



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Elementos de Máquinas para Automação

PMR 3307 - A06

Falha por impacto

2023.2



Tópicos

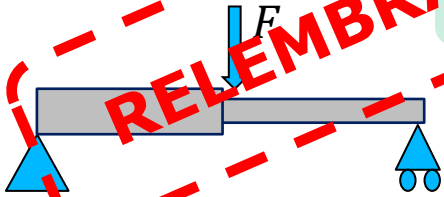
- ▶ Introdução ao problema de impacto
- ▶ Cargas de impacto
- ▶ Projeto para impacto
- ▶ Tensão e deflexão causadas por impacto linear
- ▶ Comportamento dos materiais sob impacto
- ▶ Ensaio de impacto
- ▶ Temperatura de transição Dúctil-Frágil
 - ▶ Problema Titanic
 - ▶ Problema Liberty Ship class
- ▶ Resistência ao impacto e Resistência a fratura



Este tópico está baseado no Livro: *Fundamentals of Machine Component Design*, Chapter 7 Impact, 288, ROBERT C. JUVINALL, KURT M. MARSHEK, Ed. JOHN WILEY & SONS, INC. 2011



Projeto para carregamentos estáticos



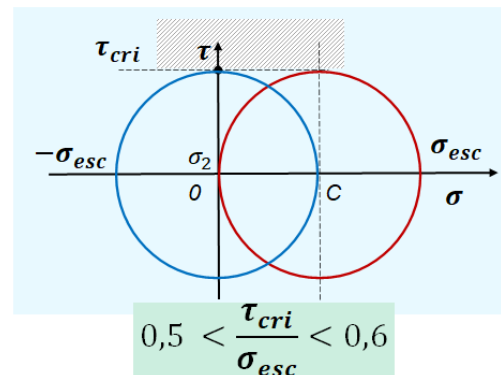
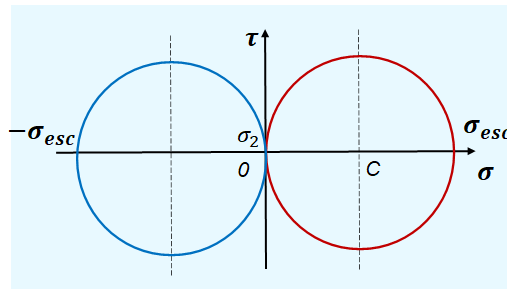
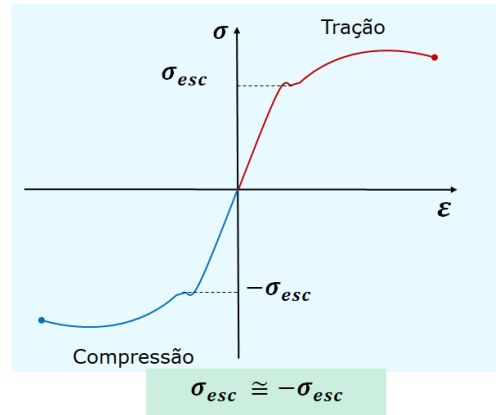
RELEMBRANDO!

Sobreposição dos resultados dos ensaios de tração e compressão

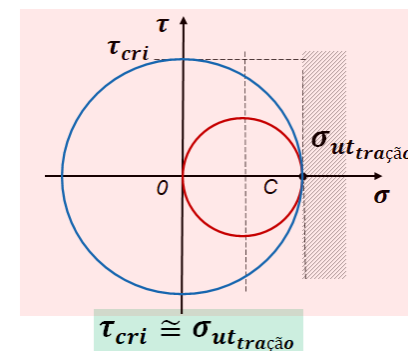
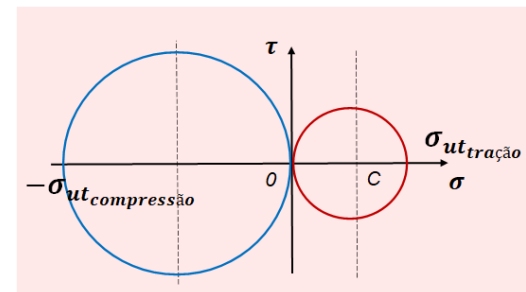
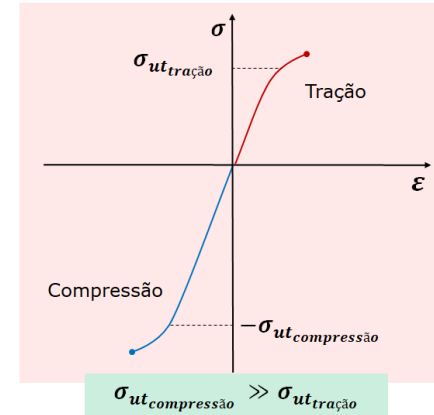
Sobreposição dos círculos de Mohr para tração e compressão

Sobreposição dos círculos de Mohr para ensaios de tração e torção

Materiais Dúcteis



Materiais Frágeis





Teorias de falha -> Dúcteis

- Máxima tensão cisalhante - *Maximum shear stress*
- Máxima energia de distorção - *Maximum distortion energy*
- Teoria Coulomb-Mohr para materiais dúcteis

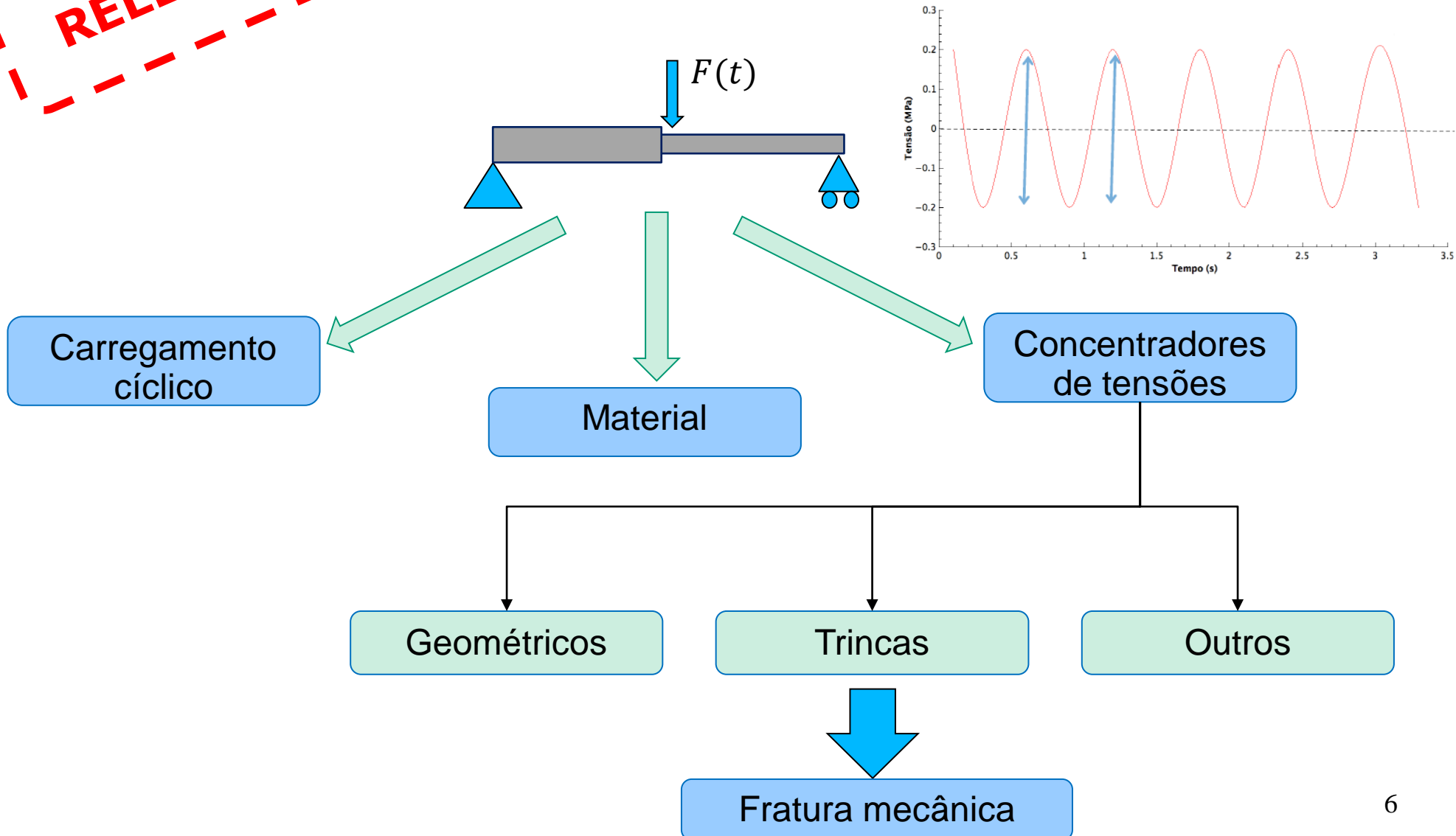
Teorias de falha -> Frágeis

- Máxima tensão normal - *Maximum normal stress*
- Falha frágil Coulomb-Mohr - *Brittle Coulomb-Mohr*
- Mohr modificado - *Modified Mohr*



RELEMBRANDO!

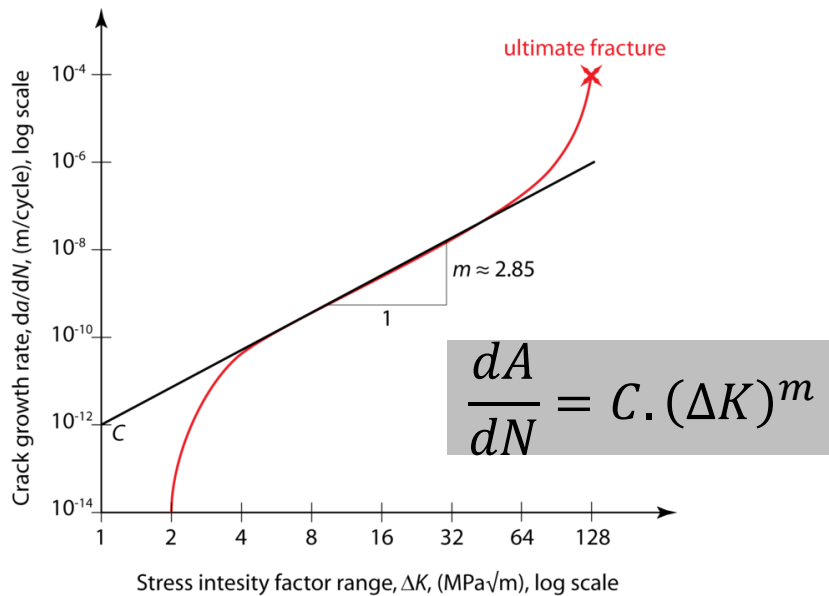
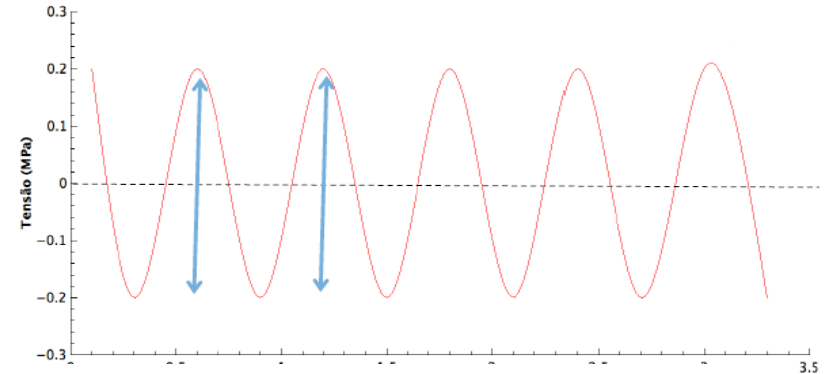
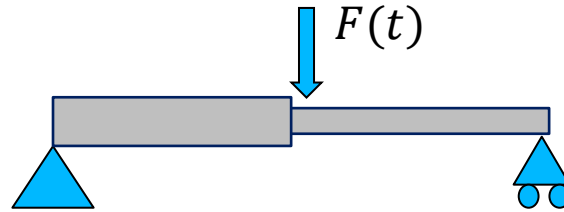
Projeto para carregamentos dinâmicos



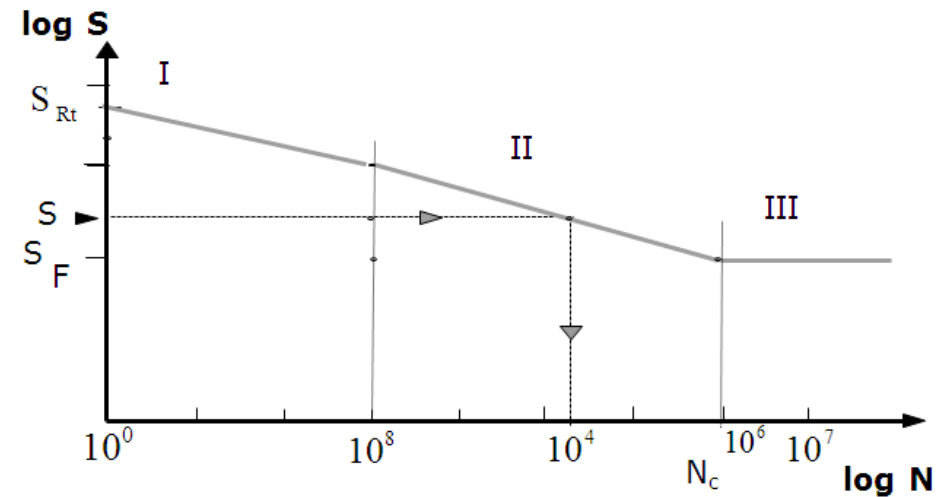


RELEBRANDO!

