

RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS II

CARREGAMENTO AXIAL

PARTE II

Prof. Dr. Daniel Caetano

2018 - 2

Objetivos

- Compreender o conceito de flambagem
- Compreender o surgimento de tensões por dilatação/contração térmica
- Compreender o que são concentrações de tensões
- Compreender as deformações inelásticas



Material de Estudo



Material

Acesso ao Material

Apresentação

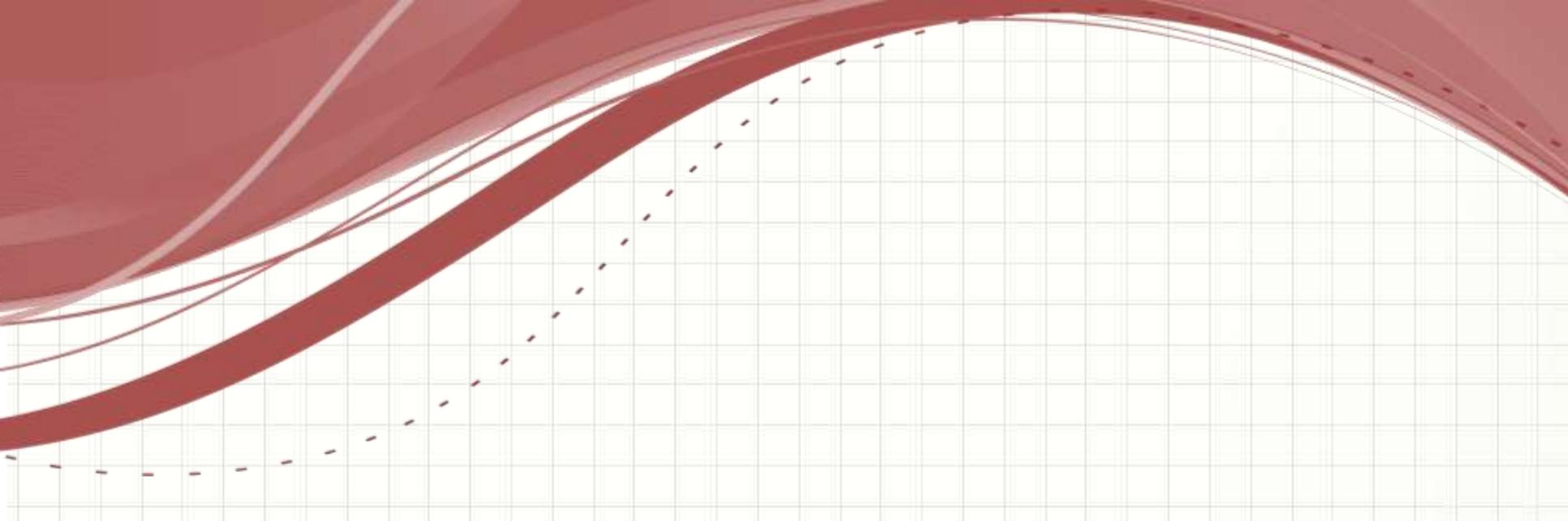
<http://www.caetano.eng.br/>
(Resistência dos Materiais II – Aula 4)

Material Didático

Resistência dos Materiais (Hibbeler), págs 96-124 e 477 a 518.

Biblioteca Virtual

“Resistência dos Materiais”

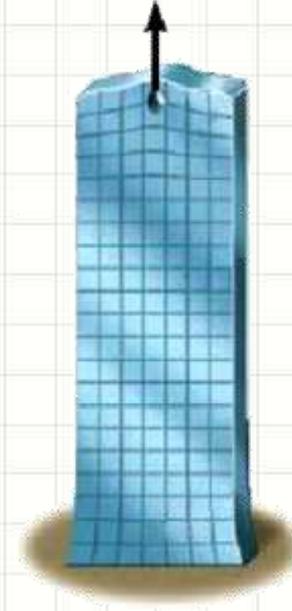


RELEMBRANDO:

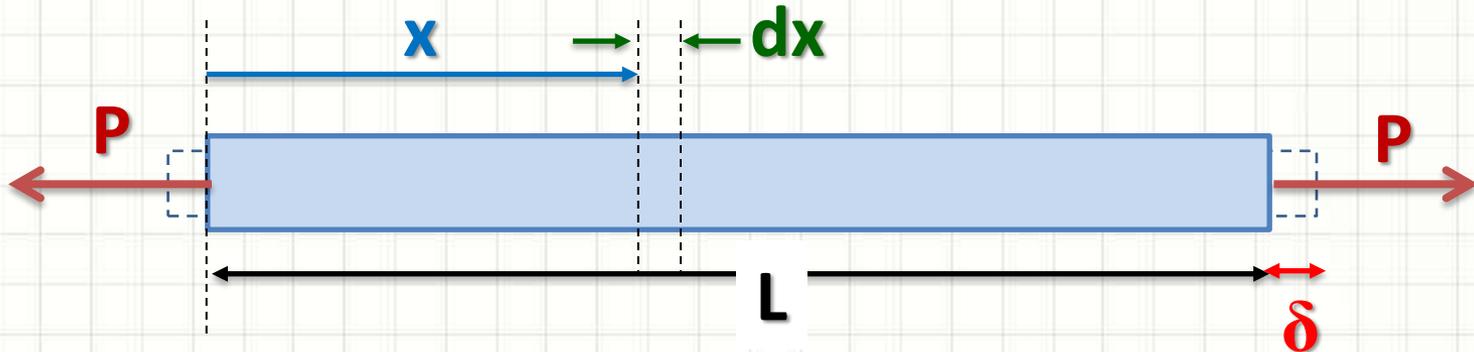
CARREGAMENTOS AXIAIS

Deformações Axiais

- Princípio de Saint-Venant

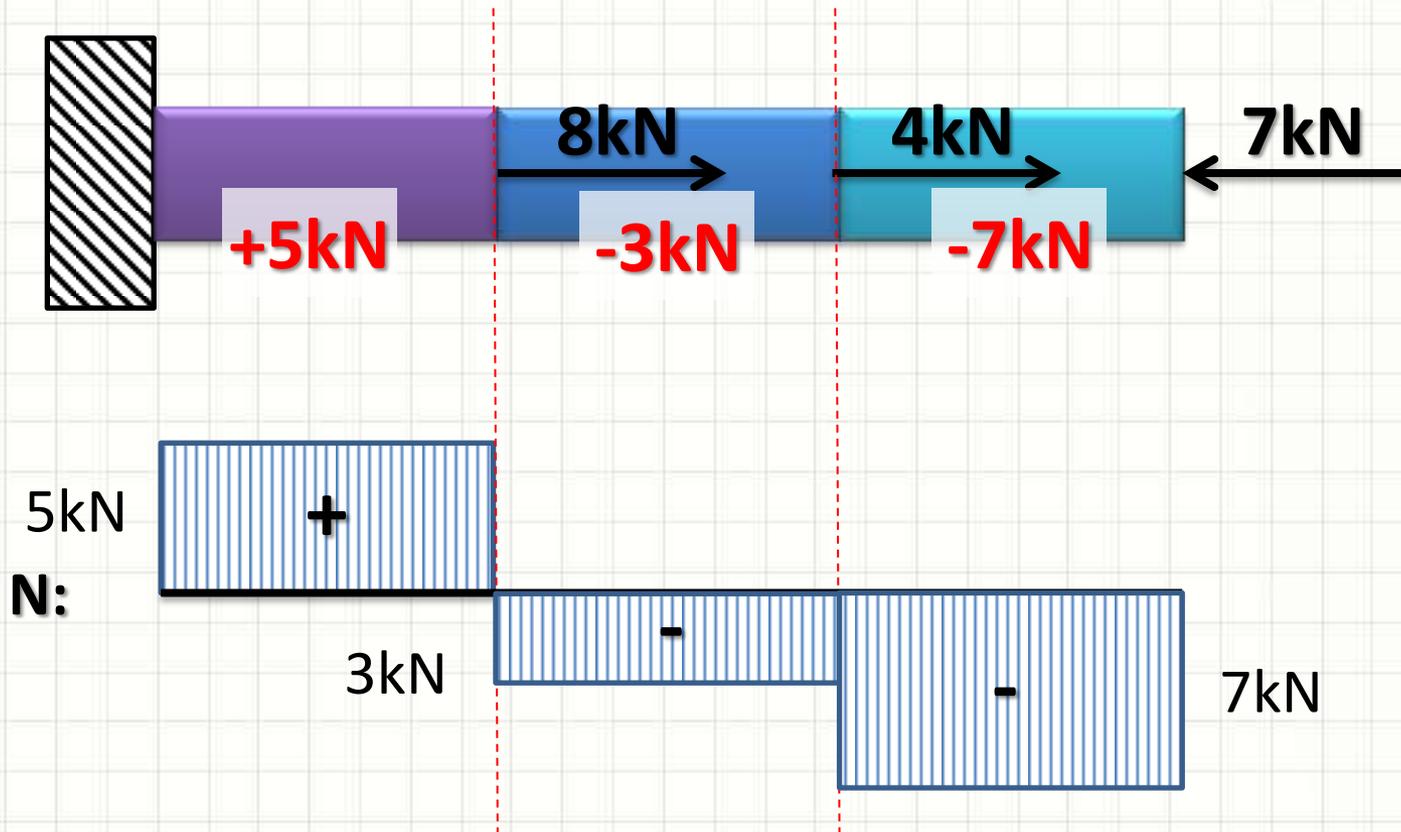


- Deformação de uma viga de seção constante



$$\delta = \int_0^L \frac{P \cdot dx}{E \cdot A(x)} = \frac{P \cdot L}{E \cdot A}$$

Diagrama de Esforços Normais

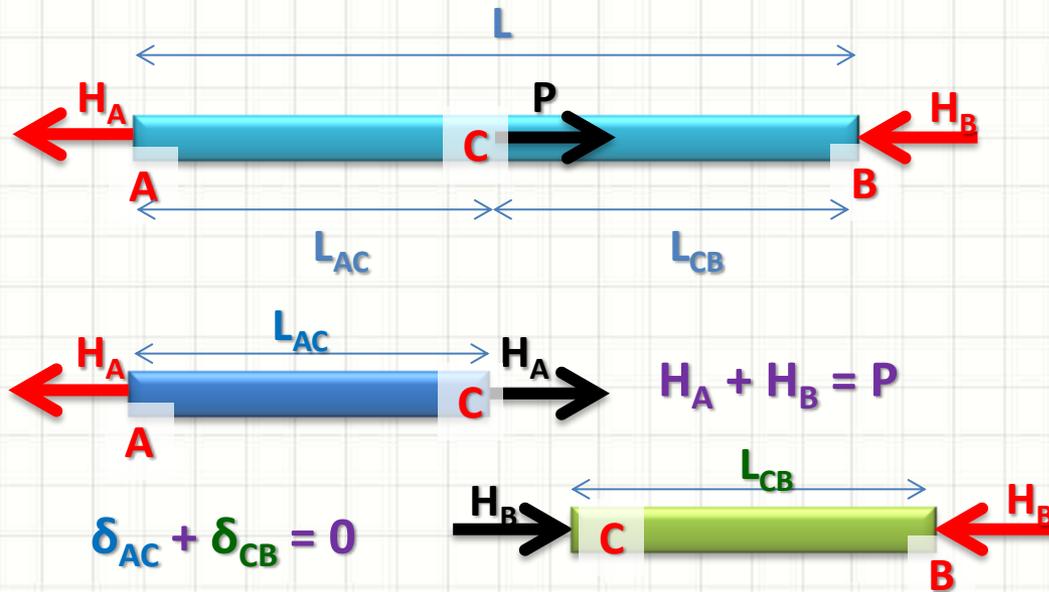


Deformações Axiais

- Princípio da Superposição de efeitos



- Estruturas Estaticamente Indeterminadas



Calcule a deformação e verifique



$$A = 0,001\text{m}^2$$
$$E = 2\text{GPa}$$
$$\sigma_{\text{adm}} = 12\text{MPa}$$

- Deformação

$$\delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} = \frac{-10^4 \cdot 10}{2 \cdot 10^9 \cdot 10^{-3}} = \frac{-10^5}{2 \cdot 10^6} = -0,1\text{m}$$

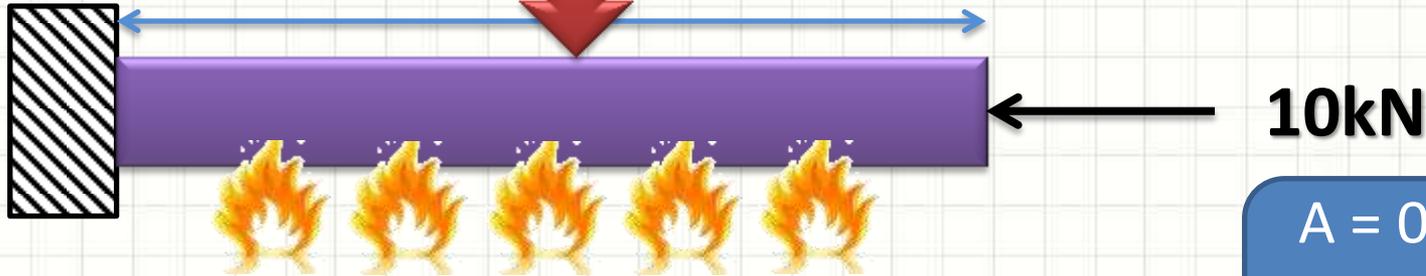
- Verificação

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{-10^4}{10^{-3}} = -10^7 = -10\text{MPa}$$

Ok?

Calculo de deformação e verifique

#comofaz?



$$\begin{aligned} A &= 0,001\text{m}^2 \\ E &= 2\text{GPa} \\ \sigma_{\text{adm}} &= 12\text{MPa} \end{aligned}$$

- Deformação

$$\delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} = \frac{-10^4 \cdot 10}{2 \cdot 10^9 \cdot 10^{-3}} = \frac{-10^5}{2 \cdot 10^6} = -0,1\text{m}$$

- Verificação

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{-10^4}{10^{-3}} = -10^7 = -10\text{MPa}$$

Calculo de deformação e verifique

#comofaz?



$$\begin{aligned} A &= 0,001\text{m}^2 \\ E &= 2\text{GPa} \\ \sigma_{\text{adm}} &= 12\text{MPa} \end{aligned}$$

- Deformação

$$\delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} = \frac{-10^4 \cdot 10}{2 \cdot 10^9 \cdot 10^{-3}} = \frac{-10^5}{2 \cdot 10^6} = -0,1\text{m}$$

- Verificação

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{-10^4}{10^{-3}} = -10^7 = -10\text{MPa}$$

Calculo de deformação e verifique

#comofaz?



$$\begin{aligned} A &= 0,001\text{m}^2 \\ E &= 2\text{GPa} \\ \sigma_{\text{adm}} &= 12\text{MPa} \end{aligned}$$

- Deformação

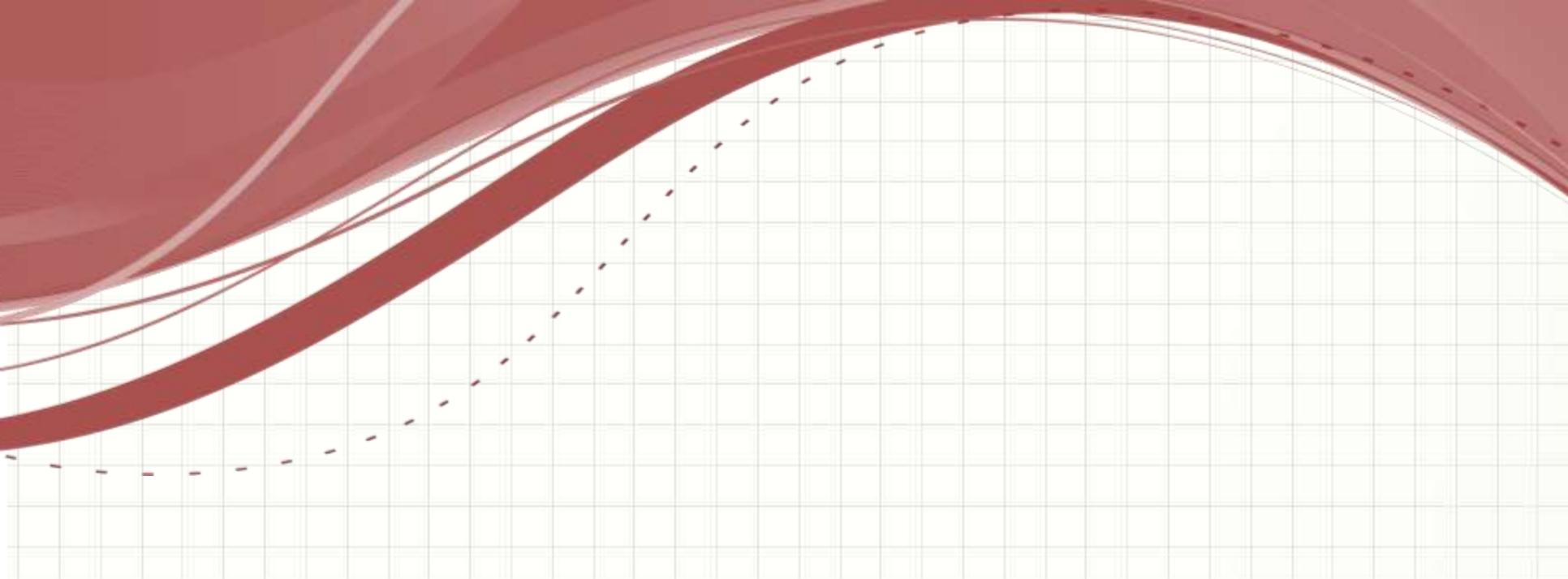
$$\delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A}$$

Vamos ver o que
fazer em cada um
desses casos!

$$\frac{5}{6} = -0,1\text{m}$$

- Verificação

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{-10^4}{10^{-3}} = -10^7 = -10\text{MPa}$$

The background features a light gray grid. In the upper left, there are several overlapping, wavy red lines of varying opacity and thickness, creating a sense of motion. A dashed red line follows a similar curved path across the upper portion of the grid.

