



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Elementos de Máquinas para Automação

PMR 3307 – 10

Introdução a Falha por Impacto – P2

2020.2



Cronograma de aulas

Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
18.08	3ª	A1	Introdução a disciplina Modelagem, carregamento e equilíbrio	RS
21.08	6ª	A2	Comportamento mecânico dos materiais	RS
25.08	3ª	A3	Composição de tensões Estado plano de tensões – Círculo de Mohr	RS
28.08	6ª	A4	Teorias de Falha: 1) Falha por deformação excessiva; fundamentos	RS
01.09	3ª	A5	Teorias de Falha: 2) Falha por deformação permanente: von Mises, Tresca, Coulomb-Mohr;	RS
04.09	6ª	A6	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 1	RS
08.09	3ª	A7	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 2	RS
11.09	6ª	A8	Teorias de Falha: 4) Falha por instabilidade: flambagem	RS
15.09	3ª	A9	Teorias de Falha: 5) Falha por impacto: Parte - 1	RS
18.09	6ª	A10	Teorias de Falha: 6) Falha por impacto: Parte - 2	RS
22.09	3ª	A11	Teorias de Falha: 6) Falha por desgaste excessivo	RS
25.09	6ª	A12	Fixações cubo-eixo	NG
29.09	3ª	A13	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Rebites	NG
02.10	6ª	A14	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 1	NG
06.10	3ª	A15	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 2	NG
09.10	6ª	A16	Especificação e dimensionamento de elementos de transmissão: Fusos	NG
13.10	3ª	A17	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 1	NG
16.10	6ª	A18	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 2	NG
20.10	3ª	A19	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 1	NG
23.10	6ª	A20	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 2	NG
27.10	3ª	A21	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Freios e embreagens	NG
30.10	6ª	A22	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Correias e Correntes	NG
03.11	3ª	A23	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 1	RS
06.11	6ª	A24	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 2	RS
10.11	3ª	A25	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 3	RS
13.11	6ª	A26	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 4	RS
17.11	3ª	---	Feriado municipal – Consciência Negra	
20.11	6ª	A27	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias de escorregamento	RS
24.11	3ª	A28	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias lineares	RS
27.11	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	RS
01.12	3ª	A30	Apresentação dos trabalhos	
04.12	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	
08.12	3ª	A30		
11.12	6ª	A31		
14.12	2ª		Encerramento do semestre 2020-2	



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



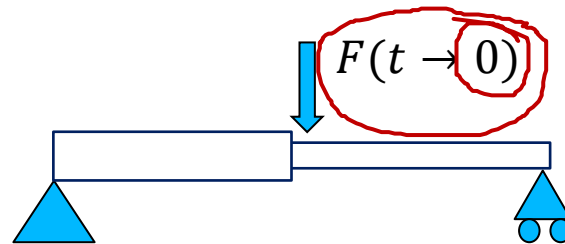
Este tópico está baseado no Livro: *Fundamentals of Machine Component Design*, Chapter 7 Impact, 288, ROBERT C. JUVINALL, KURT M. MARSHEK, Ed. JOHN WILEY & SONS, INC. 2011



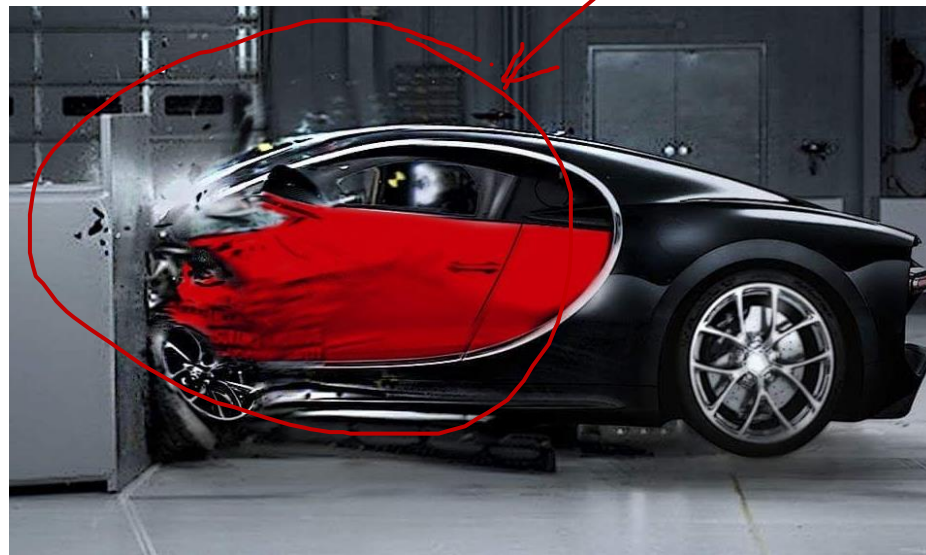
RELEMBRANDO!

Projeto para impactos

Condição impacto



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





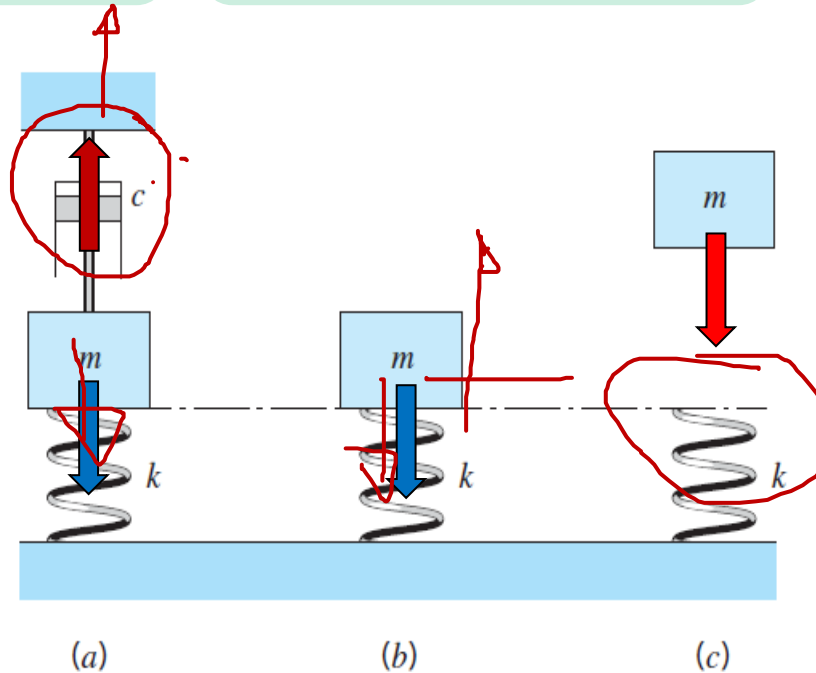
RELEMBRANDO!

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



RELEMBRANDO!

Cargas de Impacto

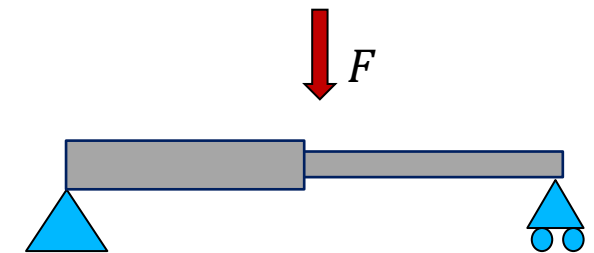
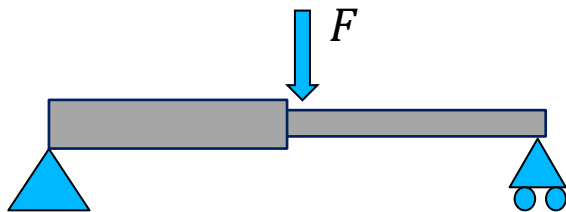
Compressivas

