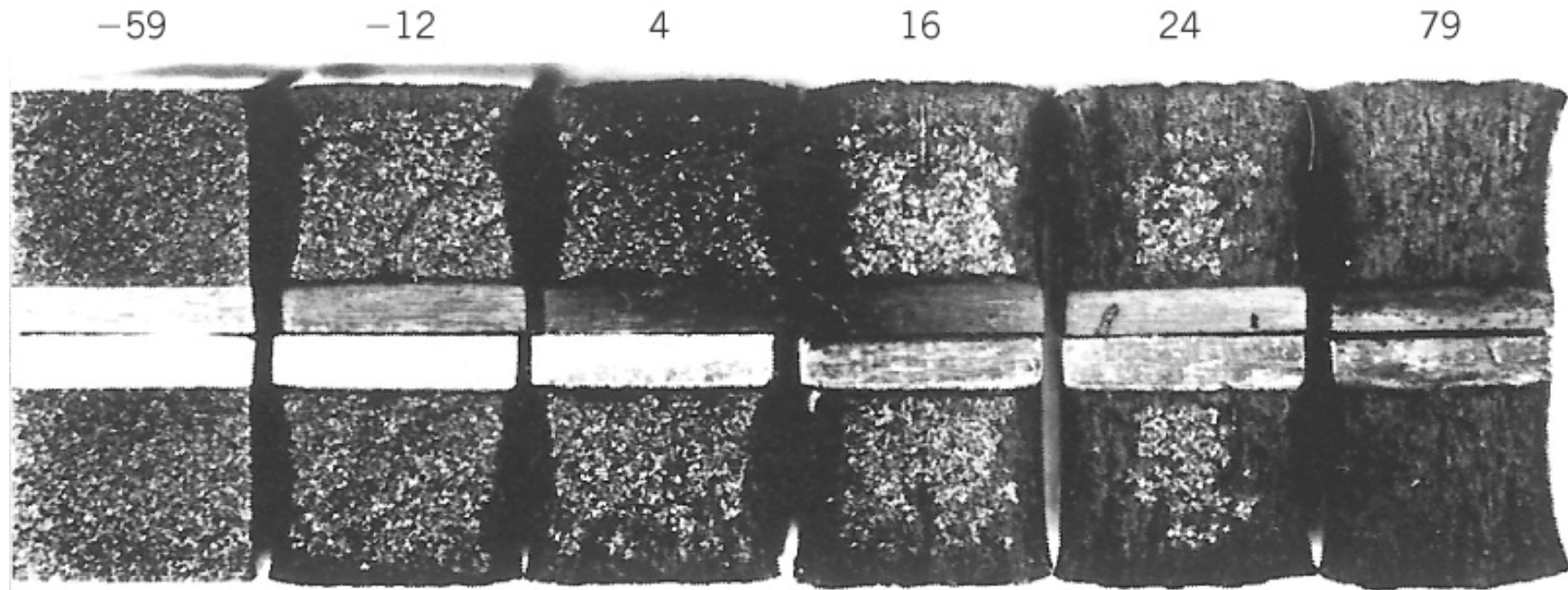
Falhas desastrosas que aconteceram em navios soldados. Falha súbita por volta de (40°F). Os cascos eram construídos de aço liga que exibiam um DBTT $\approx$ temperatura ambiente

Energia de Impacto Charpy (A) e % de Fratura Dúctil (cisalhamento) (B) em função da temperatura