FLAMBAGEM

Flambagem

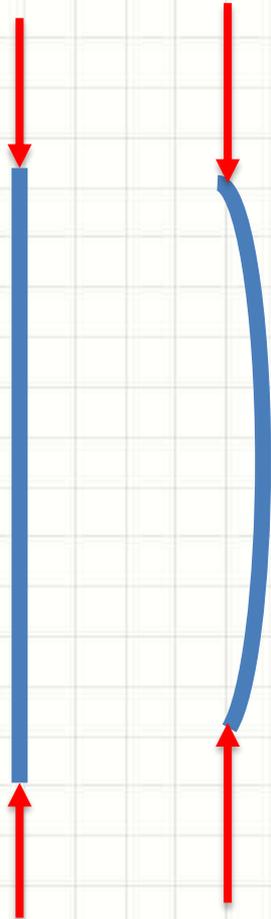
- Então, em um pilar, se $\sigma_{\text{real}} < \sigma_{\text{adm}}$, tudo ok?
- Infelizmente... Nem sempre!



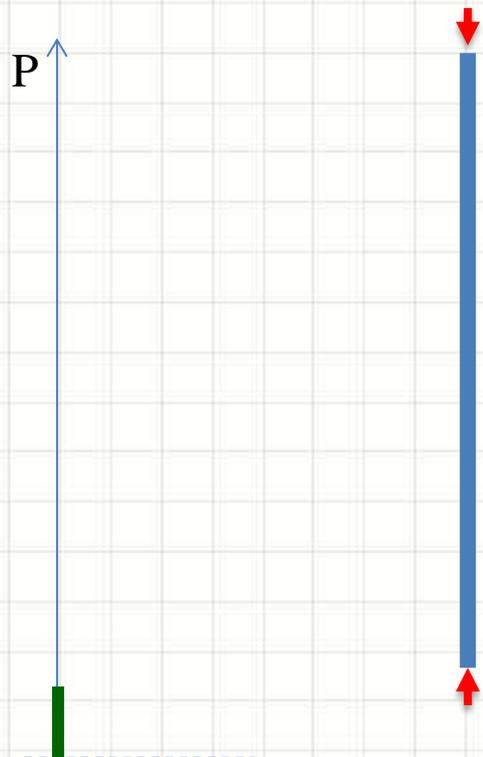
Vídeo

Flambagem

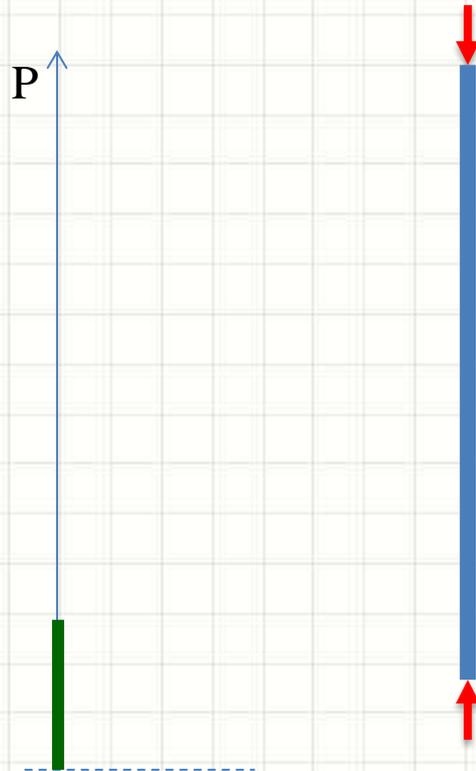
- Então, em um pilar, se $\sigma_{\text{real}} < \sigma_{\text{adm}}$, tudo ok?
- Infelizmente... Nem sempre!



Flambagem: Progressão



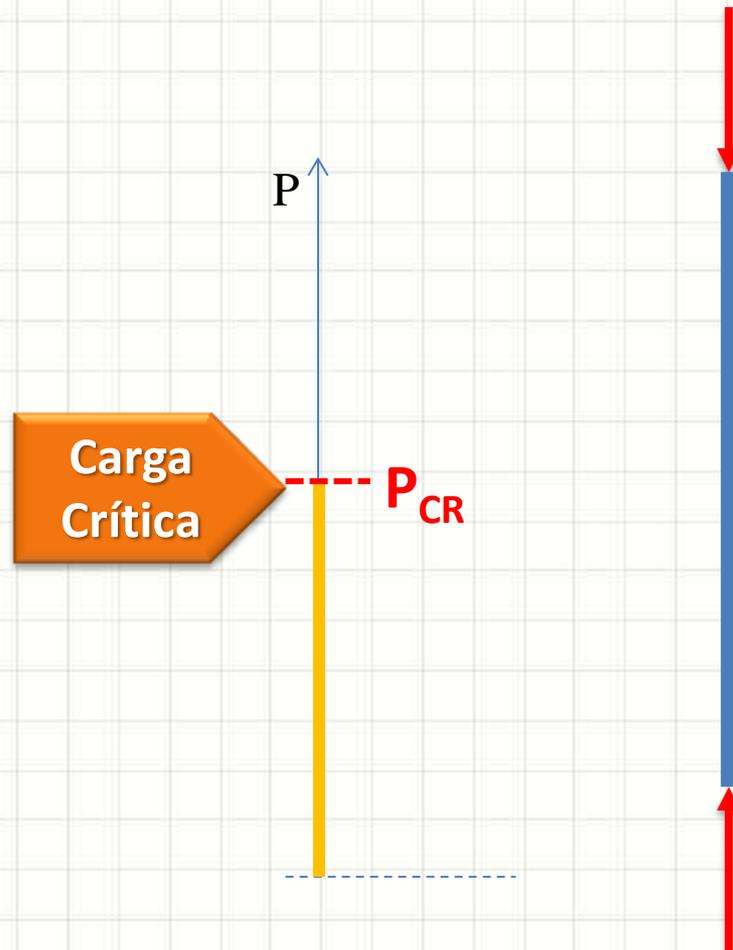
Flambagem: Progressão



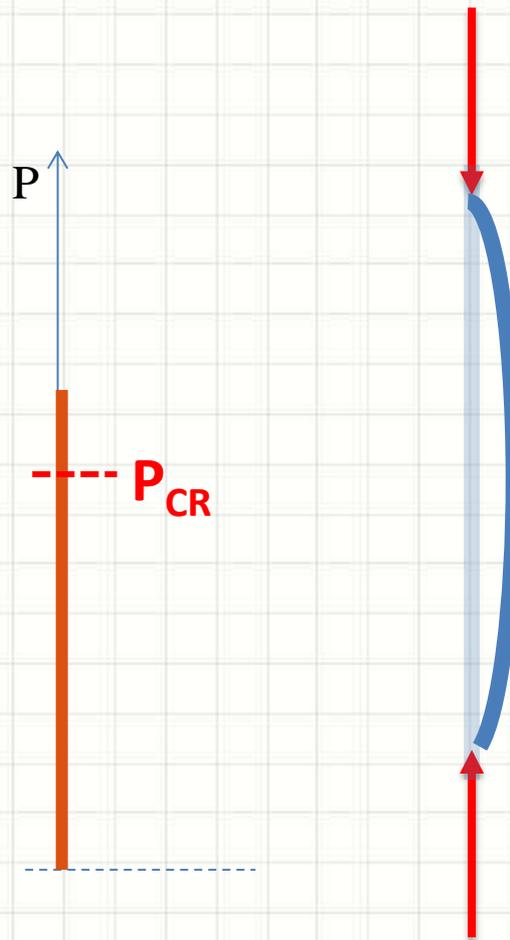
Flambagem: Progressão



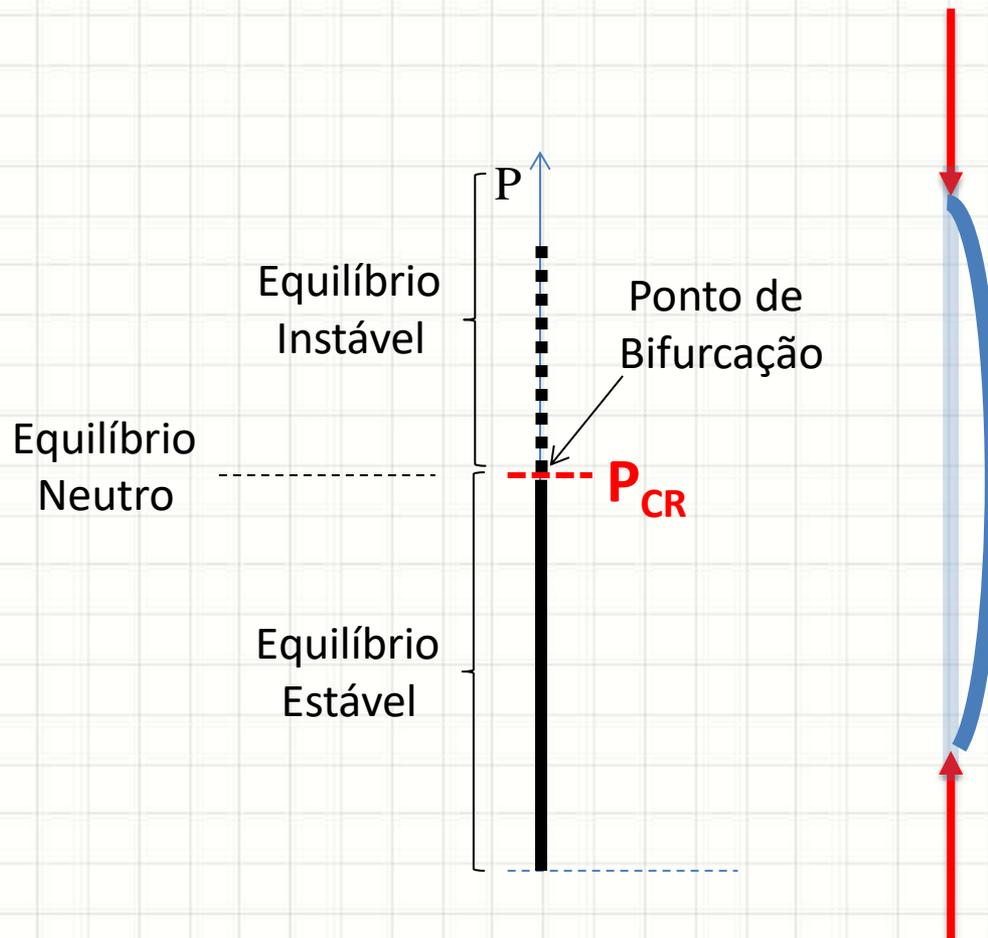
Flambagem: Progressão



Flambagem: Progressão



Flambagem: Progressão



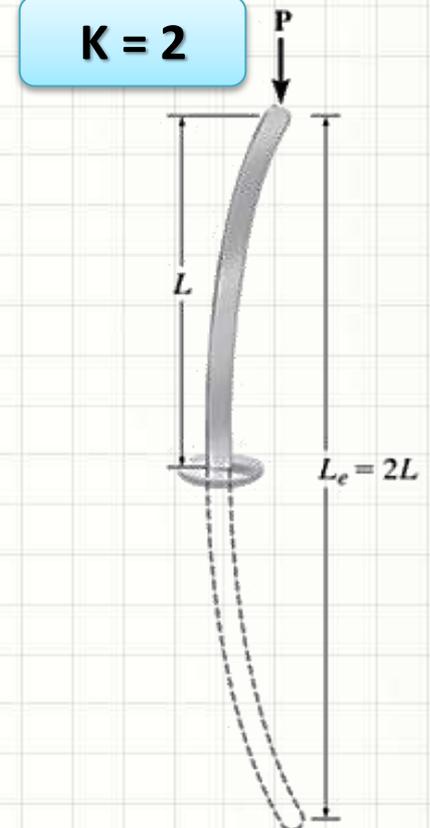
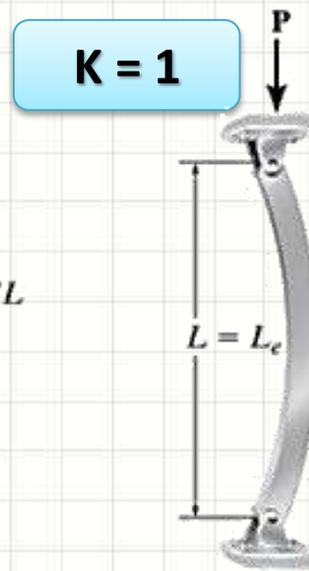
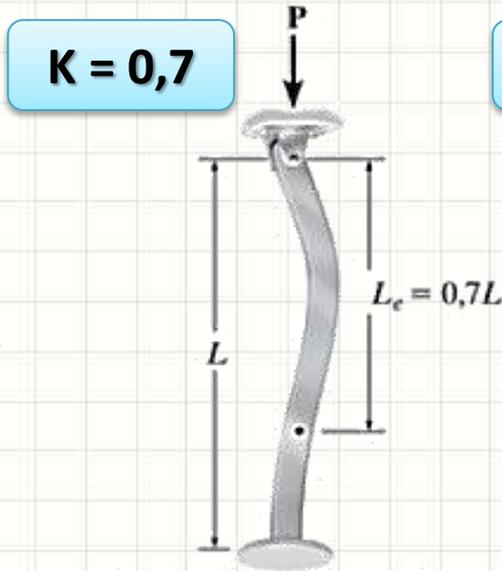
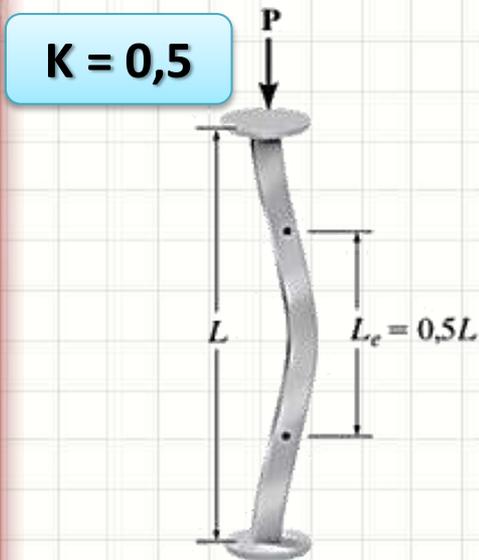
Flambagem

- Como determinar a Carga Crítica P_{cr} ?

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2}$$

Momento de Inércia

- K depende do tipo de apoio

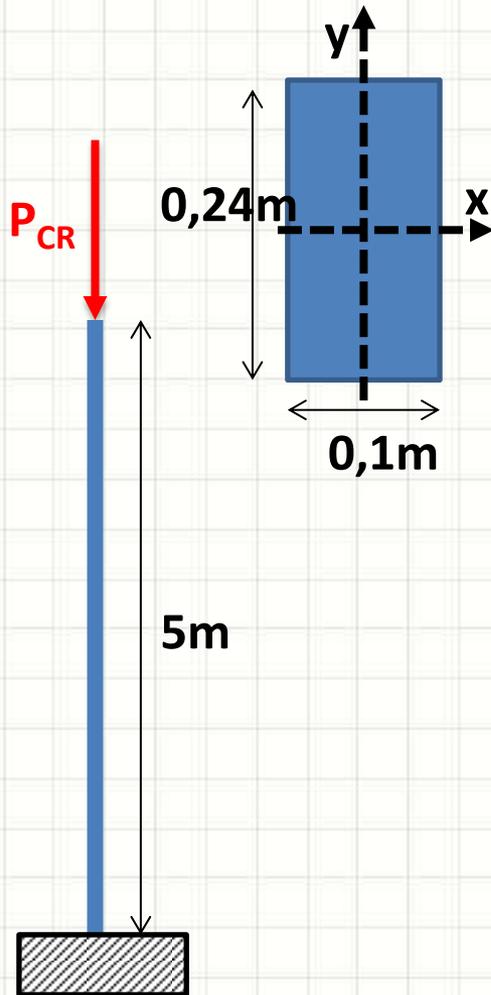


Exercício

- Determine a Carga Crítica

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2}$$

$E = 50\text{GPa}$



- Qual é o menor momento de inércia?

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,24 \cdot 0,1^3}{12}$$

$$I_y = 2 \cdot 10^{-5}$$

- E qual o K ?

Exercício

- Determine a Carga Crítica $P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2}$

$E = 50\text{GPa}$ $I_y = 2 \cdot 10^{-5}$

- E qual o K ?

