

# ESTRUTURAS METÁLICAS

## *Exercícios*

Galpões para usos gerais (Manual CBCA)

*Flexão composta*

Prof Moniz de Aragão

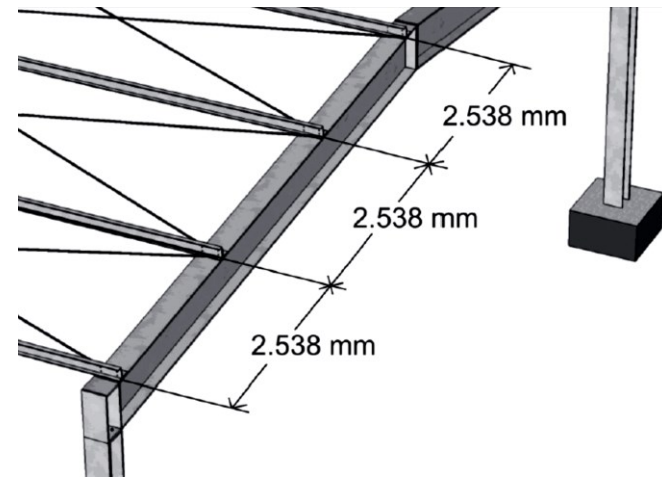
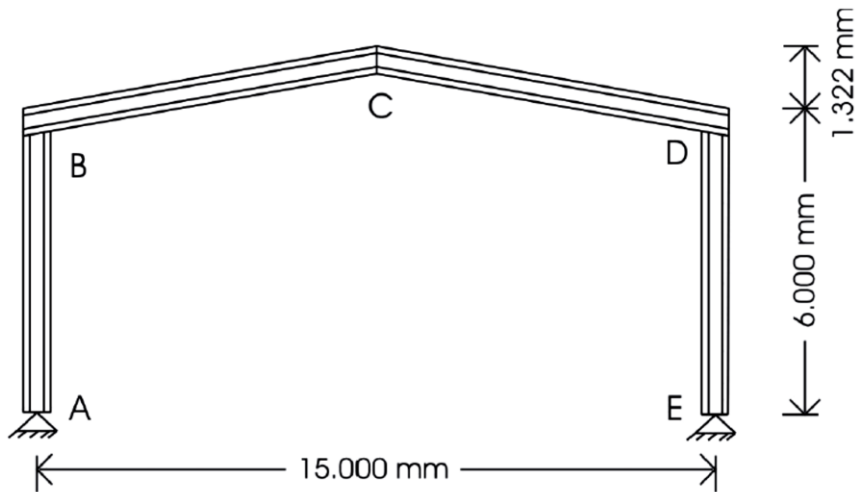
Ref: PRAVIA, Z. M. C., DREHMER, G. A., MESACASA JÚNIOR, E.,  
2010, **Galpões para Usos Gerais**, Manual de Construção em Aço,  
Instituto Aço Brasil e Centro Brasileiro da Construção em Aço, 4ª Ed.,

# Exercícios

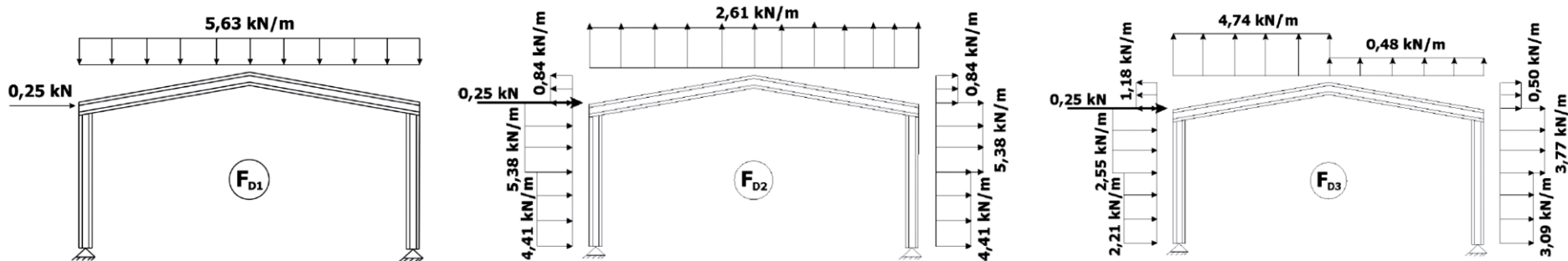
## Flexão Simples e Composta

Projeto – Galpões para usos gerais (Manual CBCA)