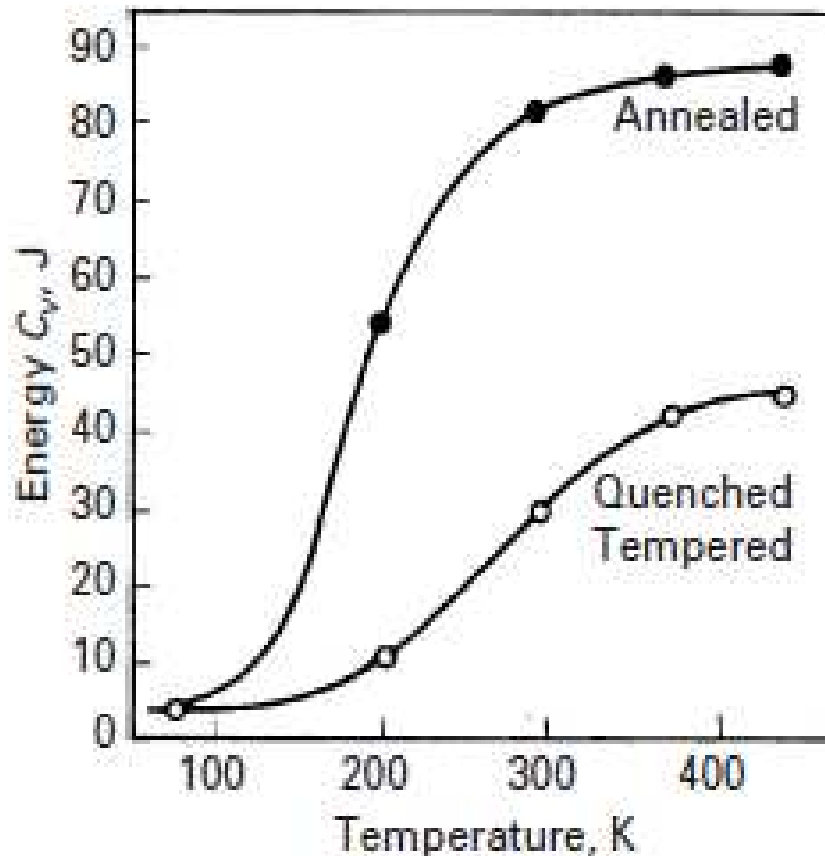
Amostras (aço) – Ensaio de Charpy



Superfícies de Fratura após impacto mostrando a variação na ductilidade com a temperatura de teste (°C).