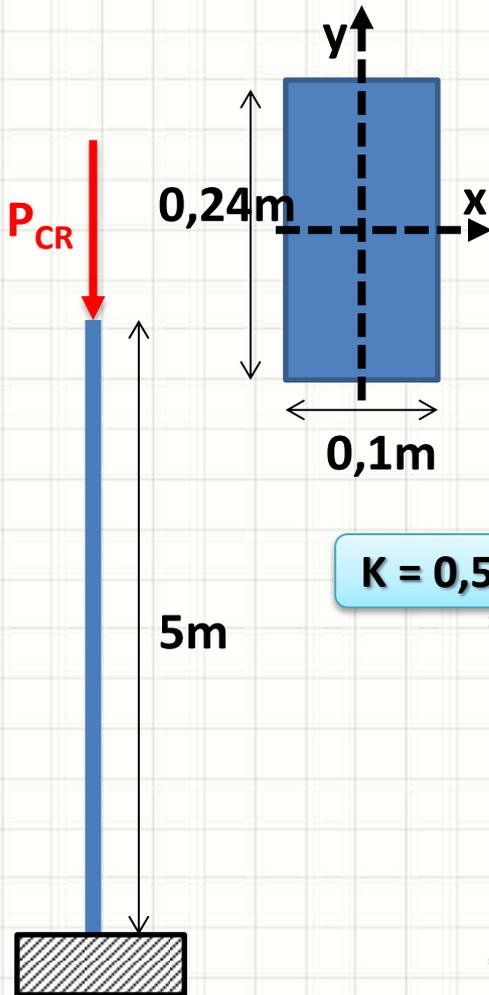
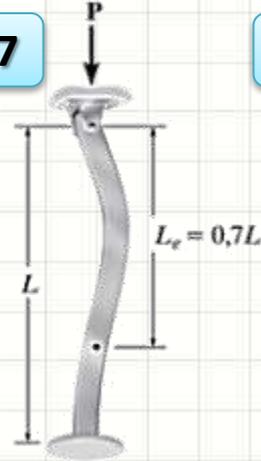
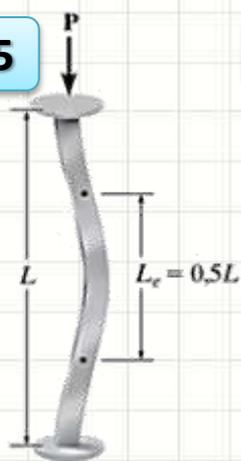
$K = 2$

$K = 2$

$K = 0,5$

$K = 0,7$

$K = 1$



Exercício

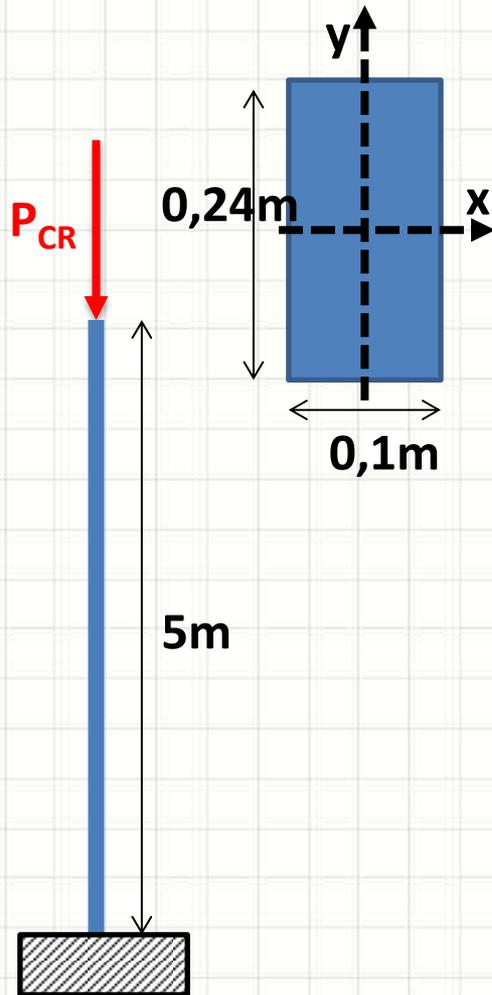
- Determine a Carga Crítica

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2}$$

$$E = 50\text{GPa}$$

$$I_y = 2 \cdot 10^{-5}$$

$$K = 2$$



$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 50 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{(2 \cdot 5)^2}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 100 \cdot 10^4}{100}$$

$$P_{cr} = 9,87 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Exercício: verifique a flambagem



- Deformação: $\delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} = -0,1m$
- Tensão Admissível: $\sigma = \frac{P}{A} = -10MPa$
- Carga Crítica:

$$\begin{aligned} A &= 0,001m^2 \\ E &= 2GPa \\ I &= 10^{-7}m^4 \\ \sigma_{adm} &= 12MPa \end{aligned}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^9 \cdot 10^{-7}}{(2 \cdot 10)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200}{400}$$

$$P_{cr} \sim 5N$$

#fail

Índice de Esbeltez

- Mais esbelto, mais propenso a flambagem

$$IE = \frac{L}{r}$$

- Raio de Giração

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$



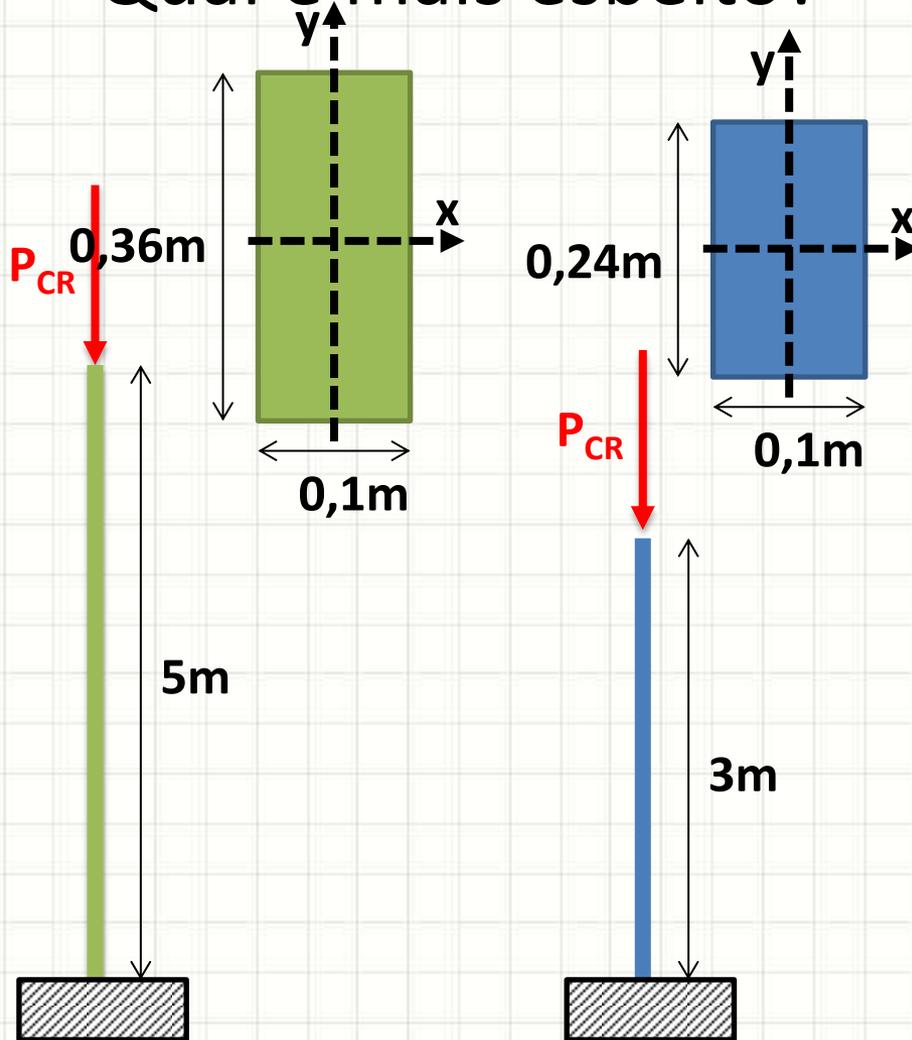
- Tensão Crítica

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{CR}}{A}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(K \cdot L/r)^2}$$

Exercício

- Qual é mais esbelto?



$$I_y = \frac{0,36 \cdot 0,1^3}{12}$$

$$I_y = 3 \cdot 10^{-5} m^4$$

$$I_y = \frac{0,24 \cdot 0,1^3}{12}$$

$$I_y = 2 \cdot 10^{-5} m^4$$

$$A = 3,6 \cdot 10^{-2} m^2$$

$$A = 2,4 \cdot 10^{-2} m^2$$

$$A = 3,6 \cdot 10^{-2} \text{m}^2$$

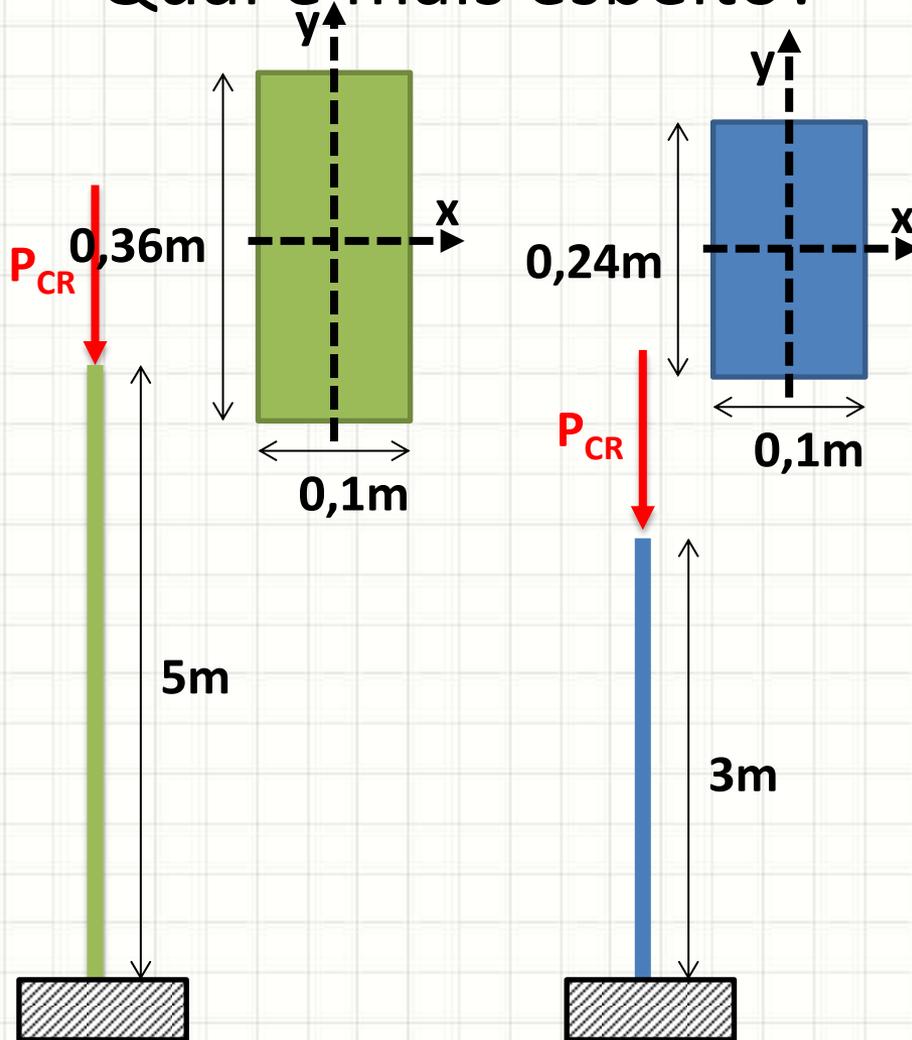
$$A = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{m}^2$$

$$I_y = 3 \cdot 10^{-5} \text{m}^4$$

$$I_y = 2 \cdot 10^{-5} \text{m}^4$$

Exercício

- Qual é mais esbelto?



$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$r = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-5}}{3,6 \cdot 10^{-2}}}$$

$$r = 2,89 \cdot 10^{-2} \text{m}$$

Exercício

- Qual é mais esbelto?

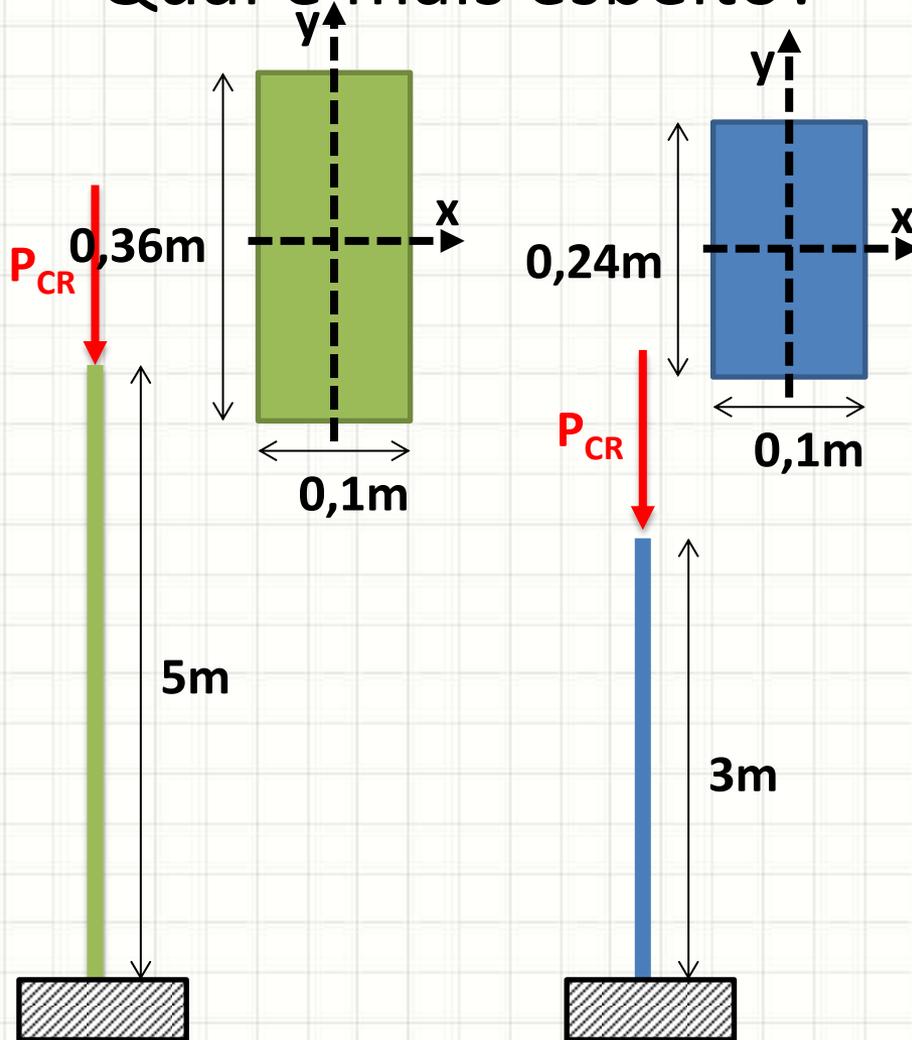
$$A = 3,6 \cdot 10^{-2} m^2$$

$$A = 2,4 \cdot 10^{-2} m^2$$

$$I_y = 3 \cdot 10^{-5} m^4$$

$$I_y = 2 \cdot 10^{-5} m^4$$

$$r = 2,89 \cdot 10^{-2} m$$



$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$r = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-5}}{2,4 \cdot 10^{-2}}}$$

$$r = 2,89 \cdot 10^{-2} m$$

Exercício

- Qual é mais esbelto?