Projeto para carregamentos dinâmicos



Fratura mecânica

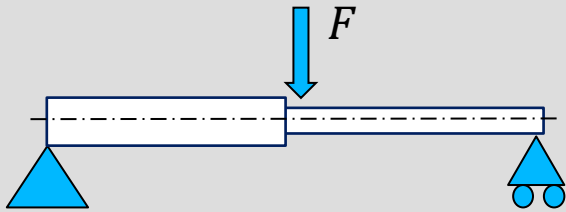


Curva de Wohler

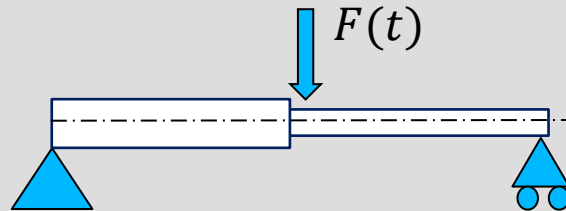


Considerações de falha de elementos de máquinas

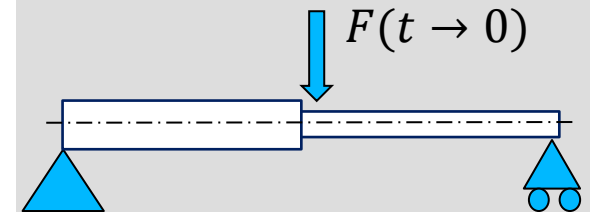
Condição estática



Condição dinâmica

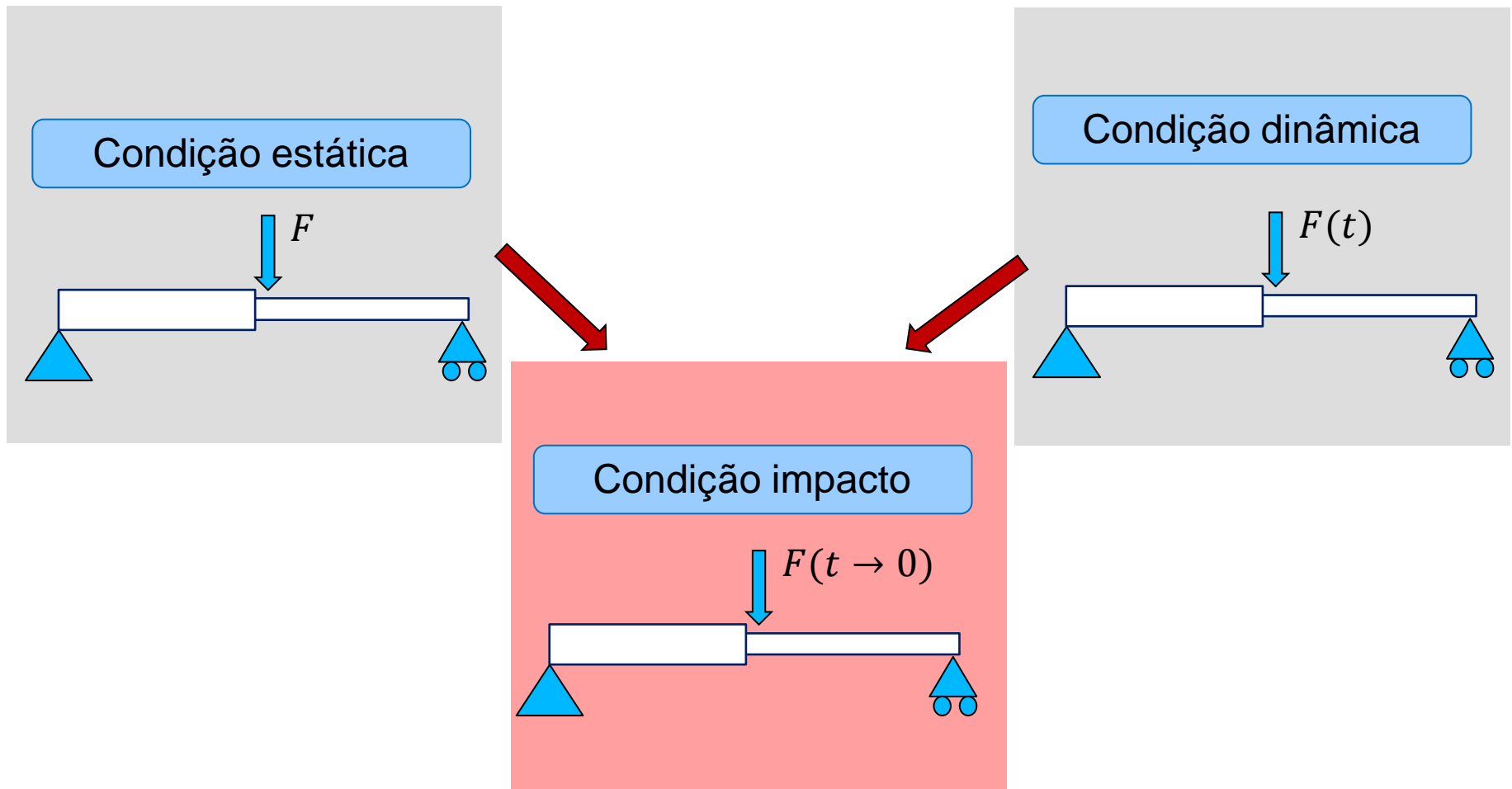


Condição impacto





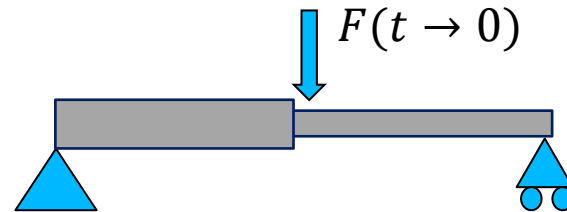
Projeto para impactos





Projeto para impactos

Condição impacto



- A carga de impacto também é chamada de carga de choque, súbita ou impulsiva.





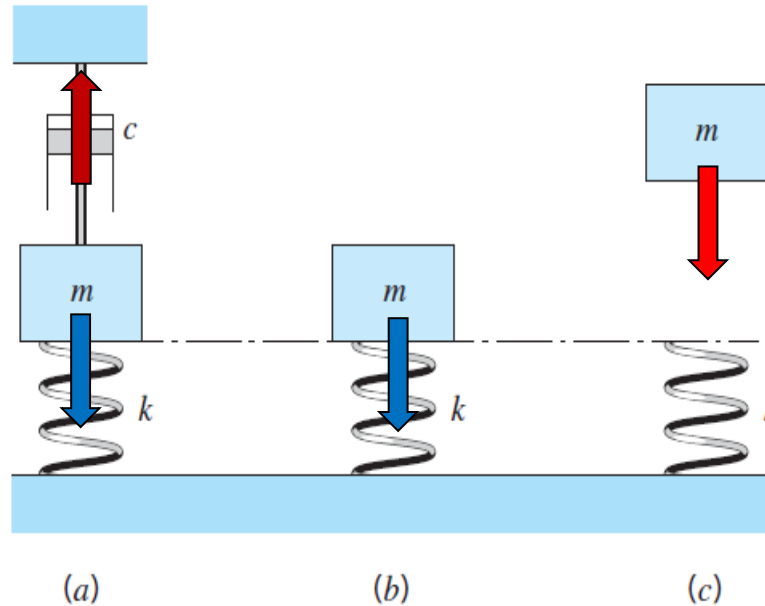
Cargas de Impacto

cargas que se movem rapidamente com magnitude essencialmente constante

cargas aplicadas repentinamente

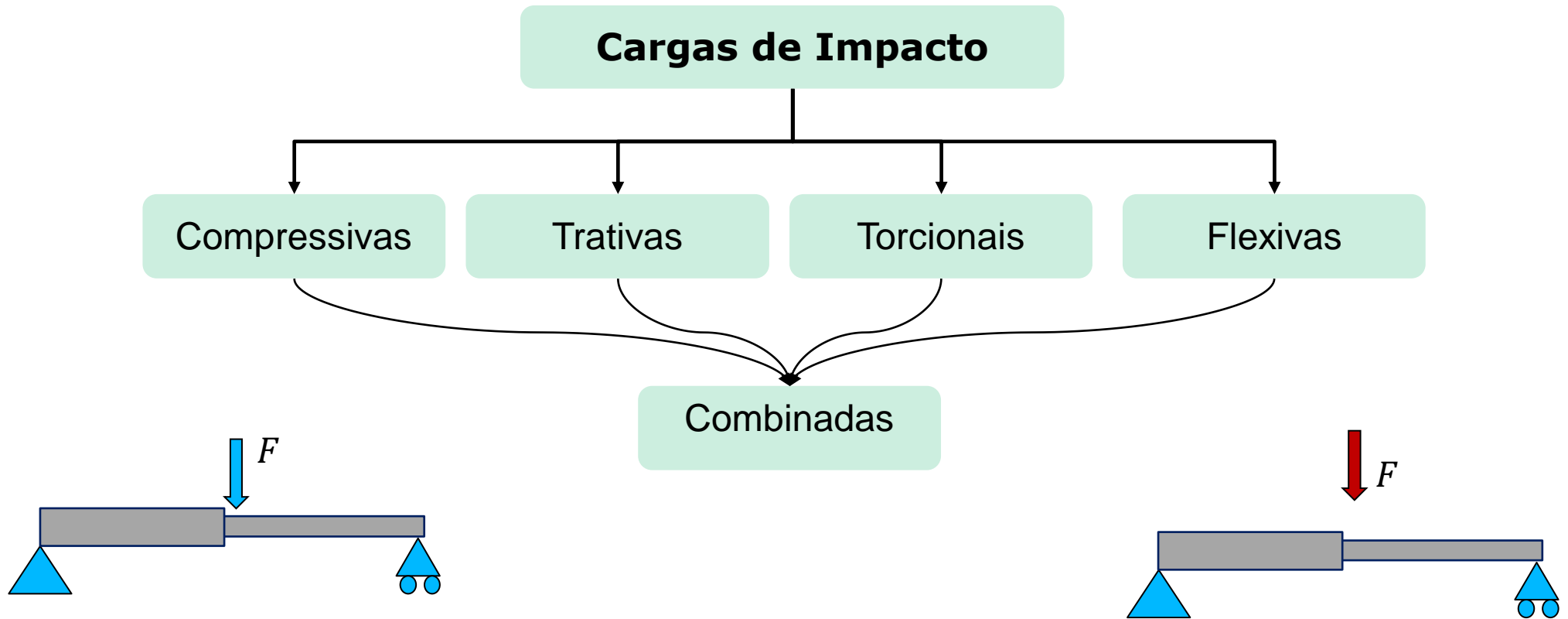
cargas de impacto direto

O amortecedor impede que toda a força gravitacional (mg) seja aplicada de forma imediata



Neste caso a massa continua adquirir energia cinética e a força gravitacional (mg) também é aplicada de forma imediata

Sem amortecedor a força gravitacional (mg) é aplicada de forma instantânea



Uma diferença importante no projeto de componentes para carga estática e de impacto, é que as peças estaticamente carregadas devem ser projetadas para transportar cargas, enquanto as peças sujeitas a impacto deve ser projetado para absorver energia.



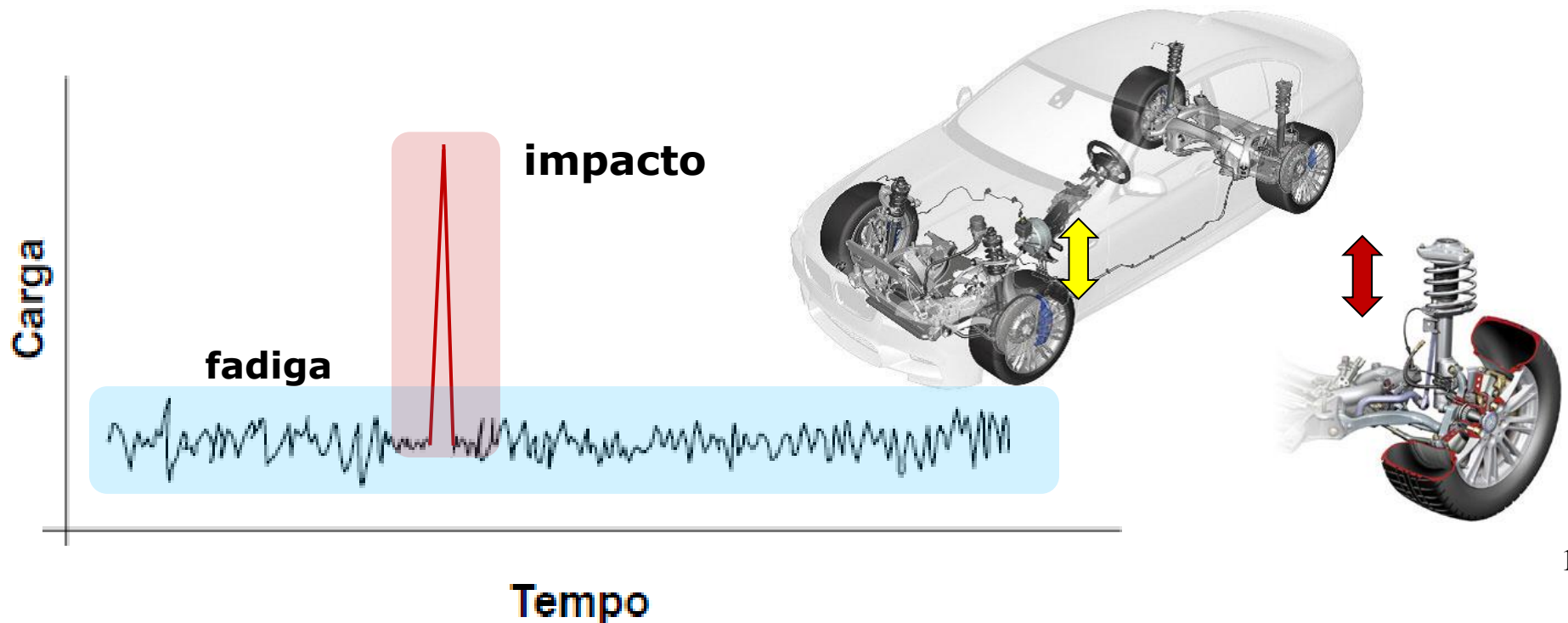
Projeto para impacto

- Um dos problemas na análise teórica de impacto na engenharia é que muitas vezes as taxas de aplicação de carga e o desenvolvimento das tensões só pode ser aproximado.
- Isso às vezes leva ao uso fatores de impacto empíricos, junto com as propriedades de resistência estática do material.
- Esta prática funciona bem quando se tem bons dados empíricos para aplicar ao projeto de componentes



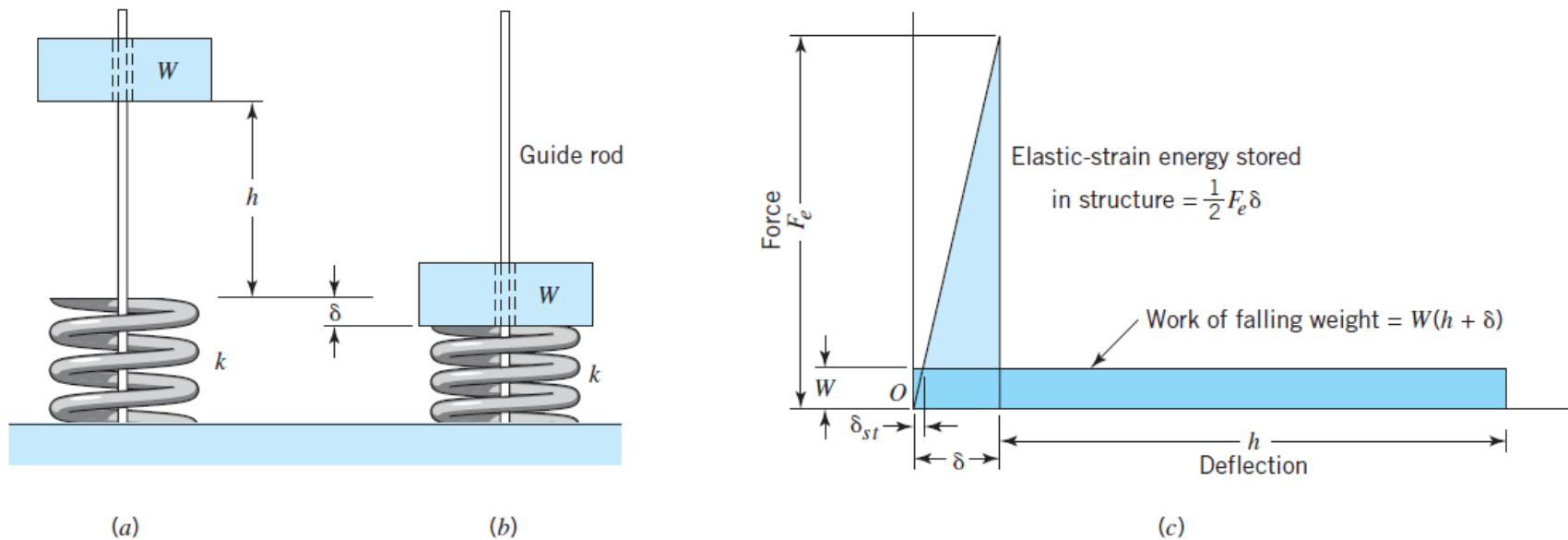
Projeto para impacto

- Um exemplo é o uso de um fator impacto 4 no projeto de peças de suspensão automotiva. Mesmo quando o uso destes fatores empíricos se justificam, é importante que o engenheiro tenha um bom entendimento dos fundamentos básicos da carga de impacto.





