



RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS II

TORÇÃO PARTE I

Prof. Dr. Daniel Caetano

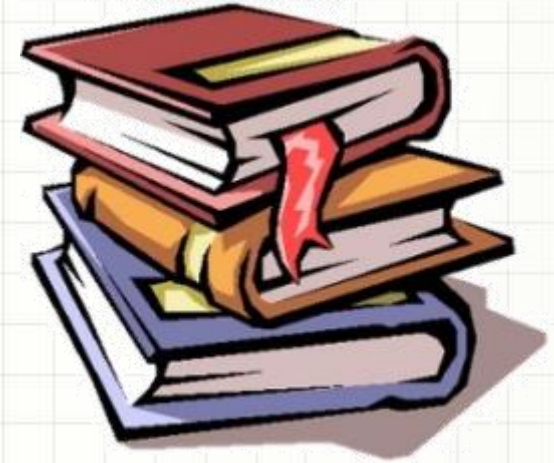
2013 - 1

Objetivos

- Compreender o que é a deformação por torção
- Compreender os esforços que surgem devido à torção
- Determinar distribuição de tensões de cisalhamento por torção
- Determinar cisalhamento em eixos transmissores de potência



Material de Estudo



Material

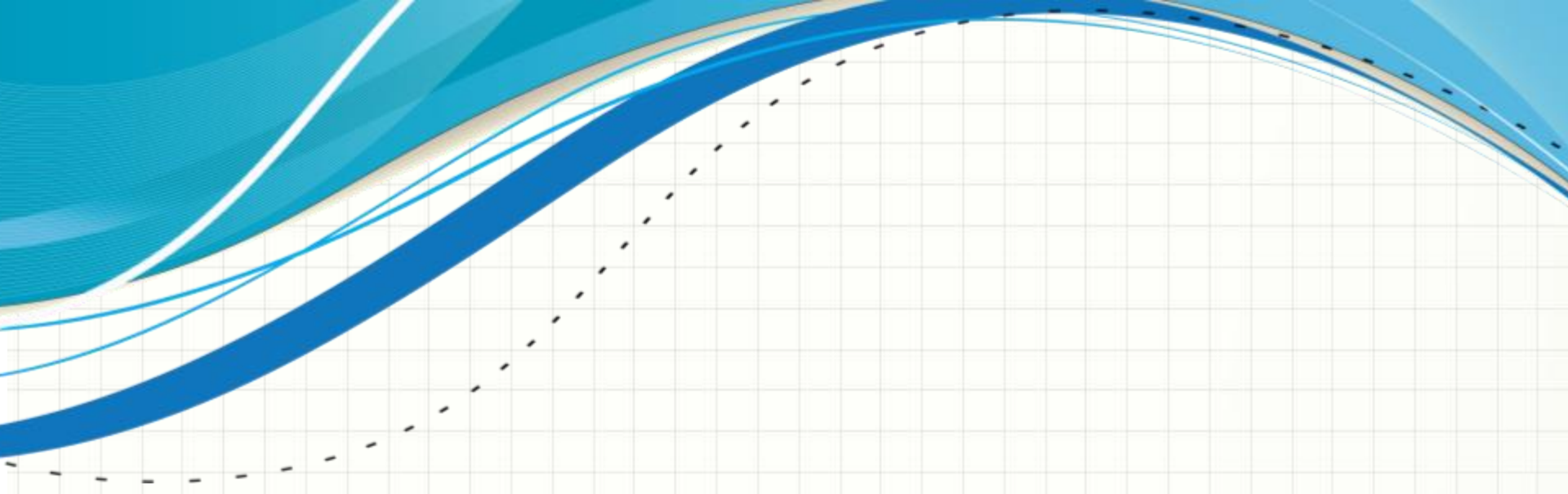
Acesso ao Material

Apresentação

<http://www.caetano.eng.br/>
(Aula 5)

Material Didático

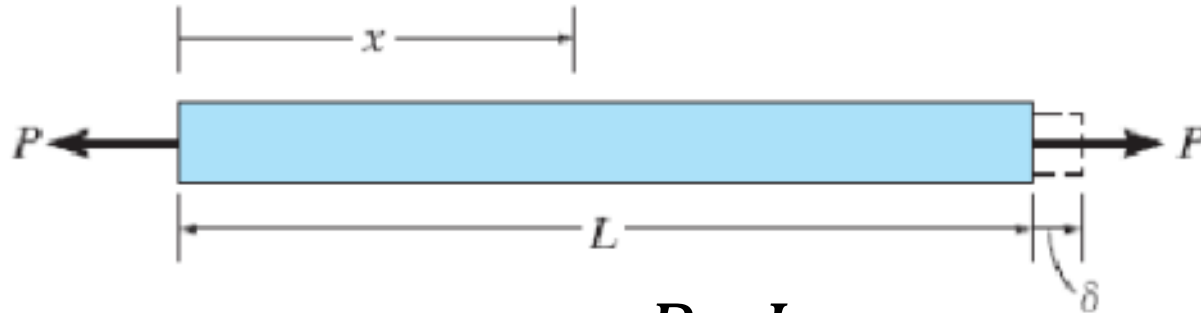
Resistência dos Materiais (Hibbeler) – Parte 1 / 2
Páginas 137 a 153.



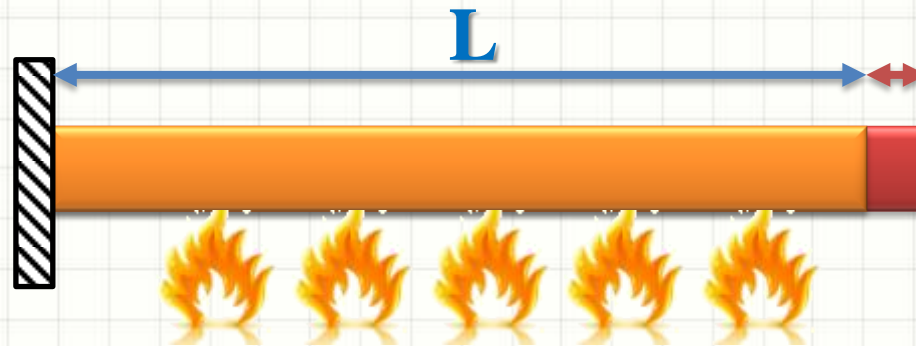
RELEMBRANDO:

CARREGAMENTOS AXIAIS

Carregamentos e Deformações Axiais



$$\delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A}$$



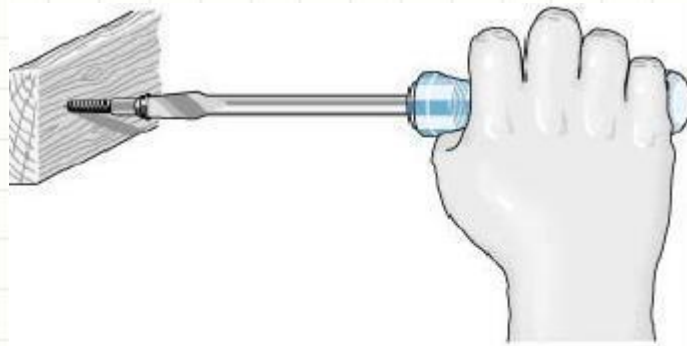
$$\delta_T = \alpha \cdot \Delta T \cdot L$$



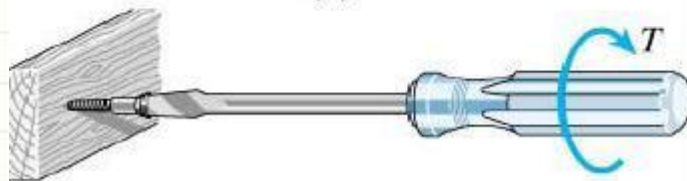
DEFORMAÇÃO DE EIXO CIRCULAR POR TORÇÃO

Deformação por Torção

- O que é torção?



(a)

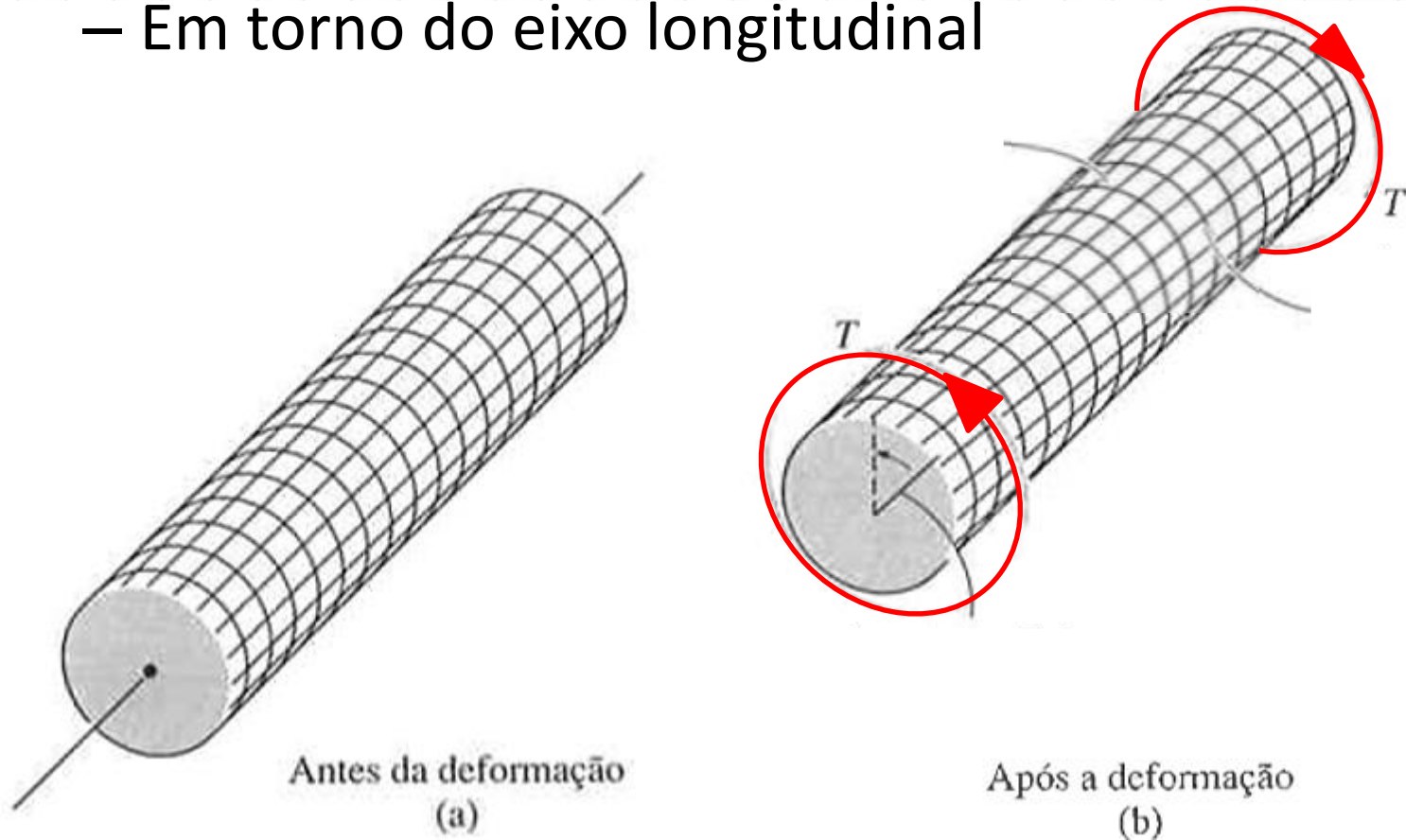


(b)