$$A = 3,6 \cdot 10^{-2} m^2$$

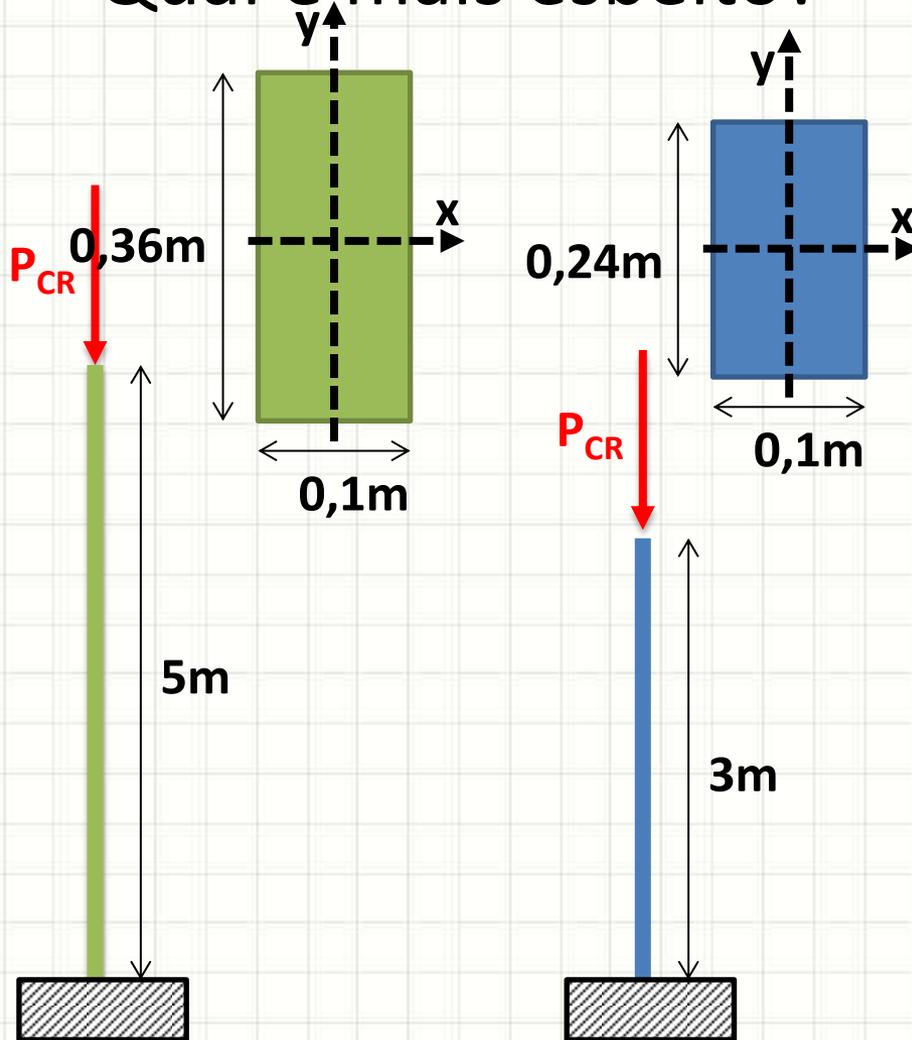
$$A = 2,4 \cdot 10^{-2} m^2$$

$$I_y = 3 \cdot 10^{-5} m^4$$

$$I_y = 2 \cdot 10^{-5} m^4$$

$$r = 2,89 \cdot 10^{-2} m$$

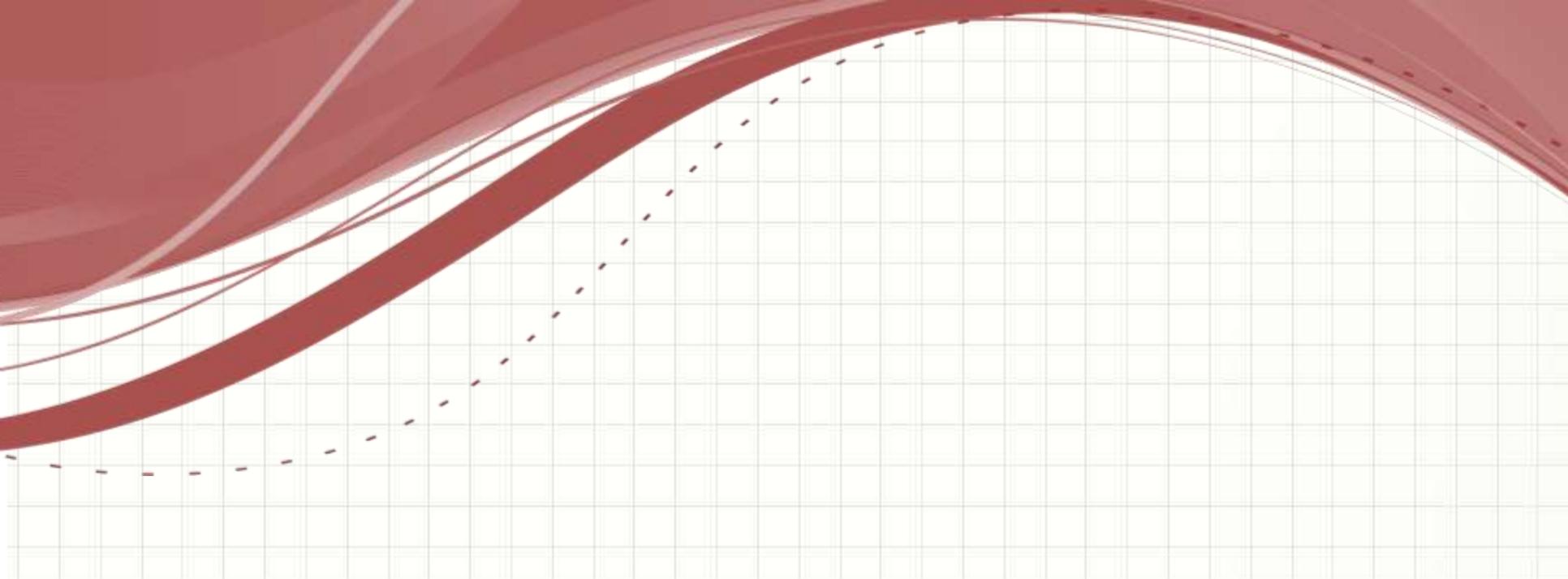
$$r = 2,89 \cdot 10^{-2} m$$



$$IE = \frac{L}{r}$$

$$IE = \frac{5}{2,89 \cdot 10^{-2}}$$

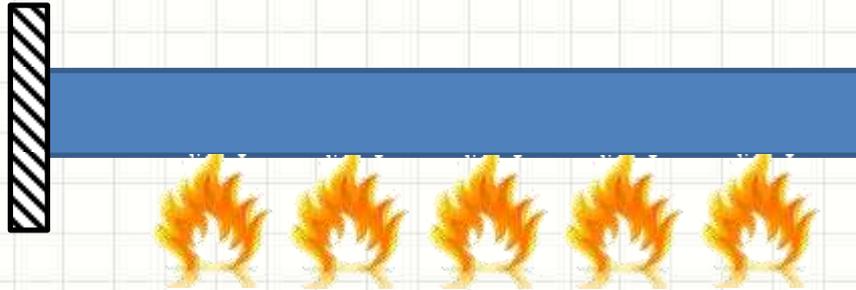
$$IE = \frac{3}{2,89 \cdot 10^{-2}}$$



TENSÕES TÉRMICAS

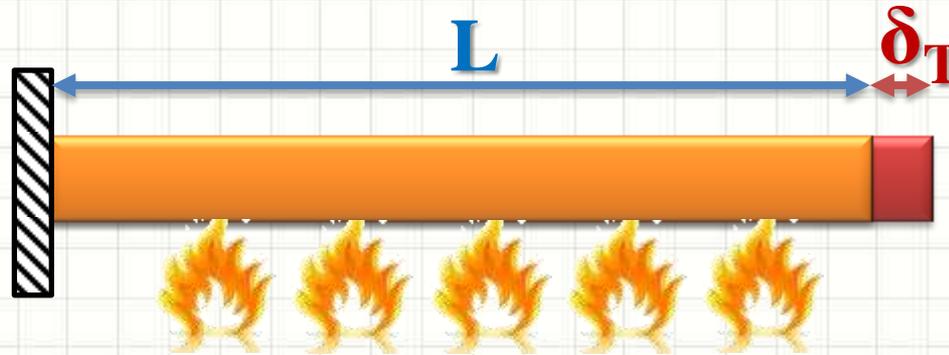
Deformação Térmica

- Aumento de Temperatura



Deformação Térmica

- Aumento de Temperatura



α : coeficiente linear de
expansão térmica

- Dilatação térmica
- Podemos calcular δ_T , se ΔT for constante

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

Deformação Térmica

- Aumento de Temperatura



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

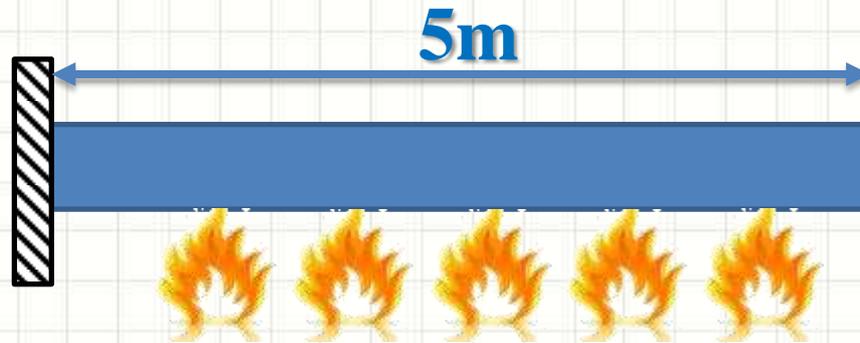
- Se ΔT é variável, $\Delta T = \Delta T(x)$

$$\delta_T = \int_0^L \alpha \cdot \Delta T(x) \cdot dx$$



Exercício

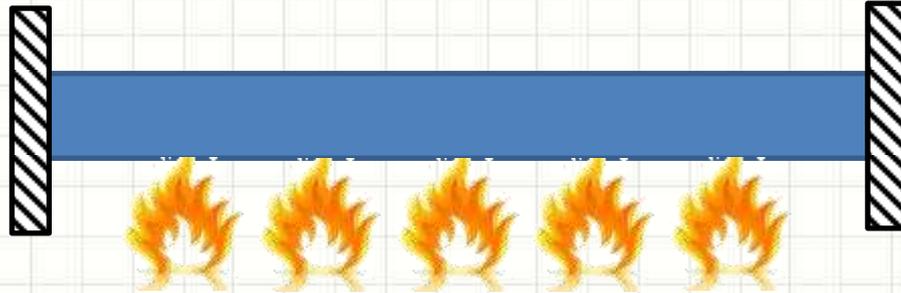
- Calcule o tamanho final da barra
 - De 20°C para 30°C



$$\alpha = 0,001 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

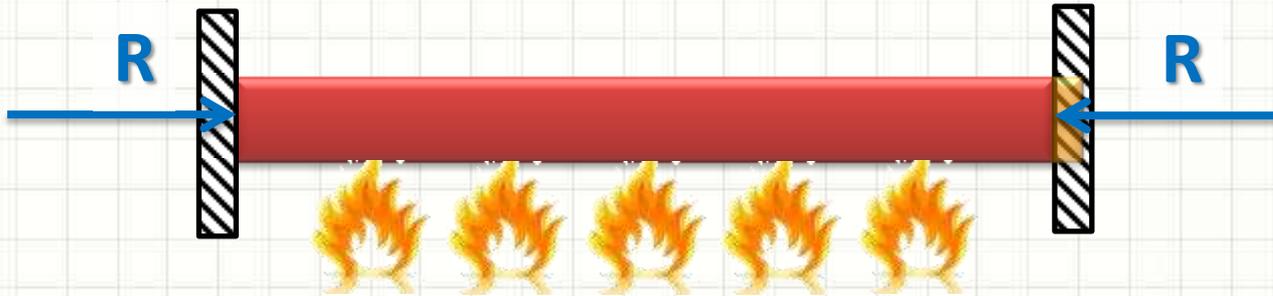
Tensões Térmicas

- E agora?



Tensões Térmicas

- E agora?



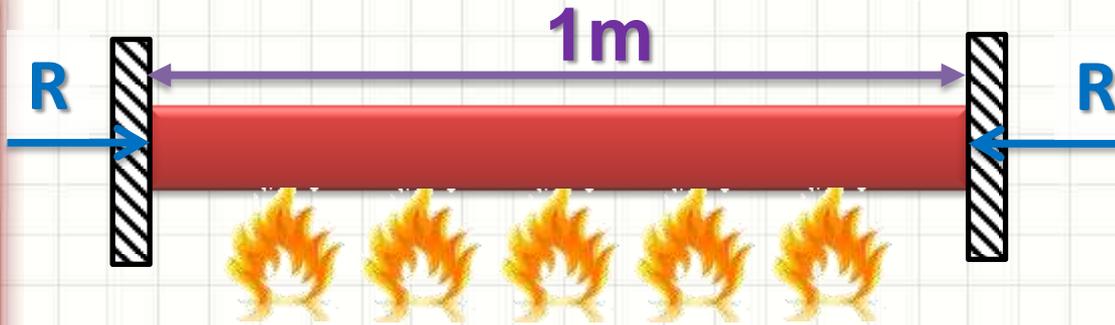
- O corpo vai querer dilatar de δ_T ...
- Mas os apoios não vão deixar!
- Surgem reações \rightarrow encurtamento... δ_R !

A barra não muda de tamanho!

$$\delta_T + \delta_R = 0$$

Tensões Térmicas - Exemplo

- Calcule a tensão na viga:



$A = 0,0001 \text{ m}^2$
 $E = 200 \text{ GPa}$
 $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 $T_1 = 30 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (R = 0)}$
 $T_2 = 60 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (R = ?)}$

- Por superposição de efeitos...



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

$$\delta_R + \delta_T = 0$$



$$\delta_R = \frac{-R \cdot L}{E \cdot A}$$

Tensões Térmicas - Exemplo

$A = 0,0001 \text{ m}^2$
 $E = 200 \text{ GPa}$
 $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 $T_1 = 30 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (R = 0)}$
 $T_2 = 60 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (R = ?)}$

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

$$\delta_R = - \frac{R \cdot L}{E \cdot A}$$

$$\delta_T + \delta_R = 0$$

- Calculando...

$$\alpha \cdot \Delta T \cdot L - \frac{R \cdot L}{E \cdot A} = 0 \Rightarrow \frac{R \cdot L}{E \cdot A} = \alpha \cdot \Delta T \cdot L$$

$$\frac{R}{E \cdot A} = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot L}{L} \Rightarrow \frac{R}{E \cdot A} = \alpha \cdot \Delta T$$

Tensões Térmicas - Exemplo

$A = 0,0001 \text{ m}^2$
 $E = 200 \text{ GPa}$
 $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
 $T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (R = 0)}$
 $T_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (R = ?)}$

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

$$\delta_R = - \frac{R \cdot L}{E \cdot A}$$

$$\delta_T + \delta_R = 0$$

- Calculando...

$$\frac{R}{E \cdot A} = \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow R = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot A$$

$$R = 12 \cdot 10^{-6} \cdot (60 - 30) \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 10^{-4}$$

$$R = 12 \cdot 30 \cdot 200 \cdot 10^{-1} = 12 \cdot 600 = \mathbf{7200N}$$

Tensões Térmicas - Exemplo

$A = 0,0001 \text{ m}^2$
 $E = 200 \text{ GPa}$
 $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
 $T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (R = 0)}$
 $T_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (R = ?)}$

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

$$\delta_R = - \frac{R \cdot L}{E \cdot A}$$

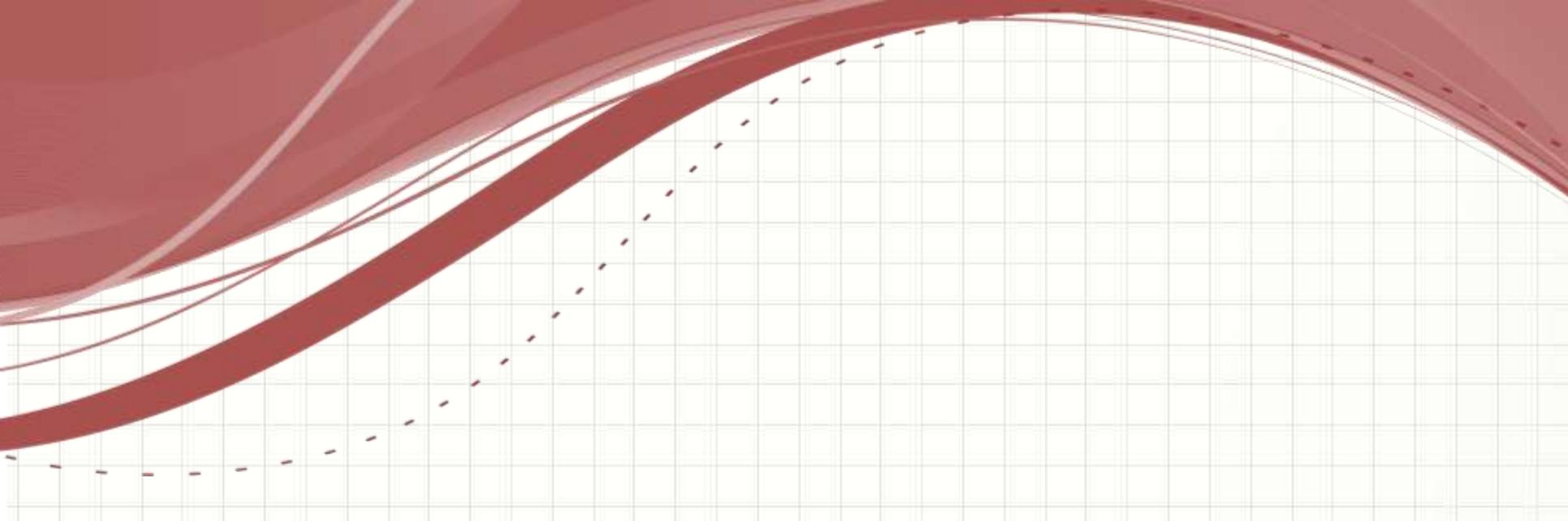
$$\delta_T + \delta_R = 0$$

$$R = 7,2 \text{ kN}$$

- Calculando...
- Mas $\sigma = F / A$...

$$\sigma = \frac{7200}{0,0001} = 72000000 \text{ Pa}$$

$$\sigma = 72 \text{ MPa}$$



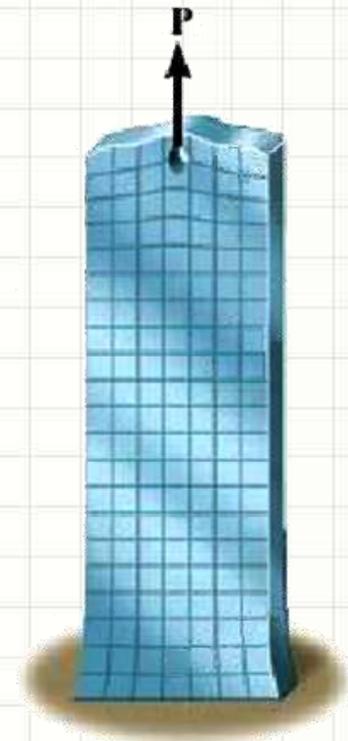
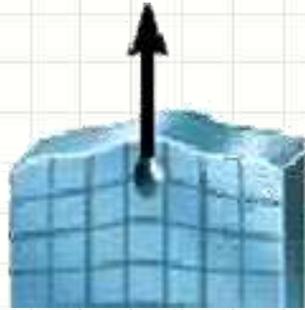
PAUSA PARA O CAFÉ



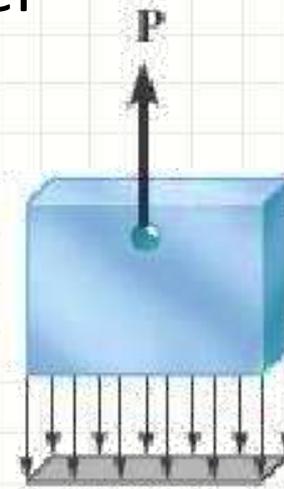
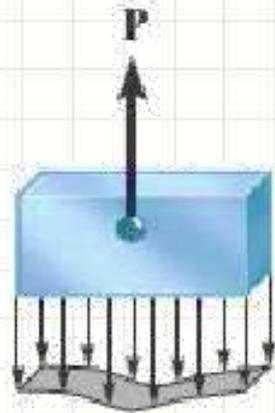
CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

Concentração de Tensões

- Vimos, anteriormente...