Tensão e deflexão causadas por impacto linear

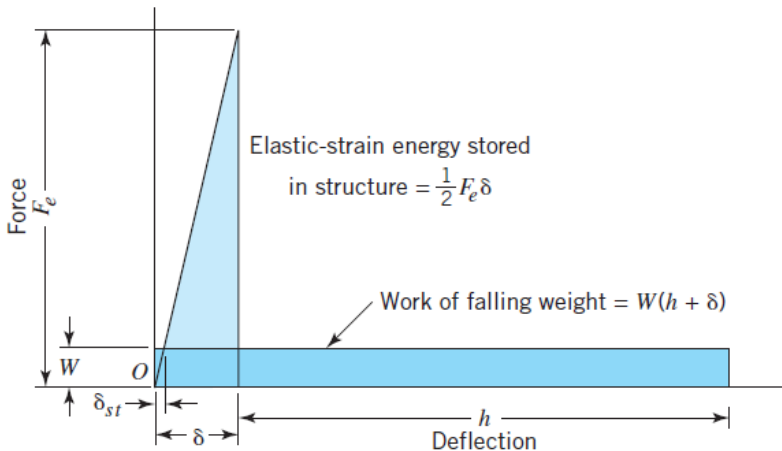
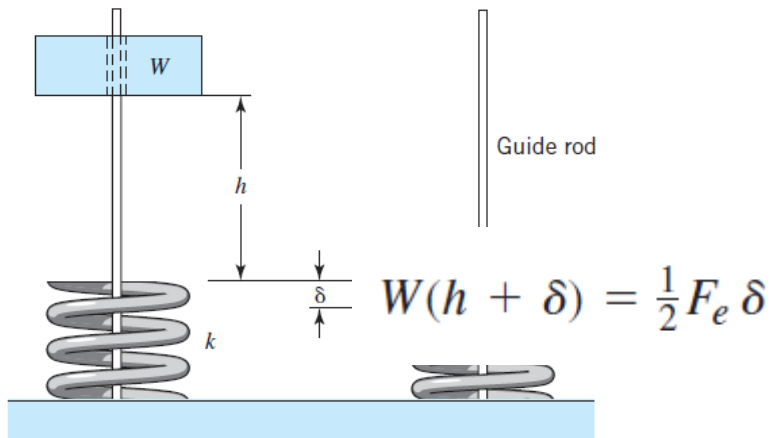


Considerações:

- A massa da estrutura (mola) é insignificante,
- As deformações dentro da própria massa são insignificante, e
- o amortecimento é insignificante



Tensão e deflexão causadas por impacto linear



$F_e =$ força estática equivalente

$$F_e = k \cdot \delta$$

$$\delta_{st} = \frac{W}{k} \quad \rightarrow \quad \delta_{st} = \text{deformação residual da mola após o equilíbrio}$$

$$F_e = \left(\frac{\delta}{\delta_{st}} \right) W$$

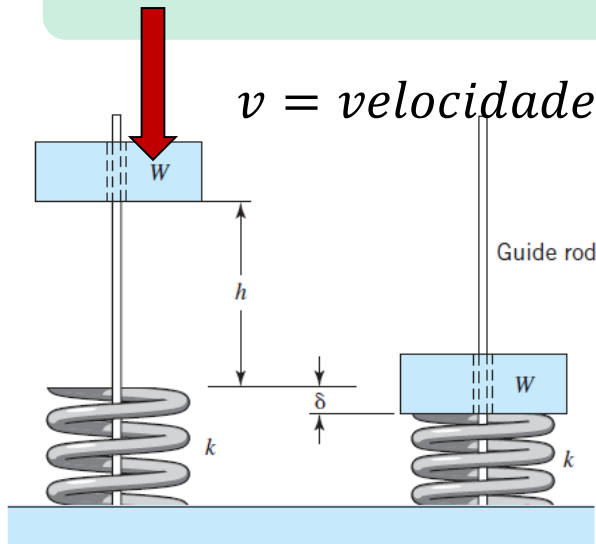
$$W(h + \delta) = \frac{1}{2} F_e \delta \quad E_{potencial} = E_{cinética}$$

$$F_e = W \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{\delta_{st}} \right)^2} \right) \quad \rightarrow \quad \text{fator de impacto}$$

$$\delta = \delta_{st} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{\delta_{st}} \right)^2} \right)$$



Tensão e deflexão causadas por impacto linear



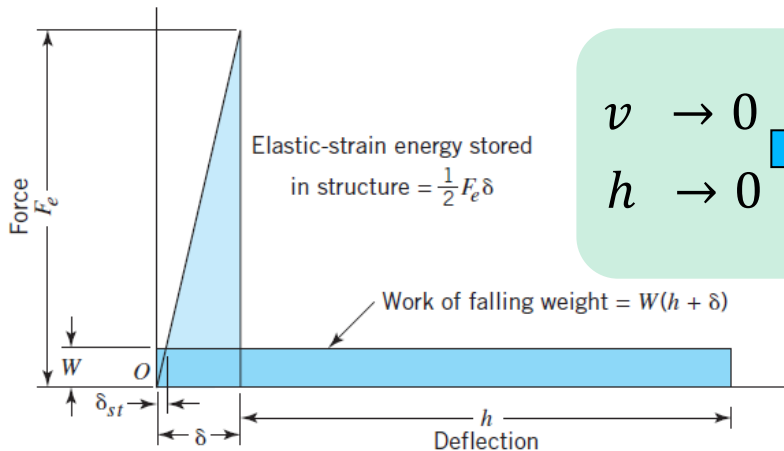
$v = \text{velocidade}$

$v^2 = 2gh \Rightarrow \text{energia pot\^e}ncial$

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

$$\delta = \delta_{st} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{v^2}{g \cdot \delta_{st}} \right)} \right)$$

$$F_e = W \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{v^2}{g \cdot \delta_{st}} \right)} \right)$$



$v \rightarrow 0$
 $h \rightarrow 0$



Suddenly applied load

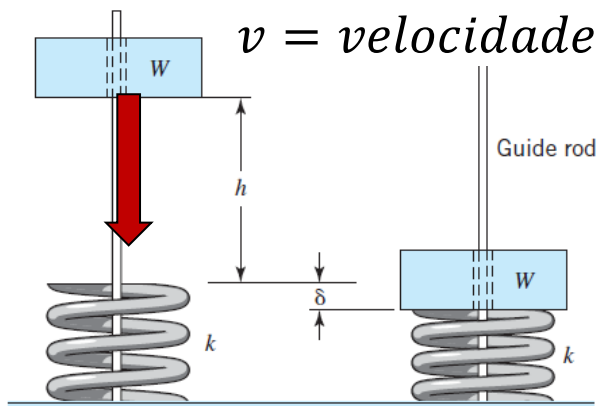


$$\left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{\delta_{st}} \right)} \right) = 2$$



Tensão e deflexão causadas por impacto linear

Em muitos problemas e engenharia envolvendo impacto, a deflexão pode ser desprezível



$$h \gg \delta_{st}$$

$$\delta = \delta_{st} \sqrt{\frac{2h}{\delta_{st}}}$$

$$\delta = \sqrt{2 \cdot h \cdot \delta_{st}}$$

$$\delta = \delta_{st} \sqrt{\frac{v^2}{g \cdot \delta_{st}}}$$

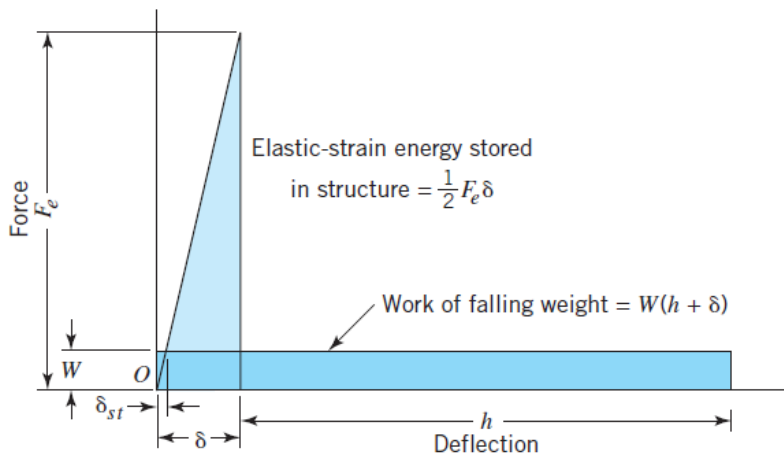
$$\delta = \sqrt{\frac{\delta_{st} \cdot v^2}{g}}$$

$$F_e = W \sqrt{\frac{2h}{\delta_{st}}}$$

$$F_e = \sqrt{2Whk}$$

$$F_e = \sqrt{\frac{v^2}{g \cdot \delta_{st}}}$$

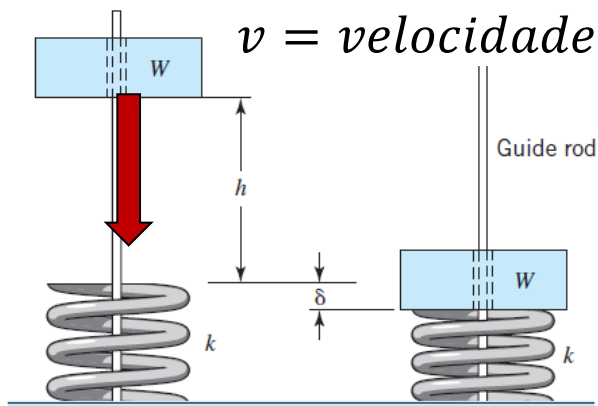
$$F_e = \sqrt{\frac{v^2 k \cdot W}{g}}$$





Tensão e deflexão causadas por impacto linear

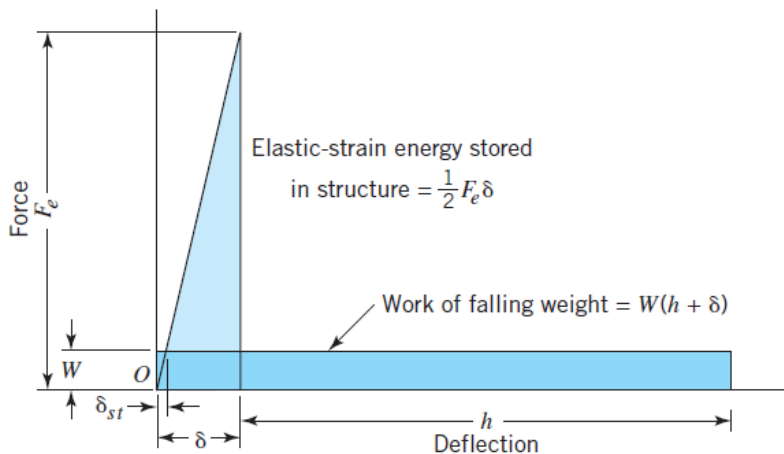
Considerando a gravidade



$$h \gg \delta_{sg}$$

$$\delta_{st} = \frac{W}{k} \quad \delta_{st} = \text{deformação residual da mola após o equilíbrio}$$

$$U = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{Wv^2}{2g} \quad U = \text{impact kinetic energy}$$



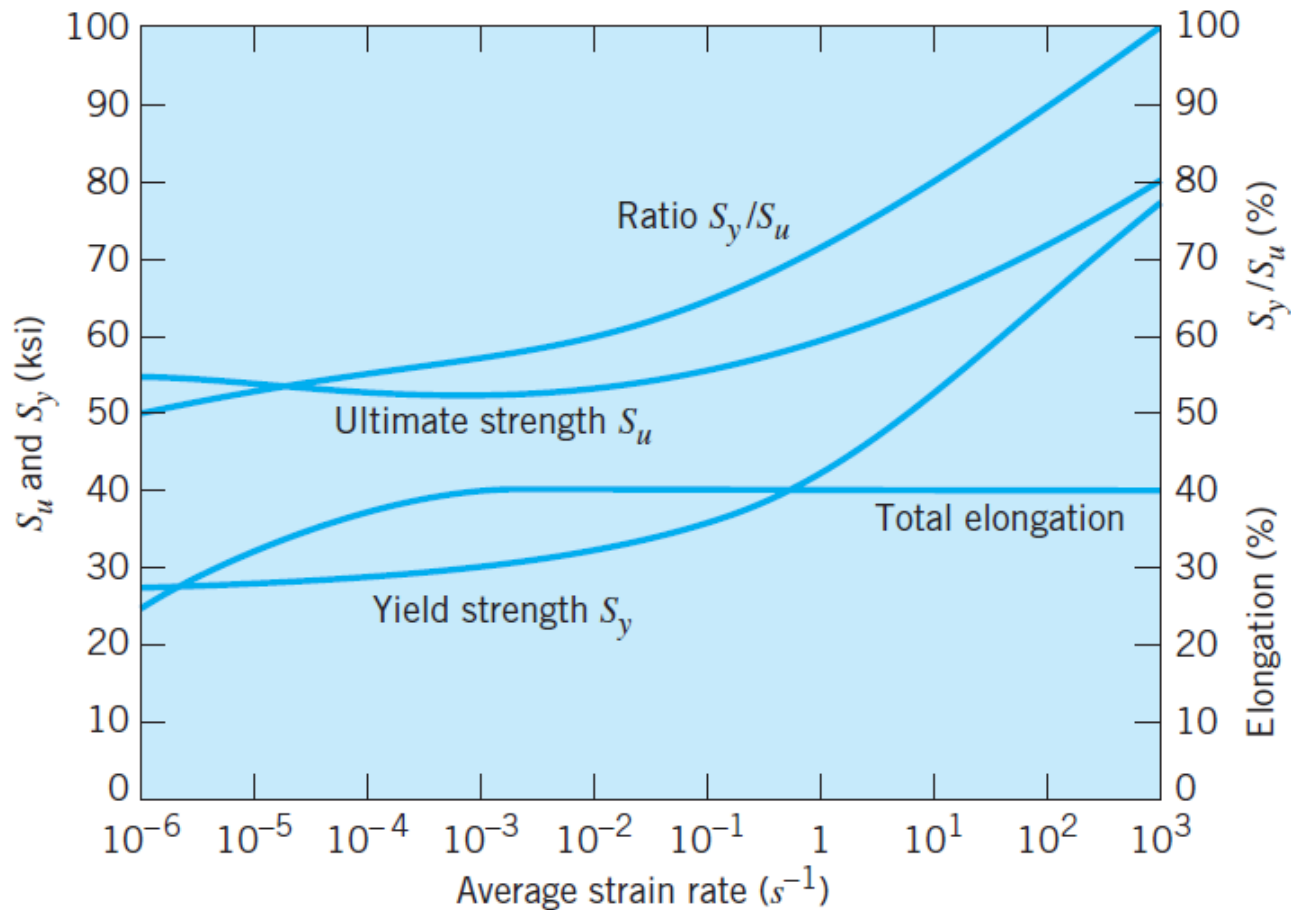
$$\delta = \sqrt{\frac{2U}{k}}$$

$$F_e = \sqrt{2Uk}$$



Comportamento dos materiais sob impacto

efeito da taxa de deformação nas propriedades de tração nos aços baixo carbono a temperatura ambiente





Comportamento dos materiais sob impacto

- As propriedades de resistência do material geralmente variam com a velocidade de aplicação da carga.
- Em geral, isso funciona favoravelmente porque tanto o rendimento quanto as forças finais tendem a aumentar com a velocidade de carregamento.
- O carregamento rápido tende a promover fratura frágil



Ensaaios de impacto

Os ensaios de impacto medem a capacidade de um material de absorver a aplicação repentina de uma carga sem quebrar.