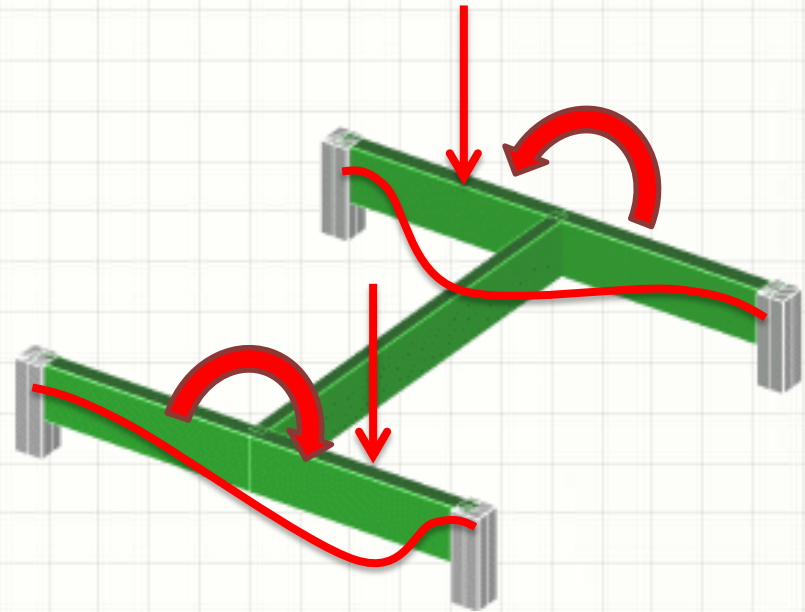
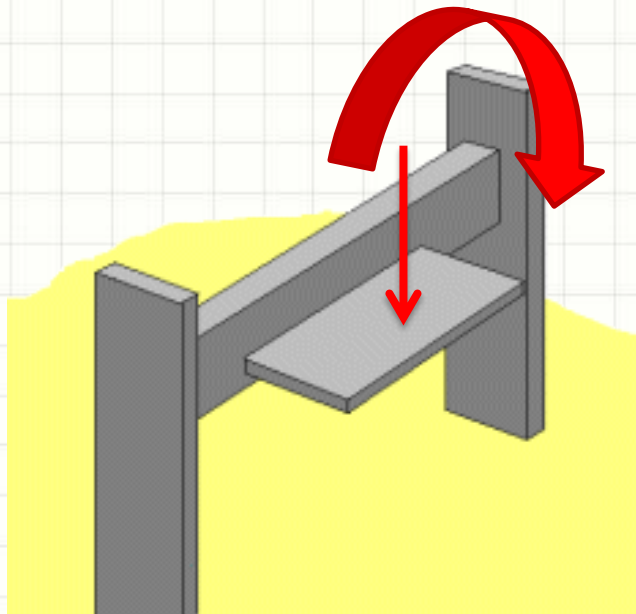
Deformação por Torção

- Torção é a deformação por efeito do **torque**
- **Torque** é um esforço que deforma...
 - Em torno do eixo longitudinal



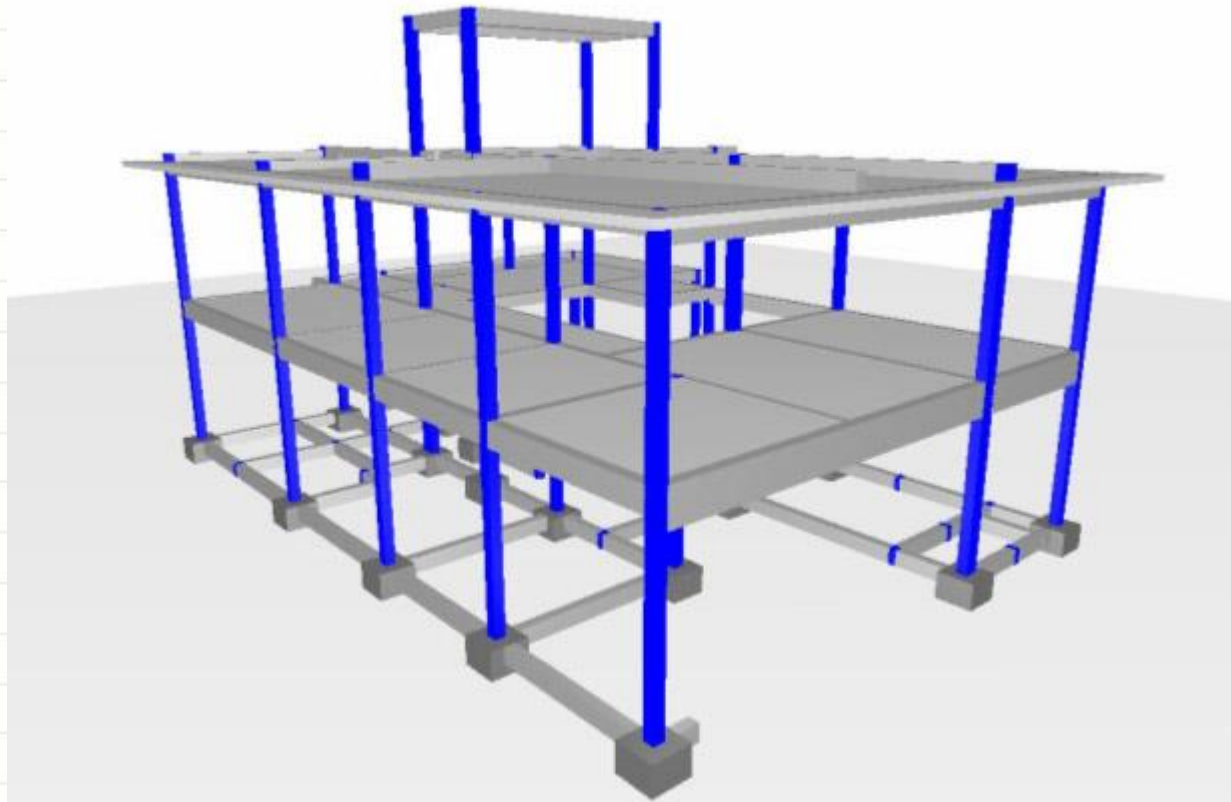
Deformação por Torção

- Preocupação em eixos...
- Estruturas reticuladas?



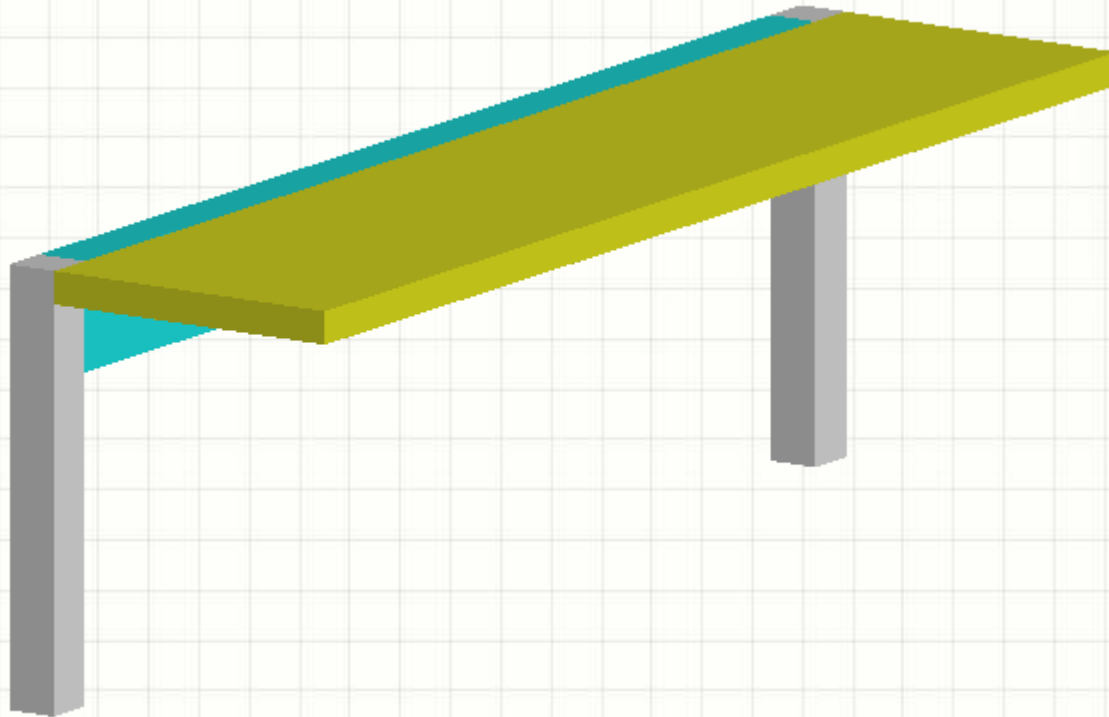
Deformação por Torção

- Preocupação em eixos...
- Estruturas reticuladas?



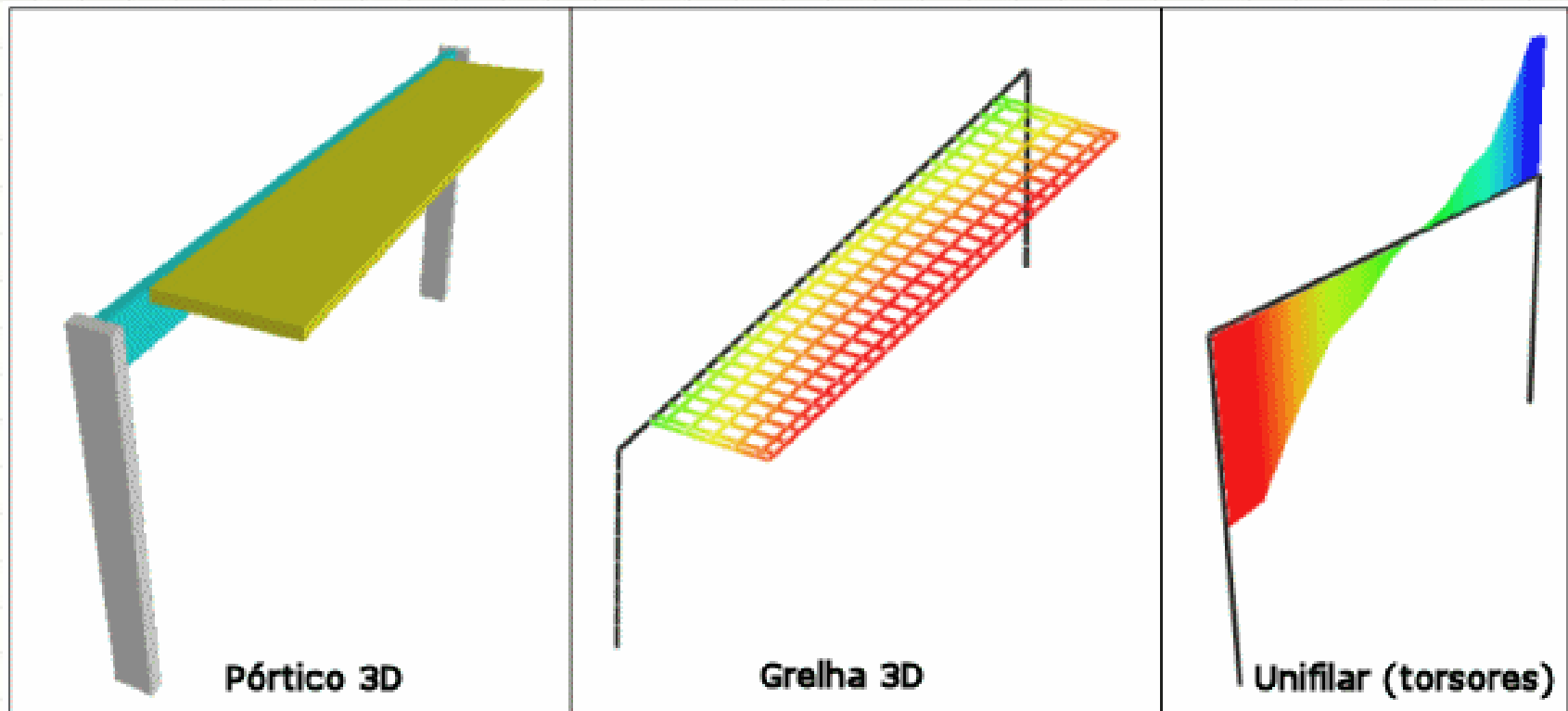
Deformação por Torção

- Preocupação em eixos...
- Estruturas reticuladas?