Trativas

Torcionais

Flexivas

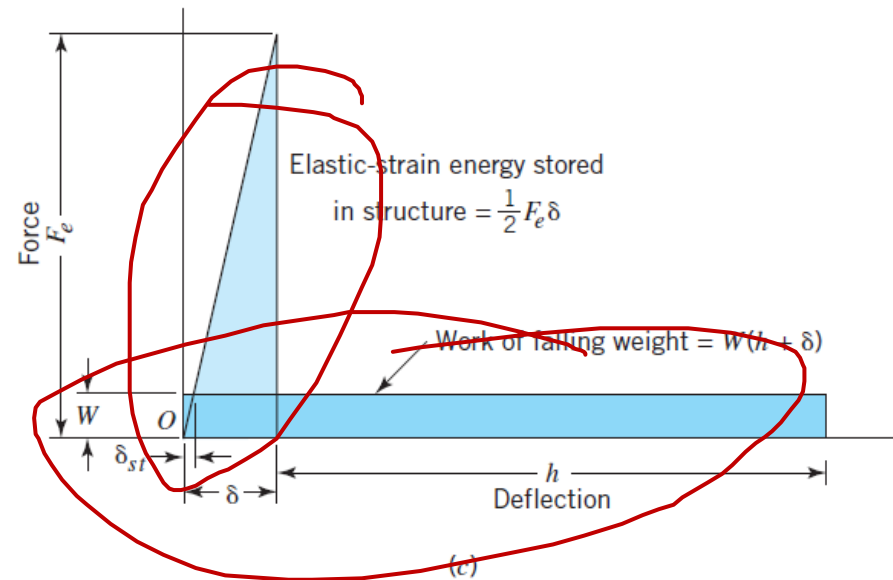
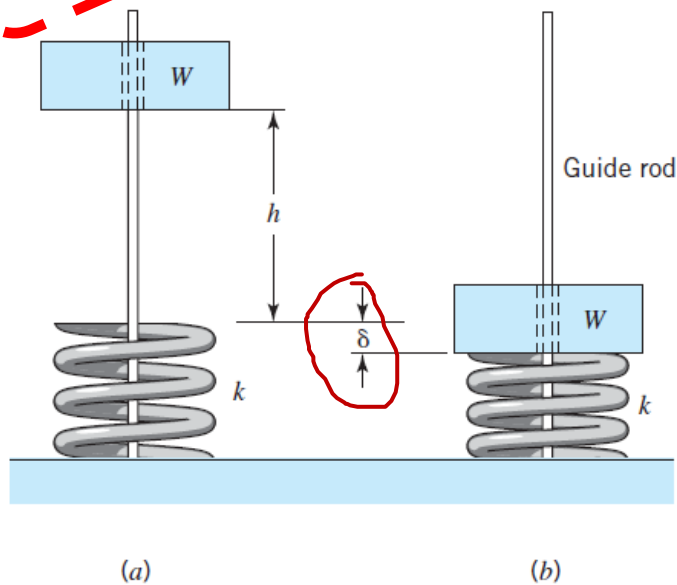
Combinadas



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.



RELEMBRANDO! Tensão e deflexão causadas por impacto linear



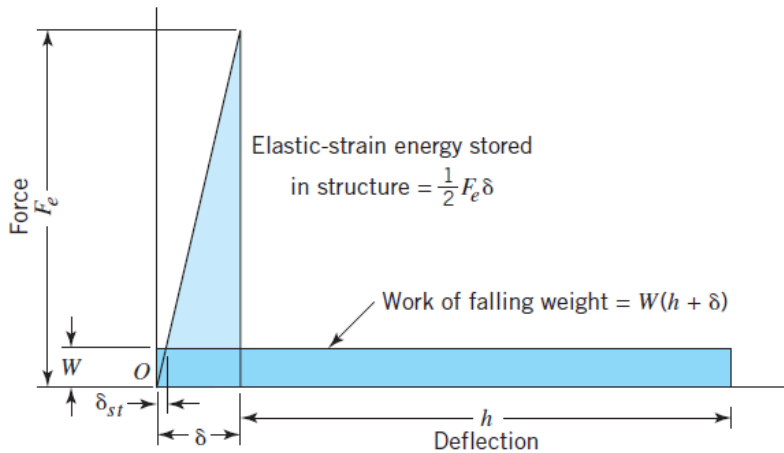
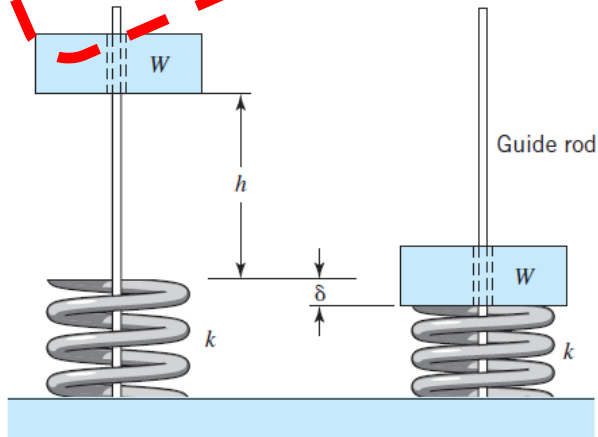
Considerações:

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



RELEMBRANDO!

Tensão e deflexão causadas por impacto linear



$F_e = \text{força estática equivalente}$

$$F_e = k \cdot \delta$$

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

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

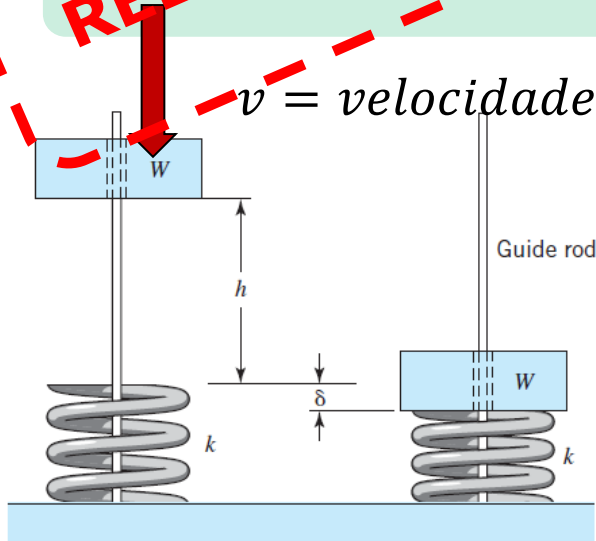
$$F_e = W \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{\delta_{st}} \right)^2} \right)$$

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



RELEMBRANDO!

Tensão e deflexão causadas por impacto linear



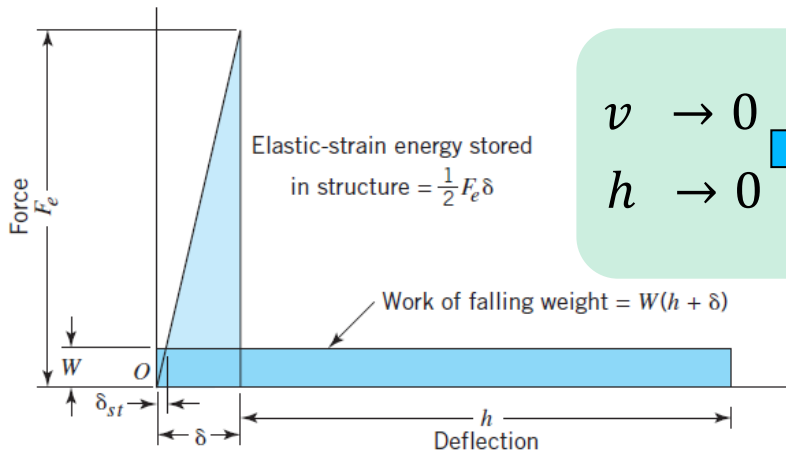
$v = \text{velocidade}$

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

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

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

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



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

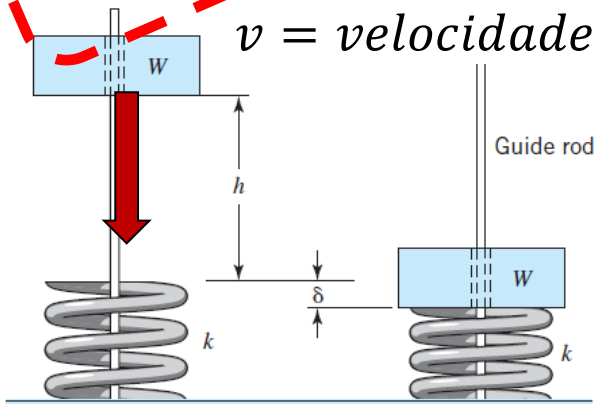
Suddenly applied load

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



RELEMBRANDO!

Tensão e deflexão causadas por impacto linear



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

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

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

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

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

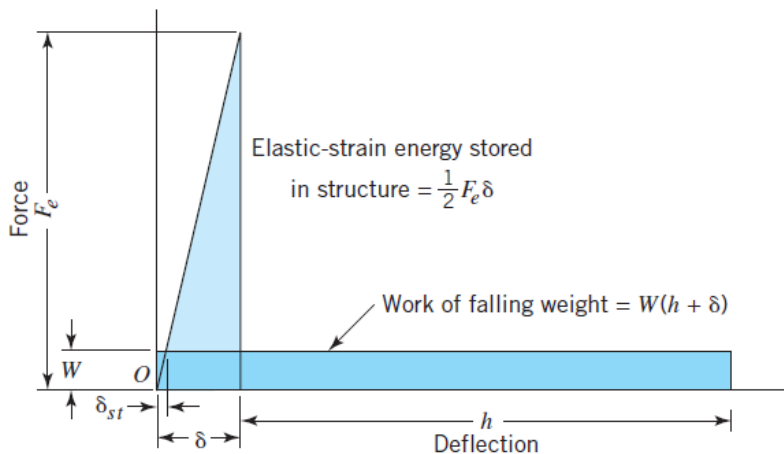
$$\delta = \sqrt{\frac{\delta_{st} \cdot v^2}{g}}$$

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

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

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

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





RELEMBRANDO!