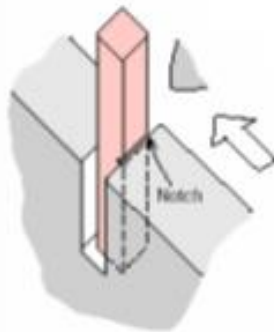
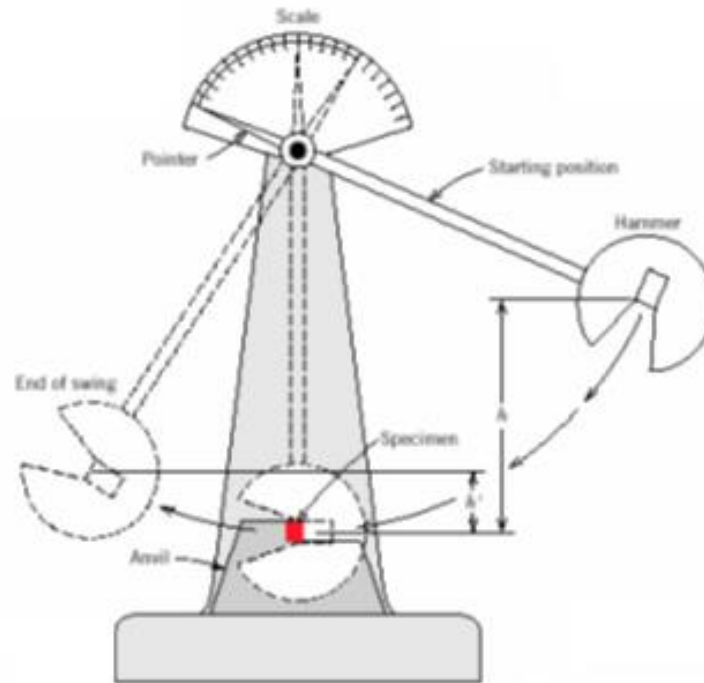
- Energia de impacto - a energia necessária para fraturar um corpo de prova padrão quando a carga é aplicada repentinamente.
- Resistência ao impacto - Energia absorvida por um material, geralmente entalhado, durante a fratura, nas condições do teste de impacto.
- Resistência à fratura - A resistência de um material à ruptura na presença de uma falha.



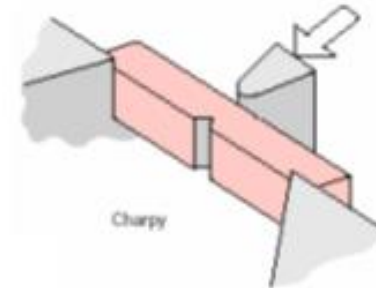
Ensaio de impacto

Izod

Charpy



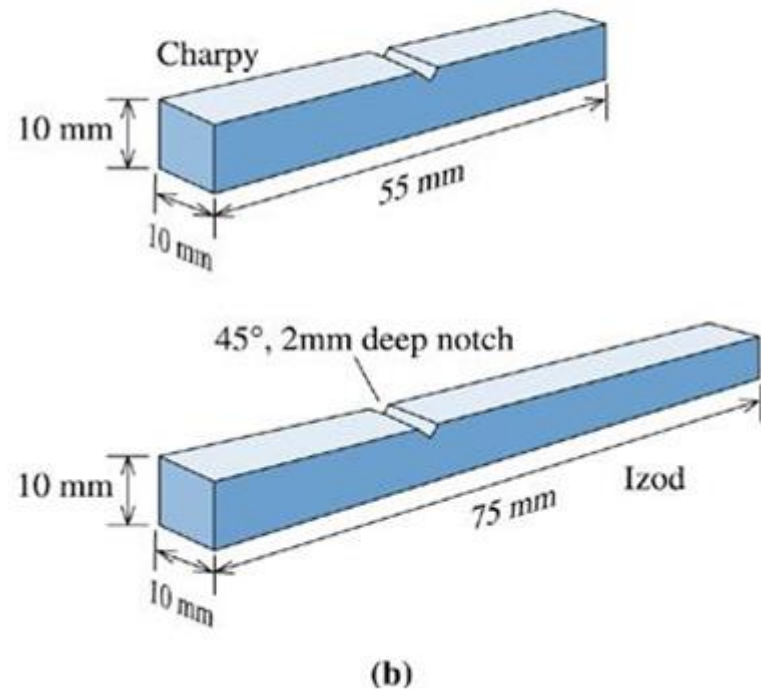
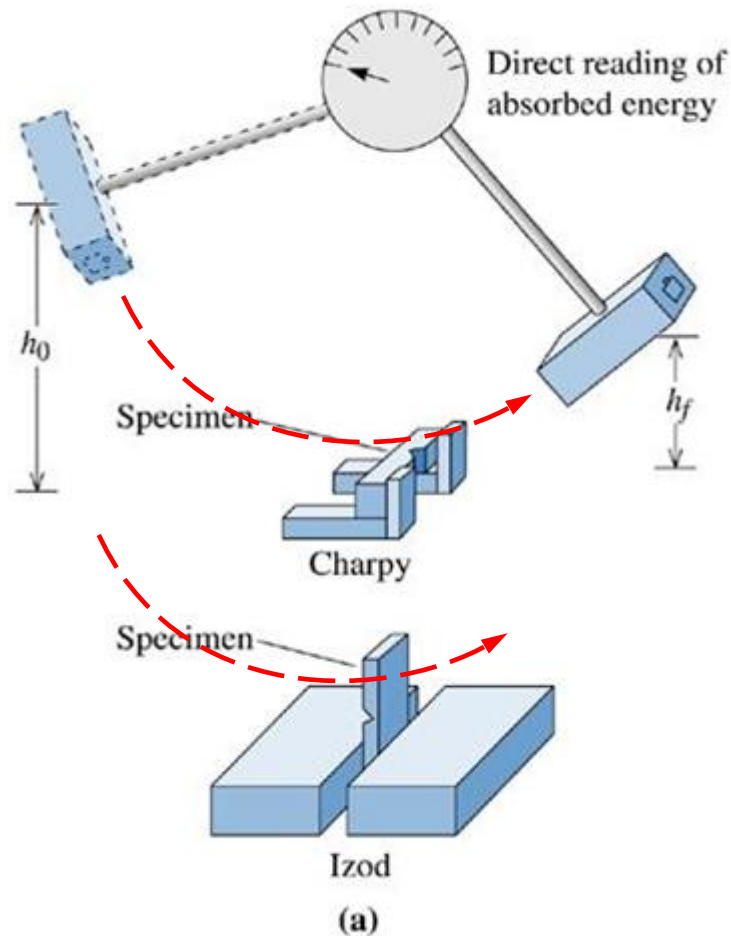
Izod



Charpy



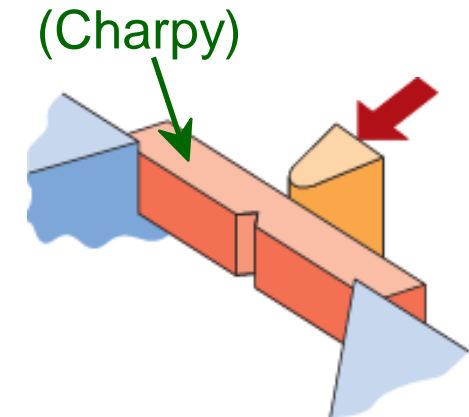
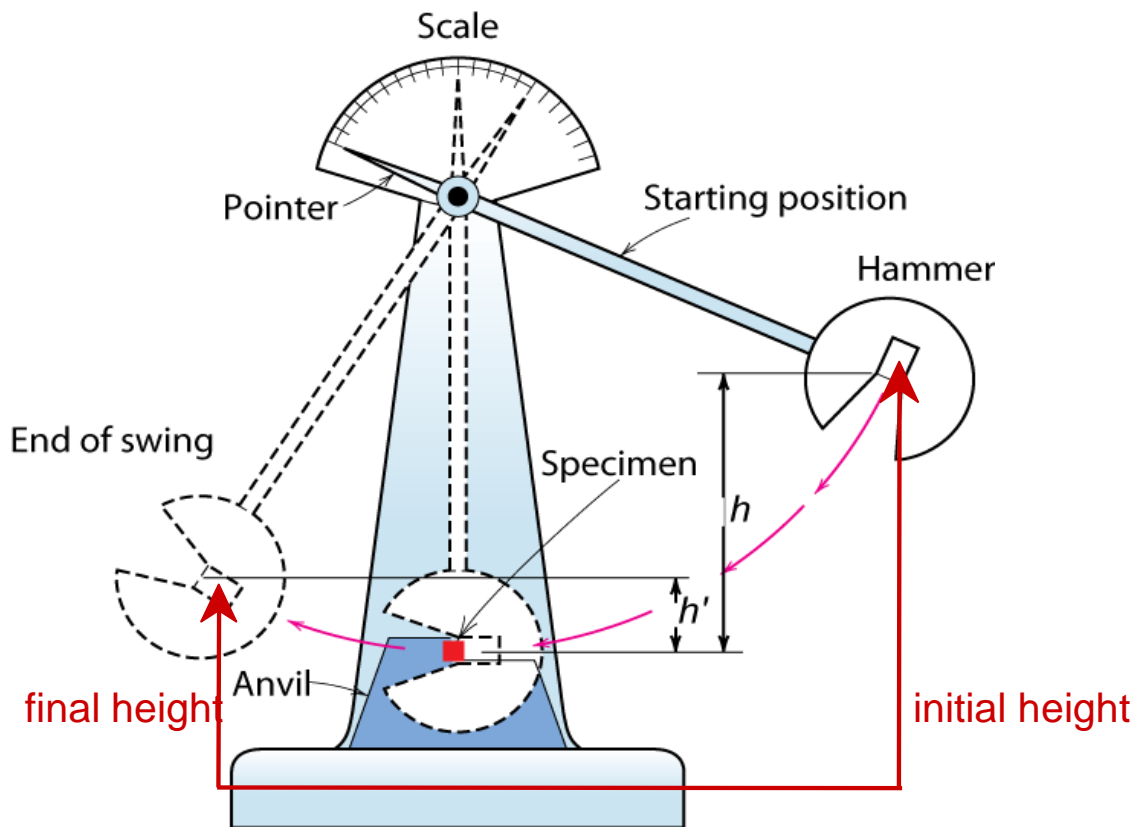
Ensaio de impacto





Ensaio de impacto

➔ <https://www.youtube.com/watch?v=tpGhqQvftAo&t=5s>





Propriedades obtidas no Ensaio de impacto

- Temperatura de transição dúctil para frágil (DBTT) - A temperatura abaixo da qual um material se comporta de maneira frágil em um teste de impacto.
- Sensibilidade ao entalhe - mede o efeito de um entalhe, arranhão ou outra imperfeição nas propriedades de um material, como resistência ou fadiga.

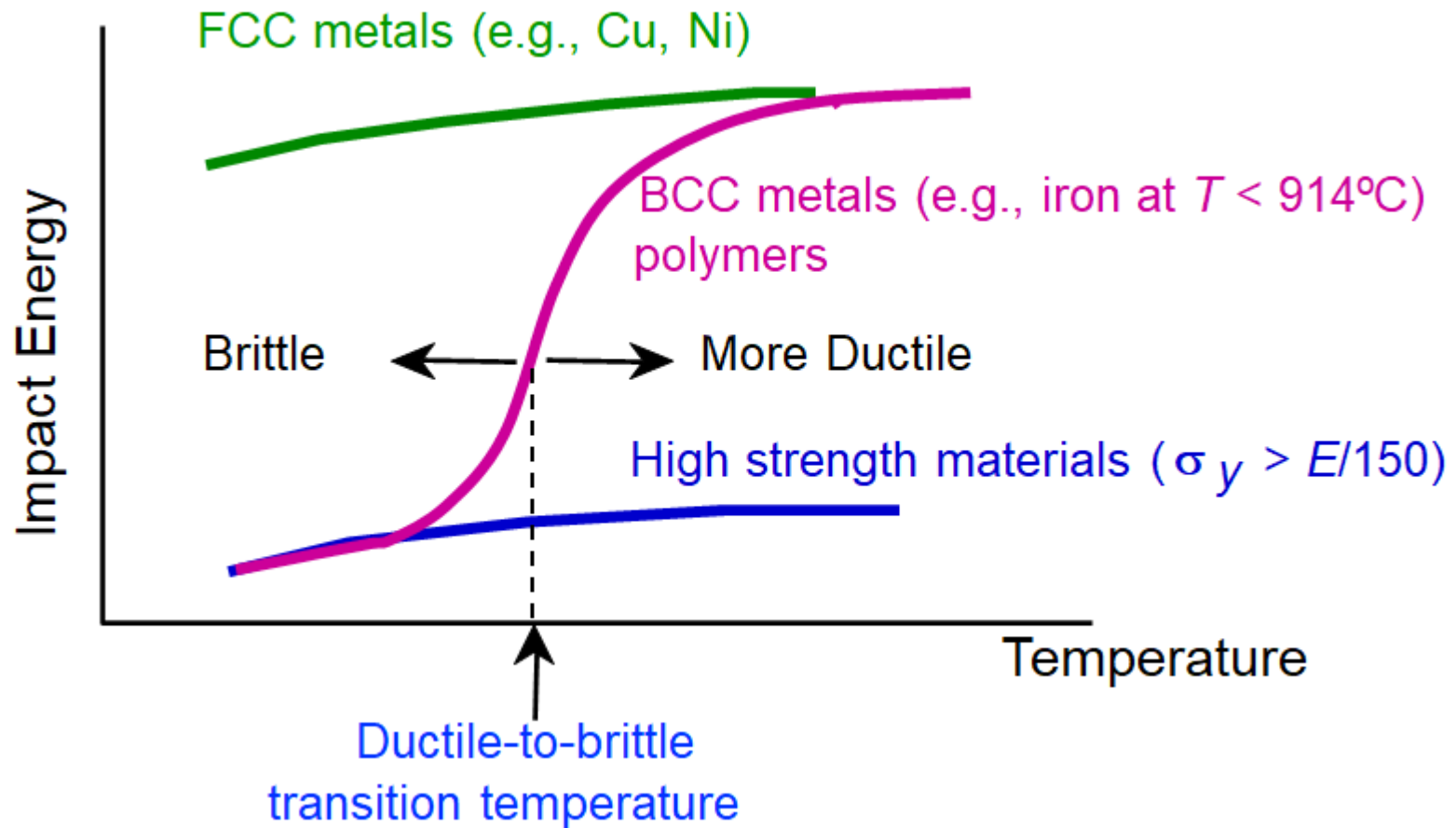


Temperatura de transição dúctil - frágil (DBTT)

- Temperatura de transição dúctil - frágil (DBTT) representa a temperatura onde um material dúctil começa a apresentar comportamento frágil
- A presença de elementos de liga geralmente aumenta a temperatura de transição dúctil para frágil.
Os metais com estrutura FCC permanecem dúcteis mesmo a temperaturas muito baixas.
- Em materiais cerâmicos essa transição ocorre em temperaturas muito mais altas do que para metais.