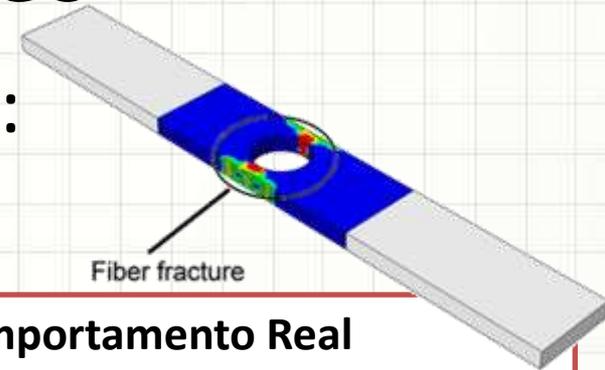


- Carga concentrada \rightarrow distorção...
 - distribuição de tensão variável

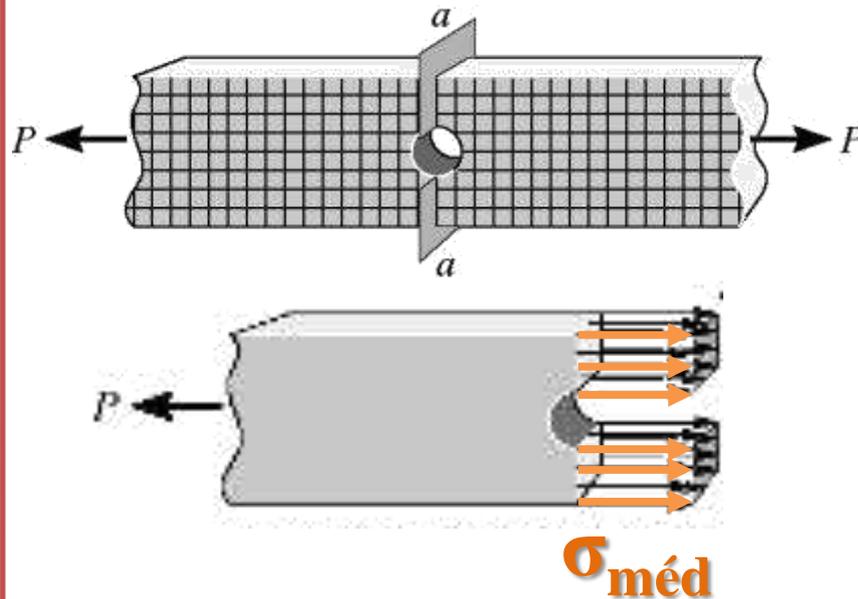


Concentração de Tensões

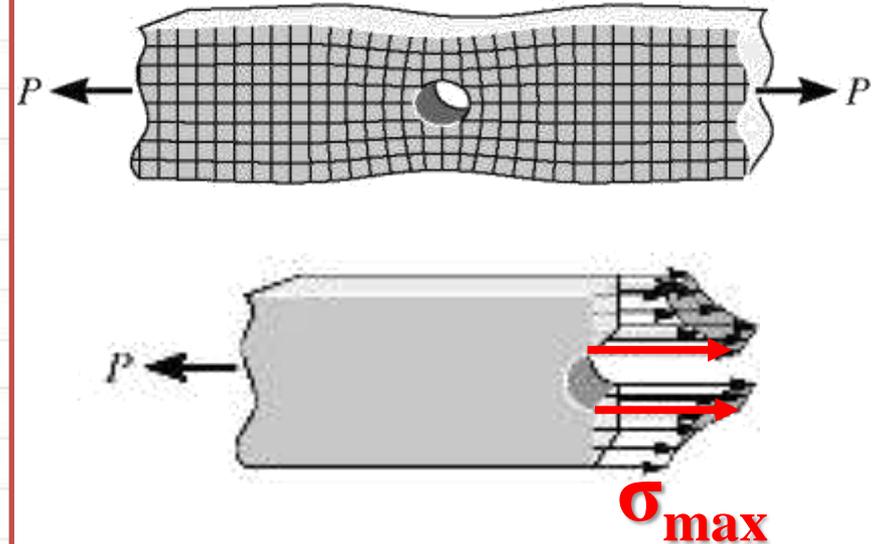
- Mudança na seção transversal:
 - Causa efeito similar



Como Calculamos Até Agora



Comportamento Real

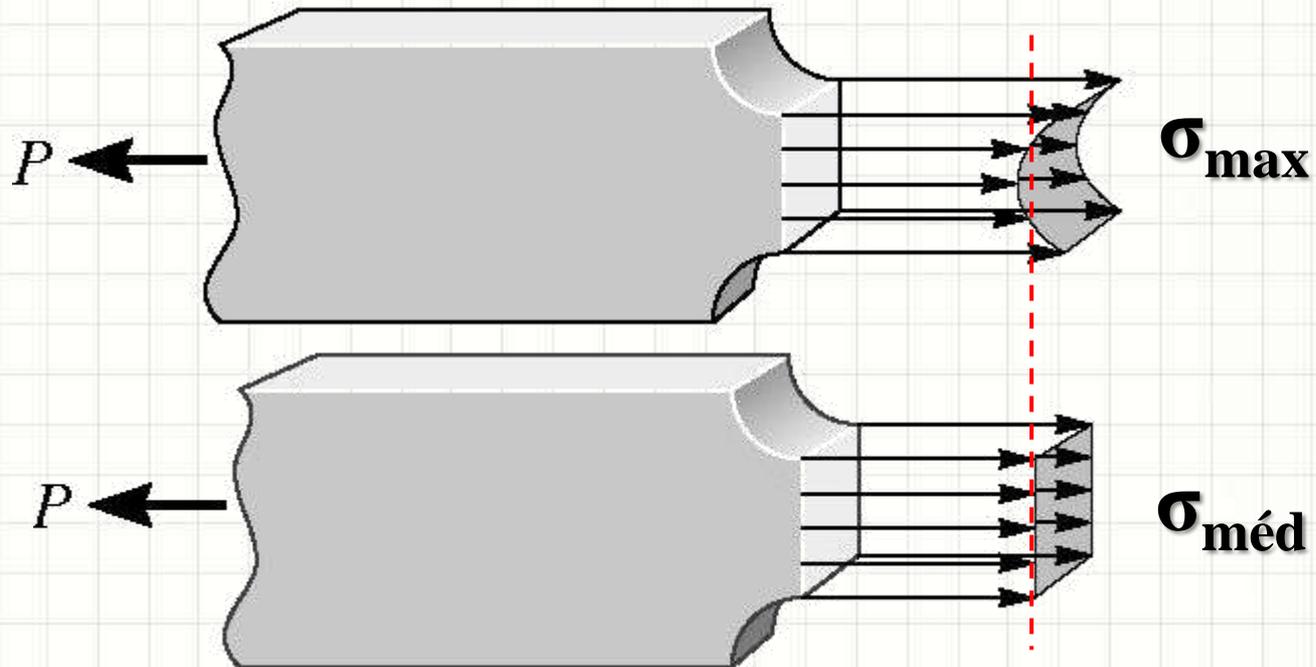


– Basta $\sigma_{\text{méd}} \leq \sigma_{\text{adm}}$?

$$\sigma_{\text{max}} > \sigma_{\text{méd}}$$

Concentração de Tensões

- Mudança na seção transversal:
 - Causa efeito similar



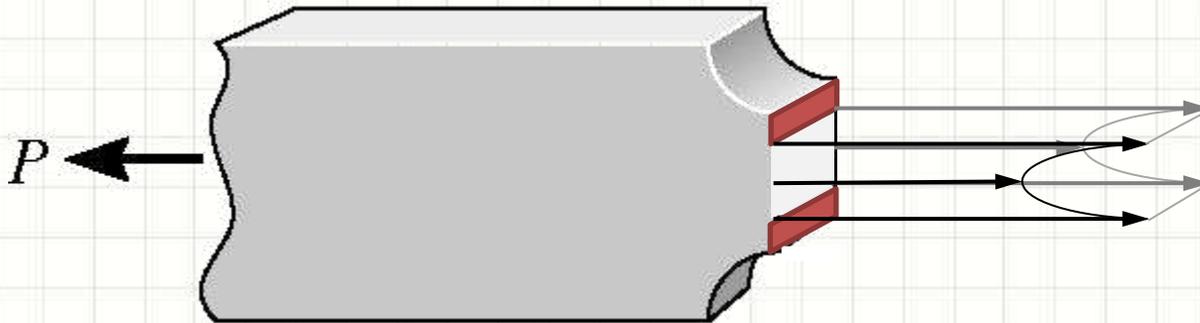
$$\sigma_{\max} > \sigma_{\text{méd}}$$

Concentração de Tensões

- Onde se iniciará a ruptura?

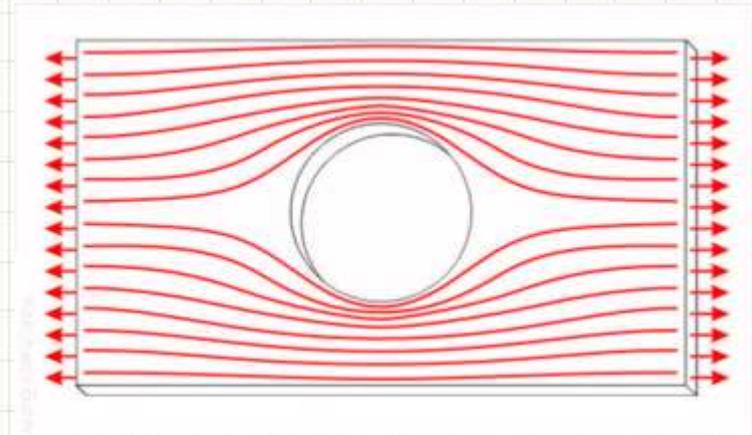
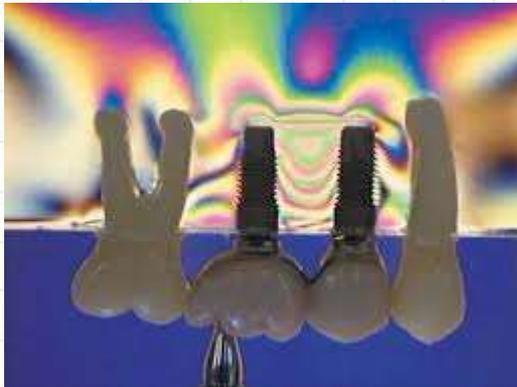
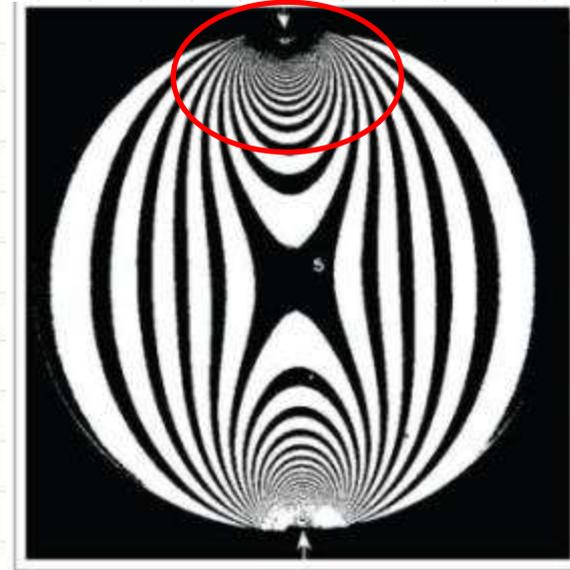


- E o que ocorrerá se começar a “rachar”?



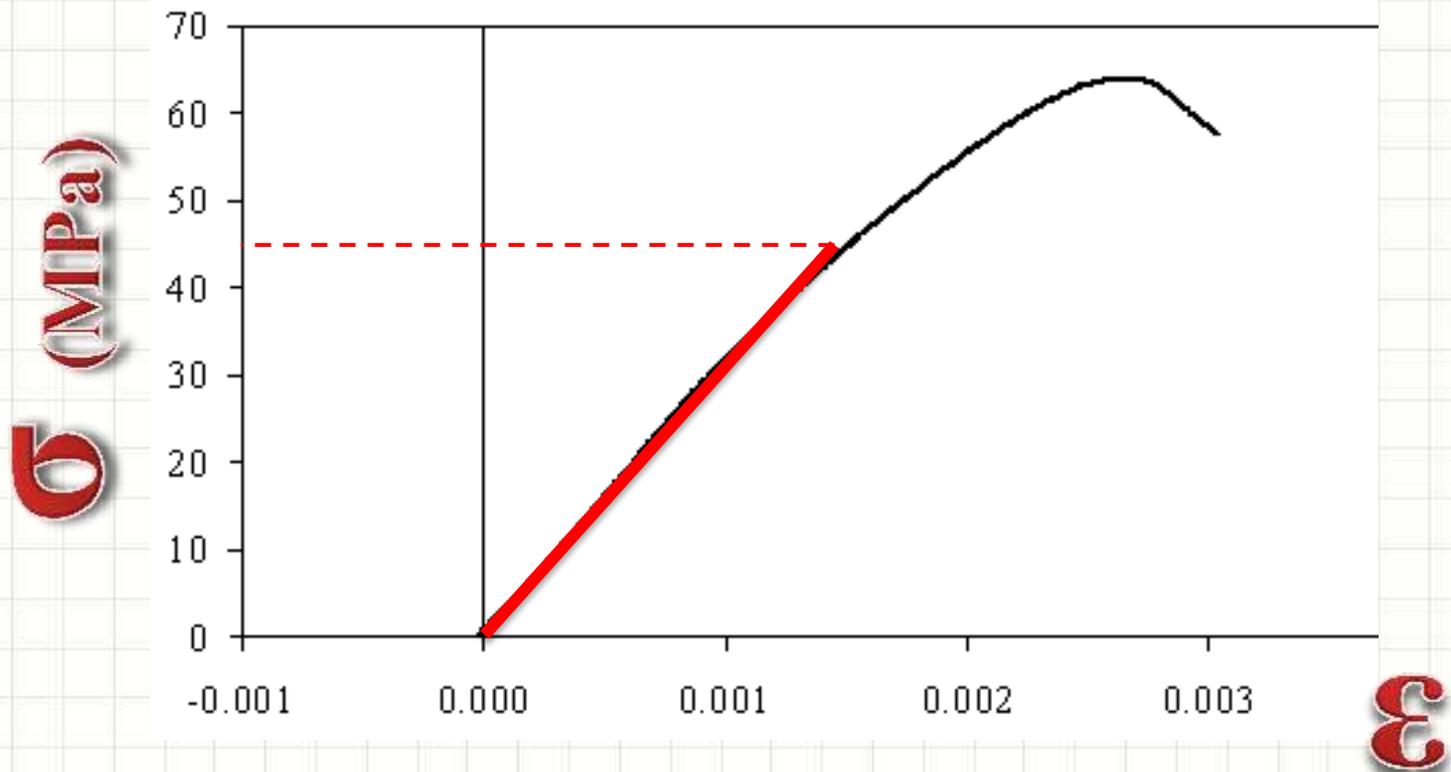
Concentração de Tensões

- Como se verifica em laboratório?
 - Fotoelasticidade



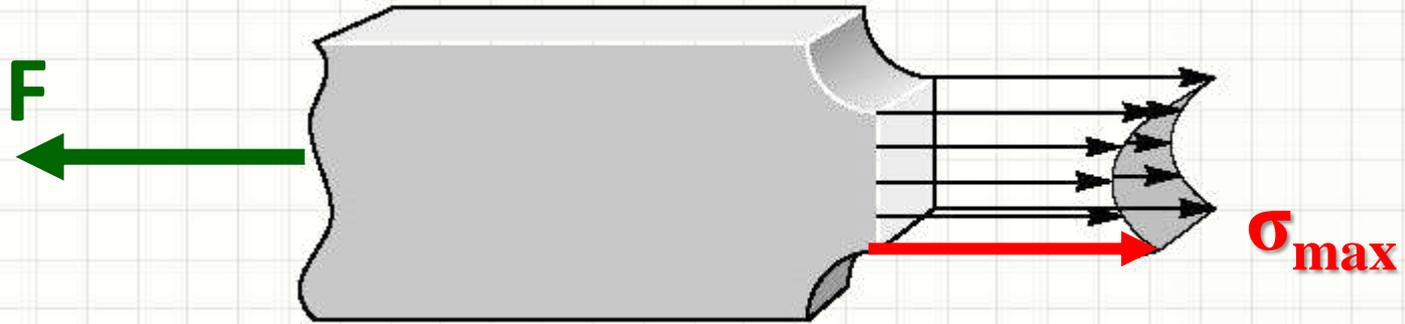
Aplicação: Concentração de Tensões

- Material frágil? Garantir que a $\sigma_{\text{máx}} < \sigma_{\text{adm}}$
 - Nesse caso $\sigma_{\text{adm}} \approx \sigma_{\text{proporcionalidade}}$

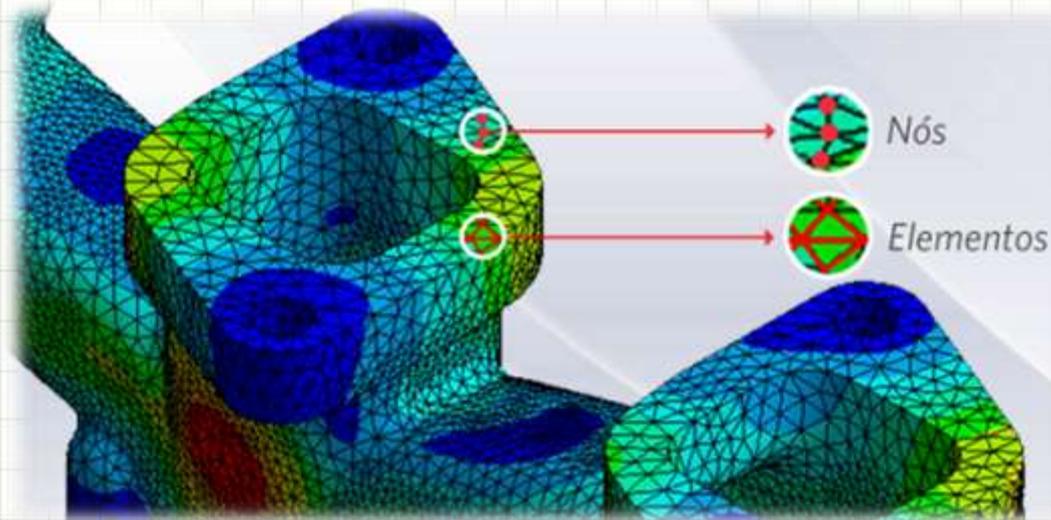


Aplicação: Concentração de Tensões

- Como calcular o $\sigma_{\text{máx}}$?



- Modelos computacionais complexos (Lei de Hooke)



Aplicação: Concentração de Tensões

- Como calcular o $\sigma_{\text{máx}}$?
 - Testes experimentais



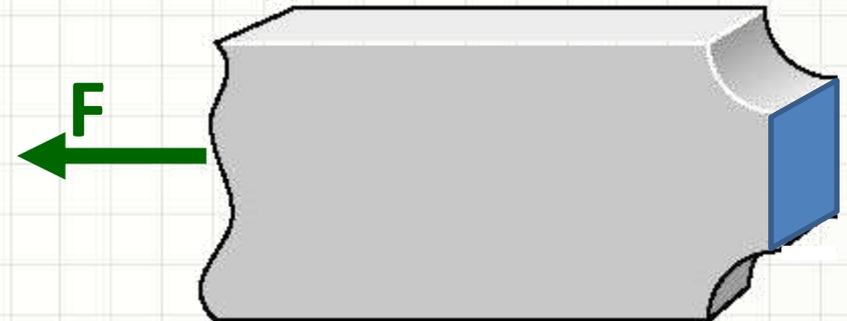
$$K = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{méd}}}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = K \cdot \sigma_{\text{méd}}$$

- Como calcular o $\sigma_{\text{méd}}$?