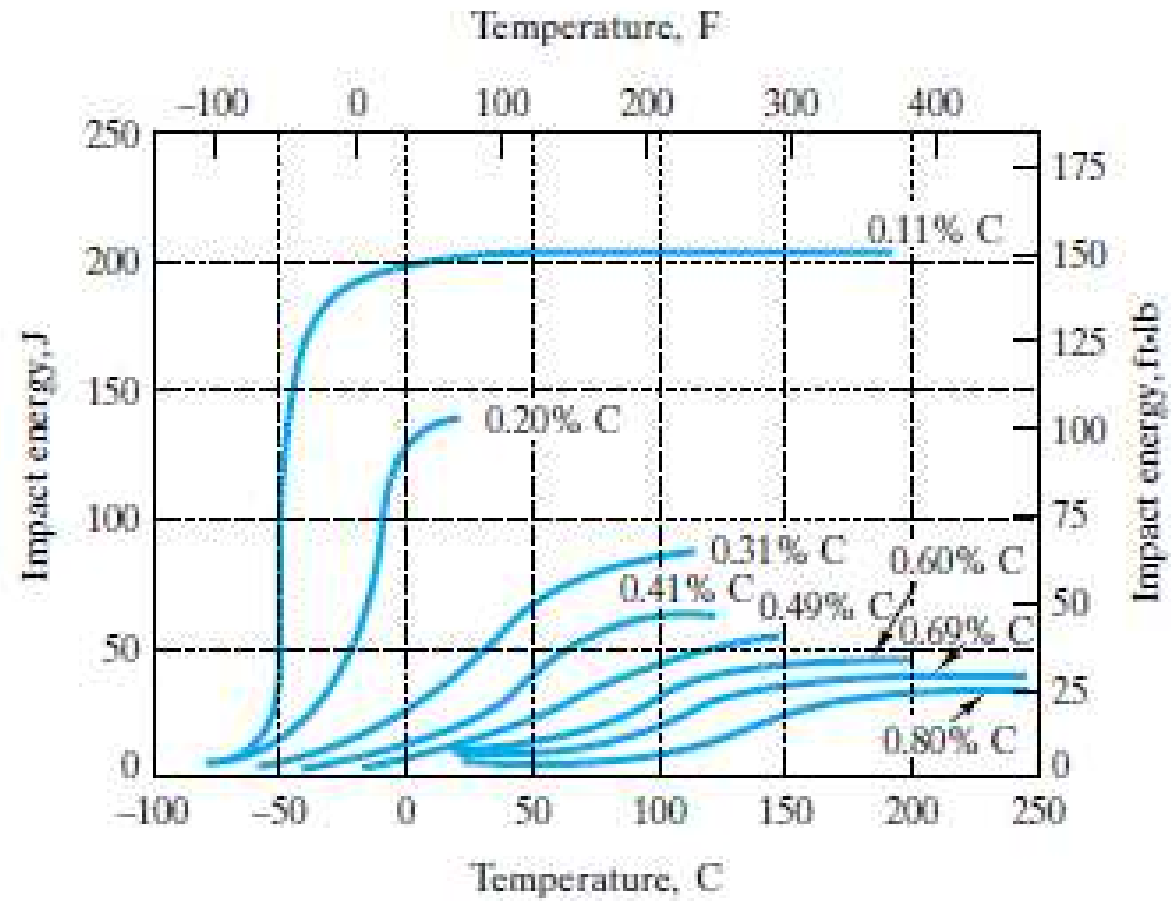
Energia Absorvida vs. Temperatura

Influência de Tratamento Térmico



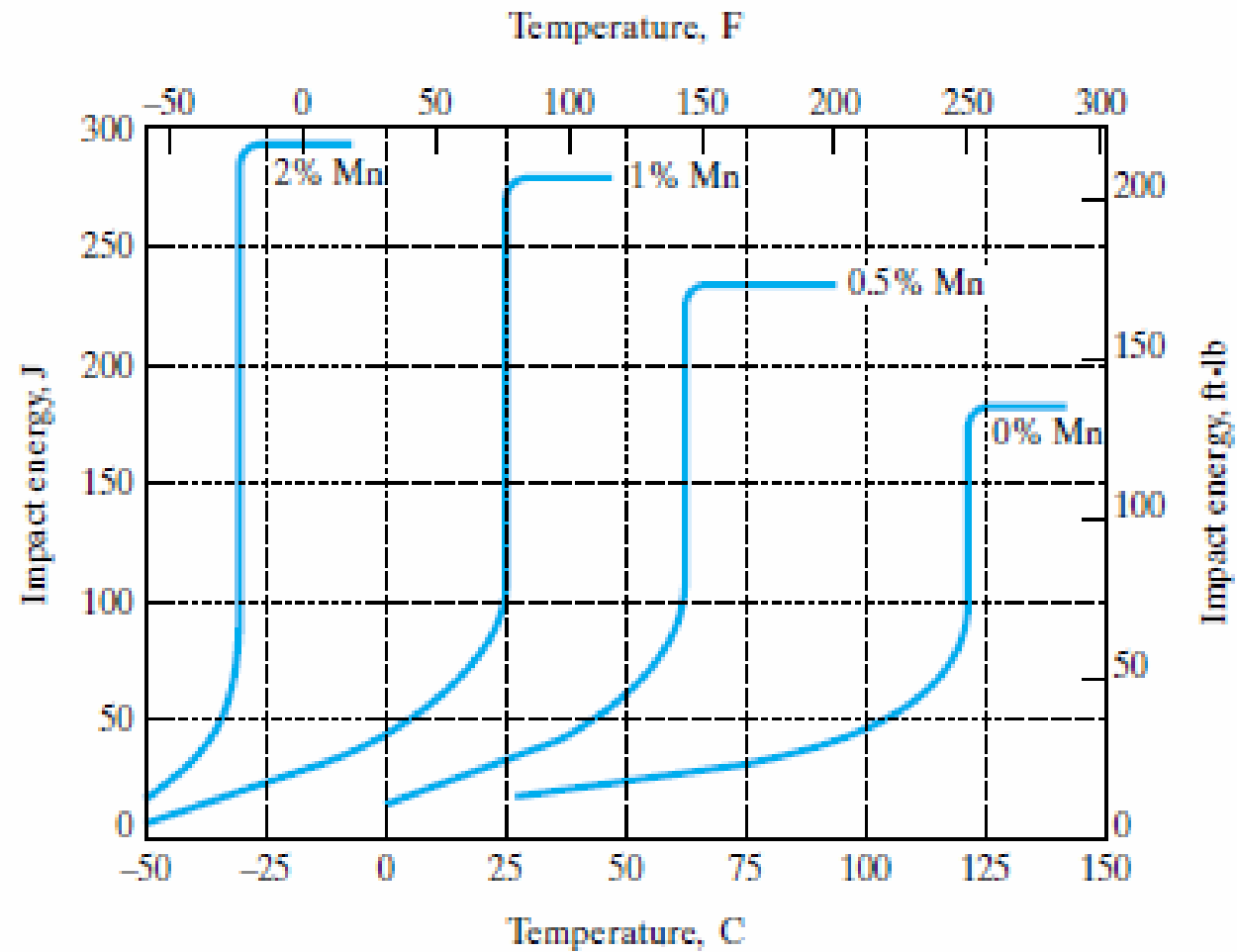
Energy absorbed versus temperature for a steel in annealed and in quenched and tempered states. (Adapted with permission from J. C. Miguez Suarez and K. K. Chawla, *Metalurgia-ABM*, 34 (1978) 825.)