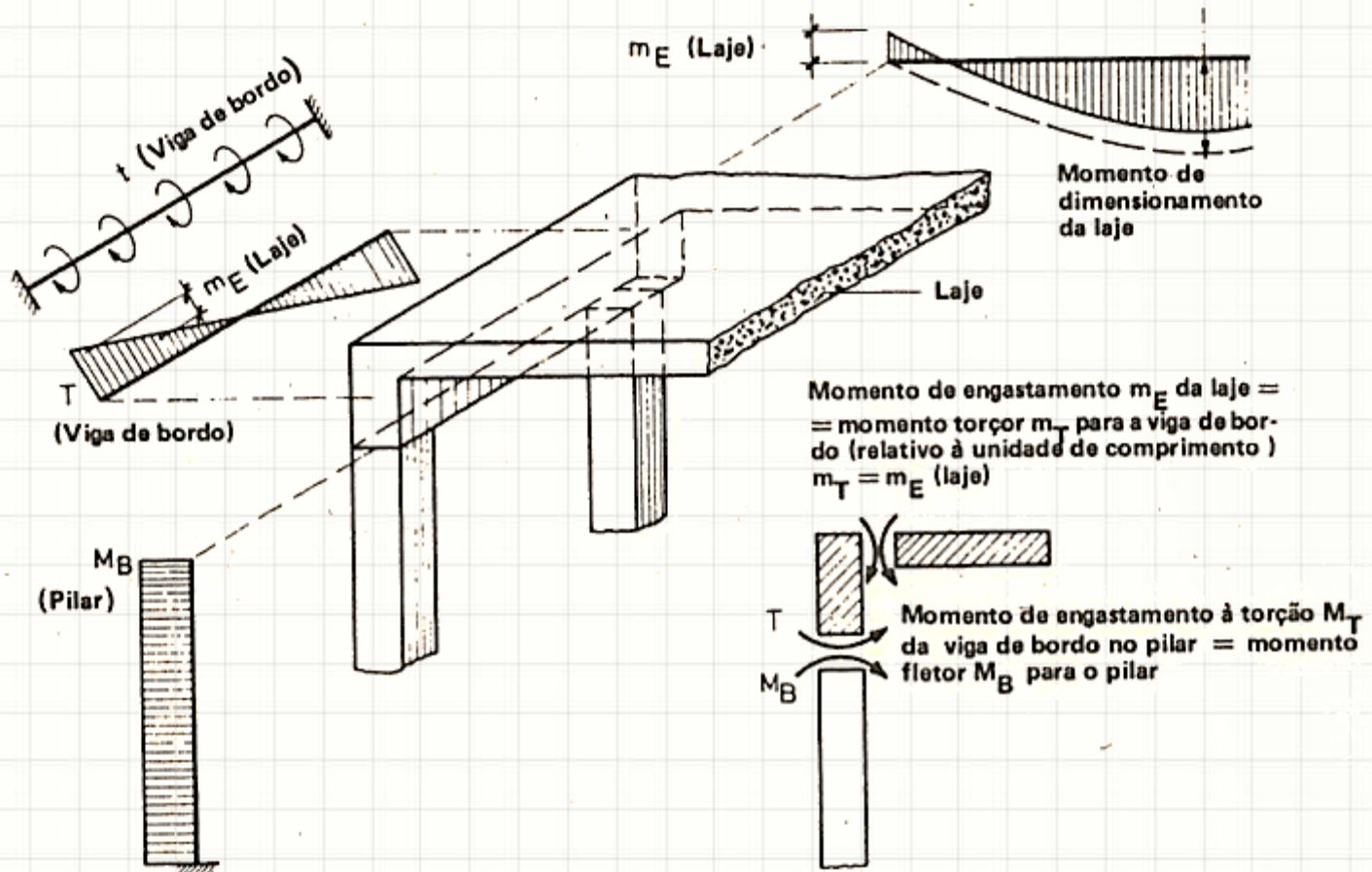
Deformação por Torção

- Preocupação em eixos...
- Estruturas reticuladas?



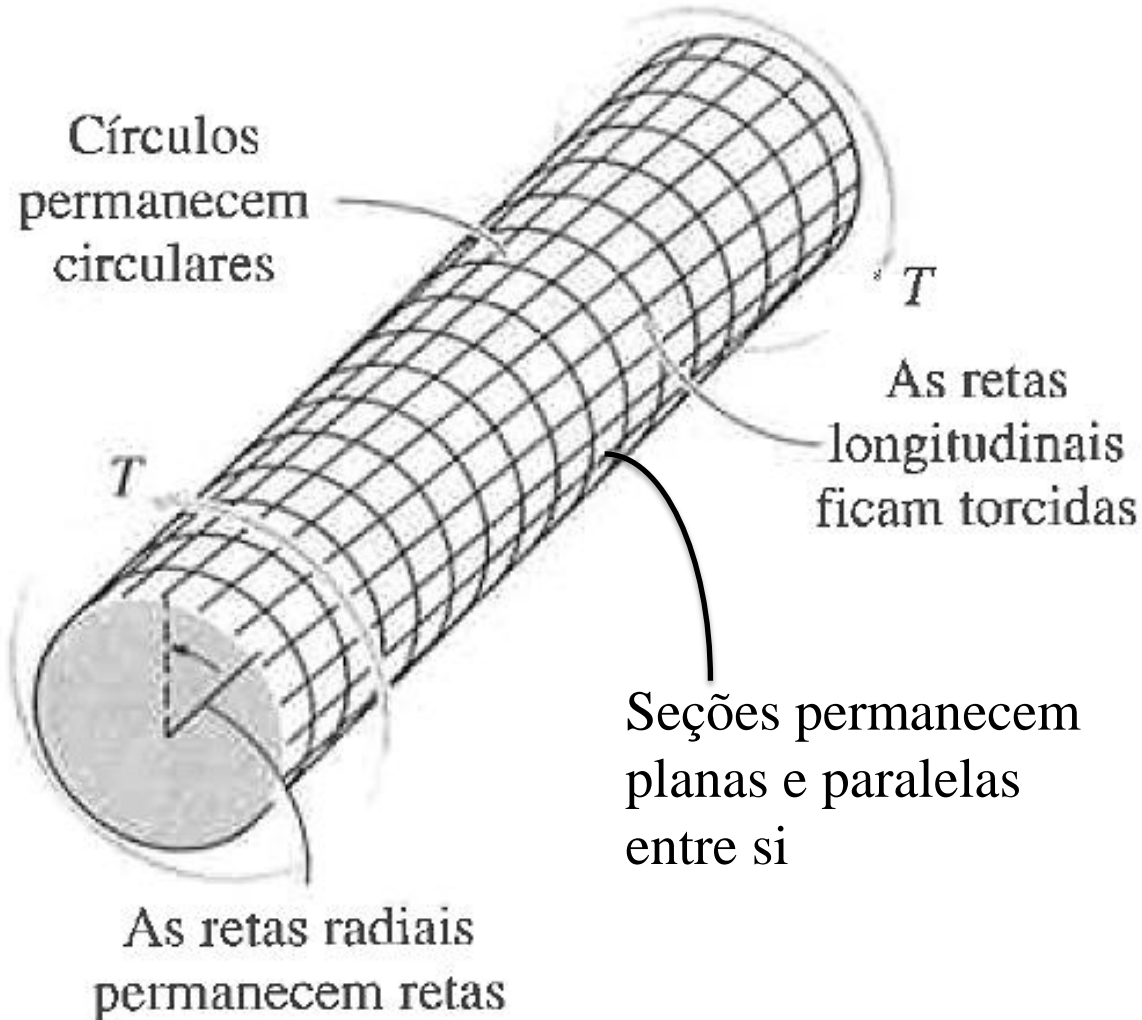
Deformação por Torção

- Preocupação em eixos...
- Estruturas reticuladas?