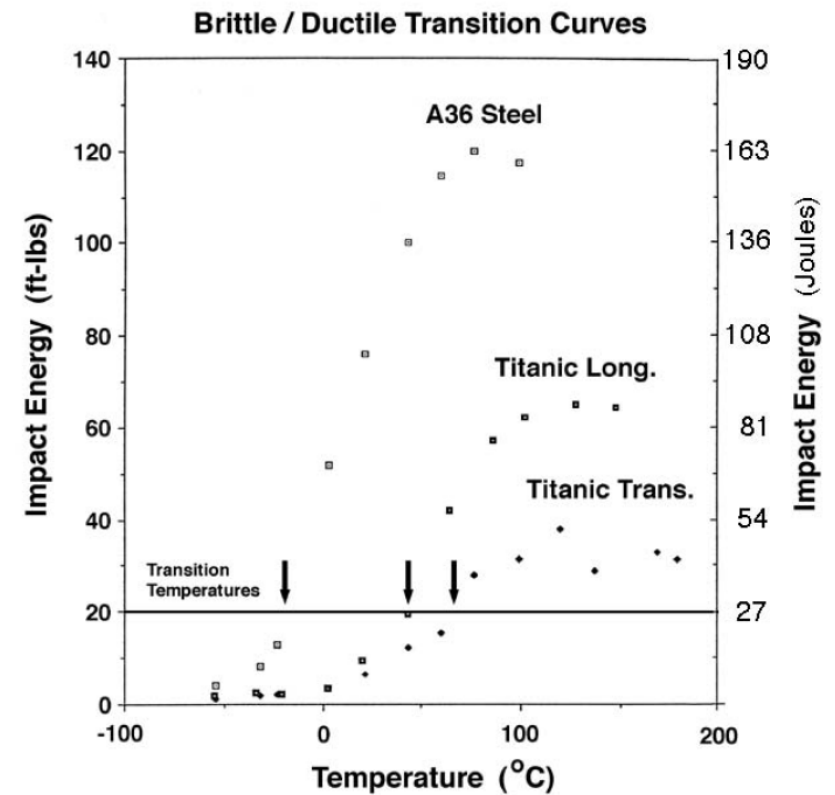
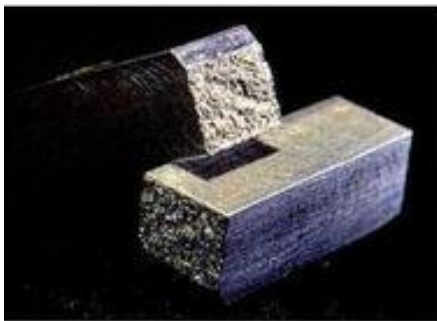
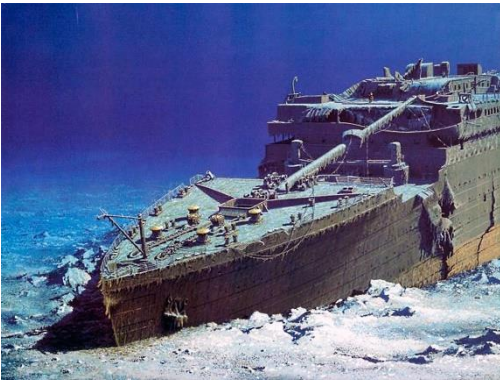
Temperatura de transição dúctil - frágil (DBTT)





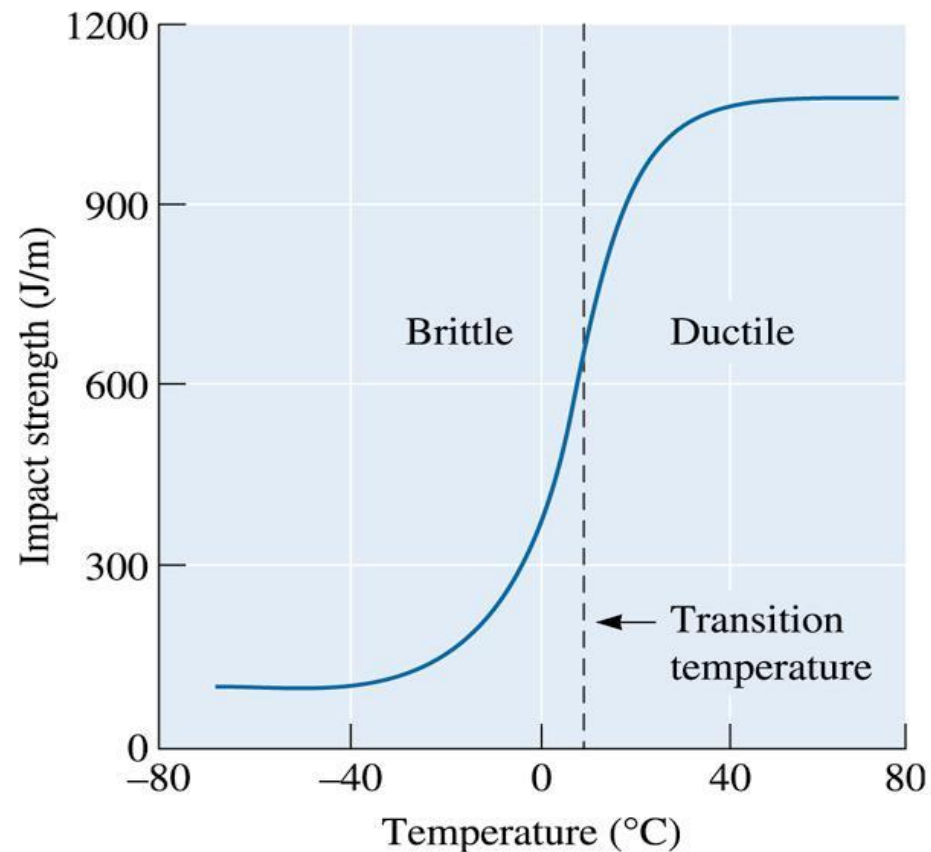
Temperatura de transição dúctil - frágil (DBTT)

Problema do Titanic





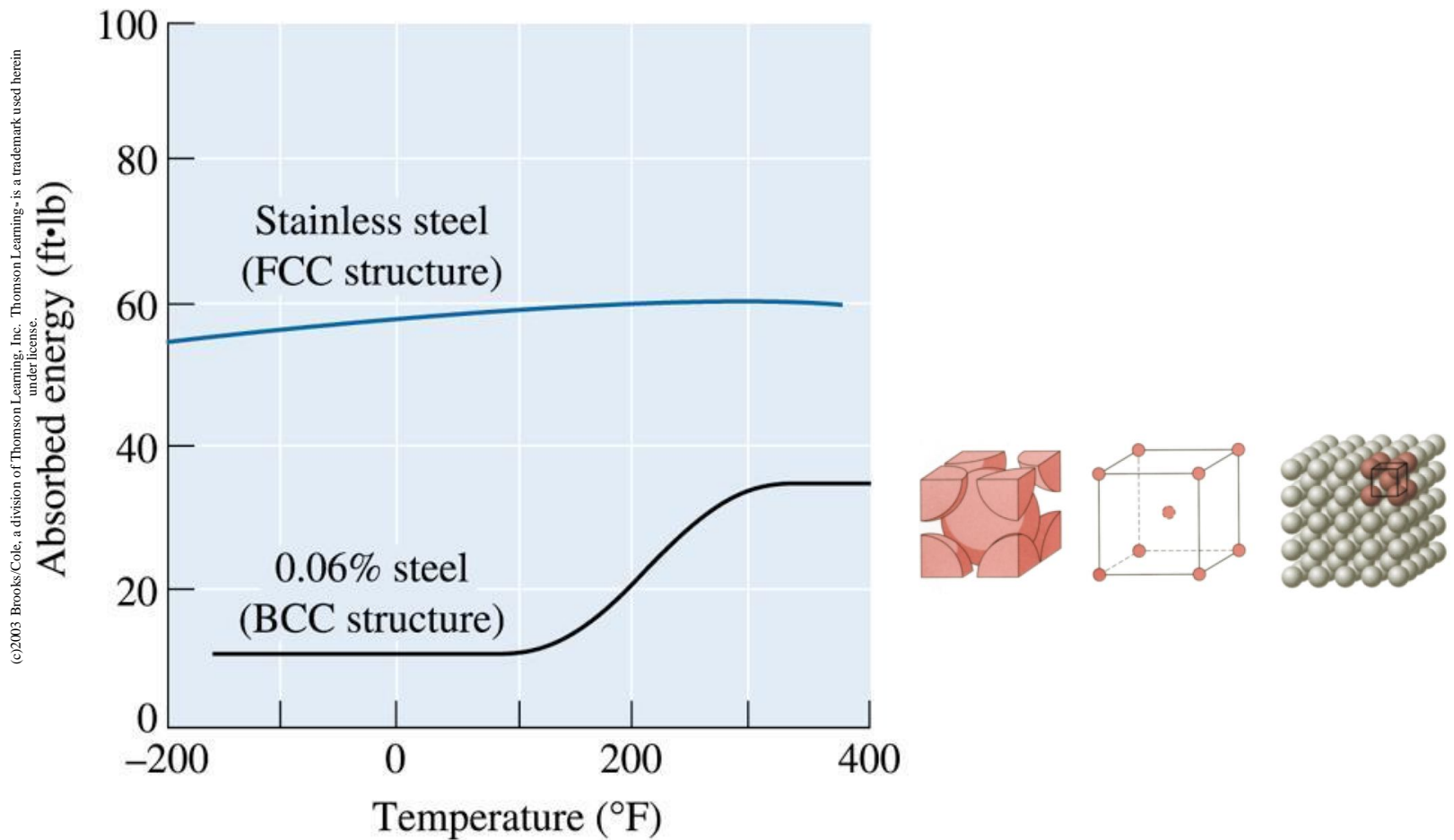
Temperatura de transição dúctil - frágil (DBTT)



Resultados para uma série de ensaios de impacto Izod para um polímero termoplástico (Nylon)



Temperatura de transição dúctil - frágil (DBTT)



Comparação dos resultados ensaios Charpi em aços inoxidáveis FCC e BCC



Temperatura de transição dúctil - frágil (DBTT)

Problema dos Liberty Class

‘ Build ships faster than the enemy could sink them’



4 years, 2751 ships

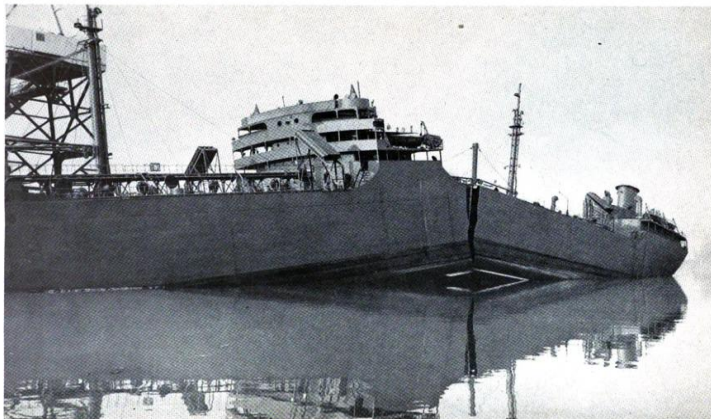
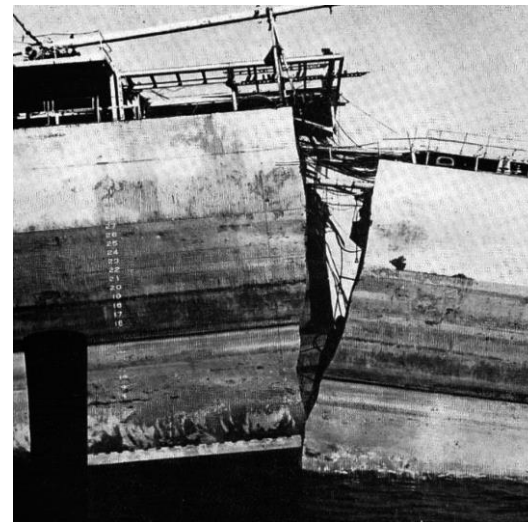
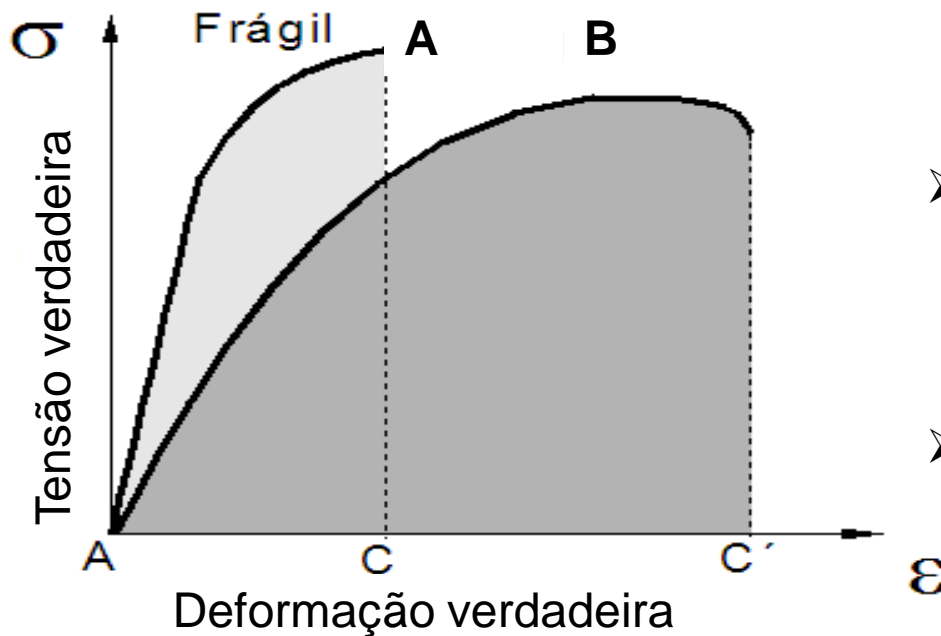


FIGURE 11.—View of *S. S. Schenck* after splitting in two at her outfitting dock.





Temperatura de transição dúctil - frágil (DBTT)

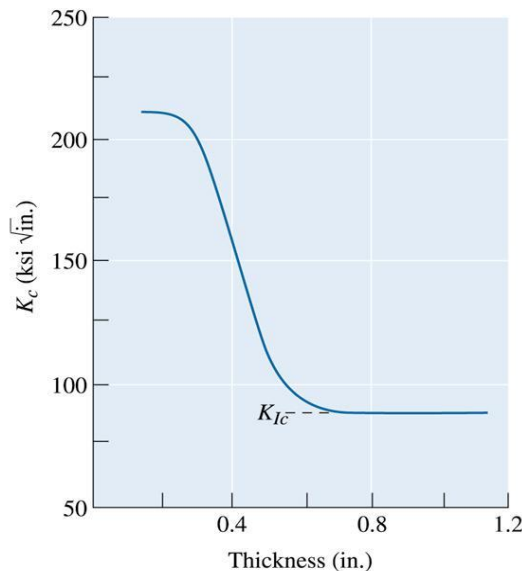


- A área contida dentro da curva tensão verdadeira deformação está relacionada à tenacidade à tração.
- Embora o material B tenha uma resistência ao escoamento inferior, ele absorve uma energia maior do que o material A.
- As energias dessas curvas podem não ser as mesmas obtidas a partir dos dados do teste de impacto



Resistência ao impacto e Resistência a fratura

- Mecânica da fratura - Estuda a capacidade de um material de resistir ao estresse na presença de uma falha.
- Resistência à fratura - Estuda resistência de um material à ruptura na presença de uma falha.