- Elementos do Pórtico: **W 310x38,7**



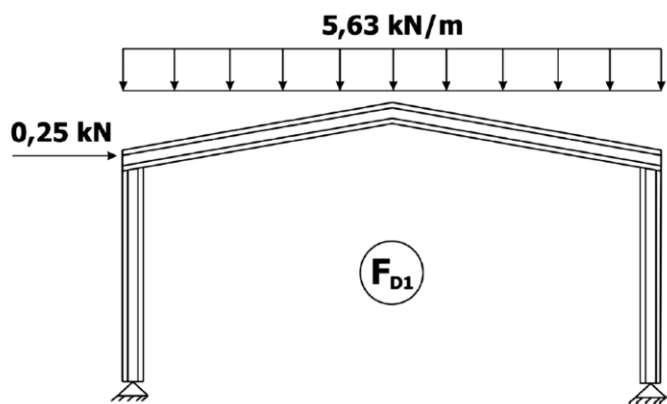
Combinações de carregamento:



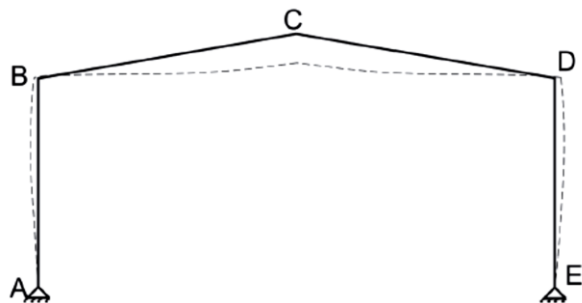
# Exercícios

## Flexão Simples e Composta

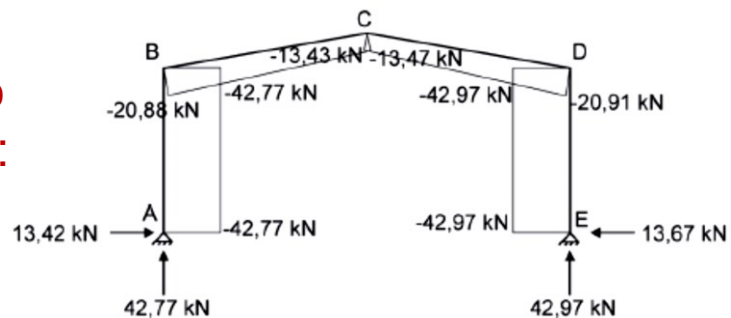
Combinação  $F_{D1}$ :



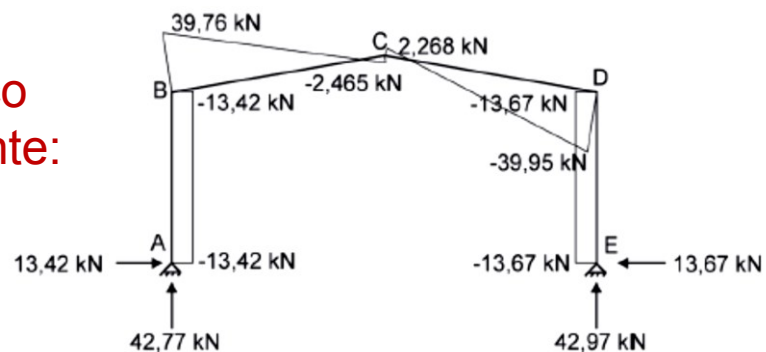
Geometria deformada:



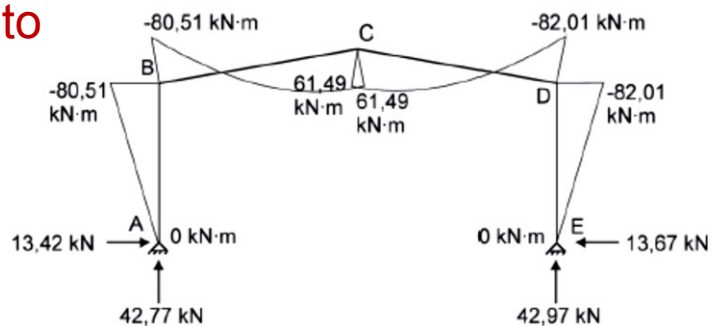
Esforço Normal:



Esforço Cortante:



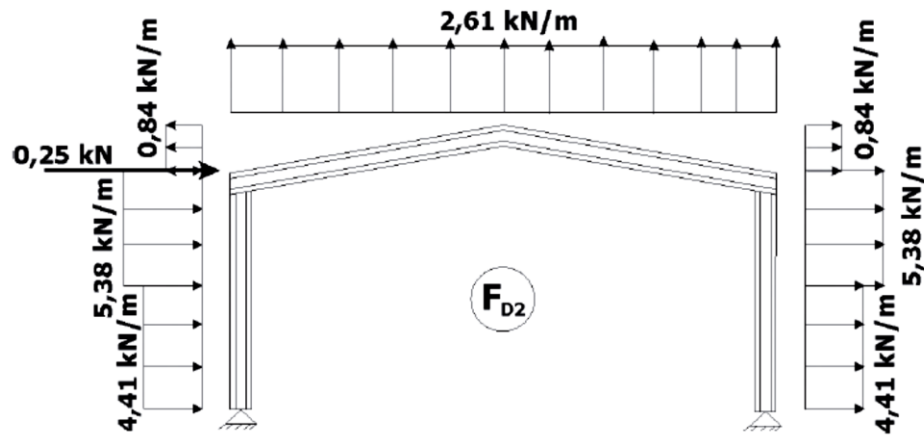
Momento Fletor:



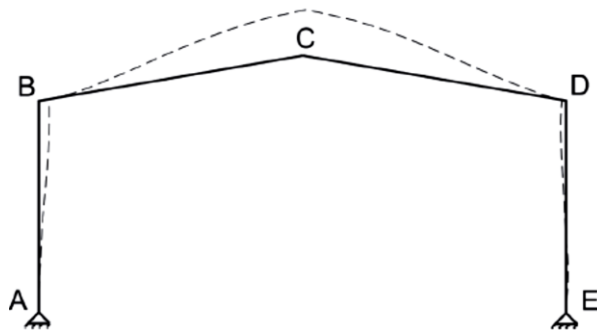
# Exercícios

## Flexão Simples e Composta

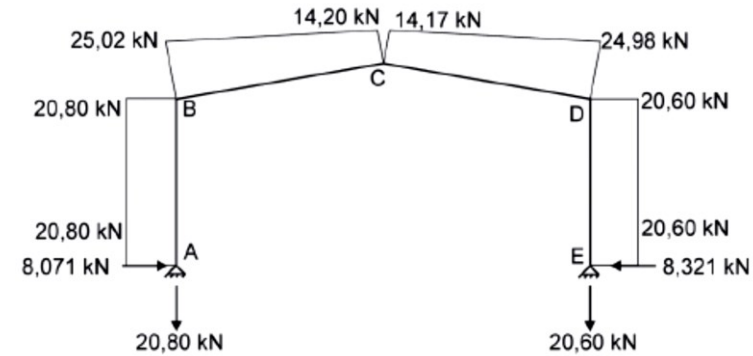
Combinação  $F_{D2}$ :



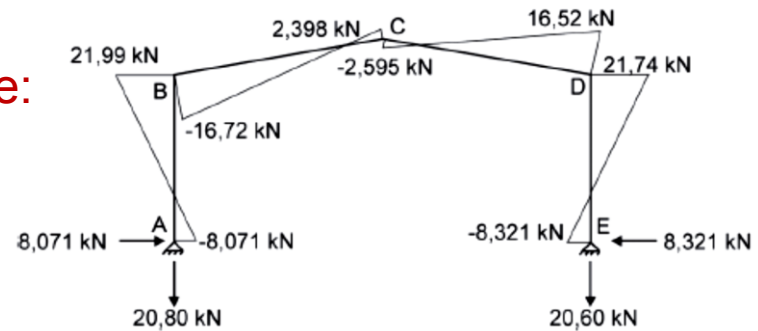
Geometria deformada:



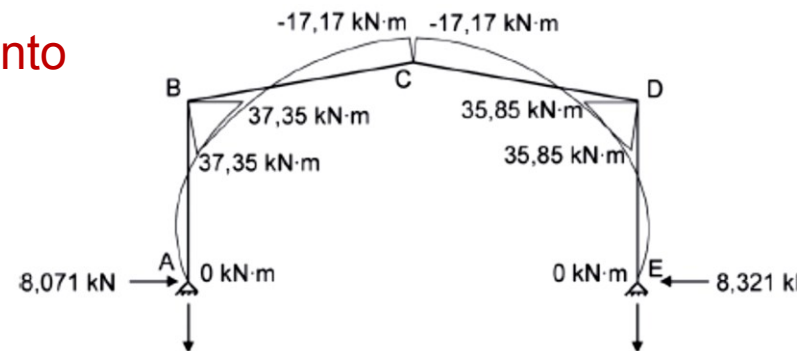
Esforço Normal:



Esforço Cortante:



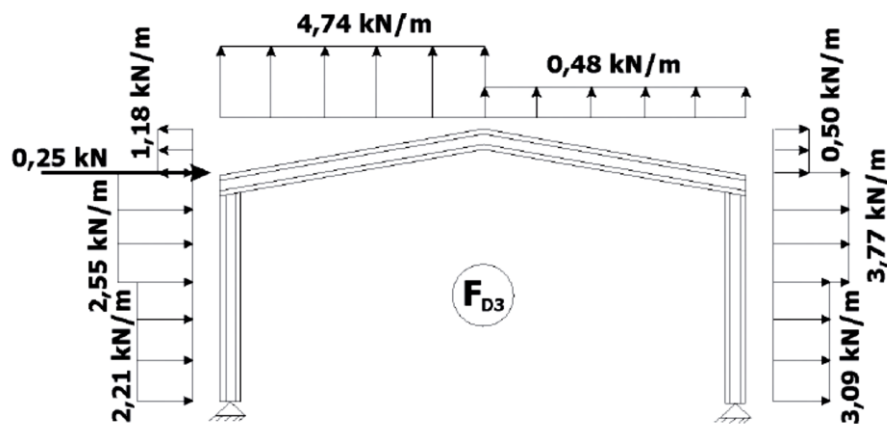
Momento Fletor:



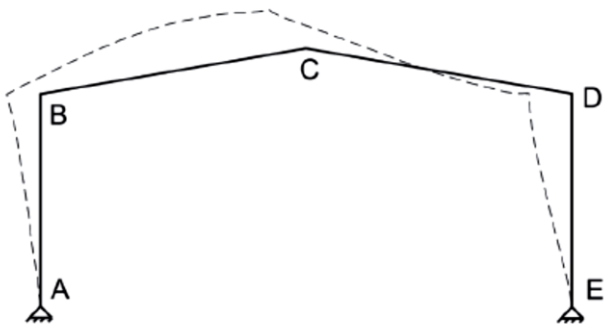
# Exercícios

## Análise Estrutural do Pórtico

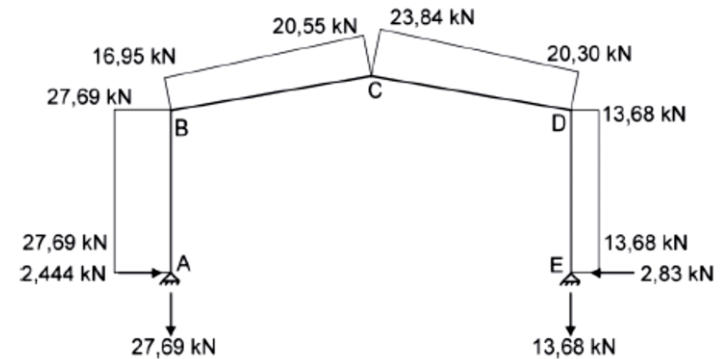
Combinação  $F_{D3}$ :