Deformação por Torção

- Vamos observar a deformação de perto



Deformação por Torção

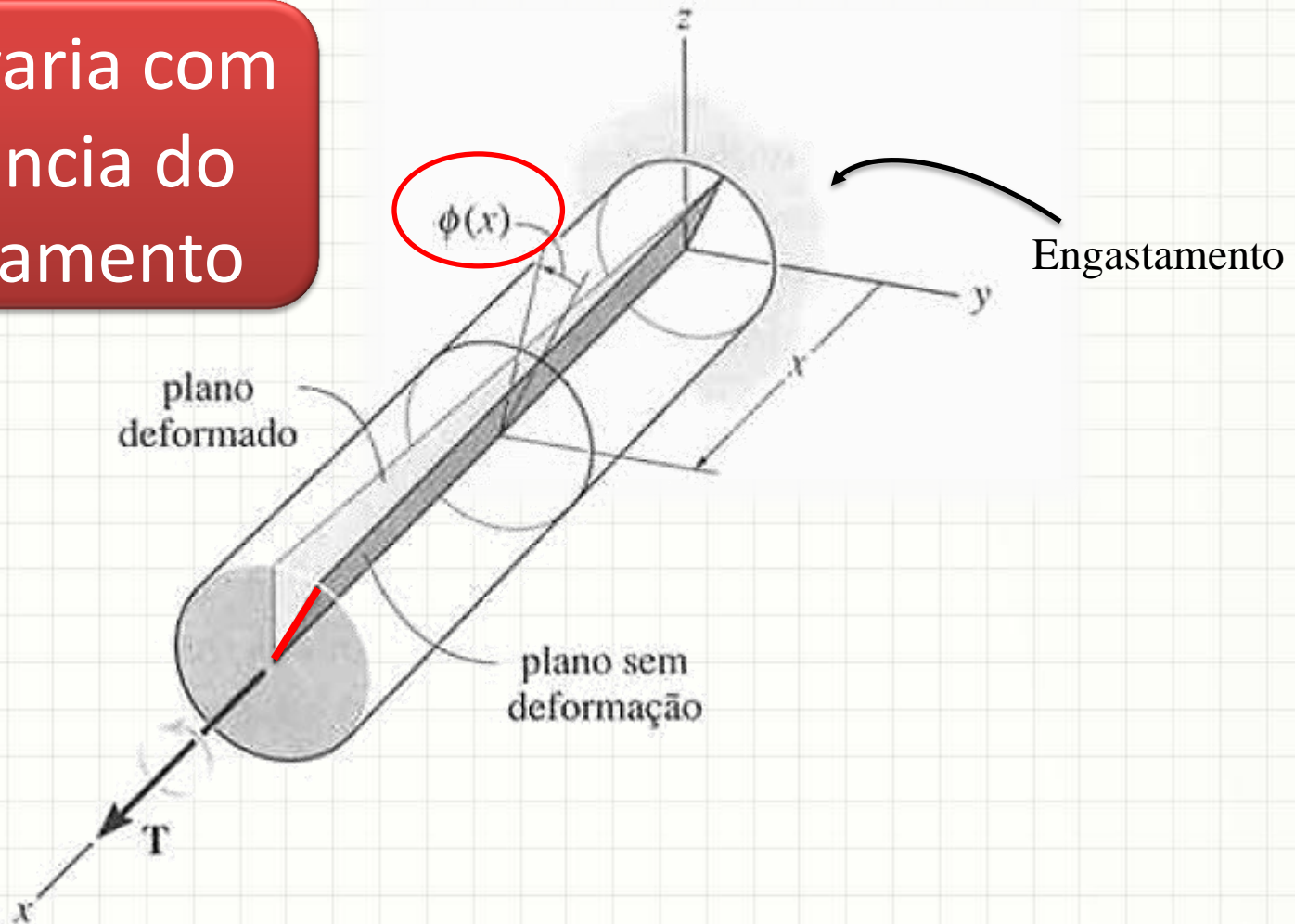
- Vamos observar a deformação de perto



Ângulo de Torção

- Pode-se definir a deformação por ângulo $\phi(x)$

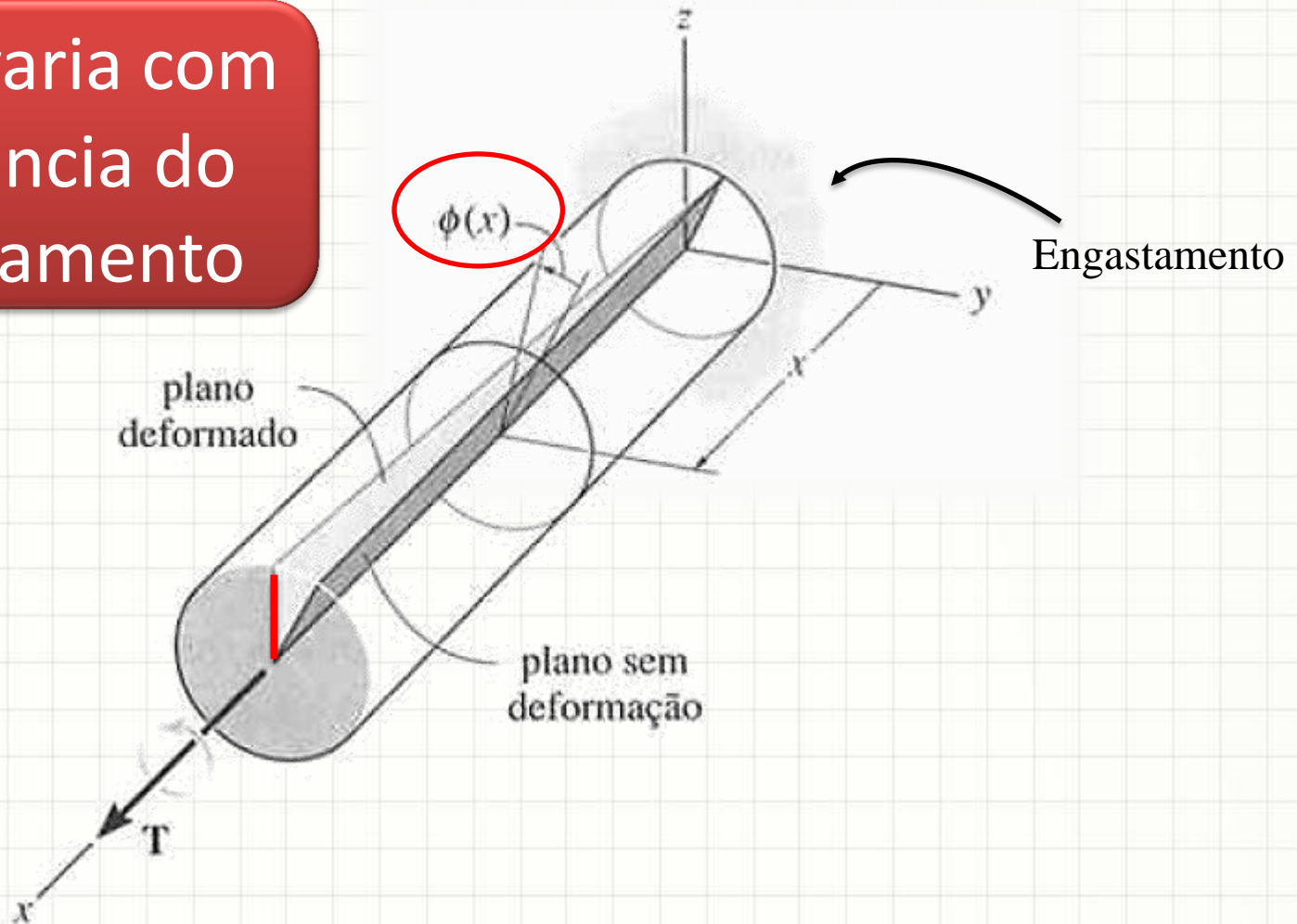
$\phi(x)$: varia com a distância do engastamento



Ângulo de Torção

- Pode-se definir a deformação por ângulo $\phi(x)$

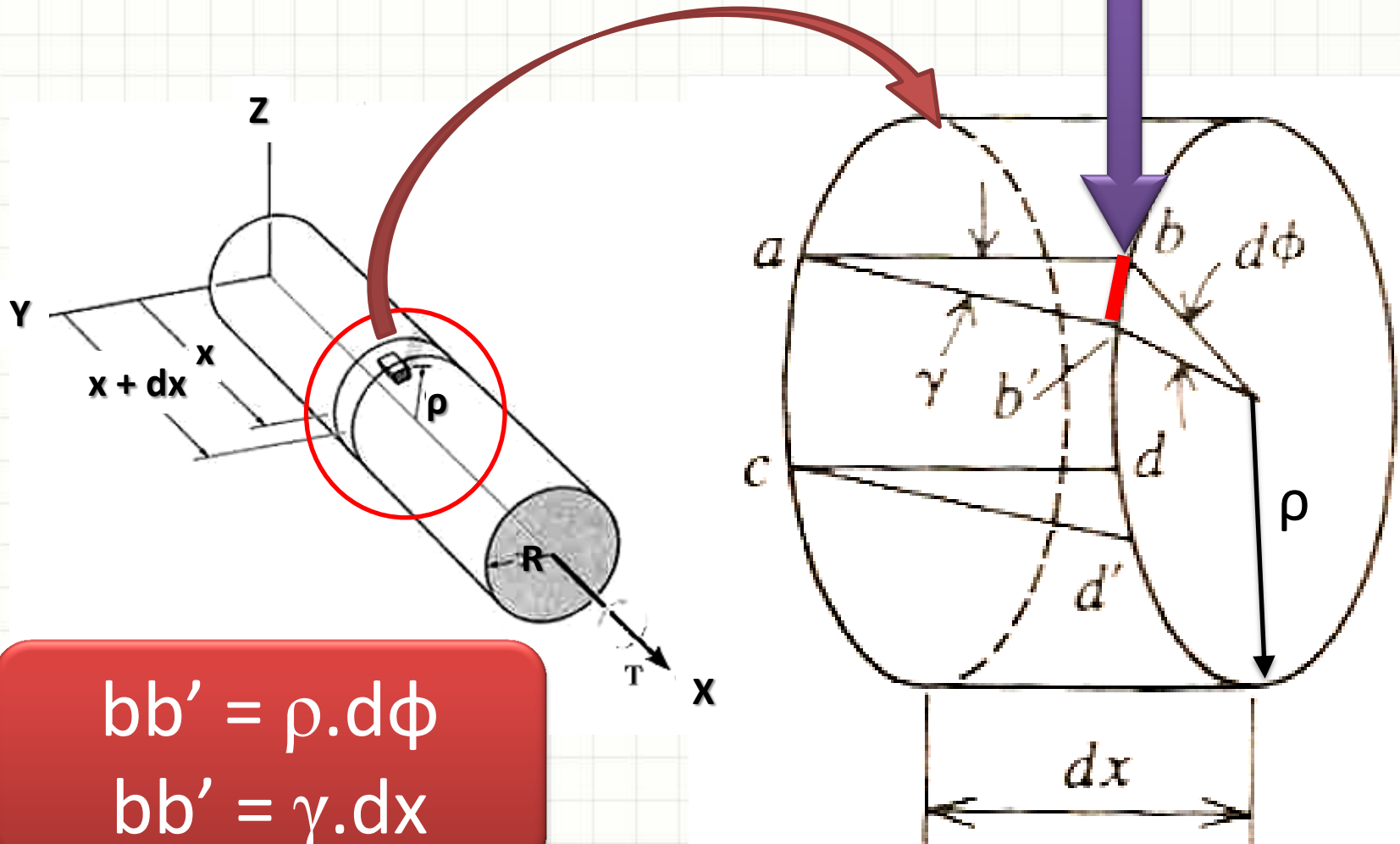
$\phi(x)$: varia com a distância do engastamento



Ângulo de Torção

- Vamos entender melhor esse $\phi(x)$

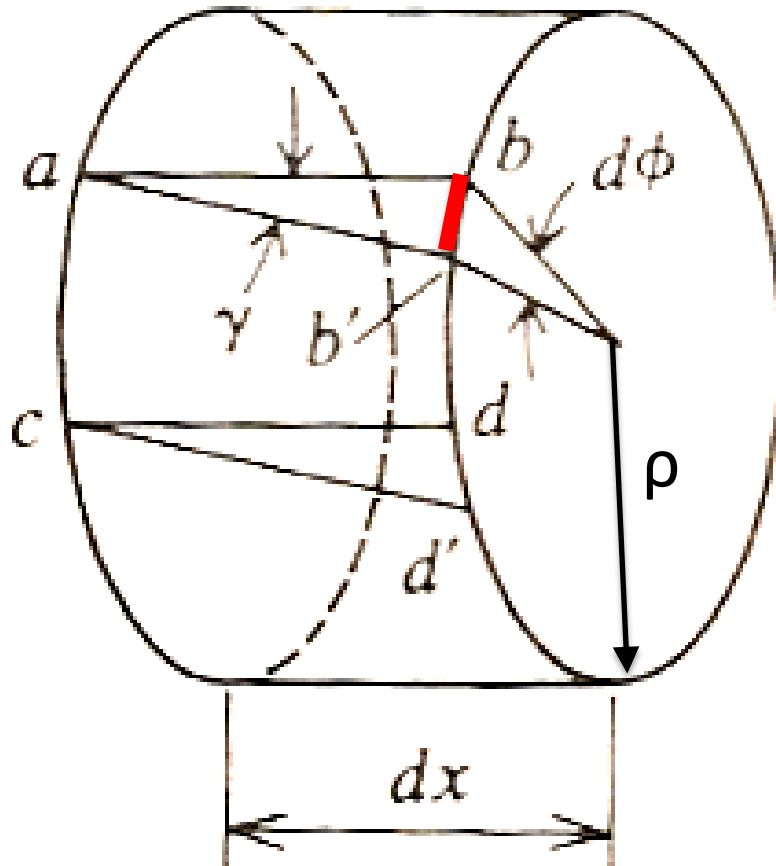
Quanto mede?



$$bb' = \rho \cdot d\phi$$
$$bb' = \gamma \cdot dx$$

Ângulo de Torção

- Portanto...