Tensão e deflexão causadas por impacto linear

Considerando a gravidade

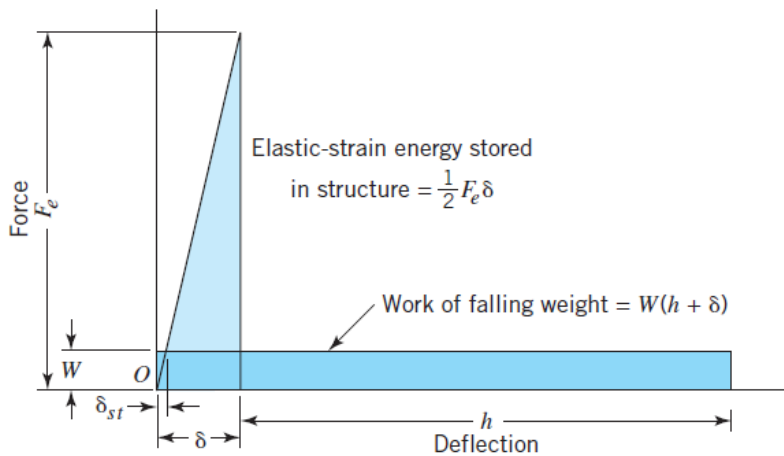
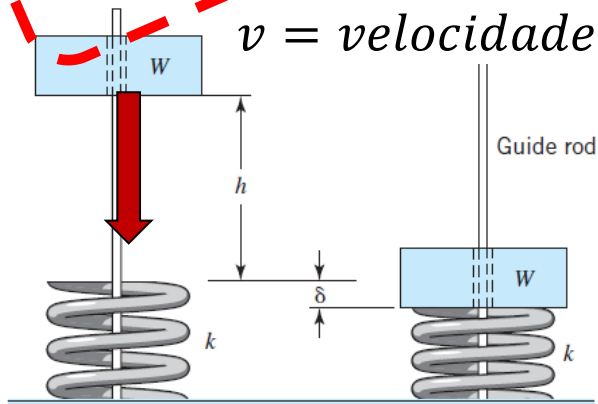
$$\delta_{st} = \frac{W}{k}$$

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

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

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

Equação da força estática equivalente em função da energia

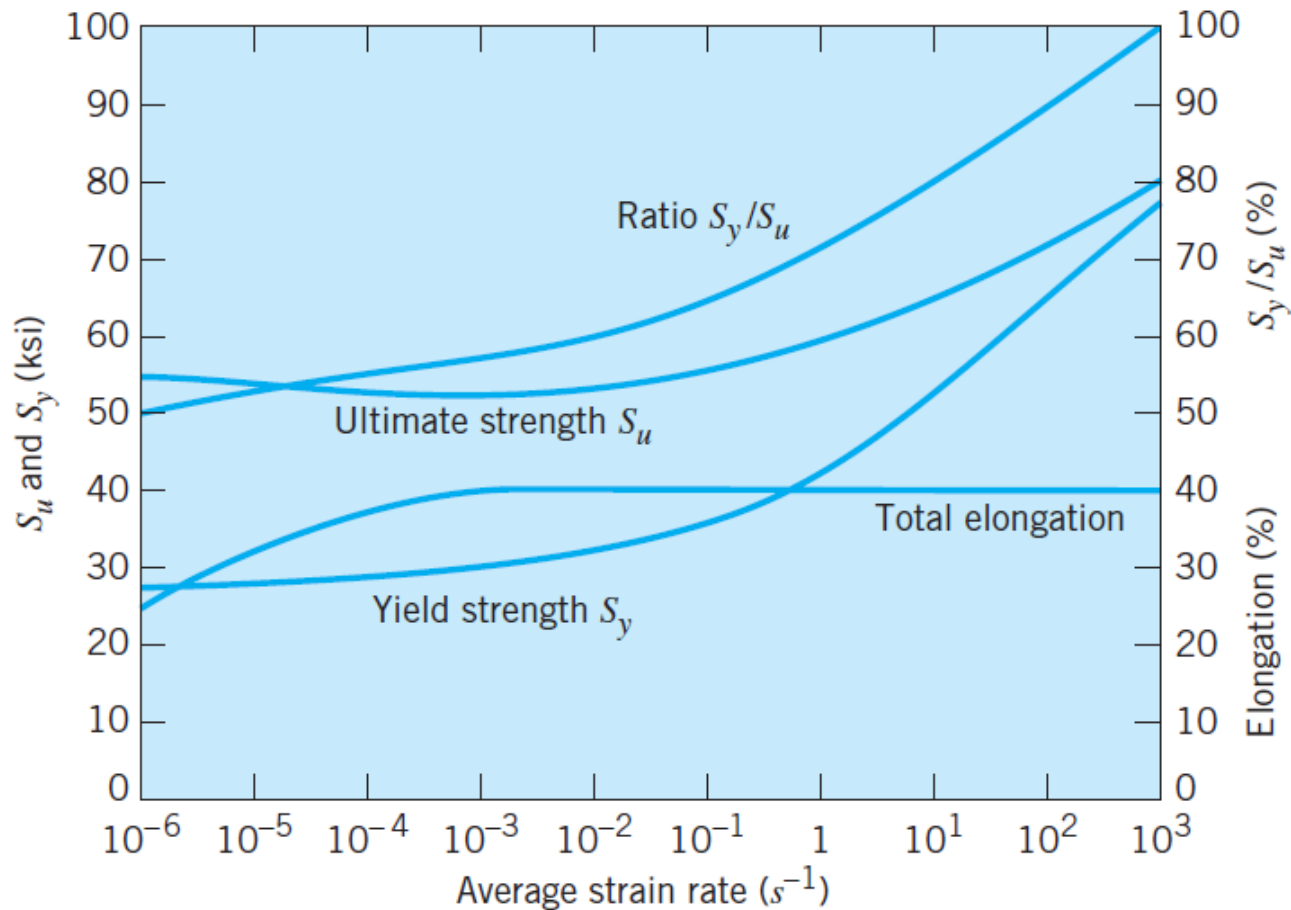




RELEMBRANDO!

Comportamento dos materiais sob impacto

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

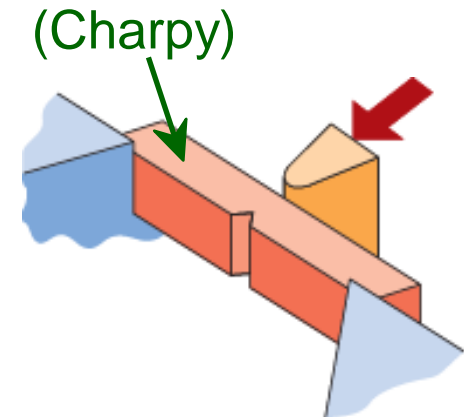
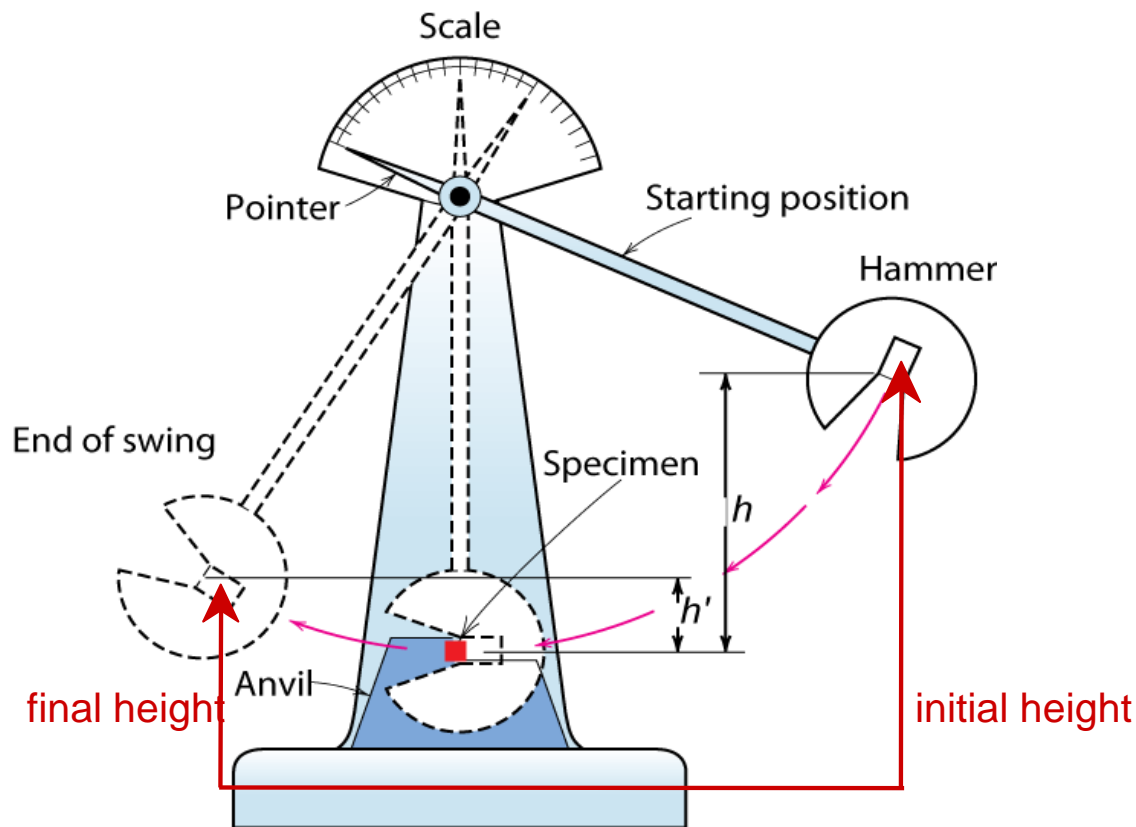




RELEBRANDO!