Influência do percentual de C

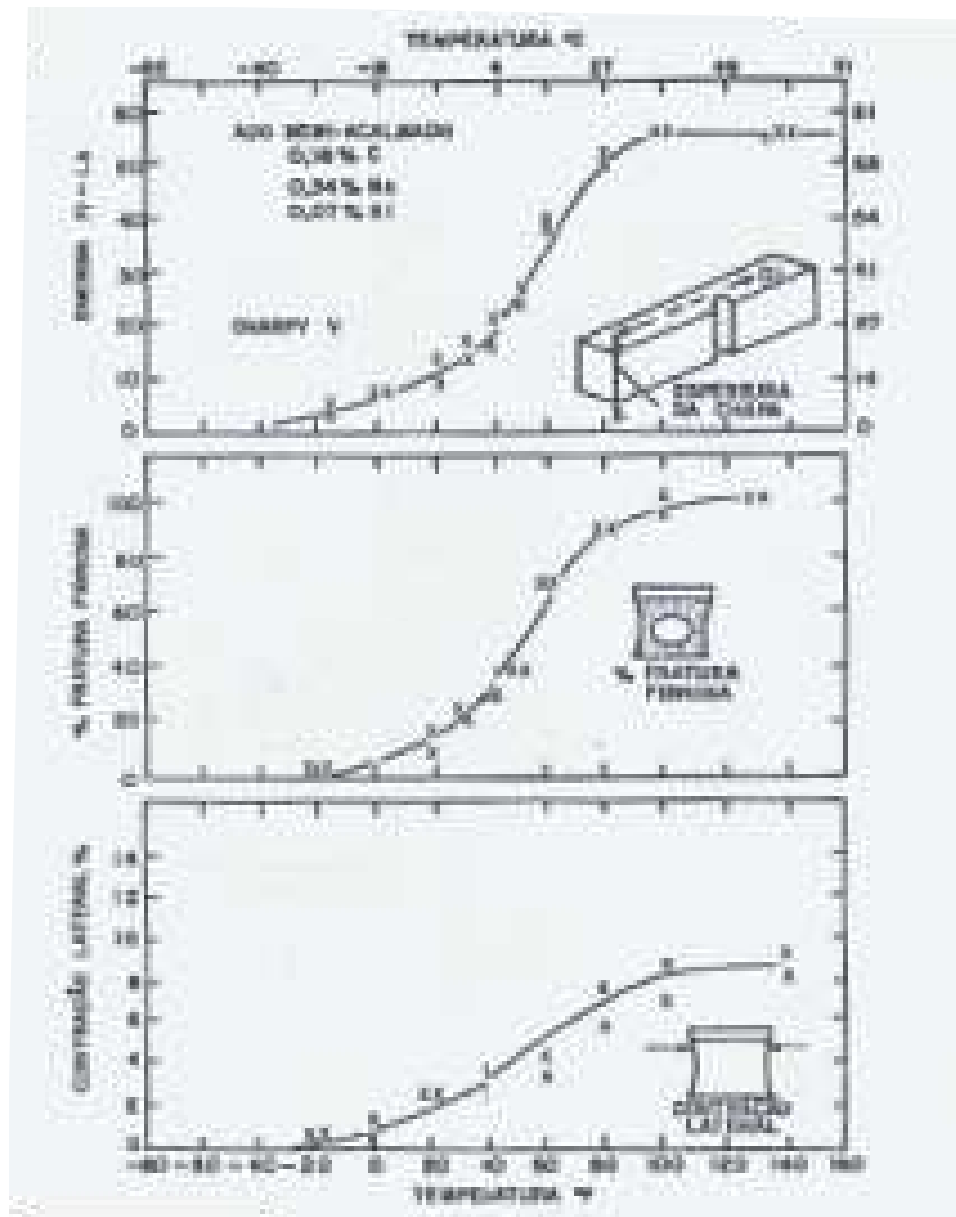


(a)