$$bb' = \rho \cdot d\phi$$

$$bb' = \gamma \cdot dx$$

$$\rho \cdot d\phi = \gamma \cdot dx$$

$$\gamma = \rho \cdot \frac{d\phi}{dx}$$

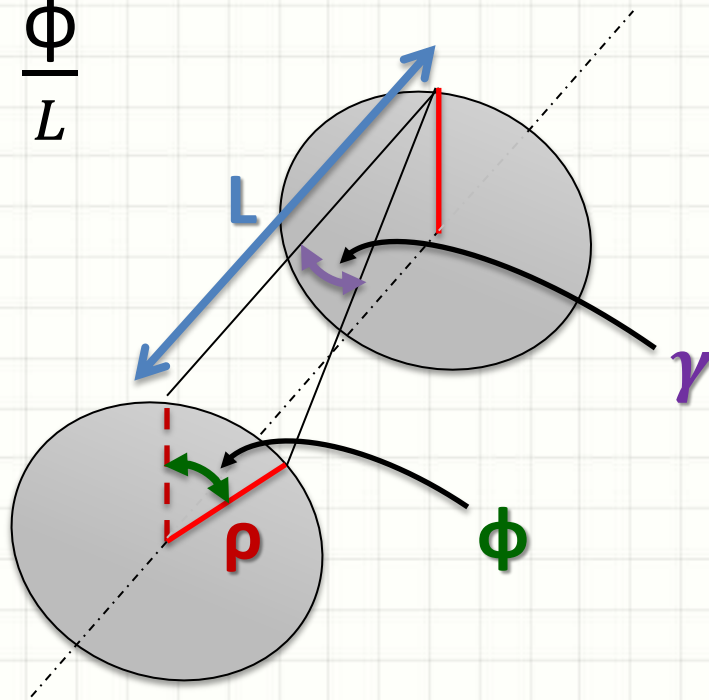
γ : deformação de cisalhamento

Ângulo de Torção

- Considerando torção pura... $d\phi/dx = \text{cte.} = \theta$
- θ : âng. de torção por un. de comp. = ϕ/L

$$\gamma = \rho \cdot \frac{d\phi}{dx} = \rho \cdot \frac{\phi}{L}$$

$$\gamma = \rho \cdot \theta$$



Quanto maior
o raio...
Maior o γ



A FÓRMULA DA TORÇÃO

A Fórmula Torção

- Pela lei de Hooke, para material linear elástico

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

- Para a torção...

$$\tau = G \cdot \gamma$$

- No entanto...

$$\gamma = \rho \cdot \theta$$

- Logo...

$$\tau = G \cdot \rho \cdot \theta$$

τ : tensão de cisalhamento
 G : módulo de elasticidade
ao cisalhamento

O valor de τ cresce com o
raio... $\tau = 0$ se $\rho = 0$

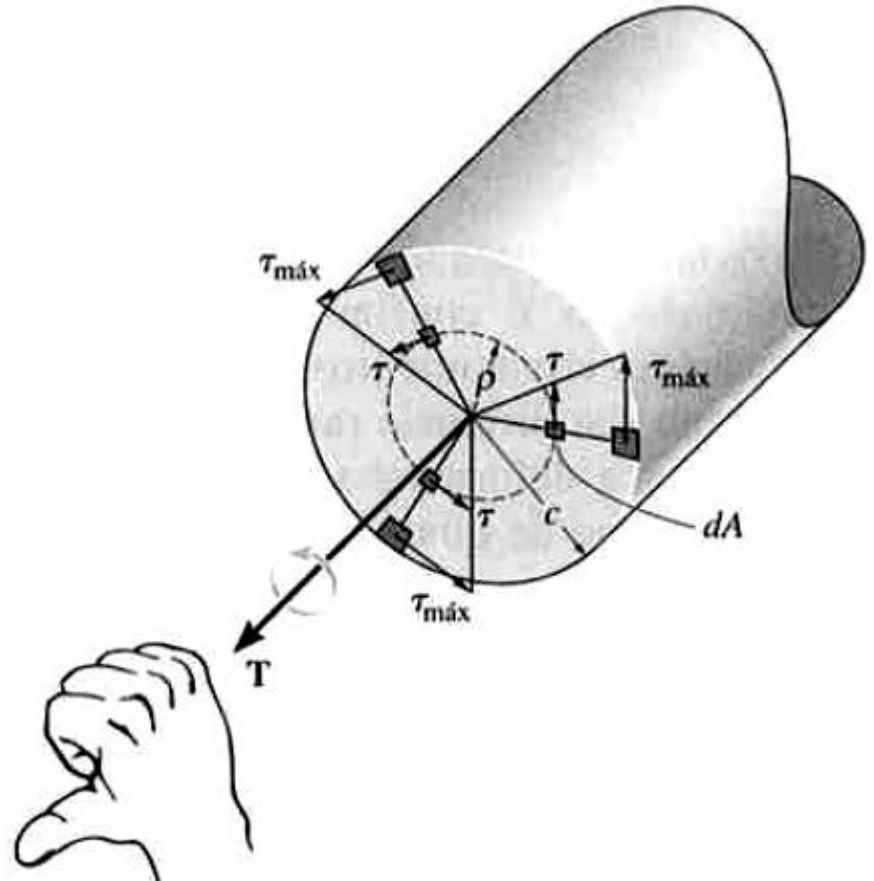
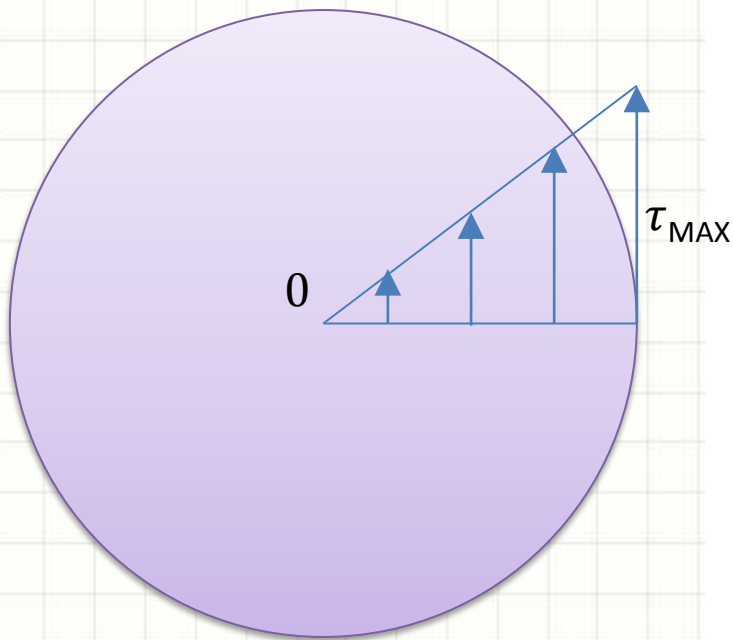
A Fórmula Torção

- Visualizando a equação:

$$\tau = G \cdot \rho \cdot \theta$$

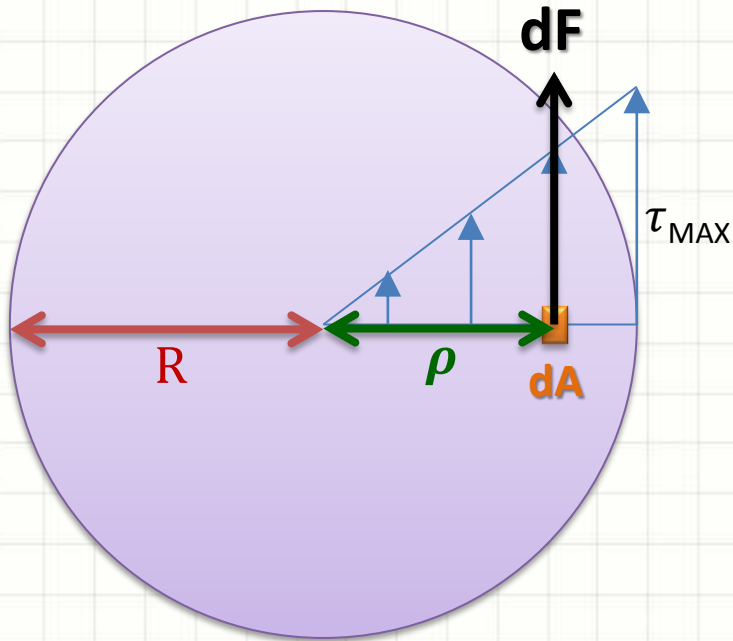
$$\rho = 0 \rightarrow \tau = 0$$

$$\rho = \text{máx} \rightarrow \tau = \text{máx}$$



A Fórmula Torção

- Considerando que cada esforço age sobre dA



$$dF = \tau \cdot dA$$

$$dT = \rho \cdot dF = \rho \cdot \tau \cdot dA$$

- Integrando...

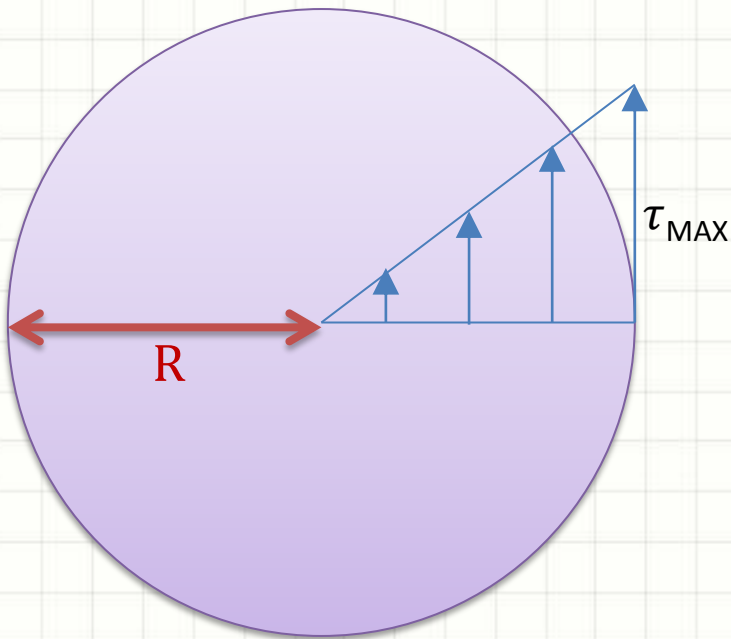
$$T = \int_A \rho \cdot \tau \cdot dA$$

- Ocorre que...

$$\tau = \tau_{MAX} \cdot \frac{\rho}{R}$$

A Fórmula Torção

- Ou seja... Podemos definir T como...



$$T = \int_A \rho \cdot \tau_{MAX} \cdot \frac{\rho}{R} \cdot dA$$

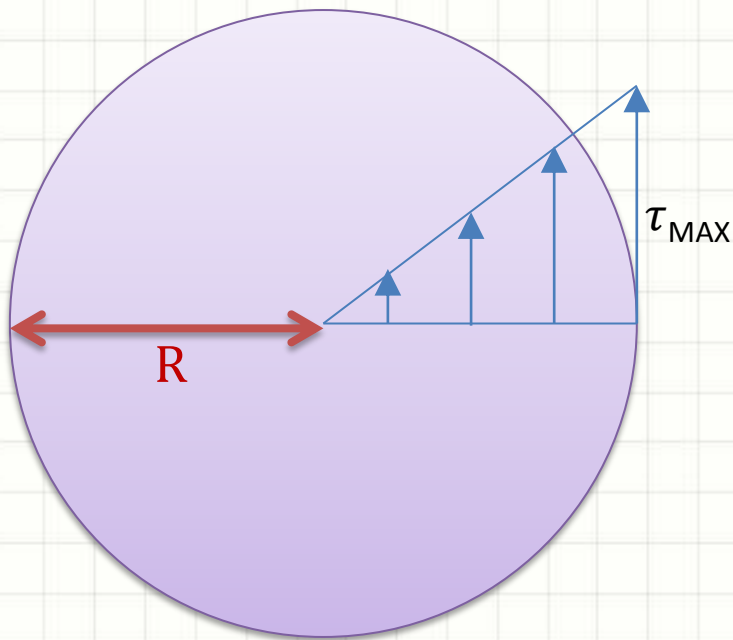
- Que resulta em...