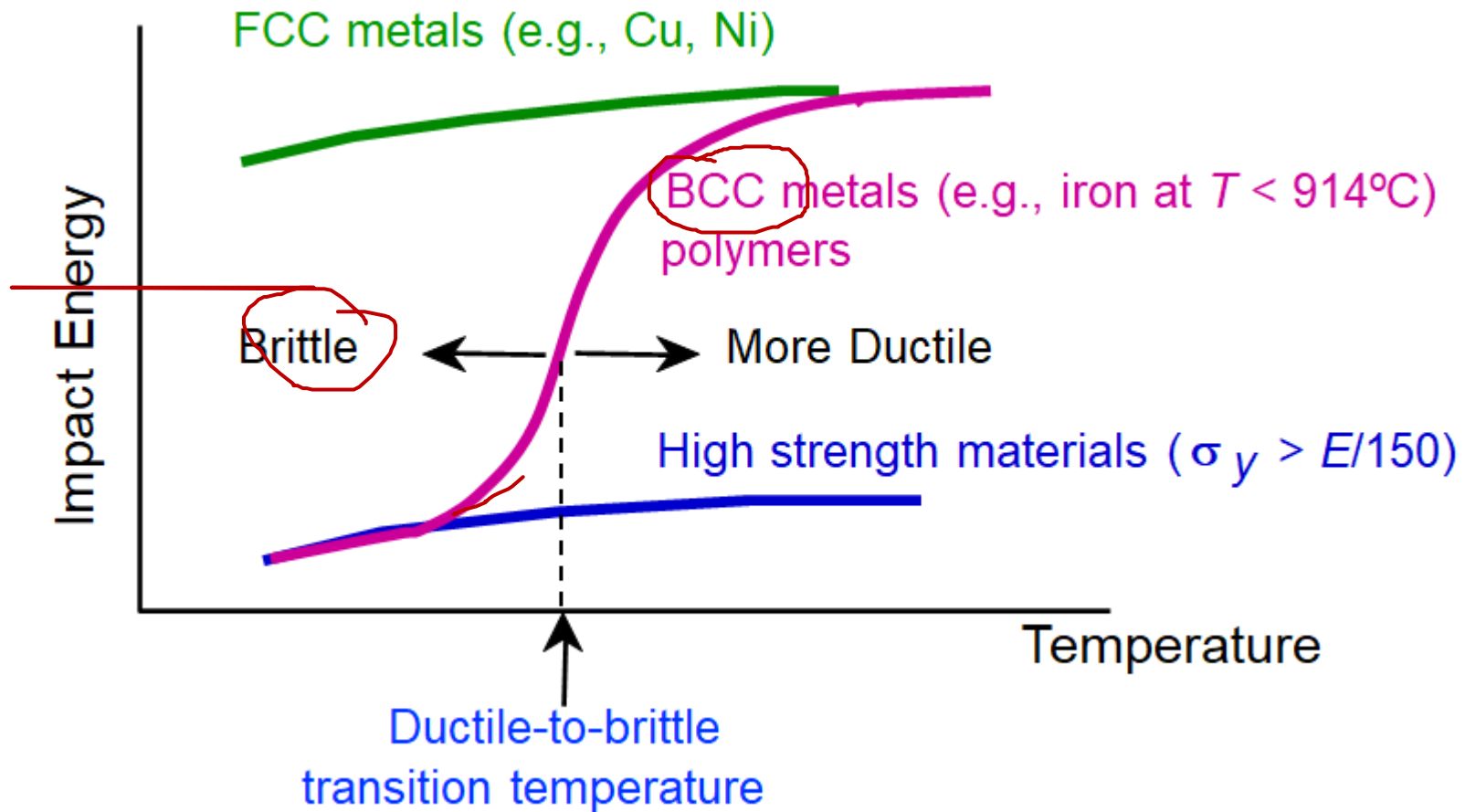
Ensaio de impacto

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





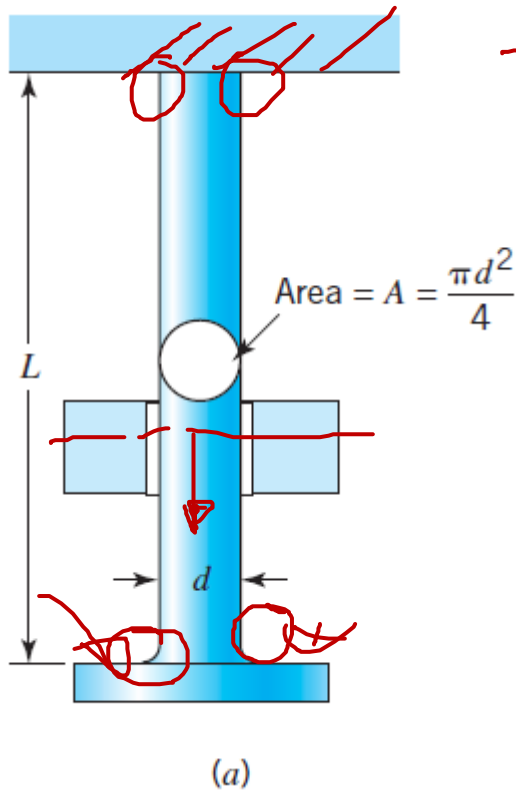
Temperatura de transição dúctil - frágil (DBTT)





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

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

$$K = \frac{AE}{L} \quad A = \frac{kL}{E}$$

$$\sigma = \frac{F_e E}{kL} \quad F_e = \sqrt{2Uk}$$

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

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

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

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

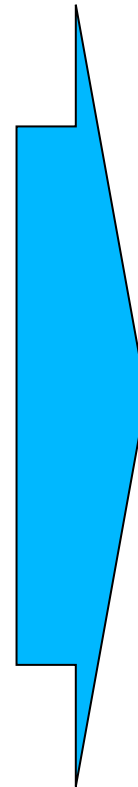
$$T_e = \sqrt{2Uk}$$

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

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

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

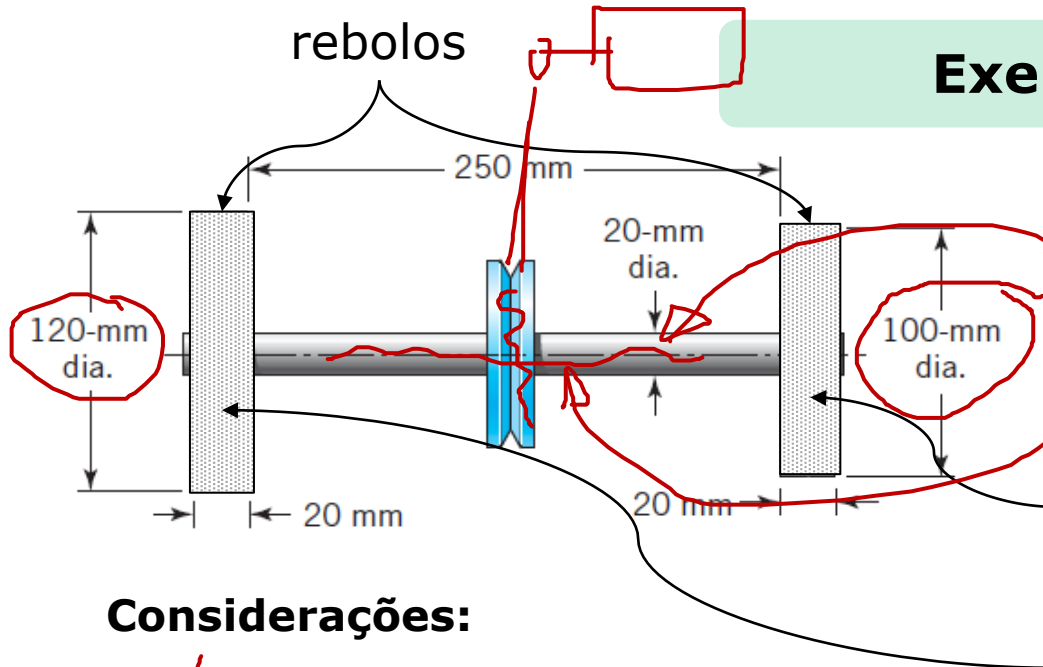
$$\tau = 2\sqrt{\frac{UG}{V}}$$





Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

Exemplo



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

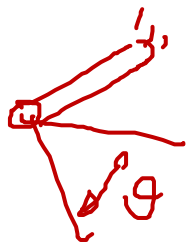
$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$$

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

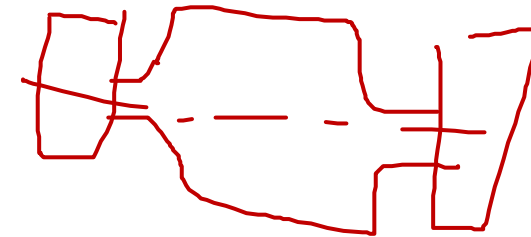
Rebolo \varnothing 100 mm para
repentinamente