Influência do percentual de Mn



Curvas usadas para determinar temperatura de transição em amostras ensaiadas em Charpy V



Métodos para determinar temperatura de transição ductil-frágil

- 1) Pela energia desprendida para produzir a fratura
 - Temperatura correspondente a 20 J
 - Temperatura correspondente a 54 J
 - Temperatura correspondente a energia média entre o patamar superior e patamar inferior de energia

- 2) Pelo aspecto da superfície da fratura
 - Temperatura mínima p/a qual a fratura é 100% fibrosa (ductil)
 - Temperatura mínima p/a qual a fratura é 0% fibrosa
 - Temperatura p/a qual a fratura é 50% fibrosa

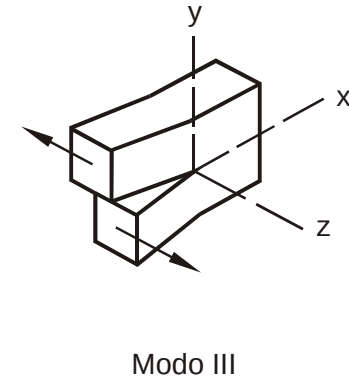
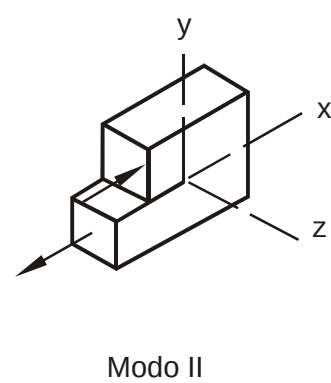
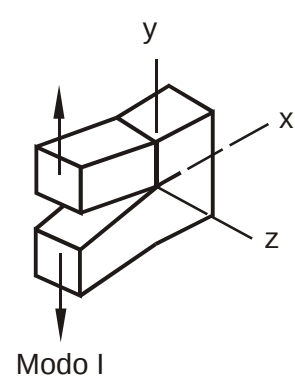
- 3) Pela contração ou expansão lateral medida na raiz do entalhe
 - 1% de contração lateral

Mecânica da Fratura



ENSAIO DE TENACIDADE À FRATURA





Modos de carregamento na ponta da trinca.