A tenacidade à fratura K_c de um aço com resistência ao escoamento de 3.000.000 psi diminui com o aumento da espessura, eventualmente igualando-se ao estado plano de deformação K_{Ic}



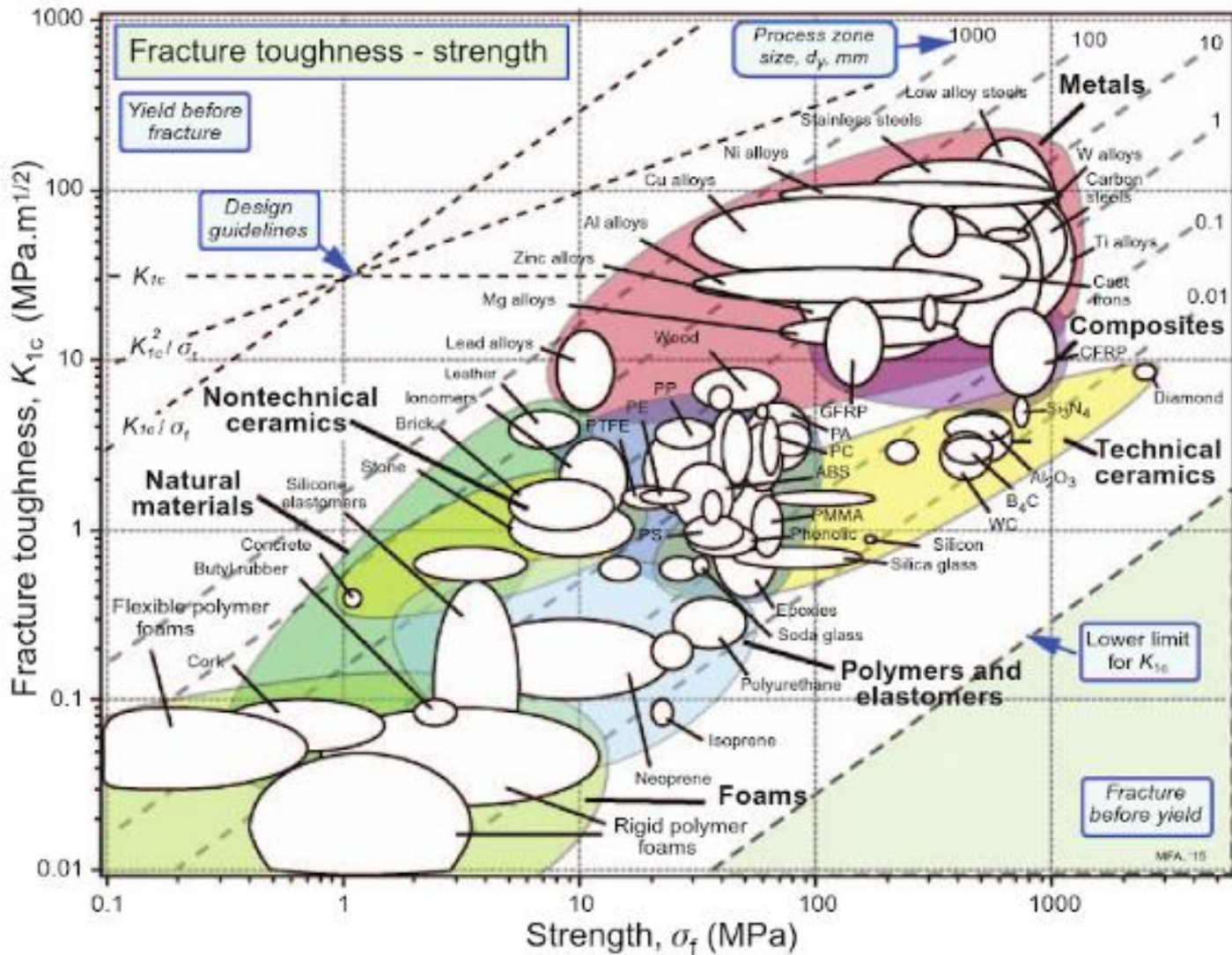
Resistência ao impacto e Resistência a fratura

TABLE 6-6 ■ *The plane strain fracture toughness K_{Ic} of selected materials*

Material	Fracture Toughness K_{Ic} (psi $\sqrt{\text{in.}}$)	Yield Strength or Ultimate Strength (for Brittle Solids) (psi)
Al-Cu alloy	22,000	66,000
	33,000	47,000
Ti-6% Al-4% V	50,000	130,000
	90,000	125,000
Ni-Cr steel	45,800	238,000
	80,000	206,000
Al ₂ O ₃	1,600	30,000
Si ₃ N ₄	4,500	80,000
Transformation toughened ZrO ₂	10,000	60,000
Si ₃ N ₄ -SiC composite	51,000	120,000
Polymethyl methacrylate polymer	900	4,000
Polycarbonate polymer	3,000	8,400

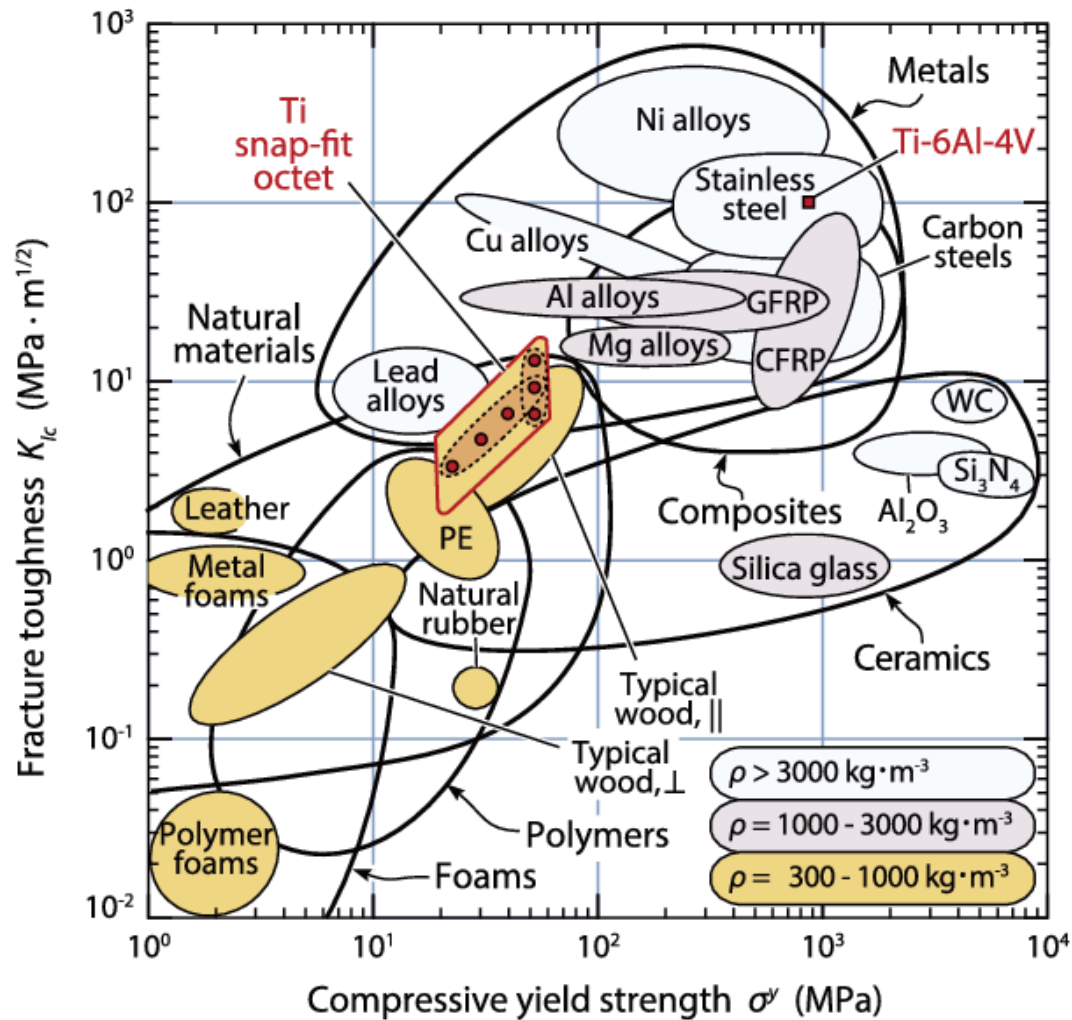


Resistência ao impacto e Resistência a fratura





Resistência ao impacto e Resistência a fratura



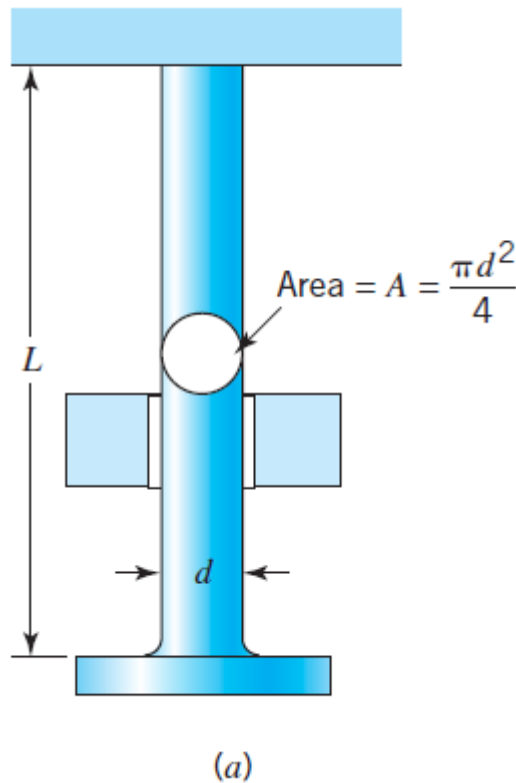


Barras sujeitas a compressão ou tração sob impacto

Caso particular de impacto linear

Considerações:

- A carga de impacto é aplicada concentricamente
- Os efeitos dos concentradores de tensões são desprezíveis



$$F_e = \sigma \cdot A$$

$$\sigma = \frac{F_e}{A}$$

$$K = \frac{AE}{L}$$

$$A = \frac{kL}{E}$$

$$F_e = \sqrt{2Uk}$$

$$\sigma = \frac{F_e E}{kL}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2UE}{AL}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2UE}{V}}$$

V = Volume



Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

Linear

δ - deflexão (m)

F_e - Força equivalente estática (N)

m - massa (kg)

k - rigidez de mola (N/m)

v - velocidade de impacto (m/s)

U - energia cinética (N.m)

Torcional

θ - deflexão (rad)

T_e - Torque equivalente estática (N.m)

I - momento de inércia (N.s².m)

K - rigidez de mola (N.m/rad)

ω - velocidade de impacto (rad/s)

U - energia cinética (N.m)



Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

Linear

Equação da força
estática equivalente em
função da energia

$$\delta = \sqrt{\frac{2U}{k}}$$

$$F_e = \sqrt{2Uk}$$

$$k = \frac{W}{\delta_{st}}$$

$$U = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\sigma = \frac{F_e E}{kL}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2UE}{V}}$$

Torcional

$$\theta = \sqrt{\frac{2U}{K}}$$

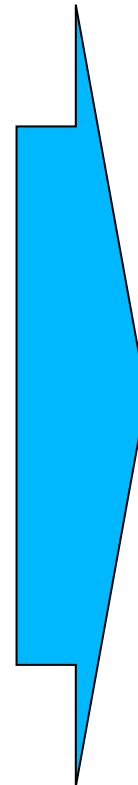
$$T_e = \sqrt{2Uk}$$

$$K = \frac{T}{\theta} = \frac{\pi d^4 G}{32L}$$

$$U = \frac{1}{2}I\omega^2$$

$$\tau = \frac{16T_e}{\pi d^3}$$

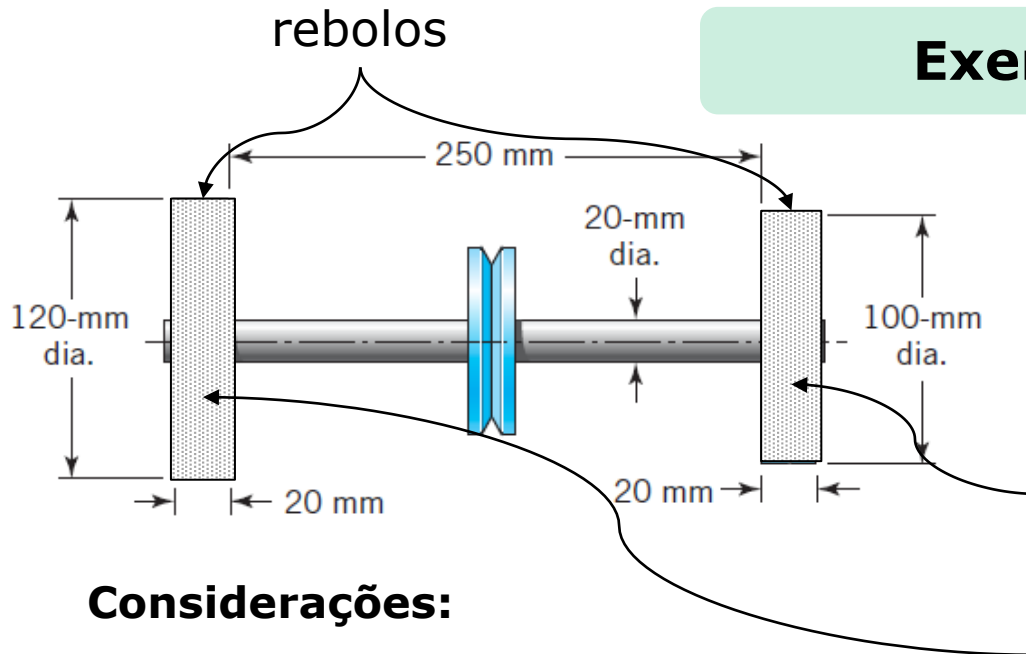
$$\tau = 2\sqrt{\frac{UG}{V}}$$





Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

Exemplo



$$\omega = 2400 \text{ rpm}$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$G_{\text{eixo}} = 79 \text{ Gpa (aço)}$$

Rebolo \varnothing 100 mm para
repentinamente

Rebolo \varnothing 120 mm tende
a continuar a girar

Considerações:

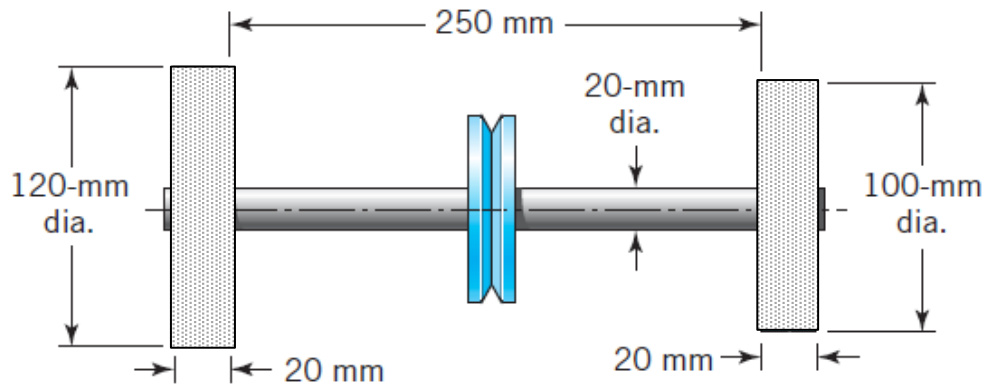
- O peso do eixo é desprezível
- O peso da polia é desprezível
- O eixo atua como uma mola torcional
- O eixo responde elasticamente ao impacto torcional
- As deflexões no rebolos são desprezíveis
- Os efeitos dos concentradores de tensões são desprezíveis

PMR-3307 ➤ O torque aplicado a polia é desprezado



Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

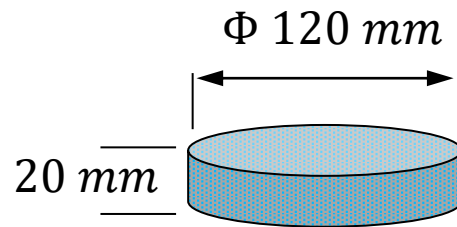
Exemplo



$$\omega = 2400 \text{ rpm}$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$G_{eixo} = 79 \text{ Gpa (aço)}$$



$$U = \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$I = \frac{1}{2} m r^2$$