Rebolo \varnothing 120 mm tende
a continuar a girar

Considerações:



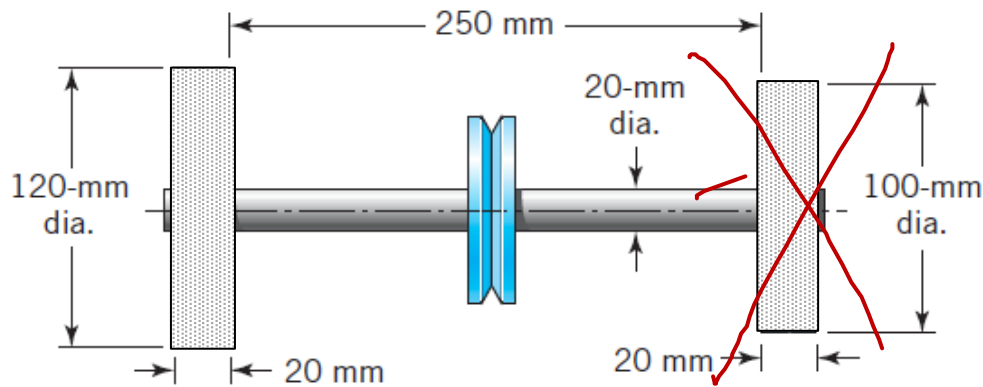
- O peso do eixo é desprezível
- O peso da polia é desprezível
- O eixo atua como uma mola torcional
- O eixo responde elasticamente ao impacto torcional
- As deflexões no rebolos são desprezíveis
- Os efeitos dos concentradores de tensões são desprezíveis
- O torque aplicado a polia é desprezado





Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

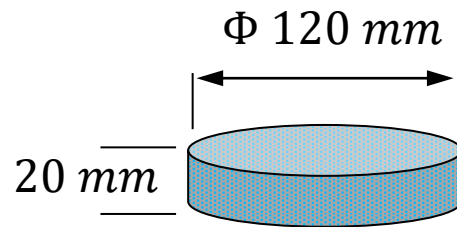
Exemplo



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

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

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



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

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

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

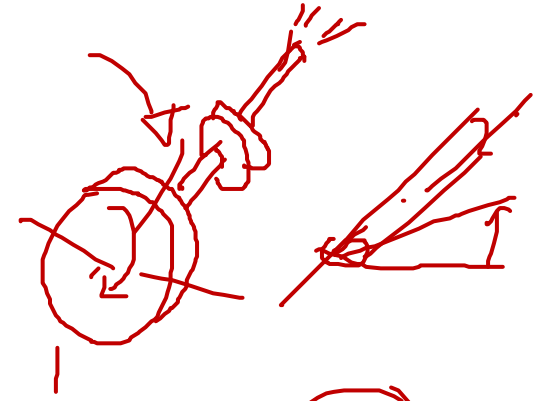
$$m = V \rho$$

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

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

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

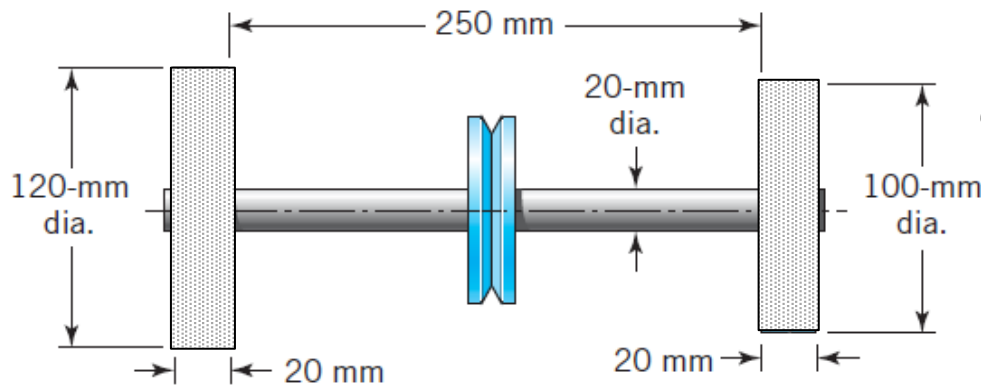
$$U = 25,72 \text{ Nm}$$





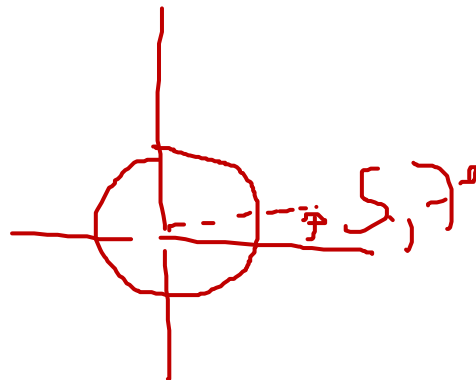
Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

Exemplo



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

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



$$U = 25,72 \text{ Nm}$$
$$\tau = 2 \sqrt{\frac{UG}{V}}$$

$G_{eixo} = 79 \text{ Gpa (aço)}$

$V = \text{volume do eixo}$

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

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

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

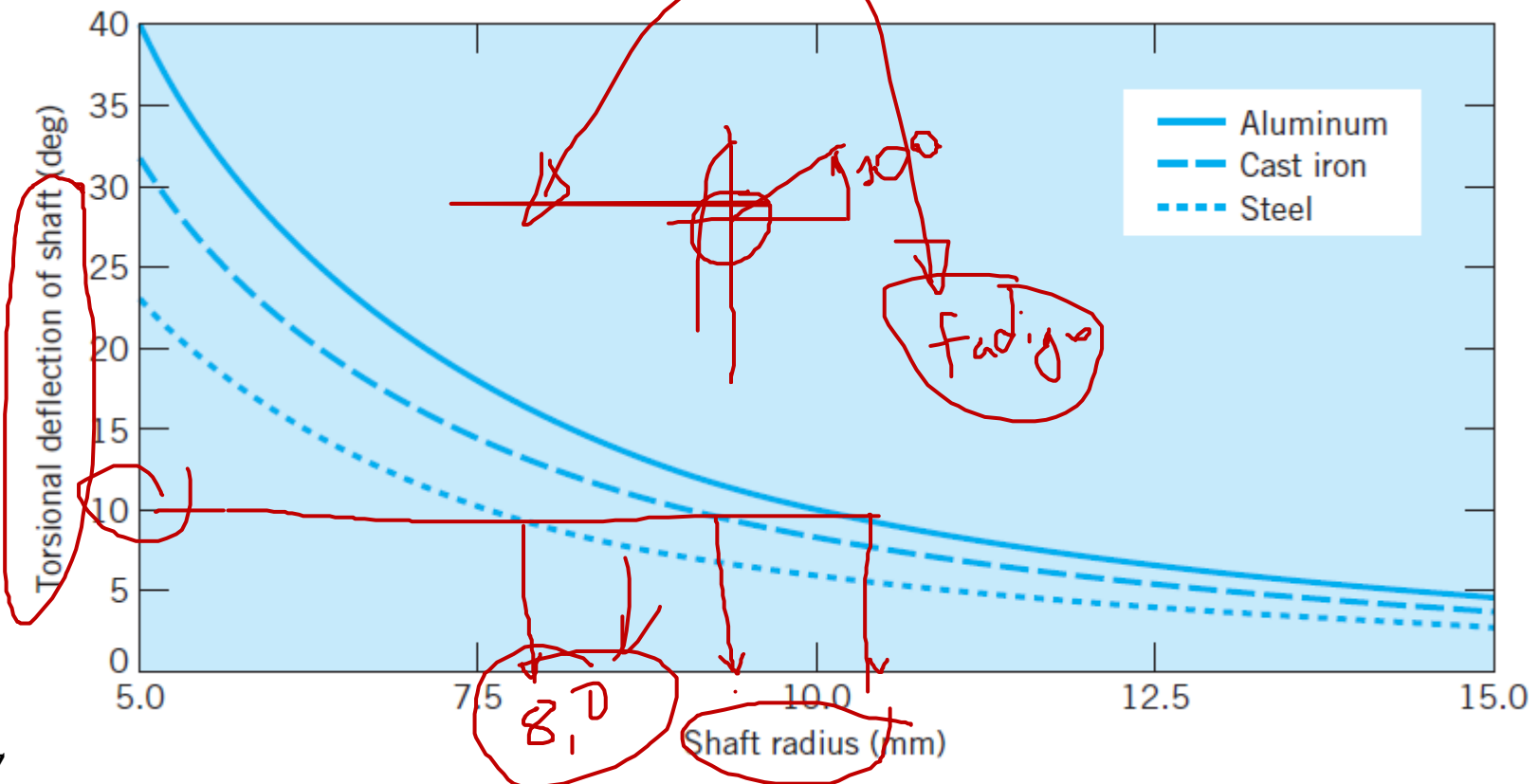


Tensão e deflexão causadas pelo impacto de torção

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

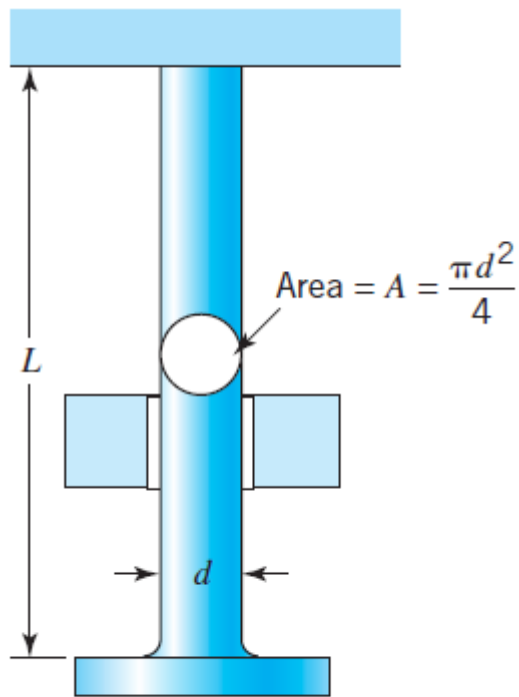
módulo de cisalhamento - G :