Ensaio de Tenacidade à fratura

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} Y$$

K_I é fator intensidade de tensão

→ Na fratura K_I é K_C (fator intensidade de tensão critico),

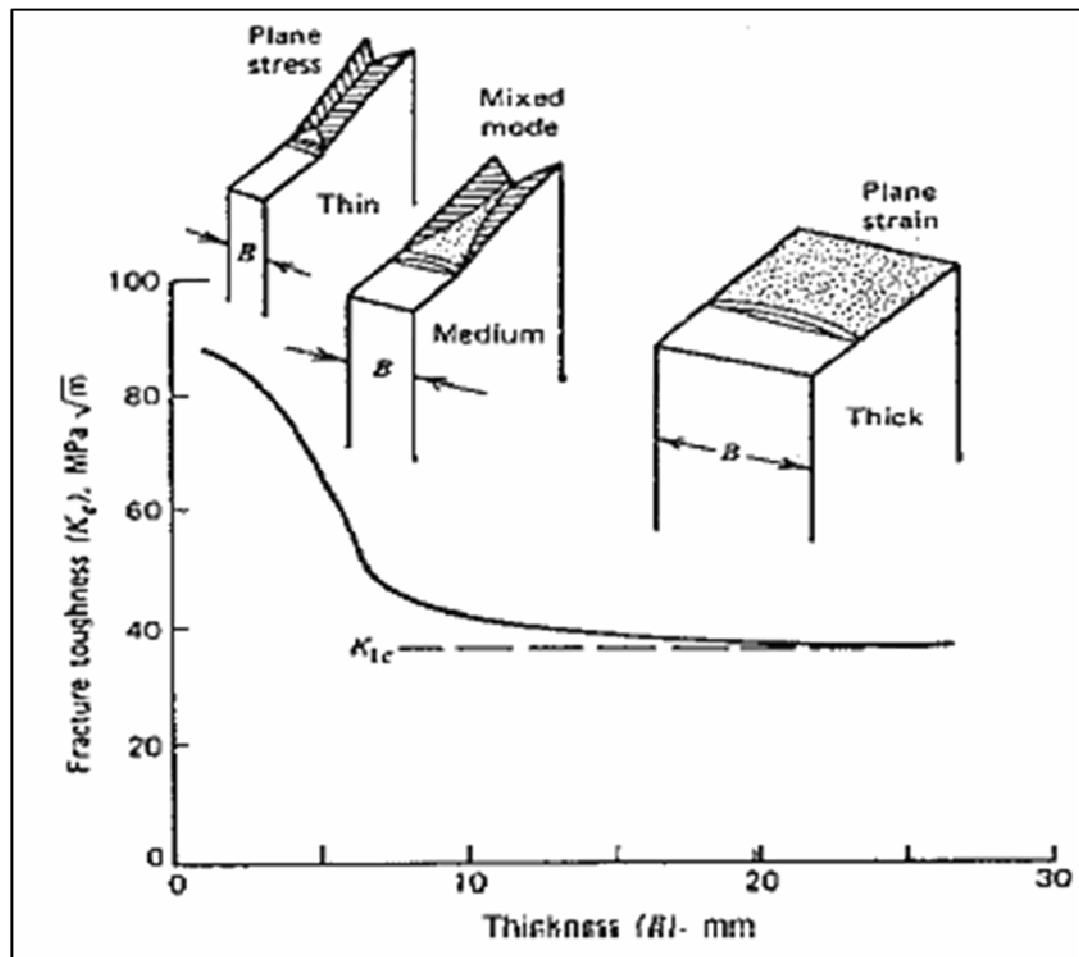
em estado plano de deformação K_I é K_{IC}

K_{IC}  Valor de tenacidade à fratura

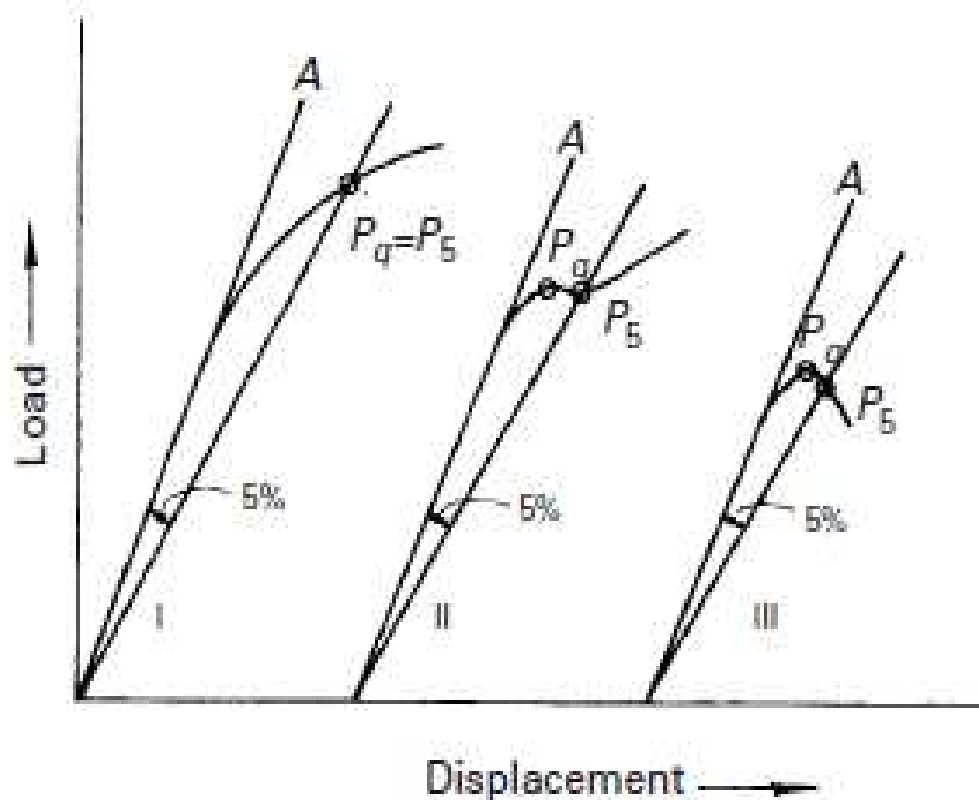
σ = tensão aplicada

a = comprimento da trinca

Y = fator de forma/geometria



Measuring Conditioned Value K_Q



Previsão de falhas com base na Mecânica da fratura

Parâmetros importantes para se evitar falhas inesperadas ou catastróficas, baseados na Mecânica da Fratura.