$$T = \frac{\tau_{MAX}}{R} \cdot \int_A \rho^2 \cdot dA$$

$$T = \frac{\tau_{MAX}}{R} \cdot J$$

A Fórmula Torção

- Define-se a fórmula da torção



$$T = \frac{\tau_{MAX}}{R} \cdot J$$

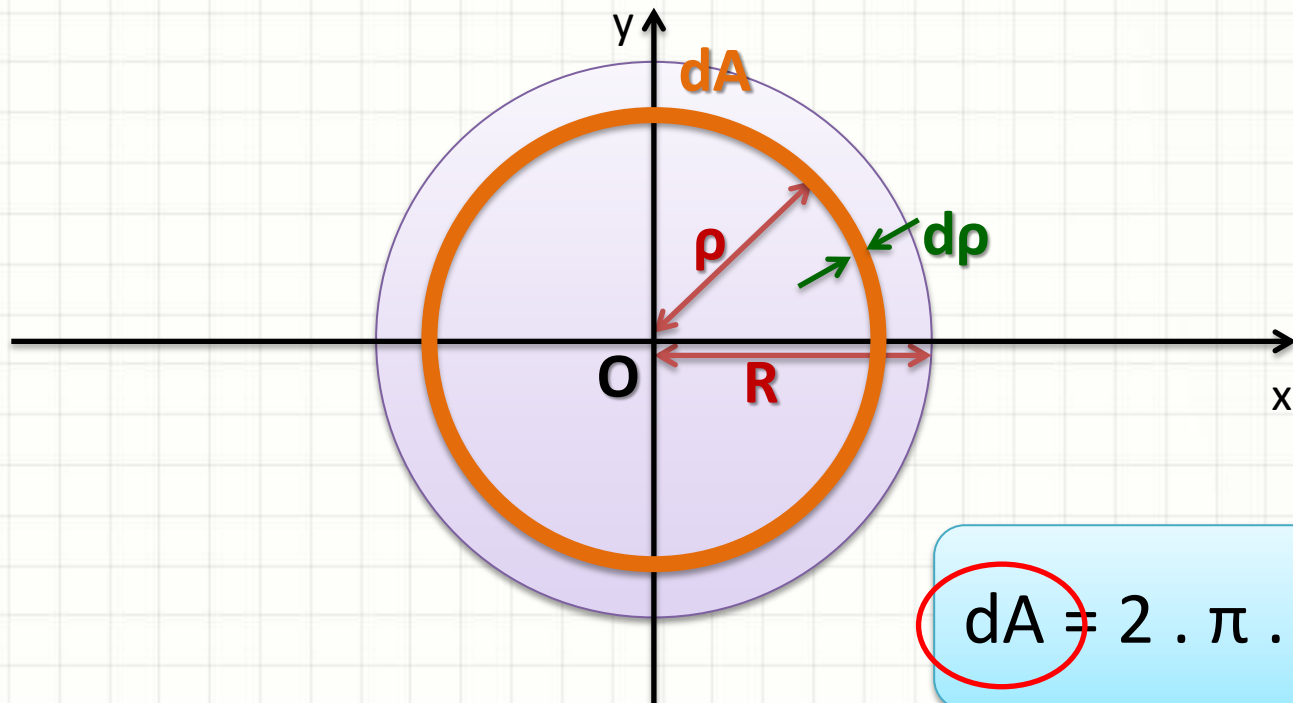
Ou...

$$\tau_{MAX} = \frac{T \cdot R}{J}$$

Exemplo para Eixo Maciço

- Lembrando que J , para um eixo maciço...

$$J = \int_A \rho^2 \cdot dA = \int_0^R \rho^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho = \frac{\pi \cdot R^4}{2}$$



Exemplo para Eixo Maciço

- Lembrando que para um eixo maciço

$$J = \frac{\pi \cdot R^4}{2}$$

$$\tau_{MAX} = \frac{T \cdot R}{J}$$

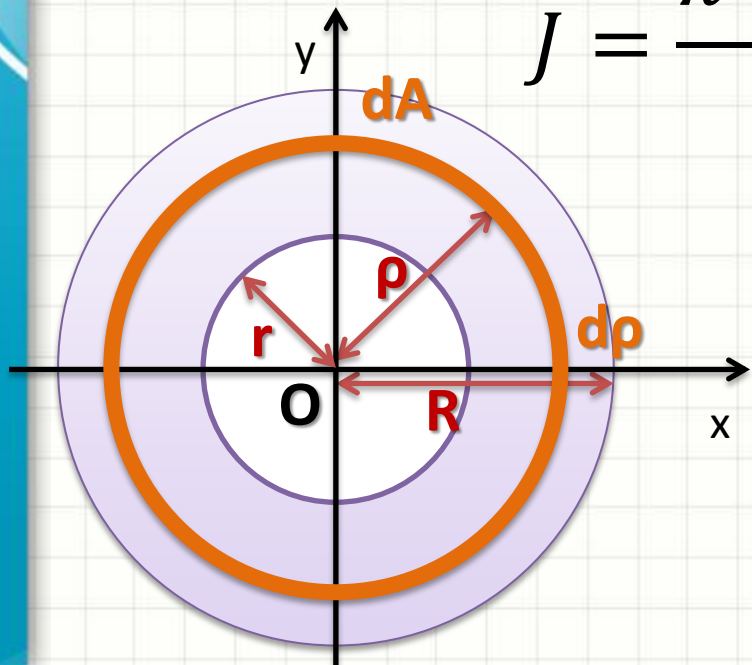
$$\tau_{MAX} = \frac{2 \cdot T \cdot R}{\pi \cdot R^4} = \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot R^3}$$

Exemplo para Eixo Tubular

- No eixo tubular, há uma região vazia... $J=?$

$$J = \int_A \rho^2 \cdot dA = \int_r^R \rho^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho$$

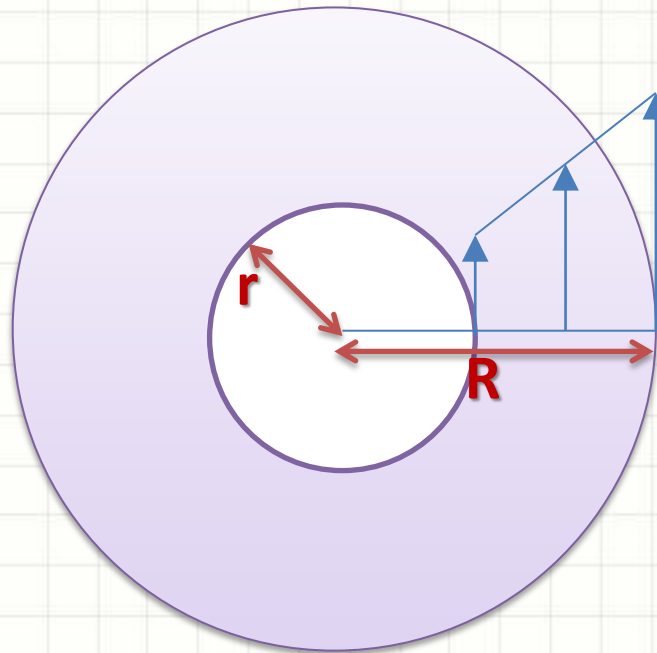
$$J = \frac{\pi \cdot R^4}{2} - \frac{\pi \cdot r^4}{2} = \frac{\pi \cdot (R^4 - r^4)}{2}$$



$$\tau_{MAX} = \frac{T \cdot R}{J}$$

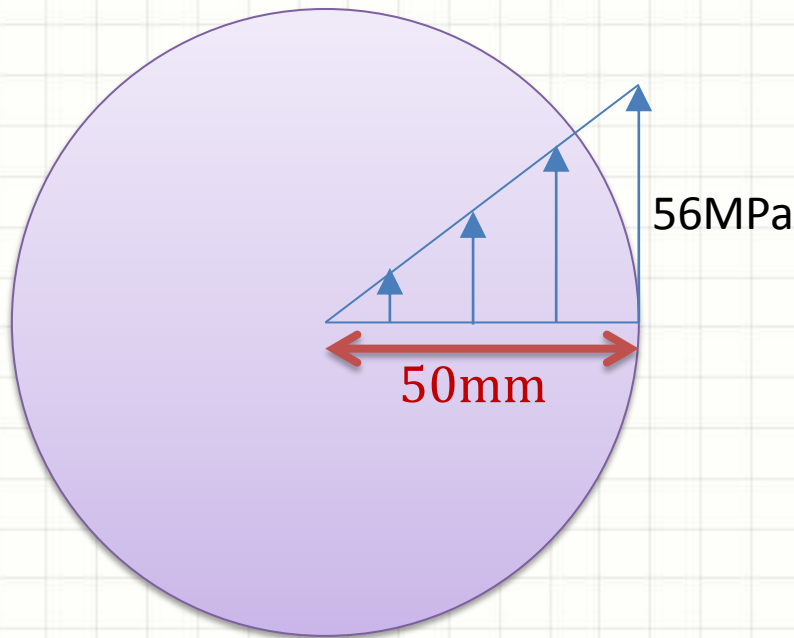
Exemplo para Eixo Tubular

- Distribuição de cisalhamento



Exemplo

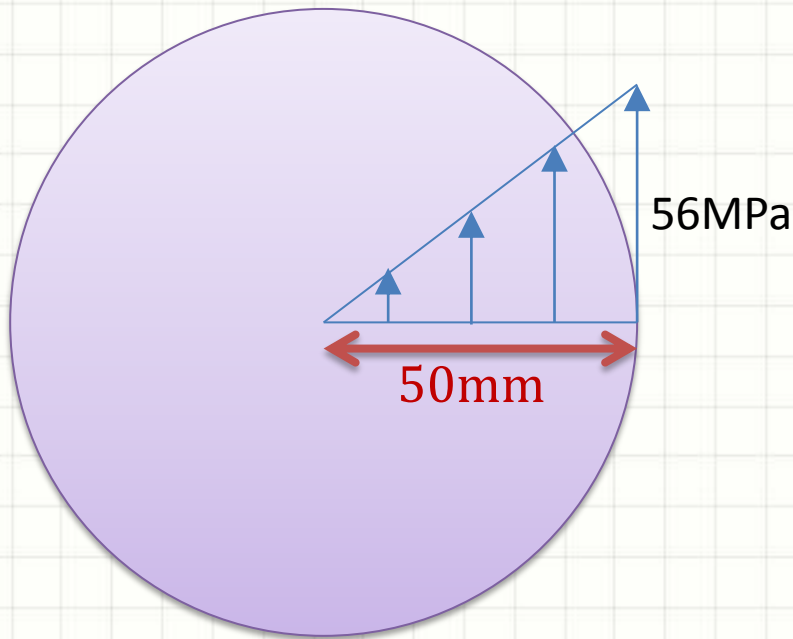
- Uma barra engastada de comprimento 10m e $R=50\text{mm}$ está submetida à seguinte distribuição de cisalhamento



- Calcule o torque total agindo sobre a barra

Exemplo

- $L=10\text{m}$ $R=50\text{mm}$ $T=?$



- Sabemos que...

$$\tau_{MAX} = \frac{T \cdot R}{J}$$

- Logo...