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

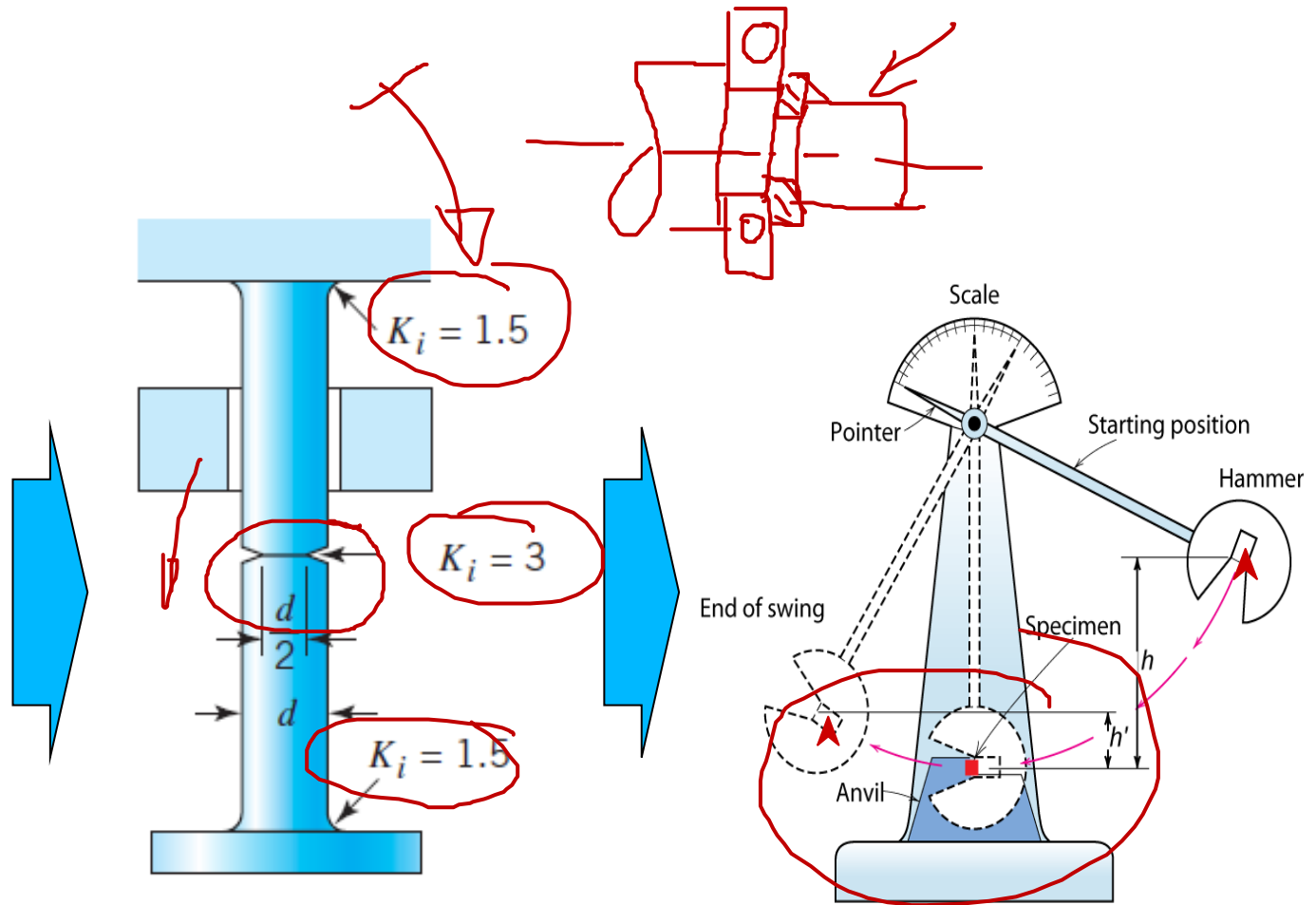




Efeito do entalhe

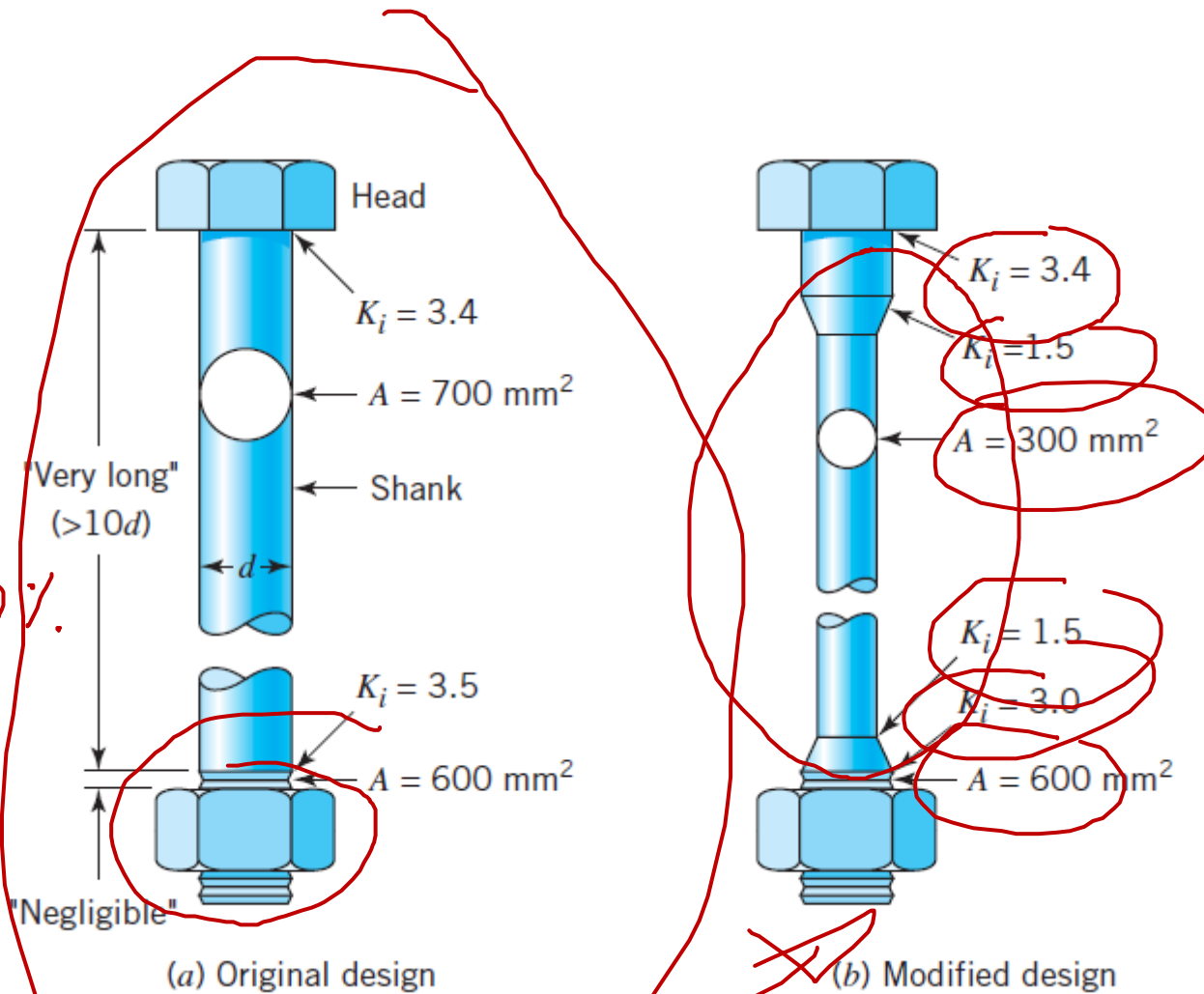


(a)