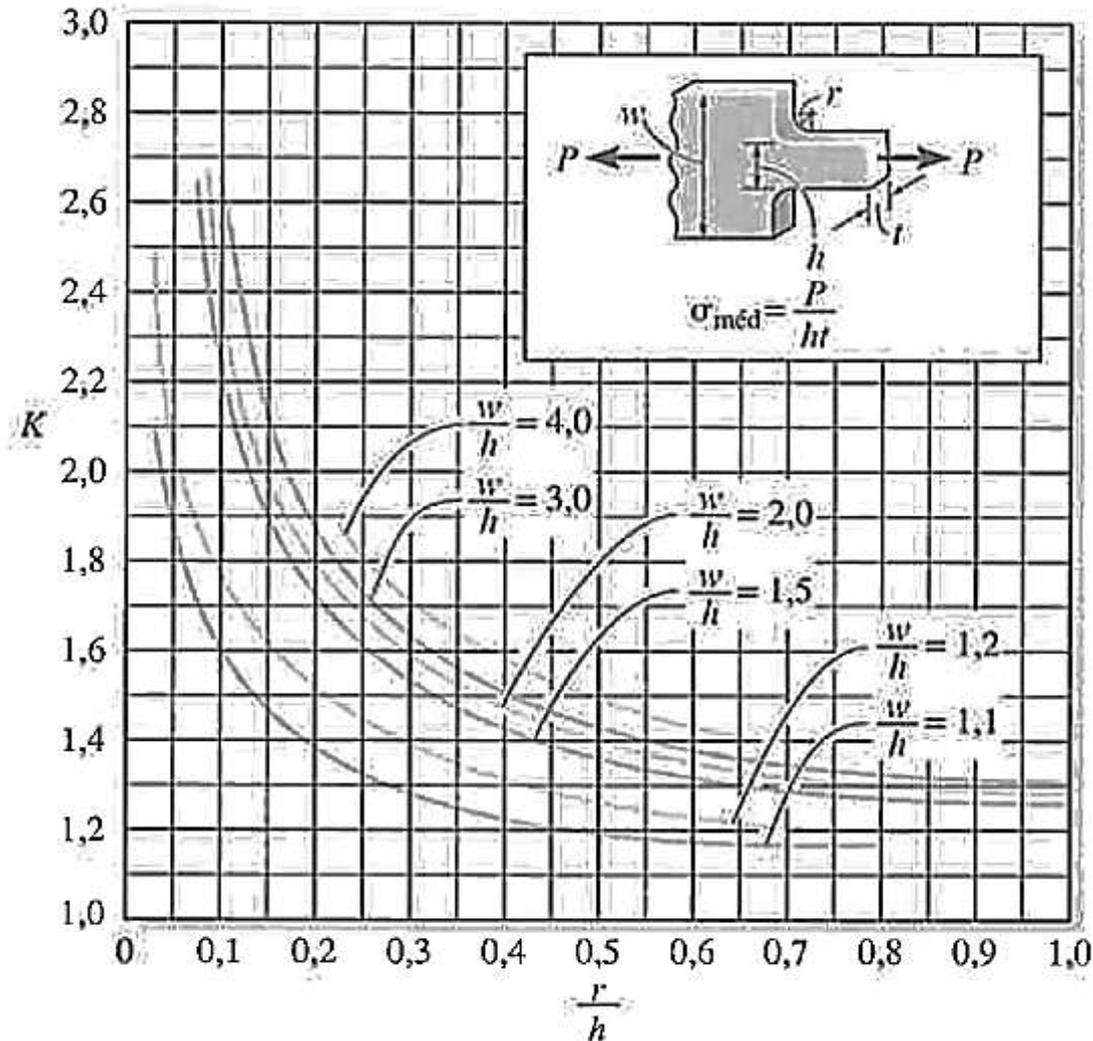
$$\sigma_{\text{méd}} = \frac{F}{A_{\text{menor}}}$$

$$\sigma_{\text{max}} = K \cdot \frac{F}{A_{\text{menor}}}$$



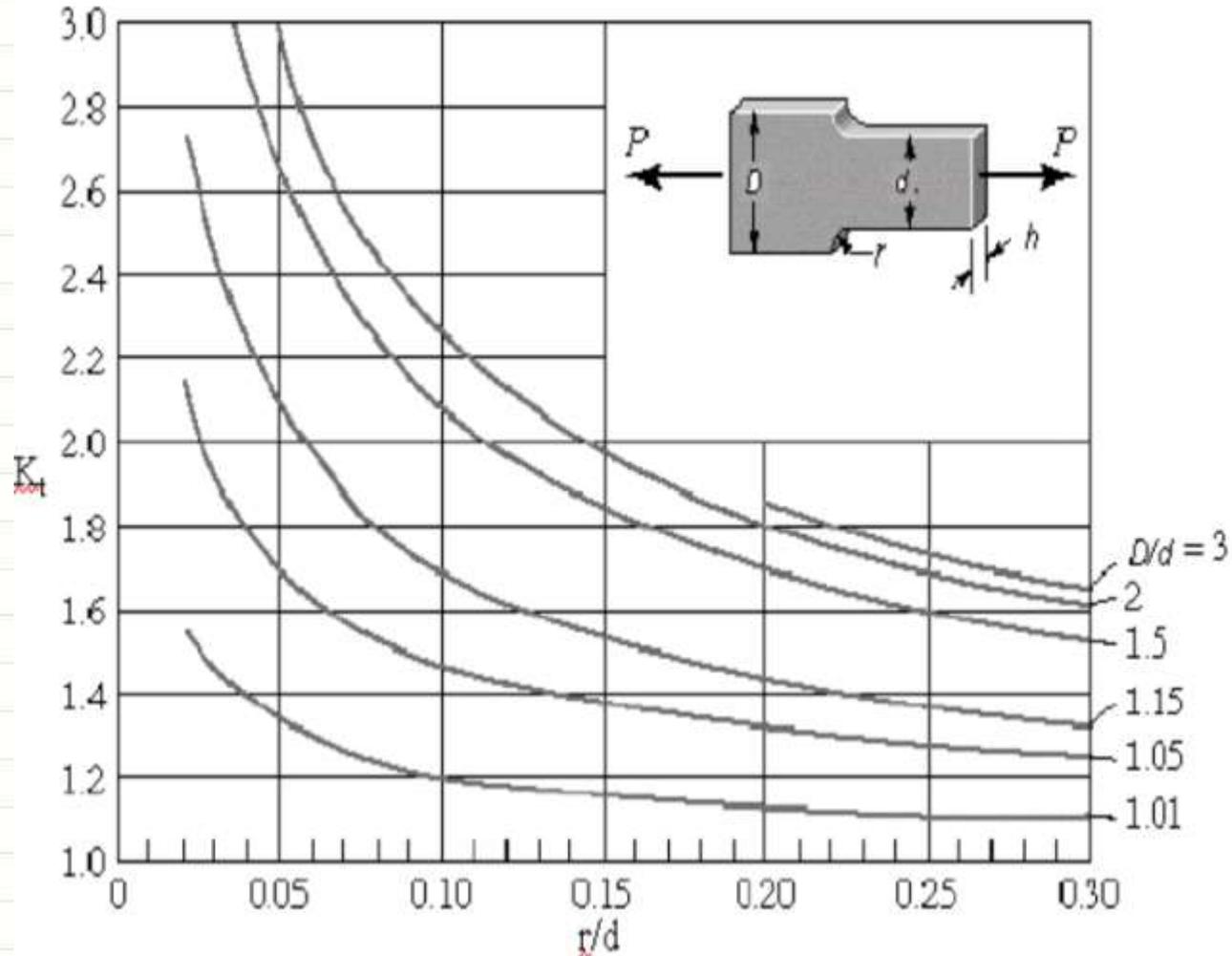
Aplicação: Concentração de Tensões

- Como determinar o K?



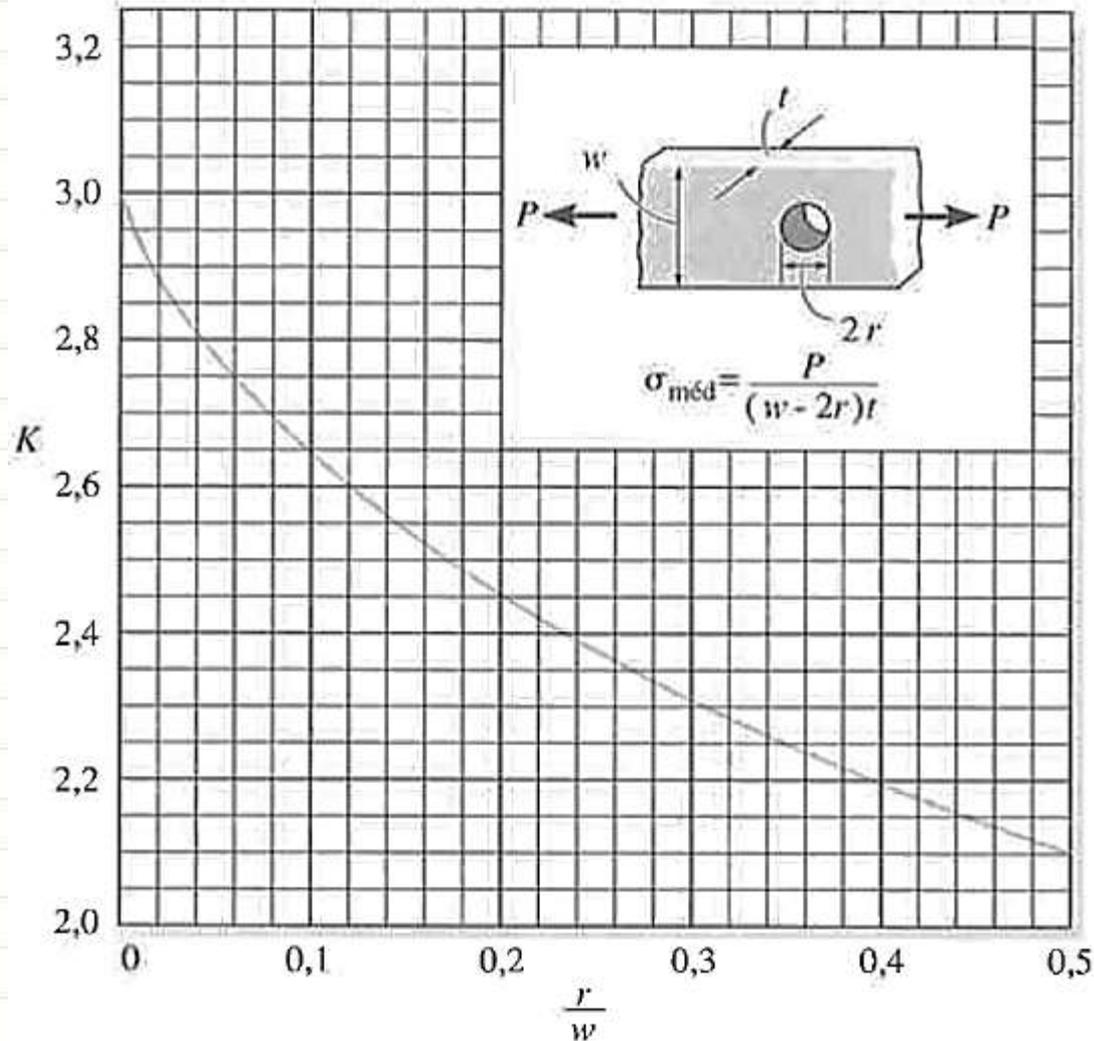
Aplicação: Concentração de Tensões

- Como determinar o K?



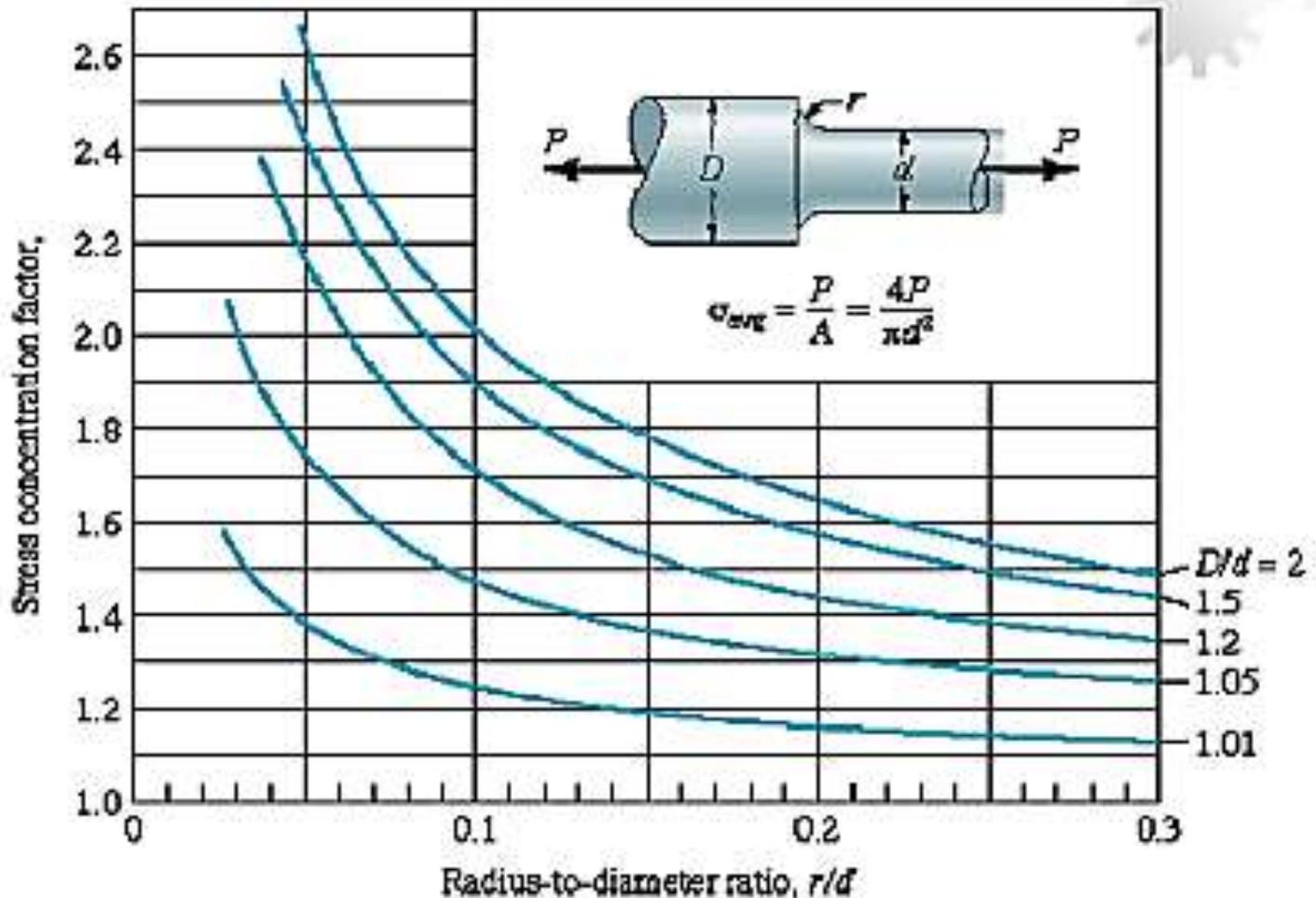
Aplicação: Concentração de Tensões

- Como determinar o K?



Aplicação: Concentração de Tensões

- Como determinar o K?



Exemplo: Concentração de Tensões

- O material (frágil) resiste?



$$A = 0,01 \text{ m}^2$$
$$A_{\text{menor}} = 0,005 \text{ m}^2$$
$$\sigma_{\text{lim}} = 24 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{méd}} = \frac{F}{A_{\text{menor}}} = \frac{100000}{0,005} = 20000000$$

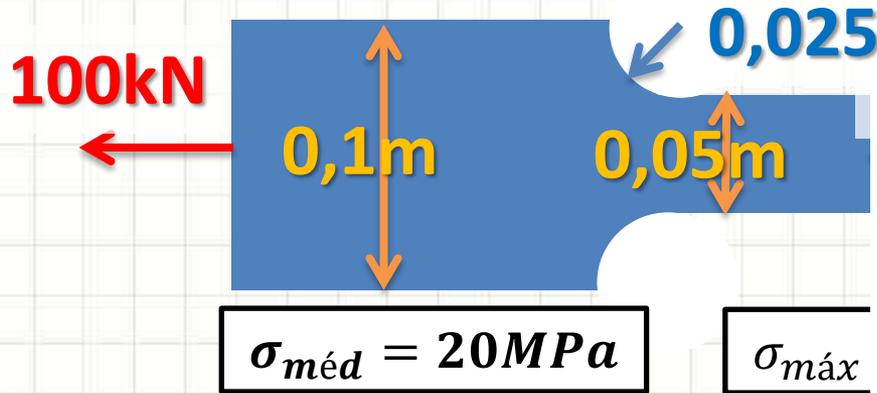
$$\sigma_{\text{méd}} = 20 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = K \cdot \sigma_{\text{méd}}$$

$$\underline{K = ?}$$

Exemplo: Concentração de Tensões

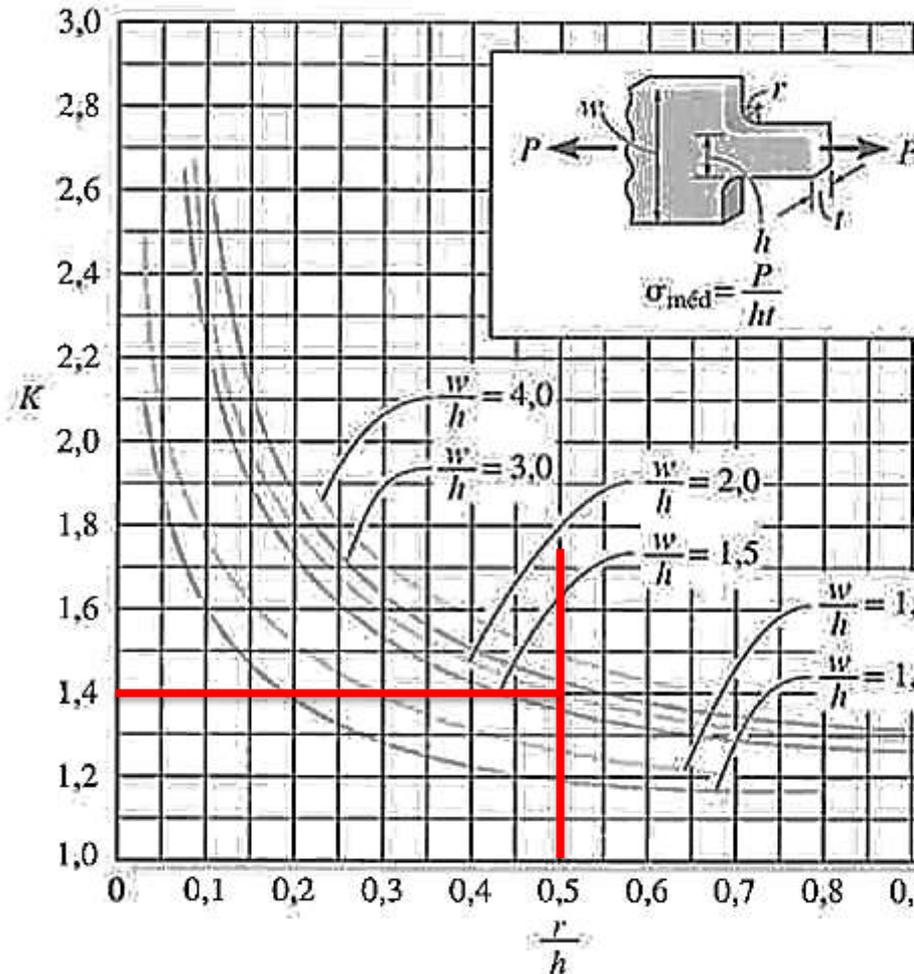
- O material (frágil) resiste?



$$r/h = 0,025/0,05 = 0,5$$

$$w/h = 0,1/0,05 = 2,0$$

$$K = 1,4$$



Exemplo: Concentração de Tensões

- O material (frágil) resiste?