- **Valor de K_C ou K_{IC} que é obtido por meio de ensaios padronizados (Ex. ASTM E399)**
- **Máxima tensão de trabalho (tensão crítica)**

$$\sigma_C \leq \frac{K_{IC}}{Y \sqrt{\pi a}}$$

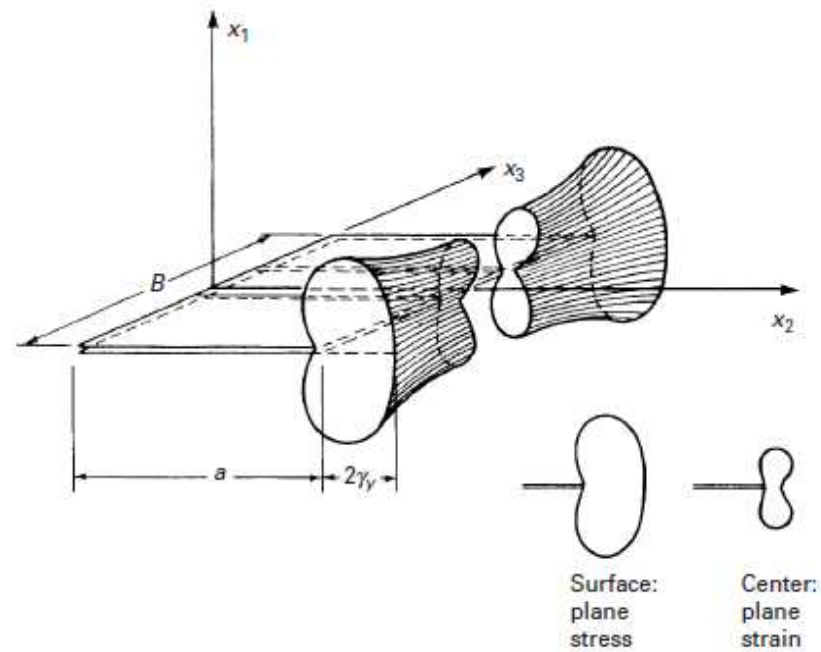
- **Comprimento da maior trinca existente (a), que pode ser obtido por ultrassom.**

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



A partir de dois parâmetros desses já conhecido o terceiro é obtido automaticamente pela formulação da mecânica da fratura

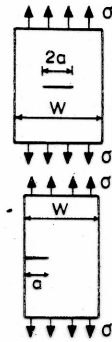
Plastic Zone at Crack Tip



Plastic zone at the x_1 crack tip in a plate of finite thickness.

Table 9.1 | TABLE 9.1 Checklist for the K_{Ic} Test

1. Dimensions of test piece
 - a. Thickness, $B \geq 2.5 (K_{Ic}/\sigma_y)^2$
 - b. Crack length, $a \geq 2.5 (K_{Ic}/\sigma_y)^2$
2. Fatigue precracking
 - a. $K_{max}/K_{Ic} \leq 0.6$
 - b. Crack front curvature $\leq 5\%$ of crack length
 - c. Inclination $\leq 10^\circ$
 - d. Length between $0.45 W$ and $0.55 W$, where W is the width of the test sample
3. Characteristics of load–displacement curve. This is effectively to limit the plasticity during the test and determines whether the gradual curvature in the load–displacement curve is due to plastic deformation or crack growth.
 - a. $P_{max}/P_Q \leq 1.1$



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left(\sec \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2}$$

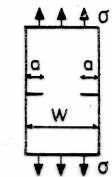
$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \left(\text{small } \frac{a}{W} \right)$$