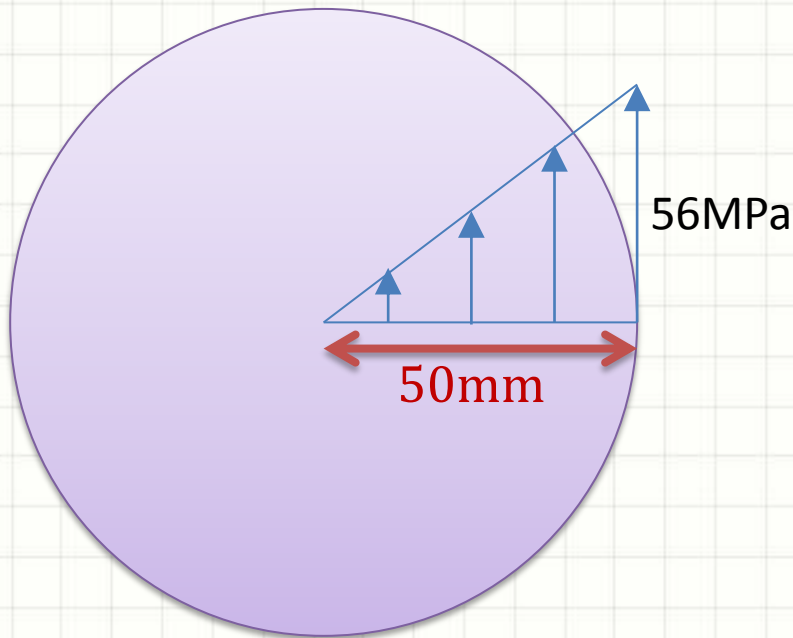
$$T = \frac{\tau_{MAX} \cdot J}{R}$$

$$T = \frac{\tau_{MAX} \cdot \pi \cdot R^4}{R \cdot 2}$$

$$T = \frac{\tau_{MAX} \cdot \pi \cdot R^3}{2}$$

Exemplo

- $L=10\text{m}$ $R=50\text{mm}$ $T=?$



- Então...

$$T = \frac{\tau_{MAX} \cdot \pi \cdot R^3}{2}$$
$$T = \frac{56 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-2})^3}{2}$$

$$T = 28 \cdot \pi \cdot 125$$

$$T = 10995,572 \text{ N} \cdot \text{m}$$
$$\cong 11 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA POR TORÇÃO

A Potência e o Torque

- **Potência:** trabalho / unidade de tempo
- **Trabalho:** força x deslocamento
- **Potência** = força x deslocamento / tempo
- A potência pelo torque fica

$$P = T \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

- Logo...

$$P = T \cdot \omega$$

P : potência, em watts
T : torque, em N.m
 ω : vel. angular, em rad/s

A Potência e o Torque

- Cisalhamento máximo?

$$\tau_{MAX} = \frac{T \cdot R}{J}$$

- Mas... Tirando T da fórmula da potência...

$$P = T \cdot \omega \Rightarrow T = \frac{P}{\omega}$$

- Logo...

$$\tau_{MAX} = \frac{P \cdot R}{\omega \cdot J}$$

A Potência e o Torque

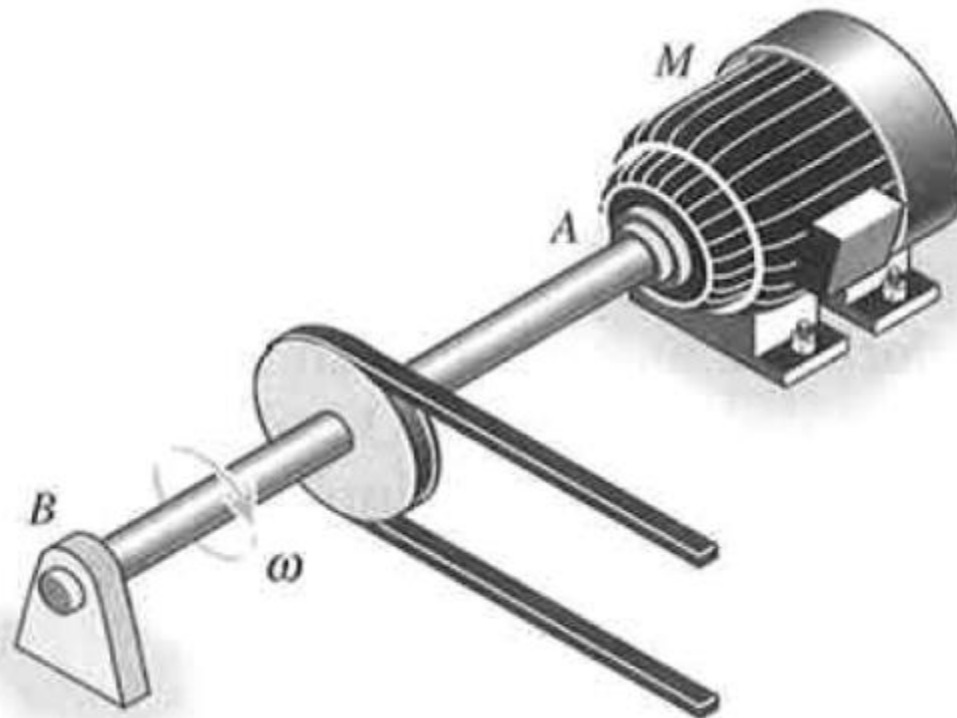
- Como $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (com f em Hz)
 - Logo...

$$P = T \cdot \omega \Rightarrow P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot T$$

$$\tau_{MAX} = \frac{P \cdot R}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot J}$$

A Potência e o Torque

- Exemplo
- Eixo maciço de aço, $P = 3750\text{W}$
- Se $\omega = 175\text{ rpm}$, $\tau_{ADM} = 100\text{MPa}$, calcule D



A Potência e o Torque

- Exemplo
- Eixo maciço de aço, $P = 3750W$
- Se $\omega = 175 \text{ rpm}$, $\tau_{ADM} = 100MPa$, calcule D
- Convertendo ω para o S.I.:

$$\omega = \frac{175 \text{ rot}}{1 \text{ min}} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rot}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 18,33 \text{ rad/s}$$

A Potência e o Torque

- Exemplo
- Eixo maciço de aço, $P = 3750\text{W}$
- Se $\omega = 175\text{ rpm}$, $\tau_{\text{ADM}} = 100\text{MPa}$, calcule D
- Pela fórmula da potência:

$$P = T \cdot \omega \Rightarrow$$

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{3750}{18,33} = 204,6 \text{ N.m}$$

A Potência e o Torque

- Exemplo
- Eixo maciço de aço, $P = 3750W$
- Se $\omega = 175 \text{ rpm}$, $\tau_{ADM} = 100MPa$, calcule D
- Com T , podemos calcular τ_{MAX}

$$\tau_{MAX} = \frac{T \cdot R}{J}$$

$$\tau_{MAX} = \frac{204,6 \cdot R \cdot 2}{\pi \cdot R^4} = \frac{409,2}{\pi \cdot R^3}$$

A Potência e o Torque

- Exemplo
- Eixo maciço de aço, $P = 3750W$
- Se $\omega = 175 \text{ rpm}$, $\tau_{ADM} = 100MPa$, calcule D
- Considerando $\tau_{MAX} = \tau_{ADM}$

$$\tau_{MAX} = \frac{409,2}{\pi \cdot R^3} = 100 \cdot 10^6$$

A Potência e o Torque

- Exemplo
- Eixo maciço de aço, $P = 3750W$
- Se $\omega = 175 \text{ rpm}$, $\tau_{ADM} = 100MPa$, calcule D
- De onde concluímos que...

$$\frac{409,2}{\pi \cdot R^3} = 100 \cdot 10^6 \Rightarrow R = \sqrt[3]{\frac{4,092}{\pi \cdot 10^6}}$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{4,092}{\pi \cdot 10^6}} = \frac{1,092099}{10^2} = 0,01092099m$$

A Potência e o Torque

- Exemplo
- Eixo maciço de aço, $P = 3750W$
- Se $\omega = 175 \text{ rpm}$, $\tau_{ADM} = 100MPa$, calcule D
- Se temos o raio, temos o diâmetro:

$$R = 0,01092099m$$

$$D = 0,021842m$$

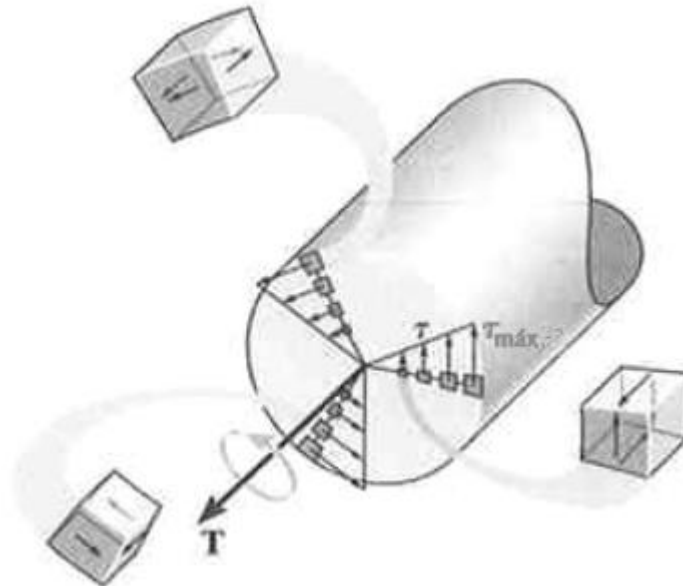
$$D \cong 2,2cm$$



ROMPIMENTO

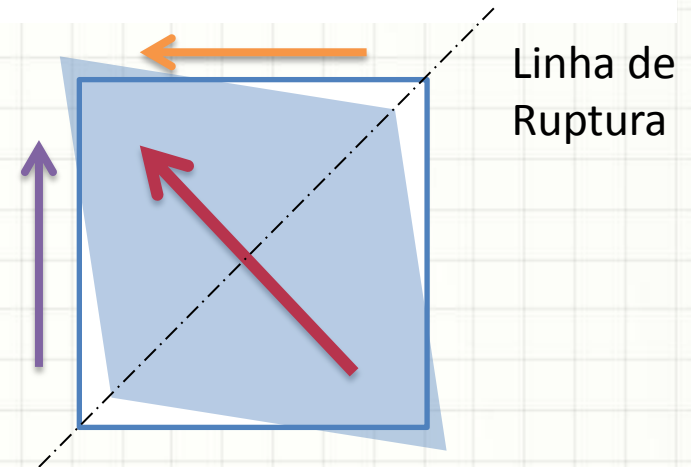
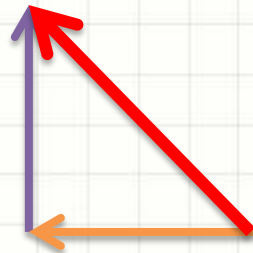
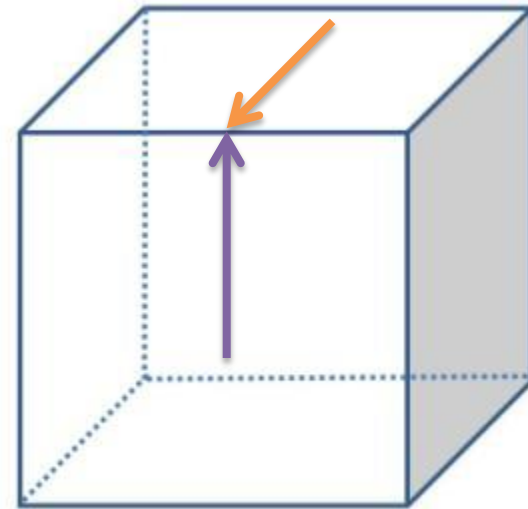
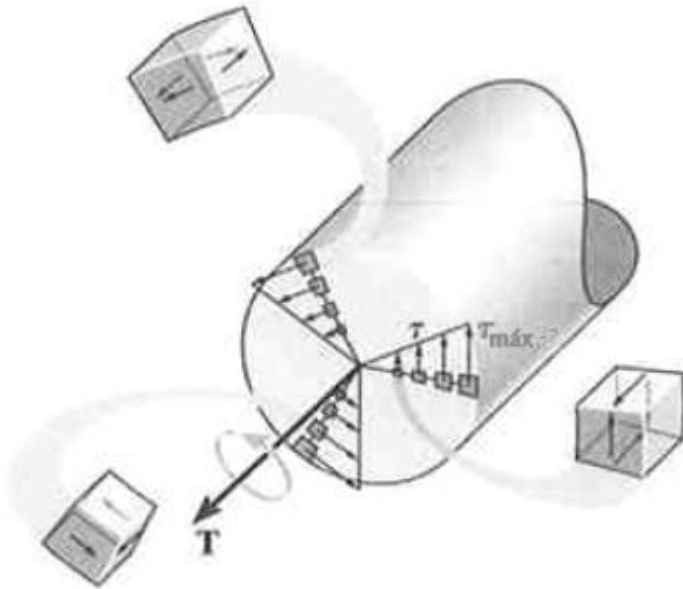
Rompimento por Torção

- O rompimento por forças de cisalhamento...
 - É no plano perpendicular a estas forças
- É isso que ocorre na torção?
- O rompimento é helicoidal!
 - Por quê?