$A = 0,01 \text{ m}^2$
 $A_{\text{menor}} = 0,005 \text{ m}^2$
 $\sigma_{\text{lim}} = 24 \text{ MPa}$

$\sigma_{\text{méd}} = 20 \text{ MPa}$

$\sigma_{\text{máx}} = K \cdot \sigma_{\text{méd}}$

$K = 1,4$

$\sigma_{\text{máx}} = 1,4 \cdot 20 \text{ MPa}$

$\sigma_{\text{máx}} = 28 \text{ MPa}$

$\sigma_{\text{máx}} < \sigma_{\text{lim}}?$

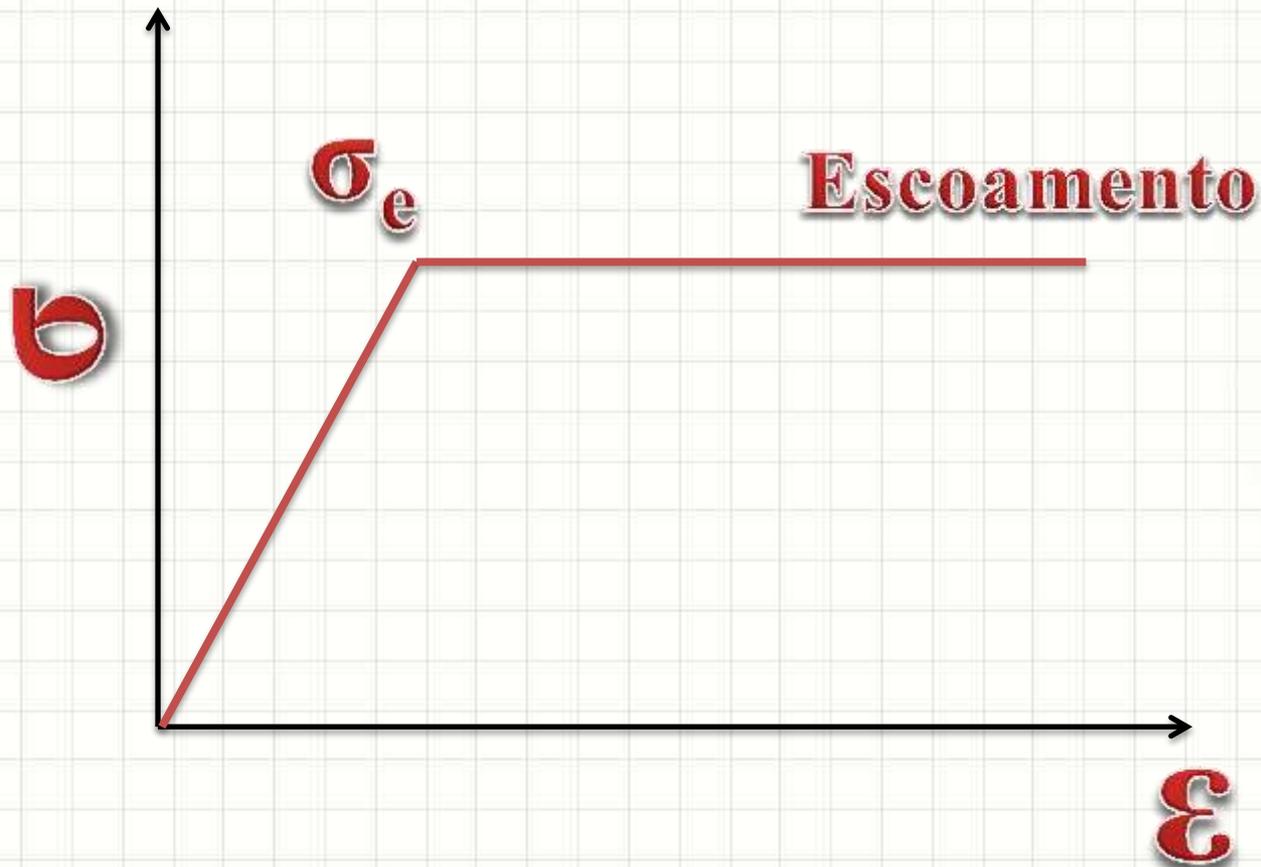
FALSO! Há ruptura!



DEFORMAÇÕES INELÁSTICAS EM CARREGAMENTO AXIAL

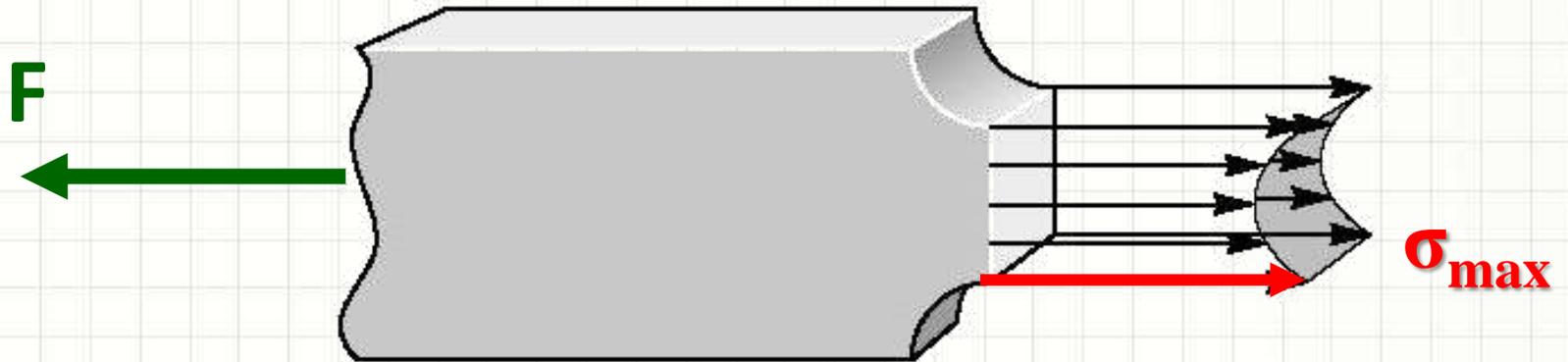
Deformações Inelásticas

- Consideramos: materiais frágeis
- O que ocorre com os elastoplásticos?



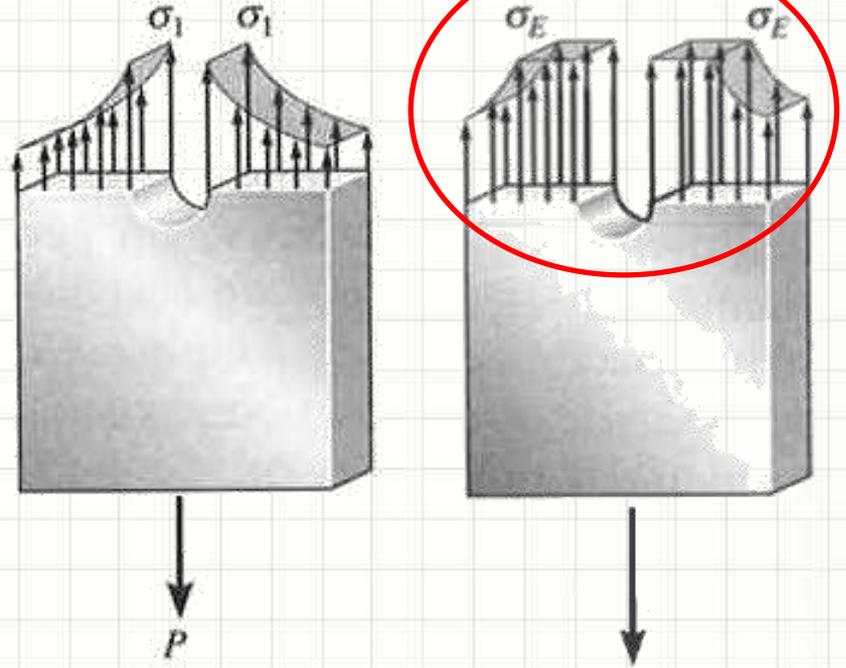
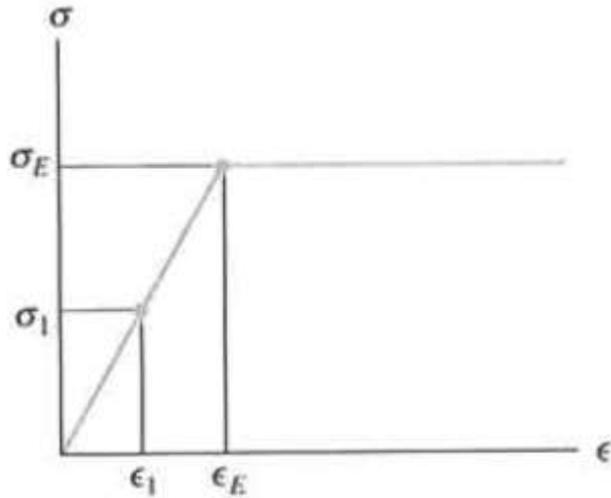
Deformações Inelásticas

- O que ocorre com os elastoplásticos?
- Ao atingir a σ_e , escoamento...
- Mas observe... Onde iniciará o escoamento?



Deformações Inelásticas

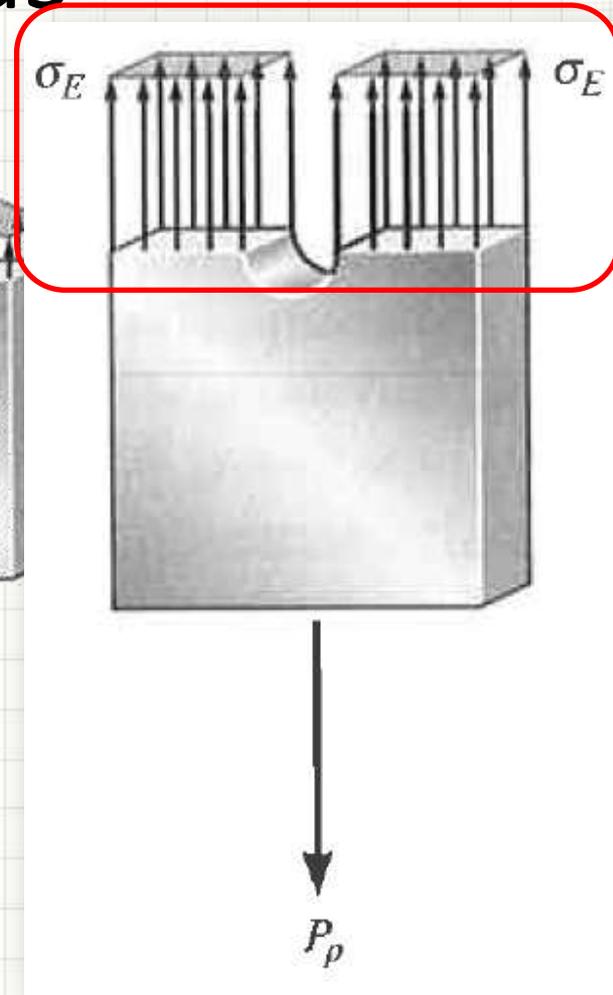
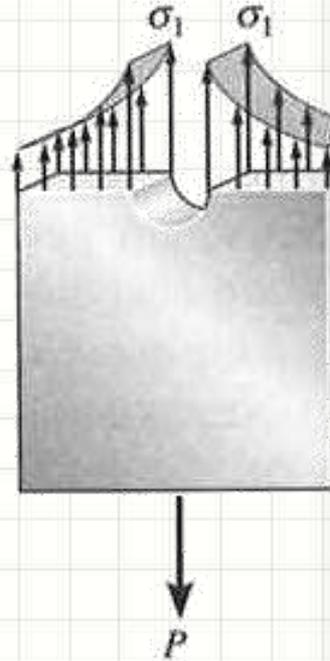
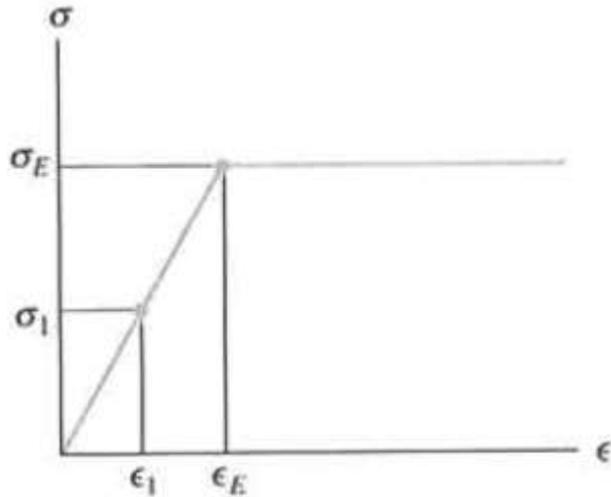
- Antes de atingir σ_e



- No escoamento... atinge σ_e ...

Deformações Inelásticas

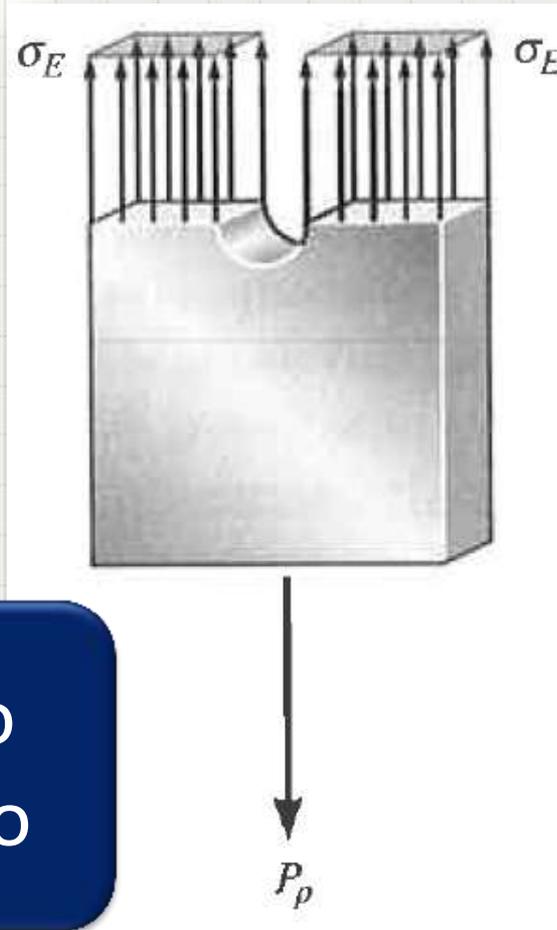
- Antes de atingir σ_e



- No escoamento... atinge $\sigma_{e...}$
- Mais escoamento... e o $\sigma_{e...}$
- Toda a seção = $\sigma_{e...}$

Deformações Inelásticas

- $R_{\max} = \sigma_e \cdot A$



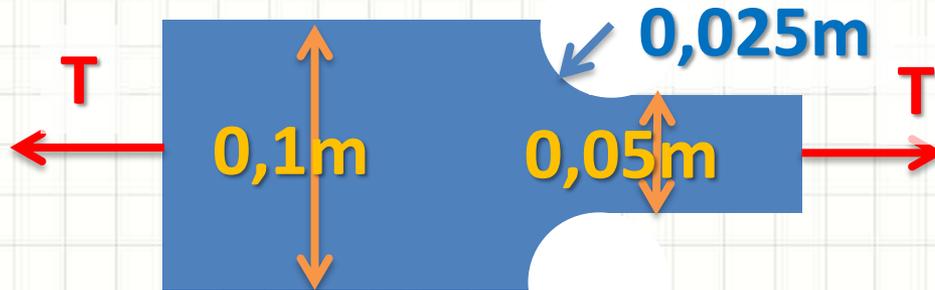
Endurecimento
por Deformação

Se alguma parte
do aço do C.A.
ficar assim:
Elemento no
Estado Limite
Último

- Resistência adicional até escoamento total

Exemplo: Concentração de Tensões

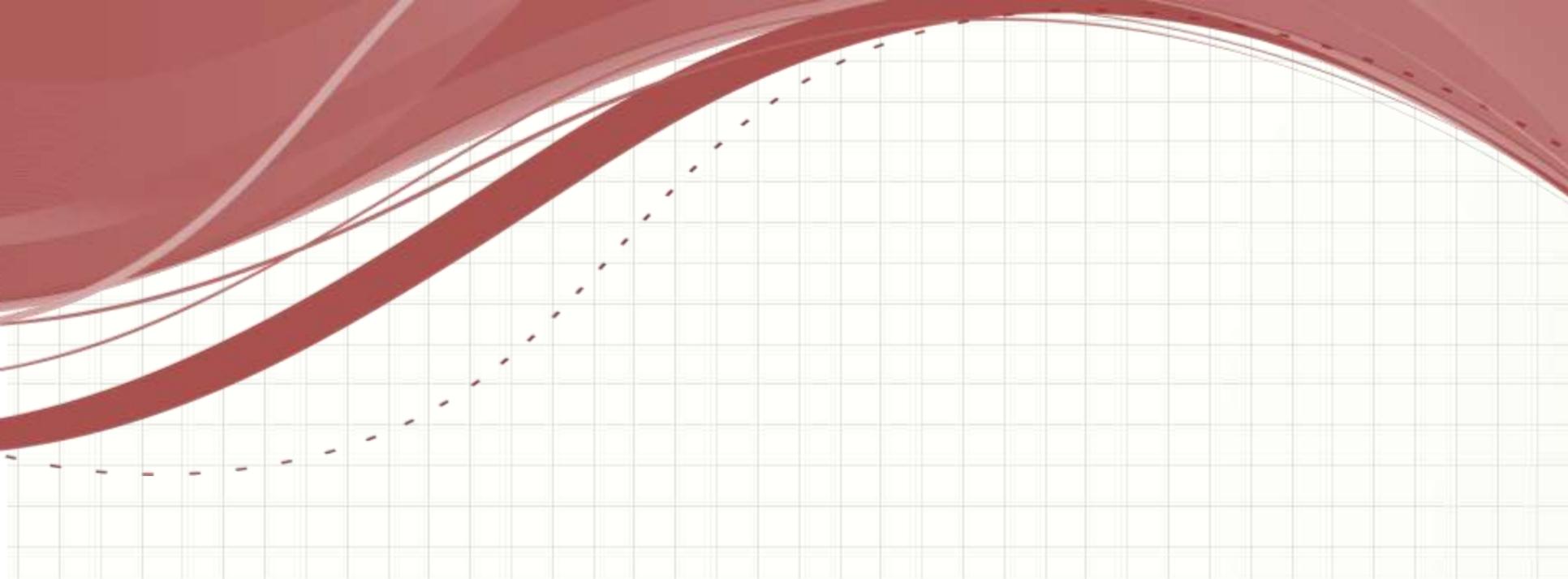
- Qual a tração máxima no material dútil?