$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \left(\text{small } \frac{a}{W} \right)$$

$$\text{or } K_I = Y \sigma \sqrt{a}$$

$$\text{with } Y = 1.99 - 0.41 \frac{a}{W} + 18.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 38.48 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 53.85 \left(\frac{a}{W} \right)^4$$

$$(1.99 = 1.12 \sqrt{\pi})$$

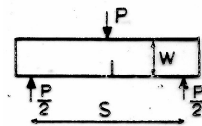


$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \left(\text{small } \frac{a}{W} \right)$$

$$\text{or } K_I = Y \sigma \sqrt{a}$$

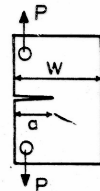
$$\text{with } Y = 1.99 + 0.76 \frac{a}{W} - 8.48 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 27.36 \left(\frac{a}{W} \right)^3$$

$$(1.99 = 1.12 \sqrt{\pi})$$



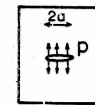
Thickness B

$$K_I = \frac{PS}{BW^{3/2}} \left[2.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 4.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 21.8 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 37.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 38.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$



Thickness B

$$K_I = \frac{P}{BW^{1/2}} \left[29.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 63.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$



p per unit thickness

$$K_I = p \sqrt{\pi a}$$

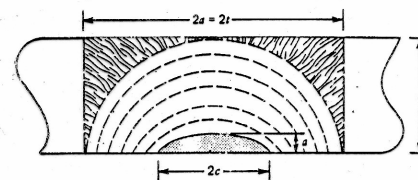
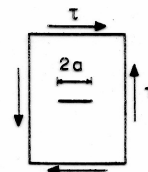


$$K_{I_{max}} = 1.12 \frac{\sigma}{\Phi} \sqrt{\pi a}$$

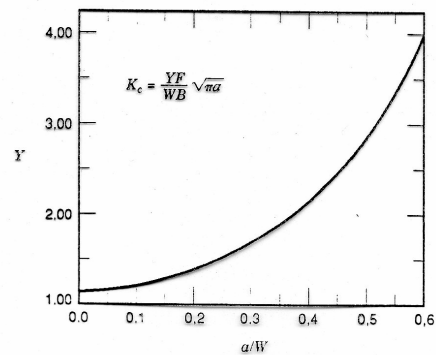
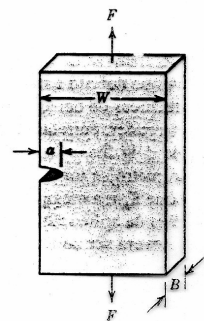
$$K_{I_{min}} = 1.12 \frac{\sigma}{\Phi} \sqrt{\pi a^2 c}$$

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \left[1 - \frac{c^2 - a^2}{c^2} \sin^2 \varphi \right] d\varphi$$

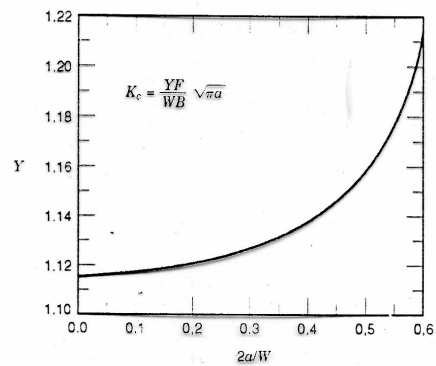
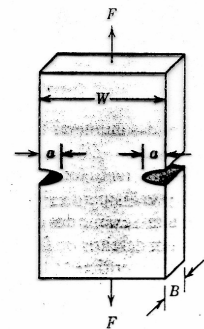
$$\Phi \approx \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \frac{a^2}{c^2}$$



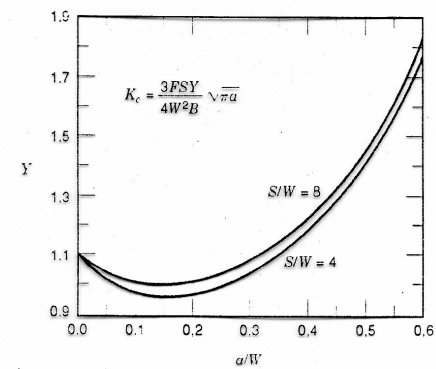
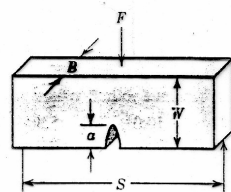
639



(a)



(b)



(c)