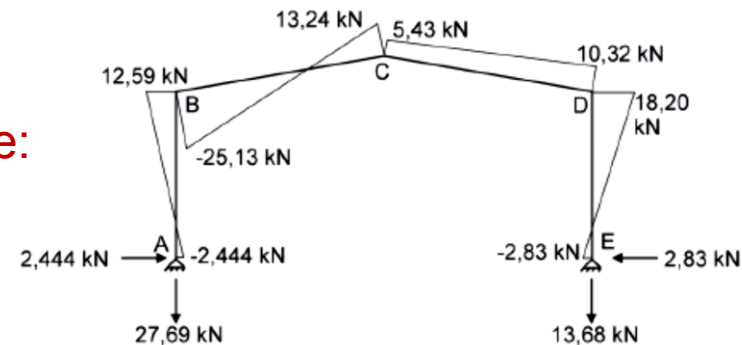
Geometria deformada:



Esforço Normal:

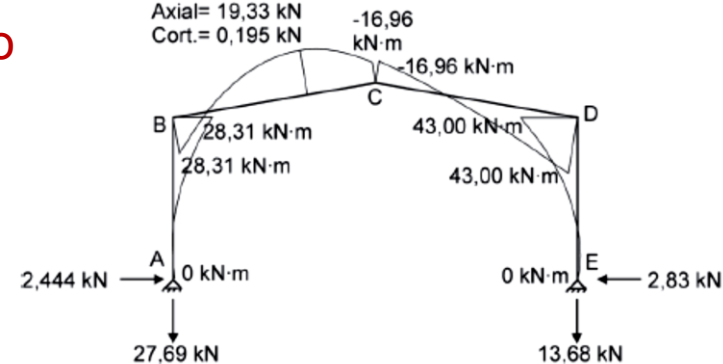


Esforço Cortante:



Mmáx = -34,36 kN·m  
 No mesmo ponto:  
 Axial = 19,33 kN  
 Cort. = 0,195 kN

Momento Fletor:



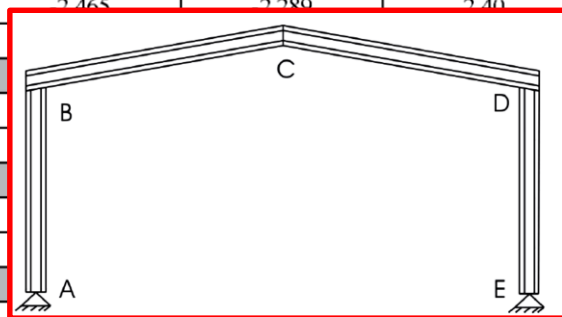
# Tabela com Deslocamentos e Esforços

Tabela 02 – Deslocamentos nos nós B e D para análises de primeira e segunda ordem

Nó	Combinação F <sub>D1</sub>			Combinação F <sub>D2</sub>			Combinação F <sub>D3</sub>		
	$\Delta_1$ (mm)	$\Delta_2$ (mm)	$\Delta_1/\Delta_2$	$\Delta_1$ (mm)	$\Delta_2$ (mm)	$\Delta_1/\Delta_2$	$\Delta_1$ (mm)	$\Delta_2$ (mm)	$\Delta_1/\Delta_2$
B	-14,02	-13,58	0,97	5,79	5,72	0,99	-27,06	-25,83	0,95
D	17,17	17,03	0,99	-2,65	-2,70	1,02	-36,85	-35,62	0,97