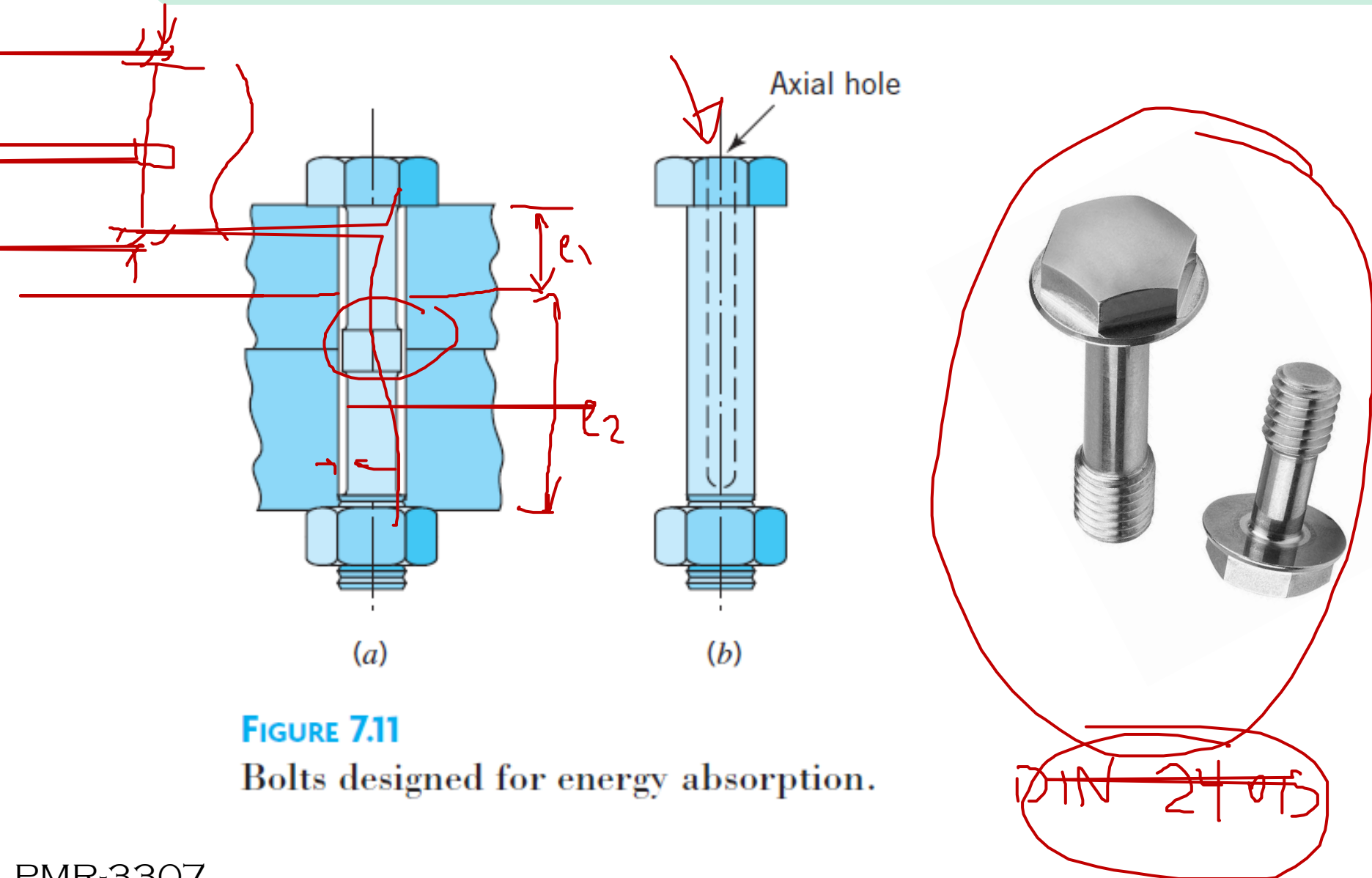


Reprojeto de Parafusos para impacto



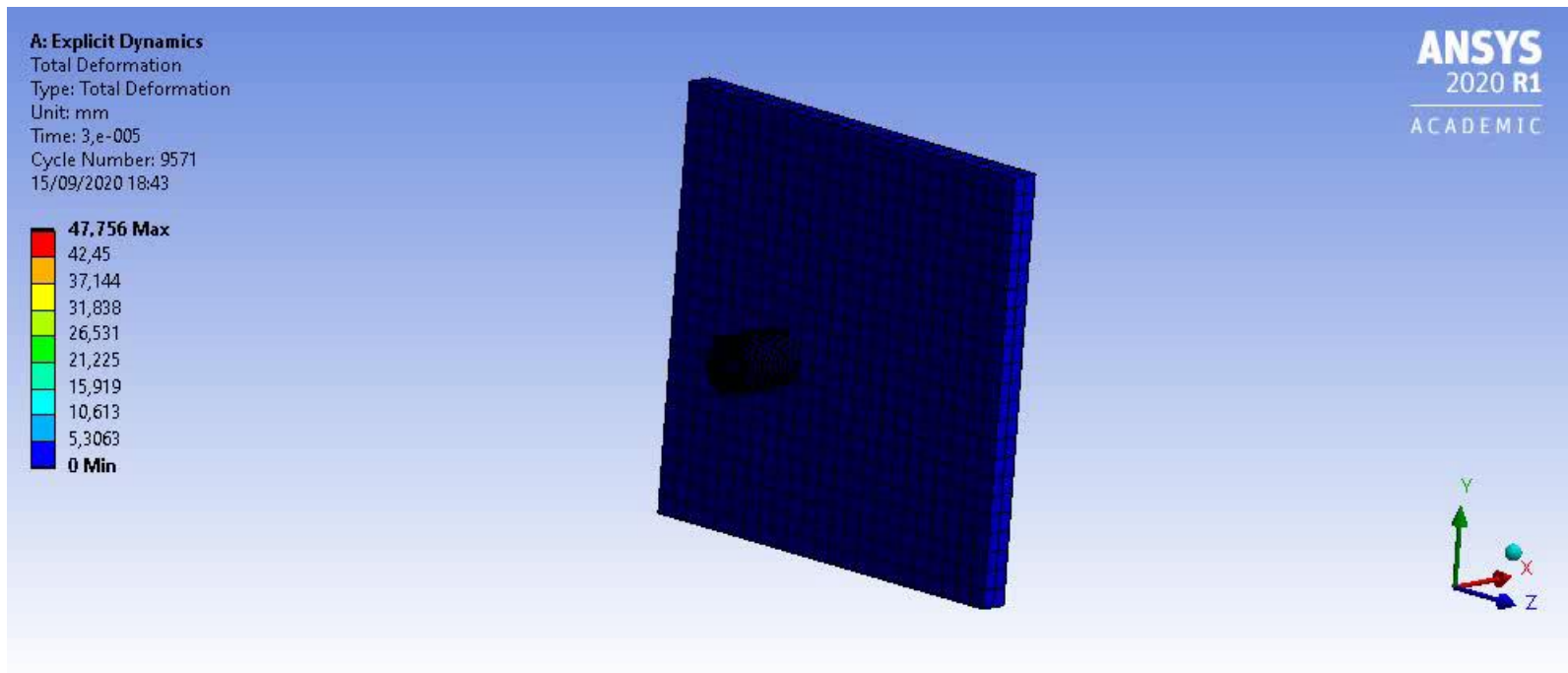


Reprojeto de Parafusos para impacto





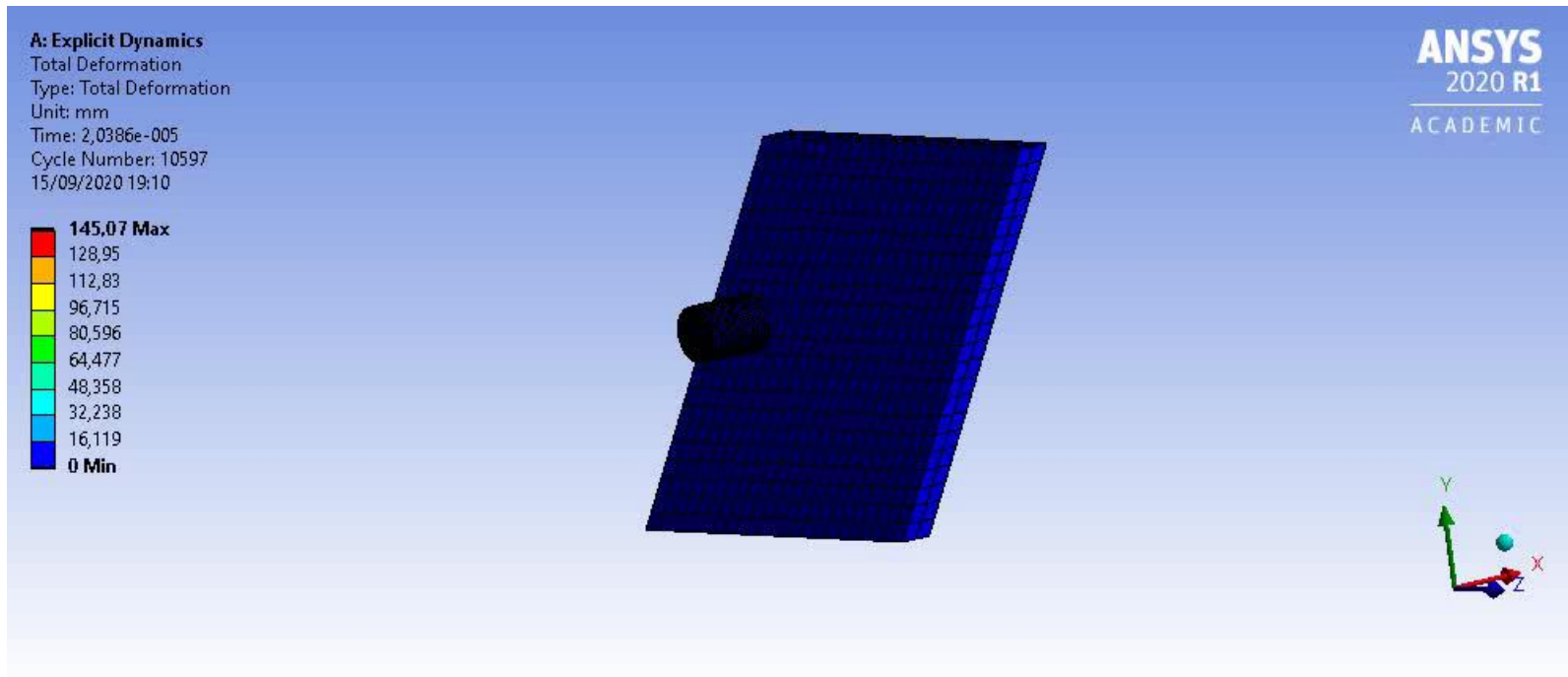
Simulação de impacto



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



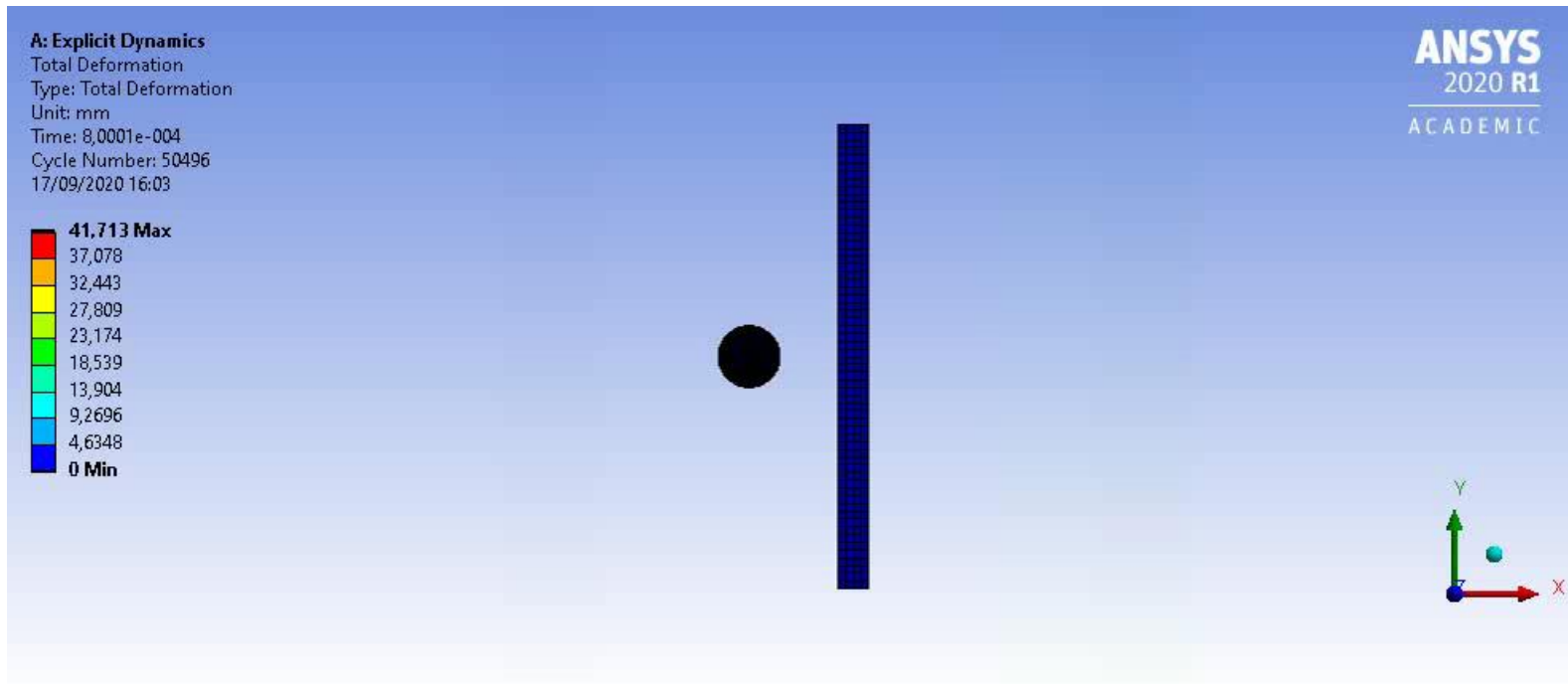
Simulação de impacto



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