$A = 0,01 \text{ m}^2$
 $A_{\text{menor}} = 0,005 \text{ m}^2$
 $\sigma_{\text{adm}} = 20 \text{ MPa}$
 $\sigma_e = 25 \text{ MPa}$

$$T = \sigma_e \cdot A_{\text{menor}} = 20 \text{ MPa} \cdot 0,005 \text{ m}^2 = 100 \text{ kN}$$

$$T = 100 \text{ kN}$$



PARA TREINAR

Para Treinar em Casa

- Mínimos:
 - Exercícios 4.70, 4.71, 4.73
 - Exercícios 4.87, 4.88
 - Exercícios 13.3, 13.6
- Extras:
 - Exercícios 4.74, 4.75
 - Exercícios: 4.89, 4.90
 - Exercícios 13.4, 13.7

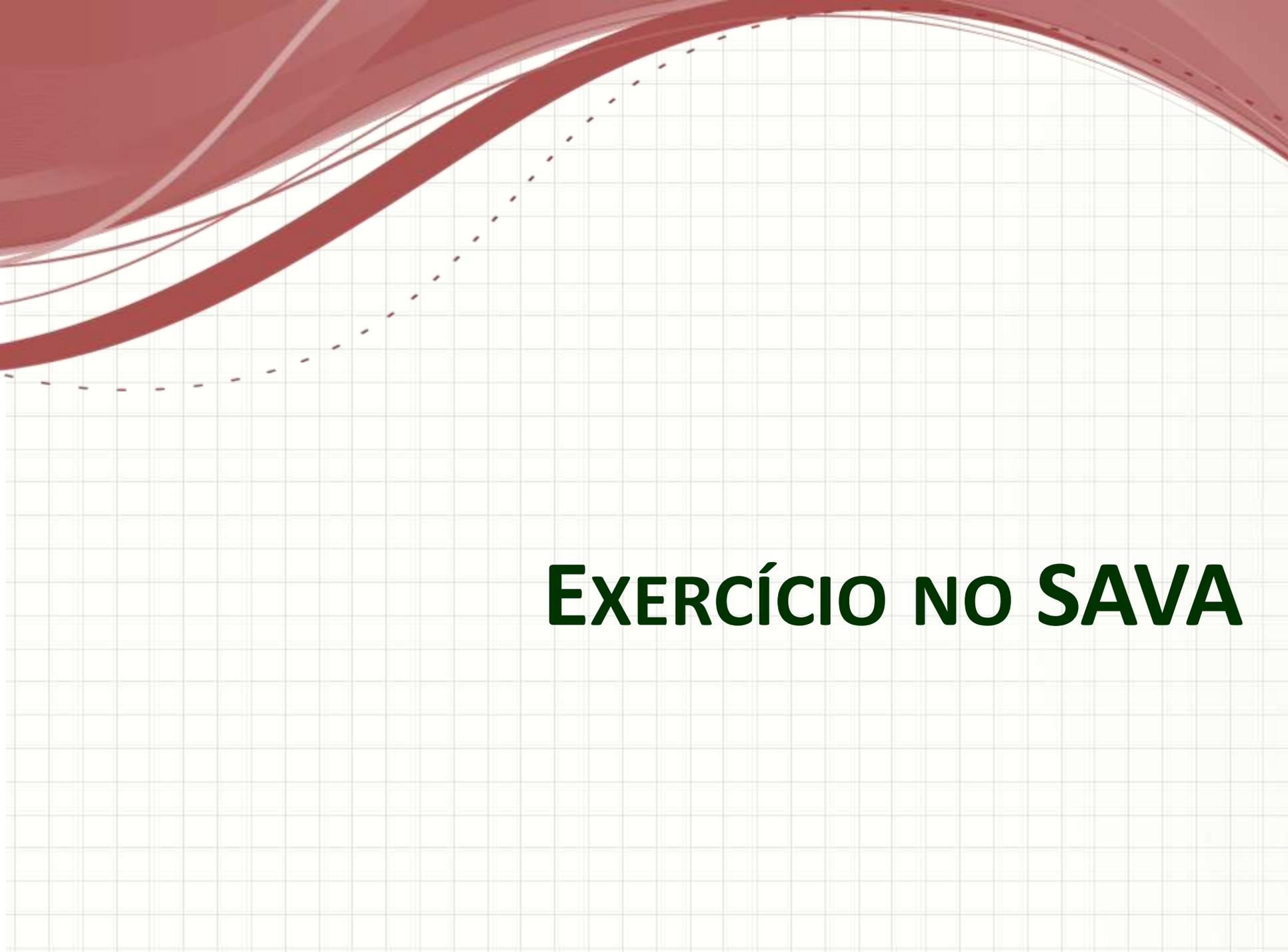
Para Treinar em Casa

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	-

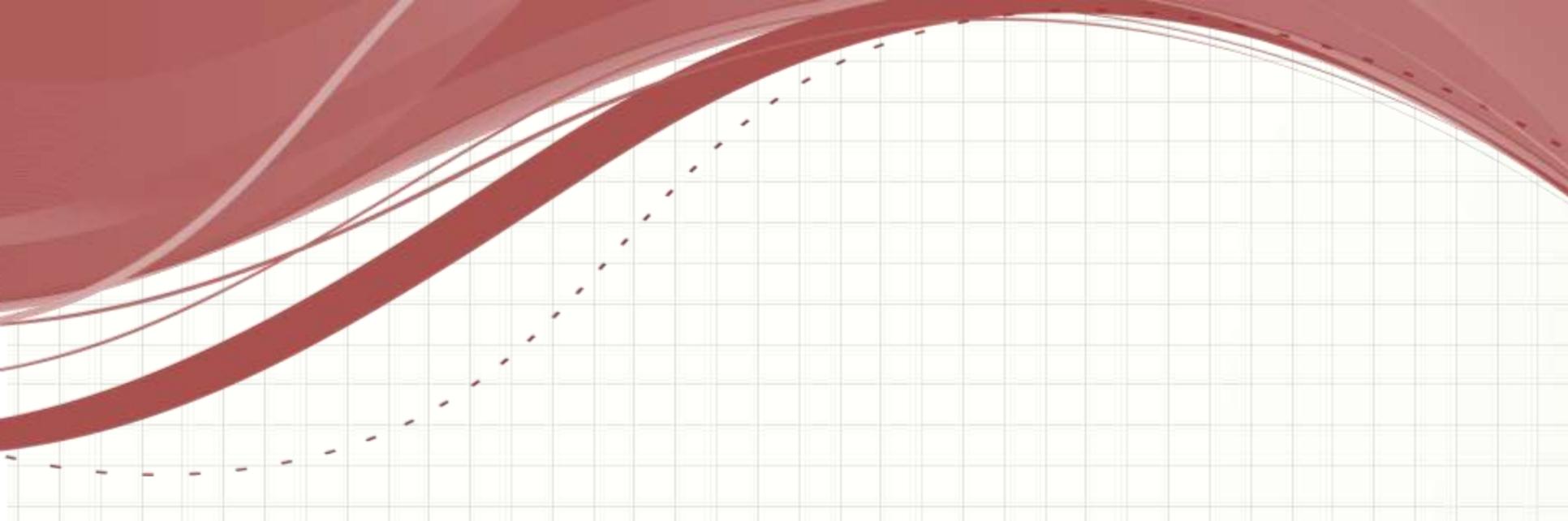
Fonte **HIBBELER, R.C. Resistência dos materiais. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.**



EXERCÍCIO NO SAVA

Exercício – Entrega Individual

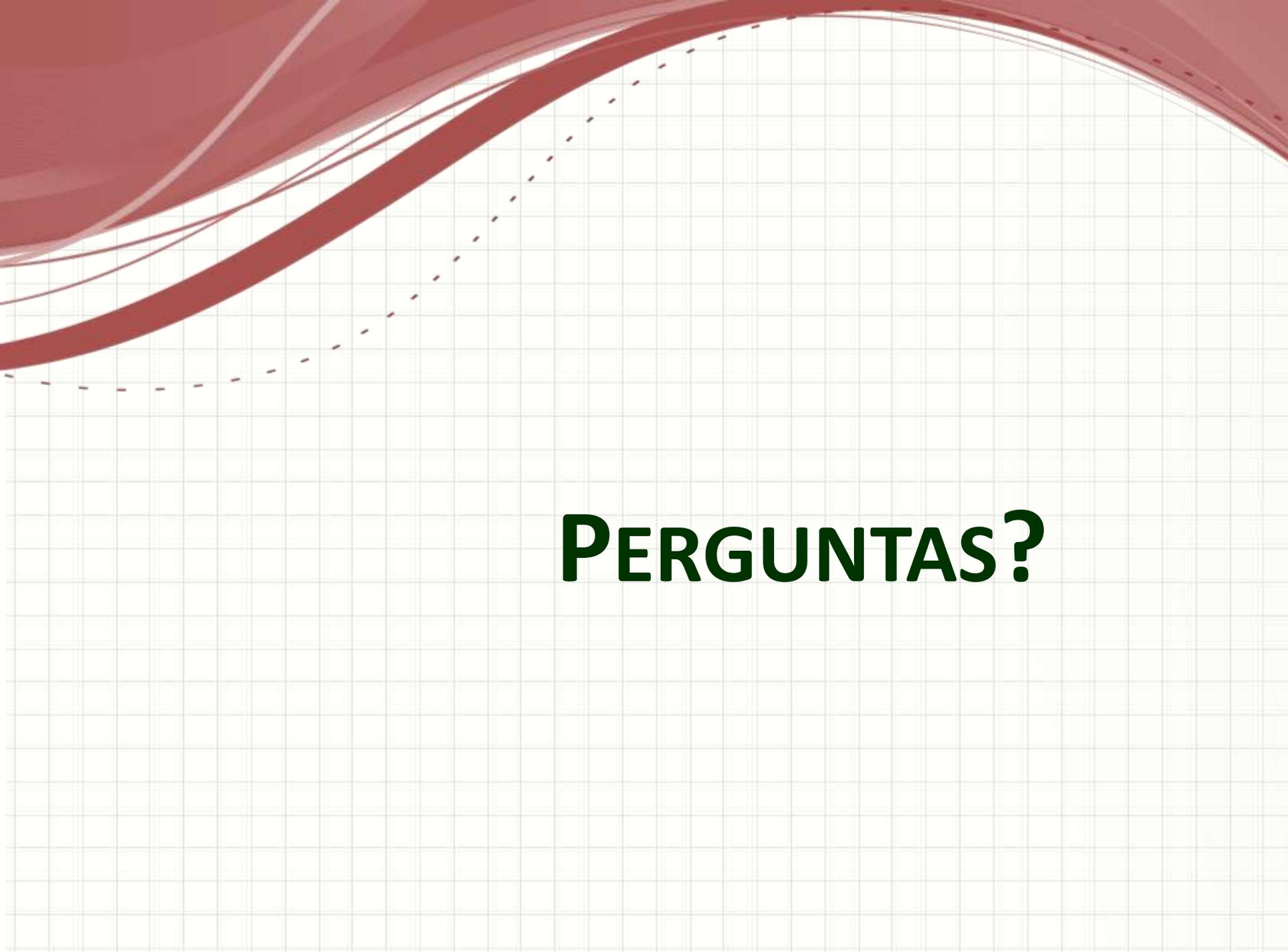
- Uma barra de aço mede 120m quando tracionada por 1000N a uma temp. de 20°C.
- Se a tensão for removida mas a barra de aço for aquecida até 45°C, qual será seu comprimento?
- $A = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{m}^2$
- $E_{\text{aço}} = 200 \text{GPa}$
- $\alpha_{\text{aço}} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$



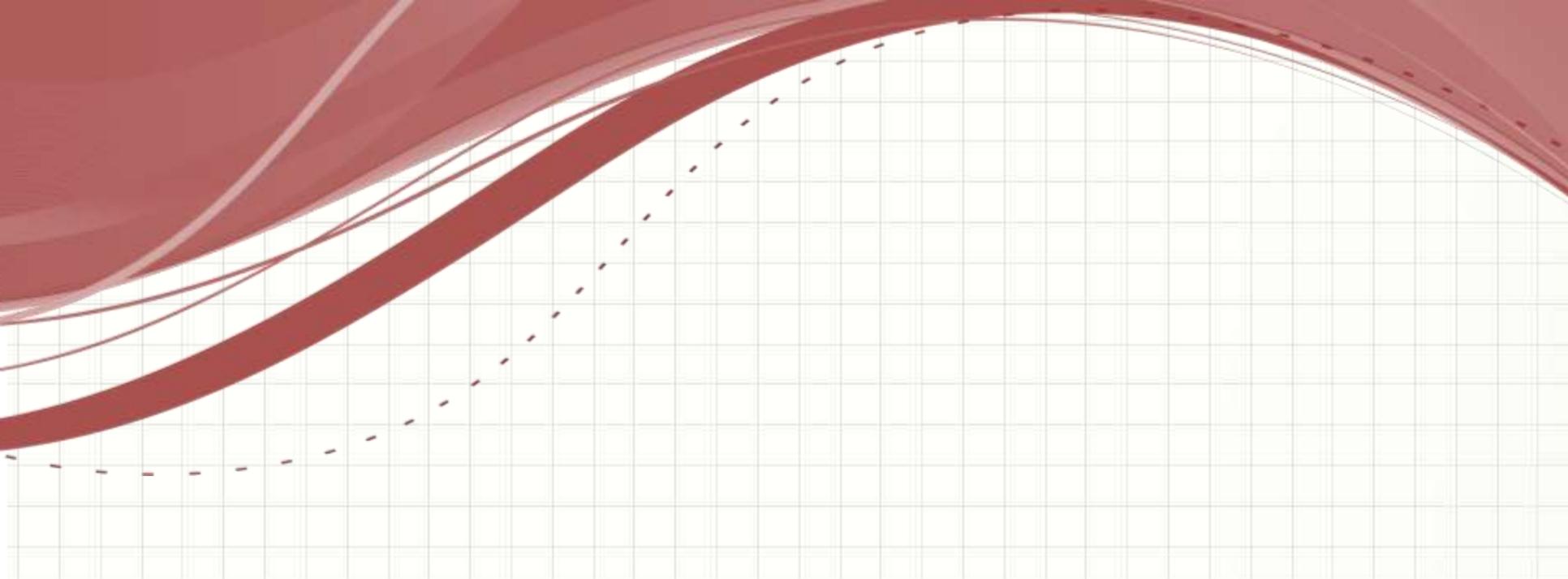
CONCLUSÕES

Resumo

- Flambagem: preocupação adicional!
 - Dilatação/contração térmica: causa tensões!
 - Concentrações de tensão: acelera ruptura
 - Materiais dúteis: resistência adicional!
 - **Exercitar: Exercícios Hibbeler**
-
- Só existem tensões normais?
 - Torção...
 - Momento...



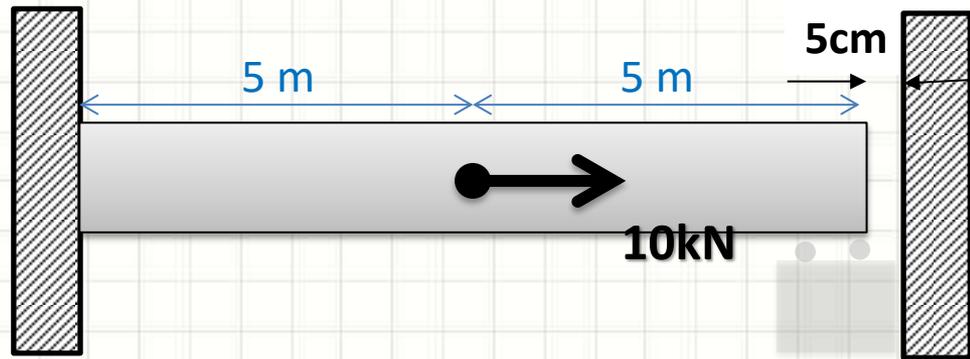
PERGUNTAS?



EXERCÍCIO EM SALA

Exercício – Individual, para **Agora!**

- Quanto deve cair a temperatura para que a reação na parede da direita seja ZERO?



$$\delta_R = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} \quad \delta_T = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = 12,5^\circ\text{C}$$