Tabela 03 – Resumo de esforços nos elementos do pórtico principal

Elem.	Nó	Tipo de Esforço	Comb. Fd1 (Linear)	Comb. Fd1 (Não-linear)	Comb. Fd2 (Linear)	Comb. Fd2 (Não-linear)	Comb. Fd3 (Linear)	Comb. Fd3 (Não-linear)
A-B	A	N (kN)	-42,77	-42,73	20,8	20,79	27,69	27,76
		M (kN·m)	0	0	0	0	0	0
		V (kN)	-13,42	-13,50	-8,07	-8,106	-2,44	-2,39
	B	N (kN)	-42,77	-42,73	20,80	20,81	27,69	27,70
		M (kN·m)	-80,51	-80,92	37,35	37,14	28,31	28,66
		V (kN)	-13,42	-13,50	21,99	21,95	12,59	12,67
B-C	B	N (kN)	-20,88	-20,49	25,02	25,04	16,95 (19,33)*	16,98
		M (kN·m)	-80,51	-80,92	37,35	37,14	28,31 (-34,36)*	28,66
		V (kN)	39,76	39,98	-16,72	-16,64	25,13 (0,00)*	-25,14
	C	N (kN)	-13,43	-13,33	14,20	14,19	20,55	20,50
		M (kN·m)	61,49	62,44	-17,17	-16,93	-16,96	-16,68
		V (kN)	2,465	2,280	2,40	2,45	13,24	13,24
C-D	C	N (kN)				14,16	23,84	23,80
		M (kN·m)				-16,93	-16,96	-16,68
		V (kN)				-2,64	5,43	5,28
	D	N (kN)				25,01	20,30	20,27
		M (kN·m)				35,70	43	42,28
		V (kN)				16,45	10,32	10,18
D-E	D	N (kN)				20,61	13,68	13,69
		M (kN·m)				-35,70	43	-42,28
		V (kN)				21,71	18,20	18,08
	E	N (kN)	-42,97	-42,94	20,6	20,60	13,68	13,61
		M (kN·m)	0	0	0	0	0	0
		V (kN)	-13,67	-13,77	-8,32	-8,34	-2,83	-2,97



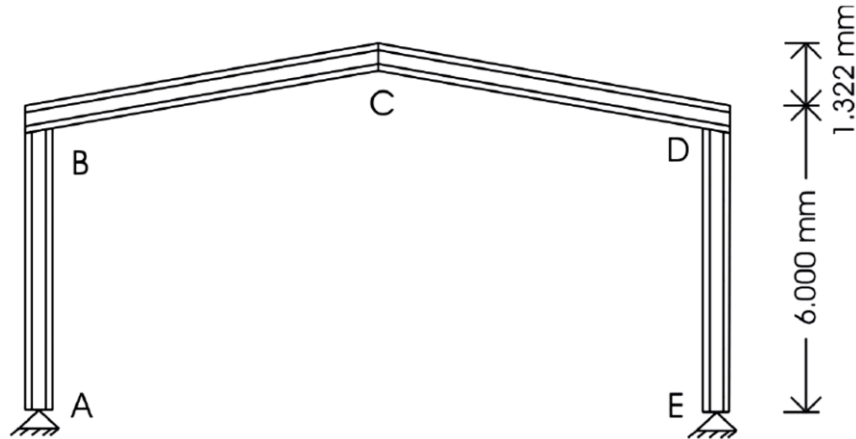
# Exercícios

## Dimensionamento da coluna

[1] Verificação da esbeltez: (item 5.3.4)

$$\frac{L_x}{r_x} = \frac{6.000}{131,4} = 45,66 < 200 \Rightarrow \text{Ok!}$$

$$\frac{L_y}{r_y} = \frac{6.000}{38,2} = 157,07 < 200 \Rightarrow \text{Ok!}$$



[2] Verificação da capacidade à compressão (Tabela F.1):

Elemento AA:  $\frac{h_w}{t_w} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   $\Rightarrow$   $Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{4.680,85}{4.970,00} = 0,94$

46,72    35,87

Elemento AL:  $\frac{b_f}{t_f} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   $\Rightarrow$   $Q_s = 1$

8,51    13,48

$\Rightarrow$   $Q = Q_a \cdot Q_s \Rightarrow Q = 0,94 \cdot 1 = 0,94$

# Exercícios

## Dimensionamento da coluna

[3] Carga de flambagem elástica:

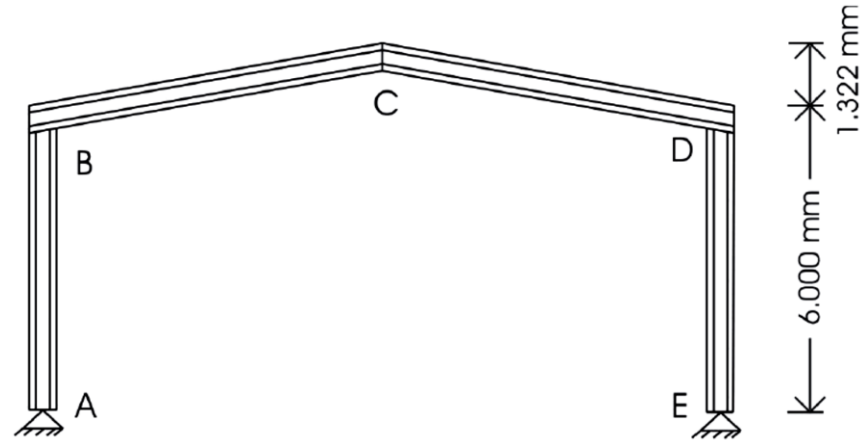
(Anexo E)

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot 200.000 \cdot 8,581 \times 10^7}{(6.000)^2} = \underline{4.705,06 \text{ kN}}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot 200.000 \cdot 7,27 \times 10^6}{(6.000)^2} = \underline{398,62 \text{ kN}}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{136,84^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot 200.000 \cdot 1,63728 \times 10^{11}}{(6000)^2} + 77.000 \cdot 132.000 \right] = \underline{1.022,23 \text{ kN}}$$

$$N_e = \min(N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}) = 398,62 \text{ kN}$$





# Exercícios

## Dimensionamento da coluna à compressão

[4] índice de esbeltez reduzido (item 5.3.3.2):

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{0,94 \cdot 4.970 \cdot 345}{398.620}} = 2,011$$

[5] fator de redução associado à resistência à compressão:

$$\begin{array}{ll} \text{se } \lambda_0 \leq 1,5 & \chi = 0,658\lambda_0^2 \\ \text{se } \lambda_0 > 1,5 & \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \end{array} \quad \Rightarrow \quad \chi = \frac{0,877}{2,011^2} = 0,2169$$

[6] força axial resistente de cálculo:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,2169 \cdot 0,94 \cdot 4.970 \cdot 345}{1,1} = 317,8 \text{ kN}$$

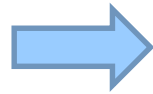
# Exercícios

## Dimensionamento da coluna à flexão

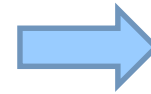
Verificando o estado limite para flambagem local da alma (FLA):

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_{FLA} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{271}{5,8} = 46,72$$



$$\lambda_{FLT} < \lambda_p$$



Seção compacta

$$M_{FLA,n} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

b) Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_Y}} = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 90,53$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_r = 5,70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_Y}} = 5,70 \cdot \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 137,24$$

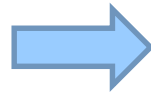
# Exercícios

## Dimensionamento da coluna à flexão

Verificando o estado limite para flambagem local da mesa (FLM):

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_{FLM} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{165}{2 \cdot 9,7} = 8,50$$



$$\lambda_{FLM} < \lambda_p$$



Seção compacta

$$M_{FLM,n} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

b) Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_Y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 9,15$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_r = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{E}{(F_Y - \sigma_r)}} = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{200.000}{(345 - 103,5)}} = 23,88$$

# Exercícios

## Dimensionamento da coluna à flexão

Verificando o estado limite para flambagem lateral com torção (FLT):

$$\lambda_{FLT} = \frac{L_b}{r_y} = \frac{6.000}{38,20} = 157,07 \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 42,38$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}}$$
$$= \frac{1,38 \sqrt{7,27 \times 10^6 \cdot 132.000}}{38,2 \cdot 132.000 \cdot 0,005064} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 1,639023 \times 10^{11} \cdot 0,005064^2}{7,27 \times 10^6}}} = 119,27$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W}{E \cdot J} = \frac{(345 - 103,5) 53.600}{200.000 \cdot 132.000} = 0,005064$$