$r = \text{raio do rebolo } 120 \text{ mm}$

$$m = V \rho$$

$$m = (\pi r^2 t) \rho$$

$t = \text{espessura do rebolo } 120 \text{ mm}$

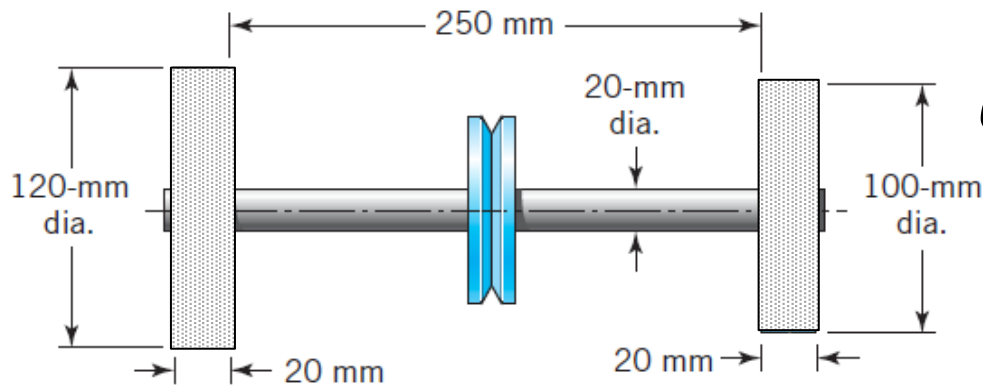
$$U = \frac{1}{4} \pi r^4 t \rho \omega^2$$

$$U = 25,72 \text{ Nm}$$



Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

Exemplo



$$\omega = 2400 \text{ rpm}$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$U = 25,72 \text{ Nm}$$
$$G_{\text{eixo}} = 79 \text{ Gpa (aço)}$$
$$\tau = 2 \sqrt{\frac{UG}{V}}$$

$V = \text{volume do eixo}$

$$\tau = 322 \text{ MPa}$$

$$\theta = \sqrt{\frac{2U}{K}}$$
$$K = \frac{T}{\theta} = \frac{\pi d^4 G}{32L}$$

$$\theta = \frac{\tau L}{r G} \rightarrow \theta = 5,7^\circ$$

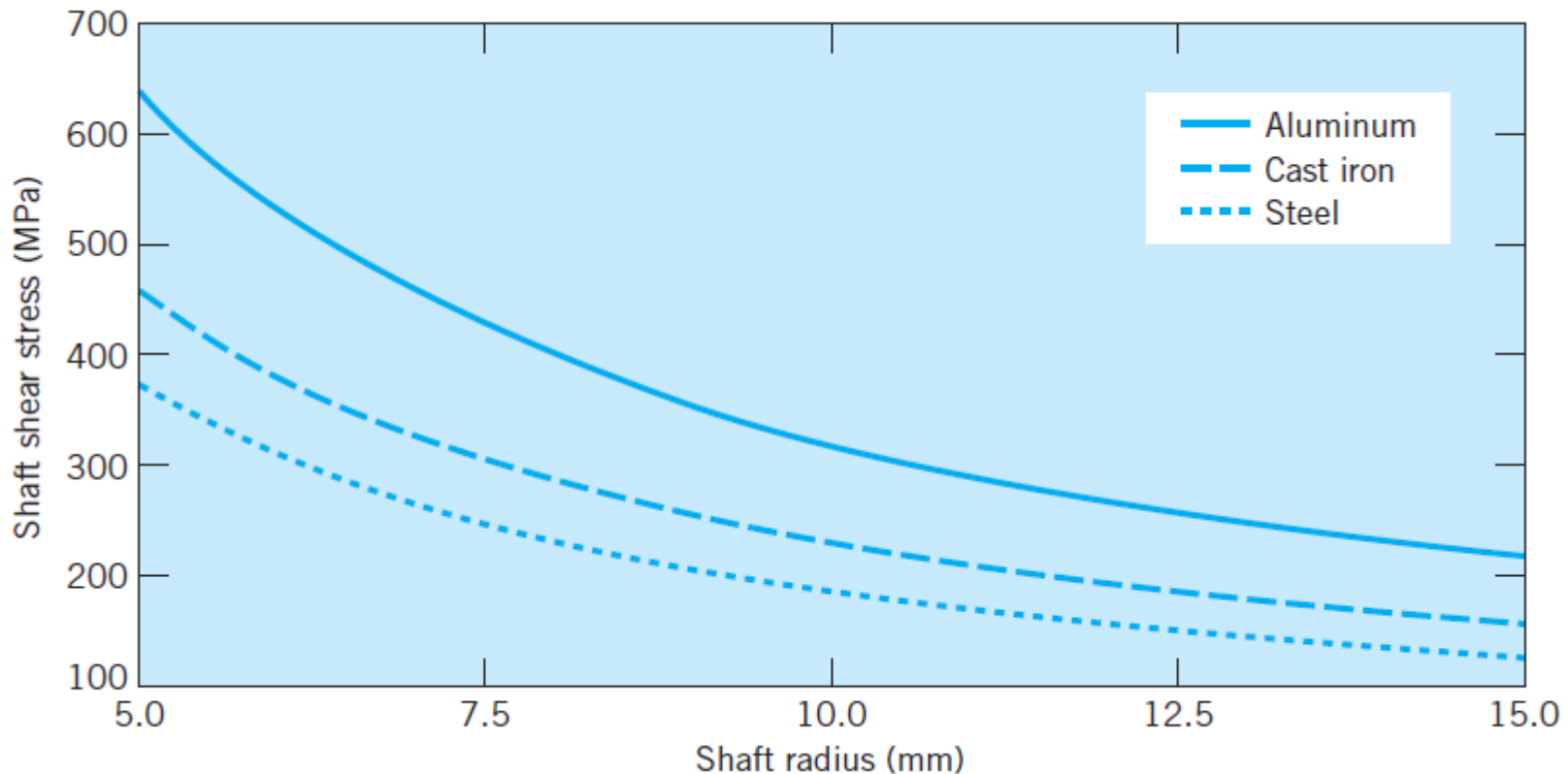


Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

efeito do raio do eixo, r , na tensão de cisalhamento do eixo

módulo de cisalhamento – G :

- aço (79 GPa),
- ferro fundido (41 GPa)
- alumínio (27 GPa)



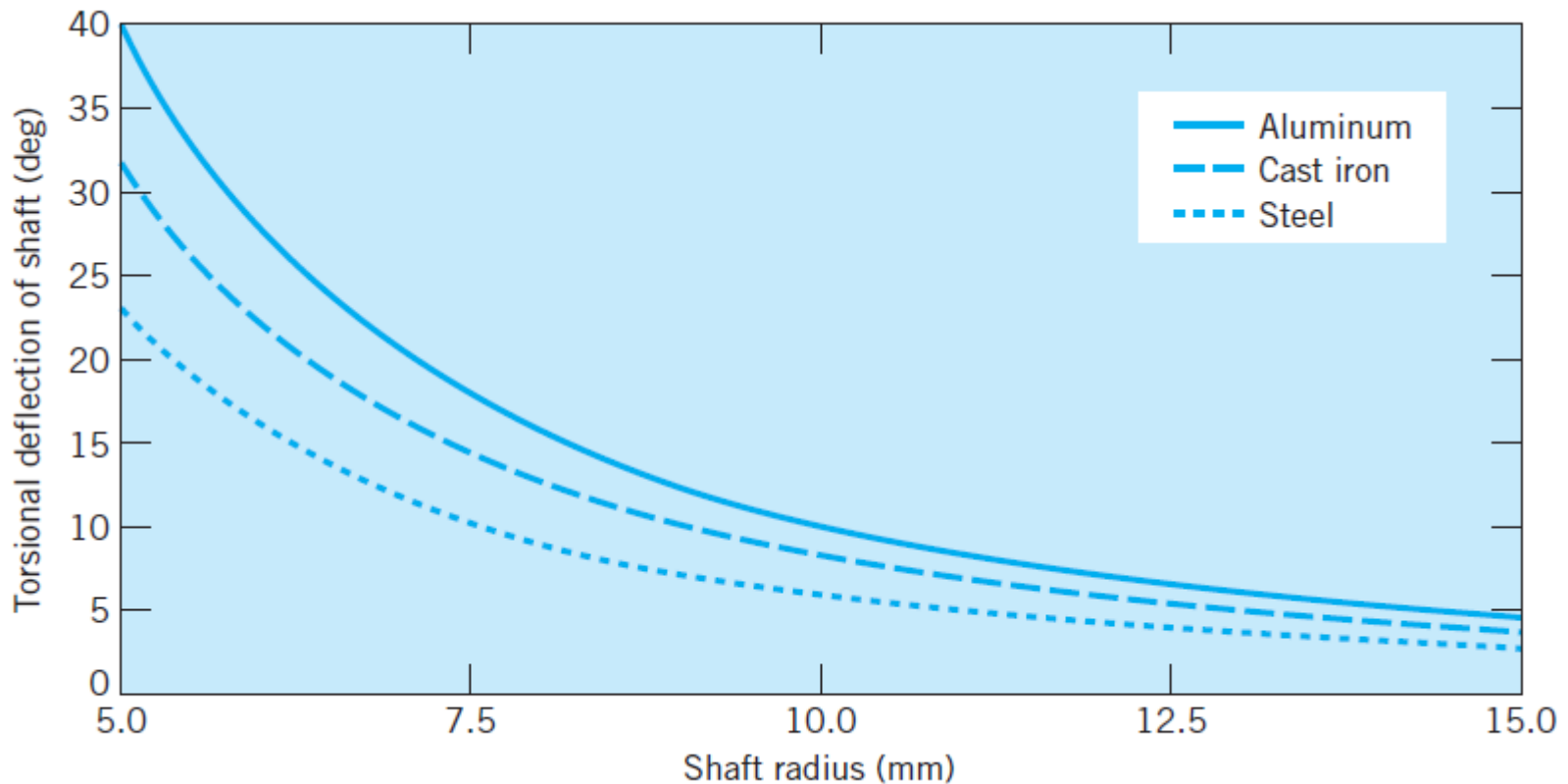


Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

efeito do raio do eixo, r , na tensão de cisalhamento do eixo

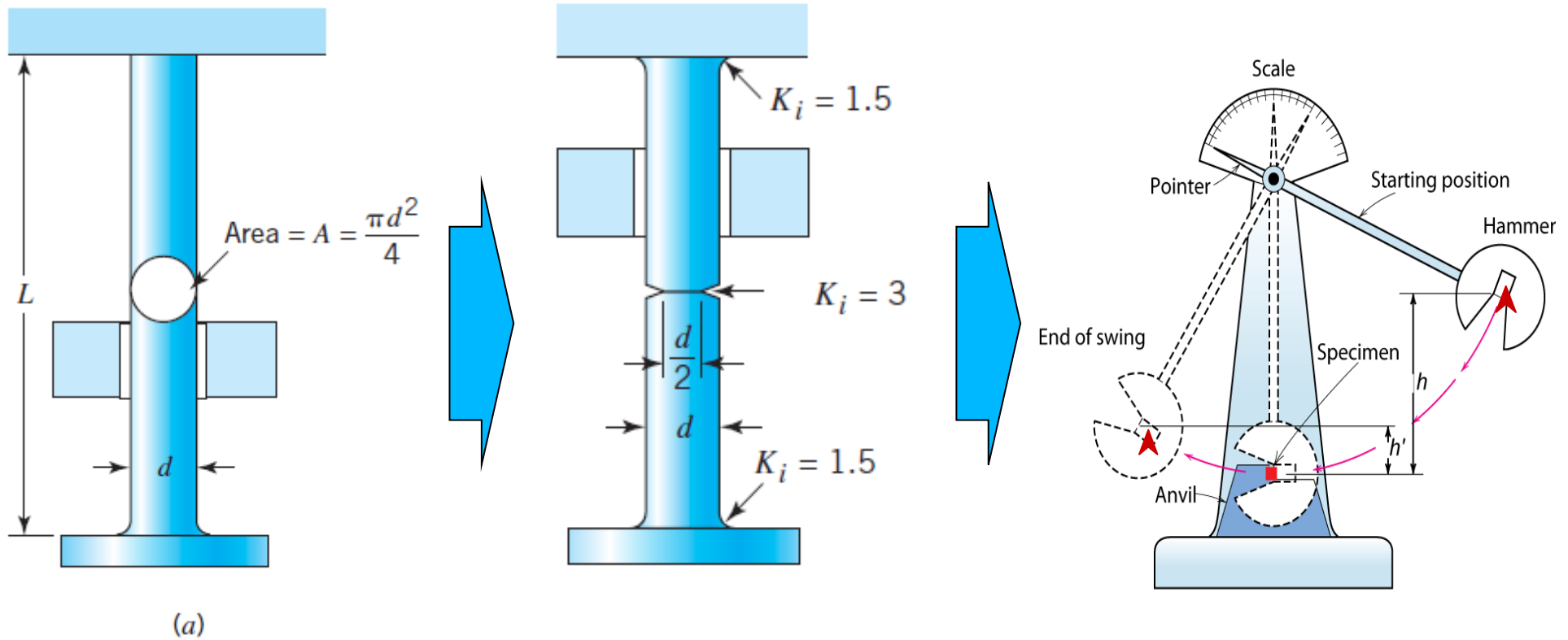
módulo de cisalhamento – G :

- aço (79 GPa),
- ferro fundido (41 GPa)
- alumínio (27 GPa)