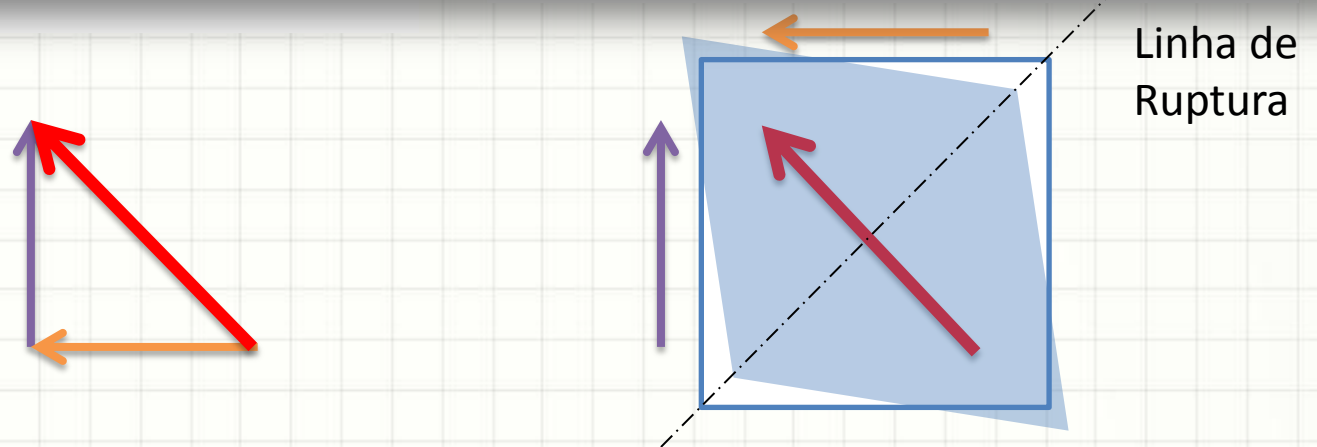
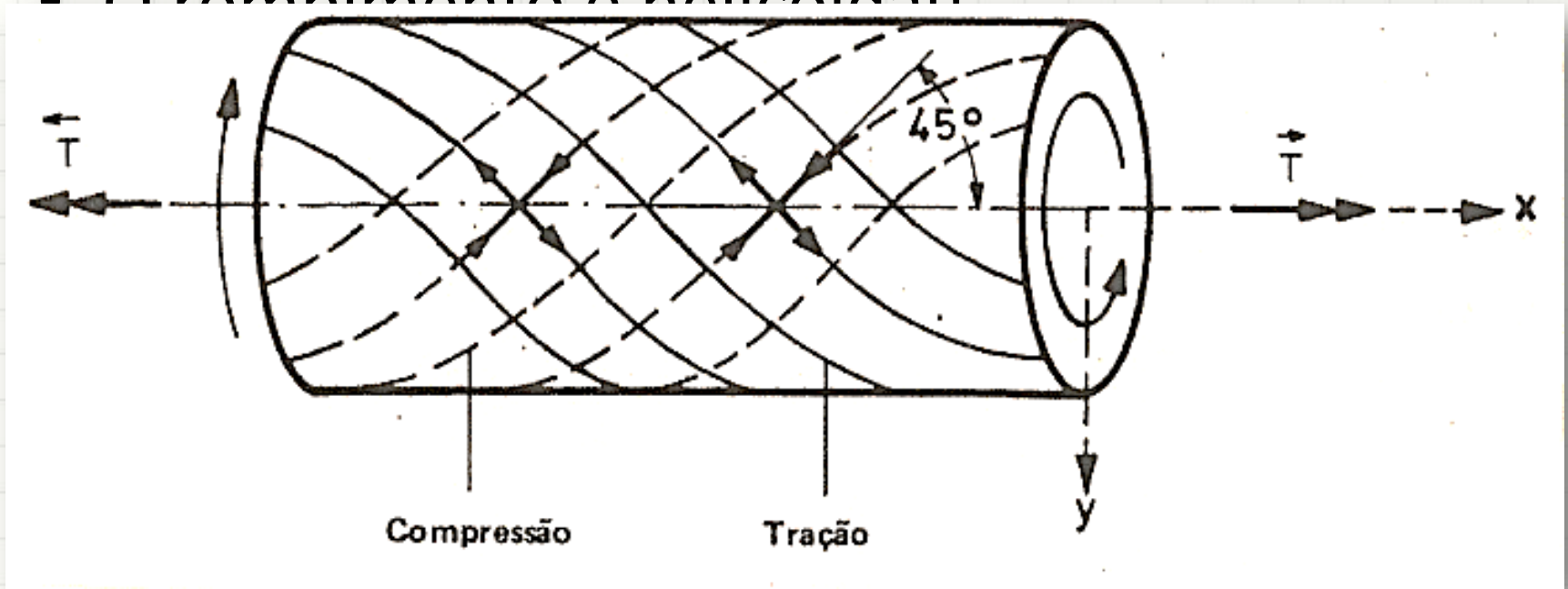
Rompimento por Torção

- O rompimento é helicoidal!



Rompimento por Torção

- O rompimento é helicoidal

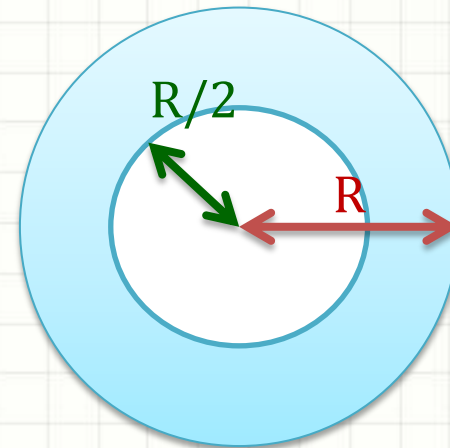
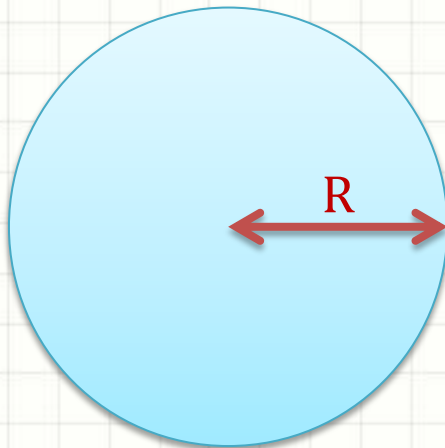




EXERCÍCIO

Exercício – Entrega Individual

- Um eixo de comprimento 10m e $R=10\text{cm}$ está submetido ao $T = 80\text{kN.m}$.
- Calcule τ_{MAX} e a potência transmitida a 5000RPM em cada uma das configurações abaixo:





PARA TREINAR

Para Treinar em Casa

- Hibbeler (Bib. Virtual), Pág. 109 a 124
- Mínimos:
 - Exercícios 5.1, 5.2, 5.5, 5.25
 - Nota: no 5.1, onde está 15pol, leia 1,5pol
- Extras:
 - Exercícios 5.3, 5.6, 5.7, 5.26, 5.30
- Adote essas conversões:
 - 1 ksi = 7MPa
 - 1 pol = 25mm
 - 1hp = 1000W

Para Treinar em Casa

Propriedades dos Materiais Utilizados em Engenharia

Materiais		Densidade (mg/m ³)	Módulo de elasticidade		Tensão de escoamento (MPa)			Tensão última (MPa)			Alongamento % em corpo de prova de 50mm	Coeficiente de Poisson	coeficiente de expansão termica x10-6
			E (GPa)	transversal G (GPa)	tração	compressão	cisalhamento	tração	compressão	cisalhamento			
Ligas de Alumínio Forjado	2014-T6	2,79	73,1	27	414	414	172	469	469	290	10	0,35	23
	6061-T6	2,71	68,9	26	255	255	131	290	290	186	12	0,35	24
Ligas de Ferro Fundido	cinza ASTM 20	7,19	67,0	27	-	-	-	179	669	-	0,6	0,28	12
	Maleável ASTM A-197	7,28	172	68	-	-	-	276	572	-	5	0,28	12
Ligas de Cobre	Latão vermelho C83400	8,74	101	37	70,0	70,0	-	241	241	-	35	0,35	18
	Bronze C86100	8,83	103	38	345	345	-	655	655	-	20	0,34	17
Ligas de Magnésio	Am 1004-T61	1,83	44,7	18	152	152	-	276	276	152	1	0,30	26
Ligas de Aço	Estrutural A-36	7,85	200	75	250	250	-	400	400	-	30	0,32	12
	Inoxidável 304	7,86	193	75	207	207	-	517	517	-	40	0,27	17
	Aço-ferramenta L2	8,16	200	75	703	703	-	800	800	-	22	0,32	12
Ligas de Titânio	Ti-6Al-4V	4,43	120	44	924	924	-	1000	1000	-	16	0,36	9,4

Materiais		Densidade (mg/m ³)	Módulo de elasticidade		Tensão de escoamento (MPa)			Tensão última (MPa)			Alongamento % em corpo de prova de 50mm	Coeficiente de Poisson	coeficiente de expansão termica
			E (GPa)	transversal G (GPa)	tração	compressão	cisalhamento	tração	compressão	cisalhamento			
Concreto	Baixa resistência	2,38	22,1	-	-	-	12	-	-	-	-	0,15	11
	Alta resistência	2,38	29,0	-	-	-	38	-	-	-	-	0,15	11
Plástico Reforçado	Kevlar 49	1,45	131	-	-	-	-	717	483	20,3	2,8	0,34	-
	30% de vidro	1,45	72,4	-	-	-	-	90	131	-	-	0,34	-
Madeira Estrutural de Alta Qualidade	Abeto Douglas	0,47	13,1	-	-	-	-	2,1	26	6,2	-	0,29	-
	Abeto Branco	3,60	9,65	-	-	-	-	2,5	36	6,7	-	0,31	-

Fonte HIBBELER, R.C. Resistência dos materiais. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.



CONCLUSÕES

Resumo

- A torção provoca deformações
 - Medidas angularmente
- Deformação depende do raio!
- Tensão de cisalhamento máxima: $f(T,R,J)$
- Eixos: dada uma rotação, possuem uma potência máxima admissível
- **Exercitar**
 - Exercícios Hibbeler

Próxima Aula



- E a deformação da torção?
- Como calcular o ponto de máxima torção?



PERGUNTAS?



**BOM DESCANSO
A TODOS!**