Viga longa

$$\lambda_{FLT} > \lambda_r$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} = \frac{7,27 \times 10^6 (310 - 9,7)^2}{4} = 1,639023 \times 10^{11} \text{ mm}^6$$

$$M_{FLT,n} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{d1}}$$

# Exercícios

## Dimensionamento da coluna à flexão

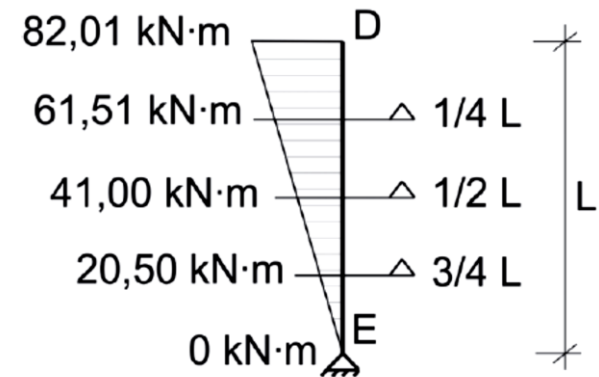
Verificando o estado limite para flambagem lateral com torção (FLT):

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 EI_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left( 1 + 0,039 \frac{JL_b^2}{C_w} \right)}$$

$$C_b = \frac{12,5M_{\max}}{2,5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \cdot R_m \leq 3,0$$

$$C_b = \frac{12,5 \cdot 82,01}{2,5 \cdot 82,01 + 3 \cdot 61,51 + 4 \cdot 41,00 + 3 \cdot 20,50} \cdot 1 = 1,667 < 3,0$$

$$M_{cr} = \frac{1,667 \cdot \pi^2 \cdot 200.000 \cdot 7,27 \times 10^6}{6.000^2} \sqrt{\frac{1,639023 \times 10^{11}}{7,27 \times 10^6} \left( 1 + 0,039 \frac{132.000 \cdot 6.000^2}{1,639023 \times 10^{11}} \right)} = 145,64 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



# Exercícios

## Dimensionamento da coluna à flexão

Verificando os estados limites para a flexão simples:

$$M_{FLT,n} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{FLT,n} = \frac{145,64}{1,1} \leq \frac{212,313}{1,1}$$

$$M_{FLT,n} = 132,40 \text{ kN} \cdot \text{m} \leq 193,01 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{FLT,n} = \underline{132,40 \text{ kN} \cdot \text{m}}$$

$$M_{Rd} = \text{Min}(M_{FLT}, M_{FLM}, M_{FLA})$$

$$M_{Rd} = 132,40 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

# Exercícios

## Verificação à flexão composta

Para a atuação simultânea da força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores, deve ser obedecida a limitação fornecida pelas seguintes **expressões de interação**:

$$\frac{N_{S,d}}{N_{R,d}} = \frac{42,97}{317,8} = 0,135 < 0,2$$

$$\frac{N_{S,d}}{N_{R,d}} < 0,2 \Rightarrow \frac{N_{c,Sd}}{2 \cdot N_{c,Rd}} + \frac{M_{xSd}}{M_{xRd}} \leq 1,00$$

$$\frac{42,97}{2 \cdot 317,8} + \frac{82,01}{132,40} = 0,69 \leq 1,00 \Rightarrow \text{Ok!}$$

# Exercícios

## Verificação à flexão composta

Verificação da capacidade ao cisalhamento: (item 5.4.3)

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_v = \frac{h}{t_w} = \frac{271}{5,8} = 46,72$$

b) Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{K_v E}{f_Y}} = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 200.000}{345}} = 59,22$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_r = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{K_v E}{f_Y}} = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 200.000}{345}} = 73,76$$

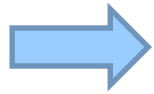


# Exercícios

## Verificação à flexão composta

Verificação da capacidade ao cisalhamento: (item 5.4.3)

$$\lambda_v < \lambda_p$$



$$V_{pl} = 0,60 \cdot A_w \cdot f_y = 0,60 \cdot (310 \cdot 5,8) \cdot 345$$

$$V_{pl} = 372,186 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{372,186}{1,1}$$

$$V_{Rd} = 338,35 \text{ kN}$$

Portanto, pode-se dizer que o perfil W310x38,7 é adequado para o elemento da coluna D-E