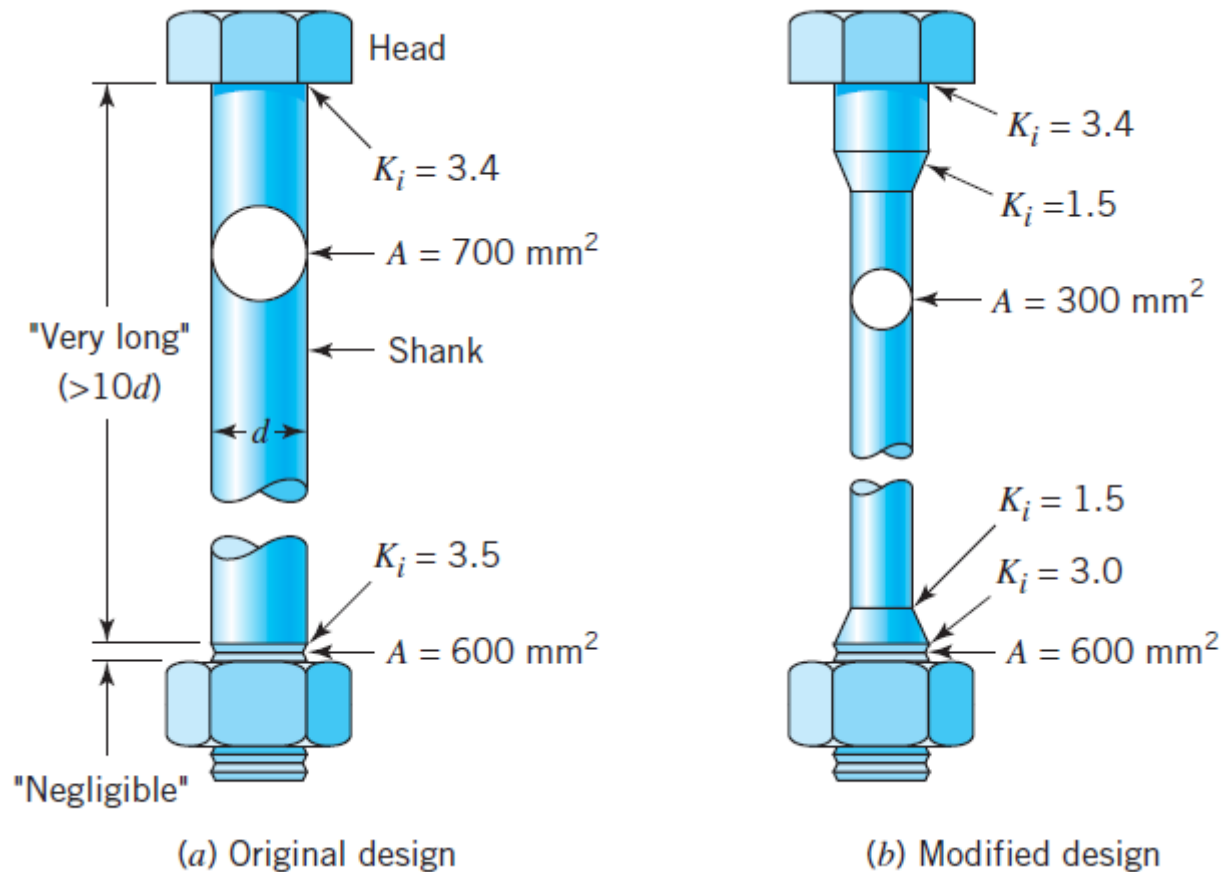


Efeito do entalhe





Reprojeto de Parafusos para impacto





Reprojeto de Parafusos para impacto

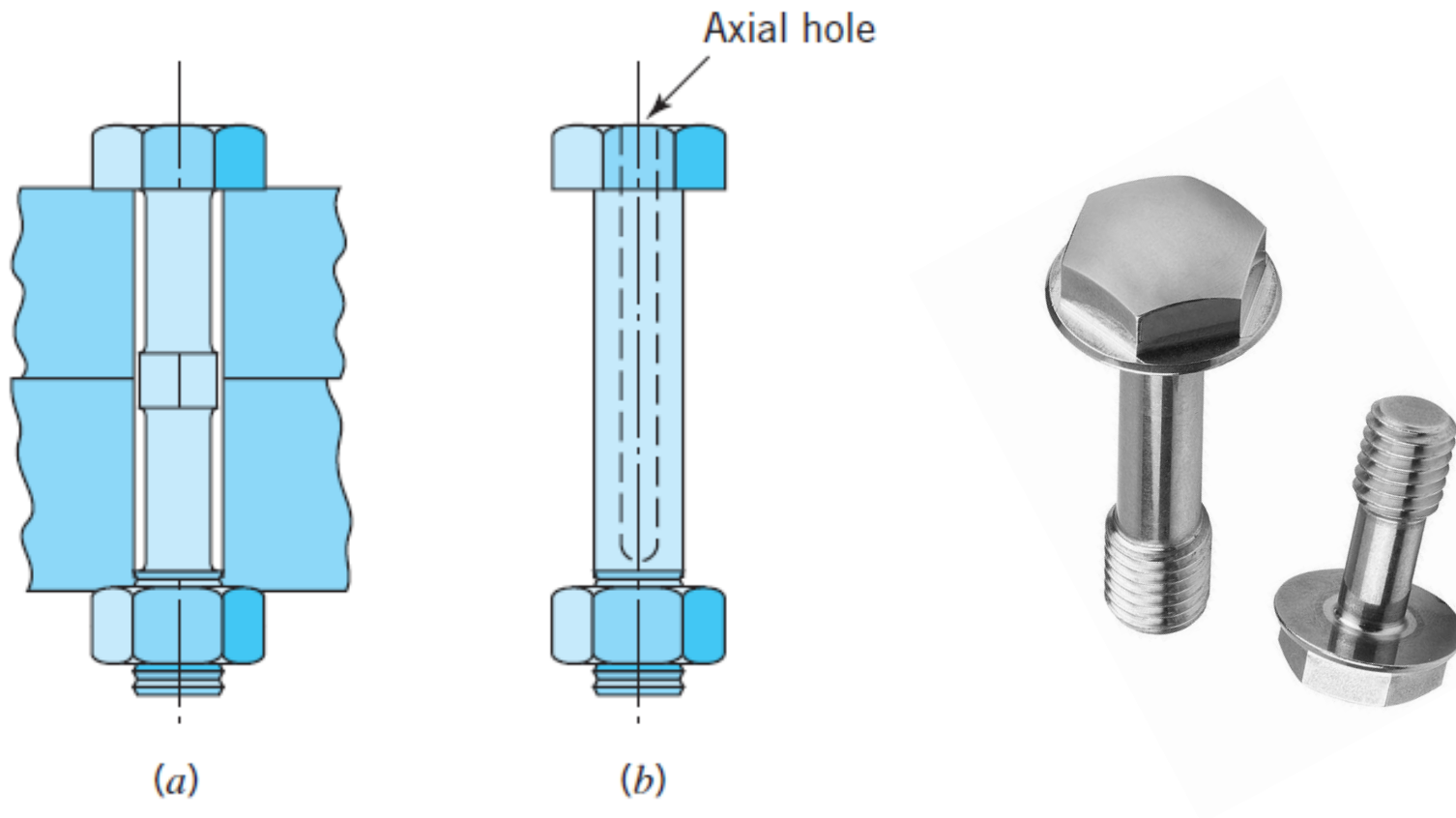
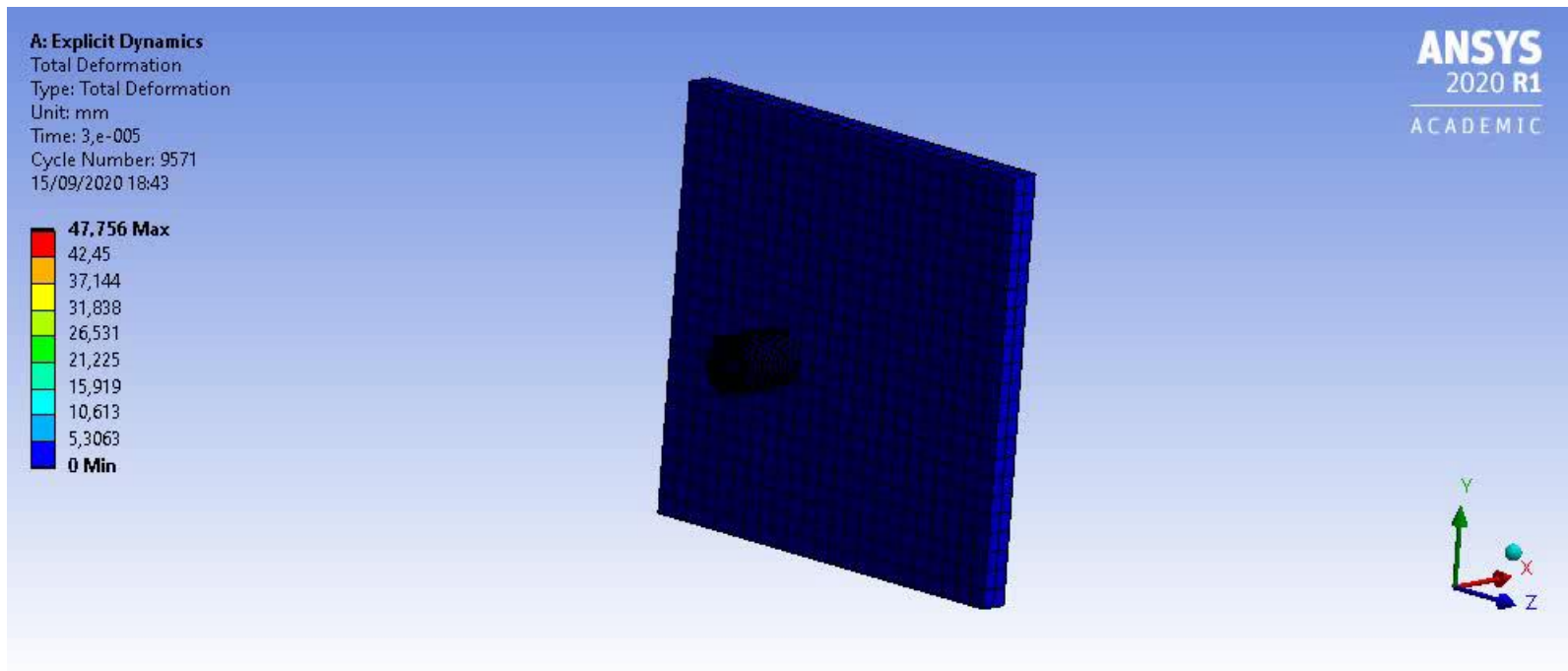


FIGURE 7.11

Bolts designed for energy absorption.



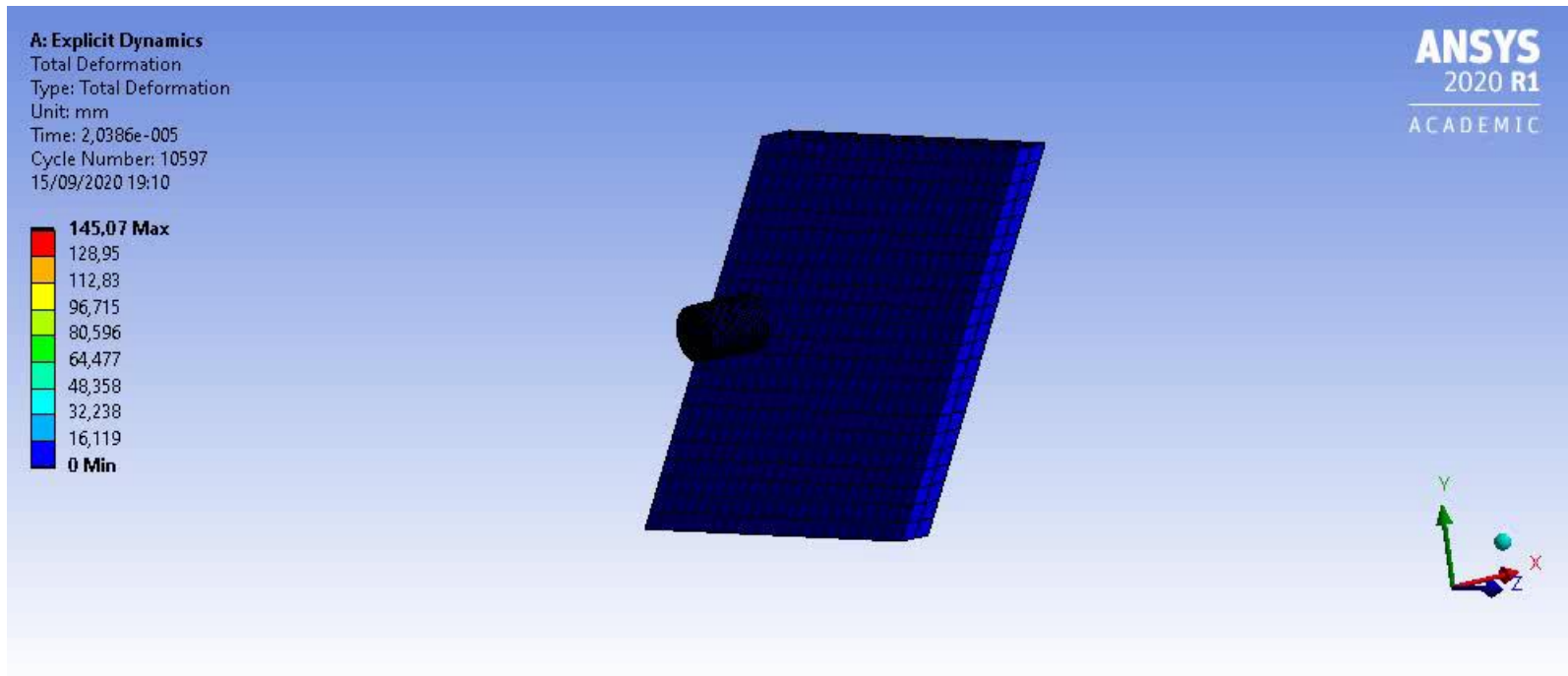
Simulação de impacto



Projétil: cilíndrico
Material: aço 1020
Placa: Alumínio 2024 T4
Ângulo de impacto: 0°
Velocidade: 1.500 m/s



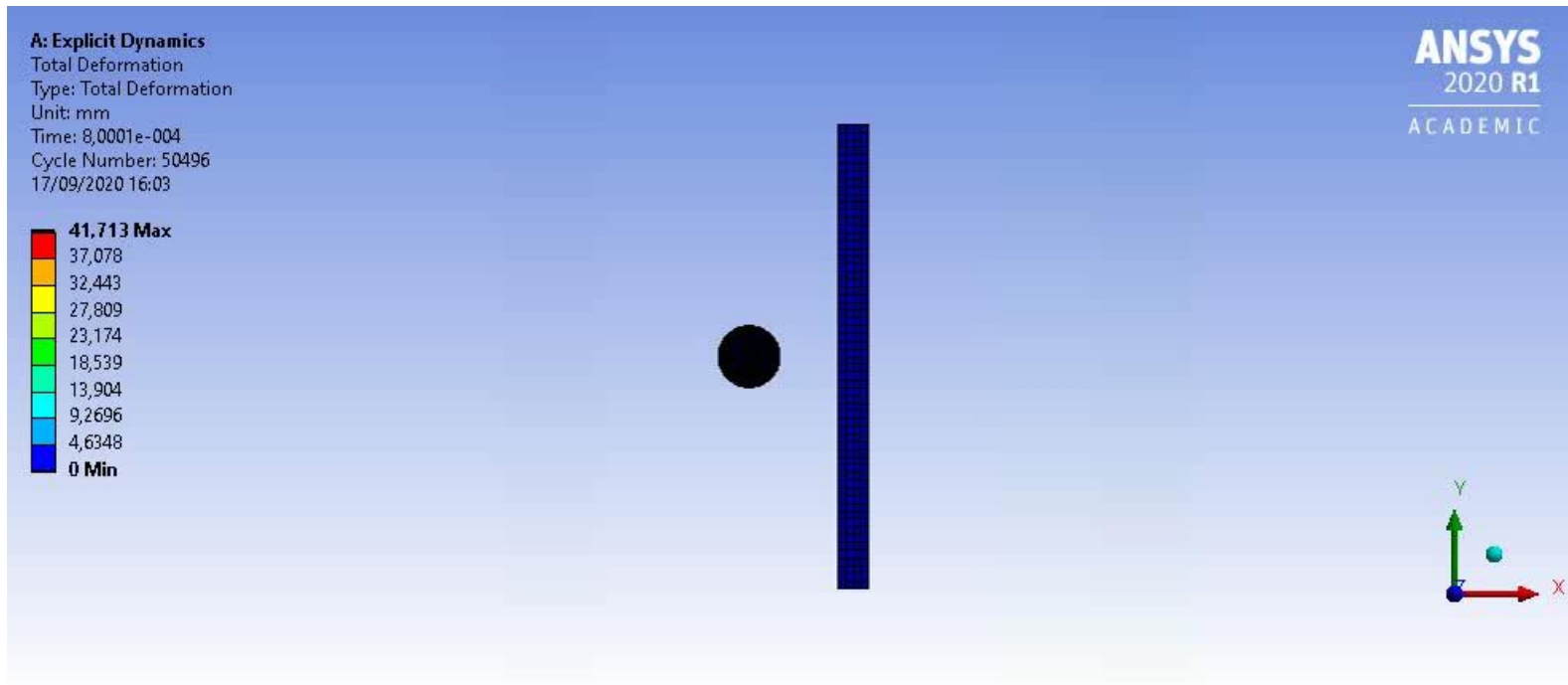
Simulação de impacto



Projétil: cilíndrico
Material: aço 1020
Placa: Alumínio 2024 T4
Ângulo de impacto: 60°
Velocidade: 1.500 m/s



Simulação de impacto



Projétil: esférico

Material: aço 4340

Placa: Alumínio 2024 T4

Ângulo de impacto: 0°

Velocidade: 50 m/s \sim 180km/h



FIM DA AULA