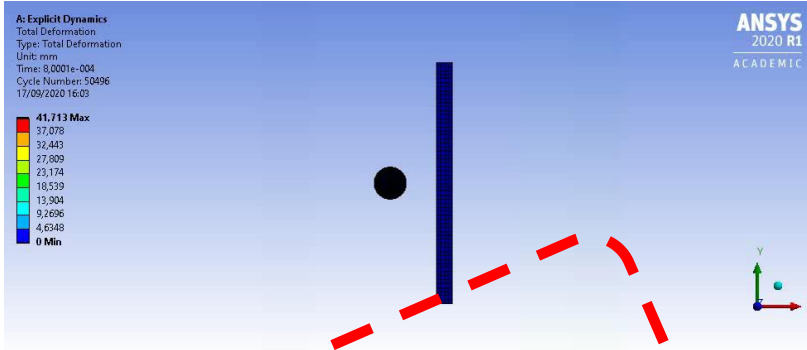
Placa: Alumínio 2024 T4

Ângulo de impacto: 0°

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

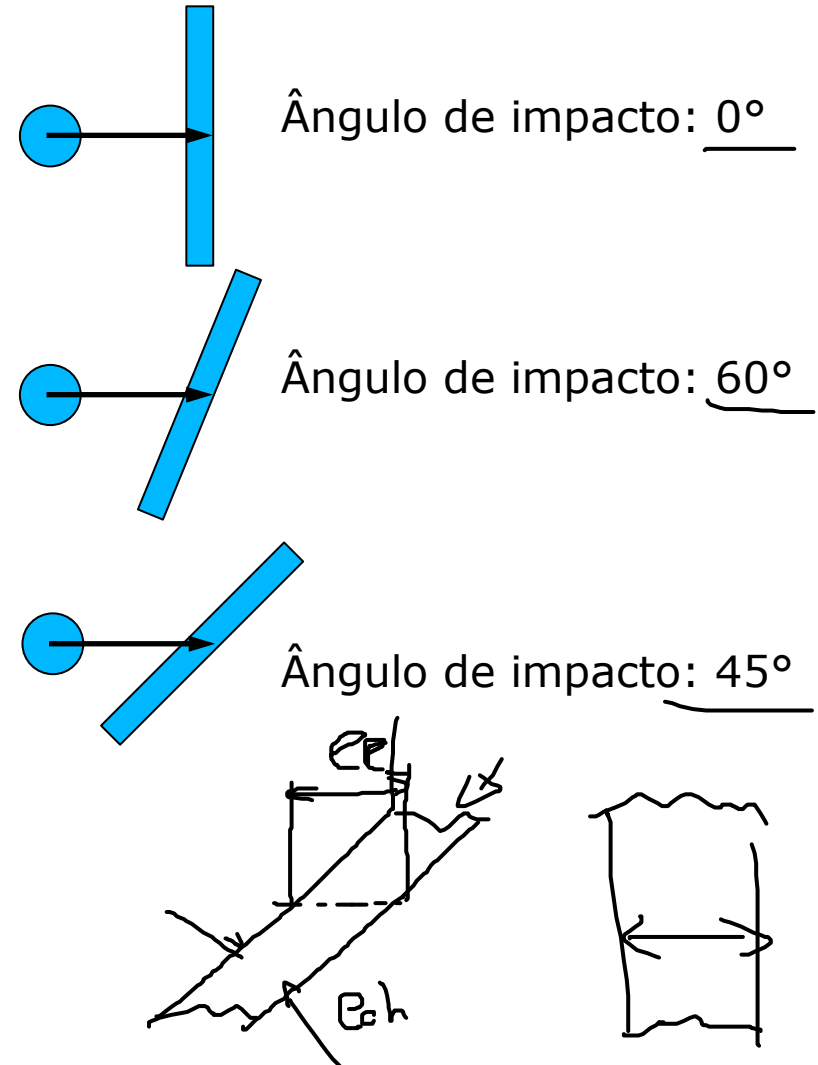


Simulação de impacto



Trabalho das aulas A09 e A10

Projétil: esférico
Material: Equipe N
Placa: Equipe N
Ângulo de impacto: 0° , 60° , 45°
Velocidade: 50 m/s \sim 180km/h





FIM DA AULA