



**Universidade Presbiteriana
Mackenzie**

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL

Capítulo XV

Segurança de elementos metálicos
sujeitos a flexão composta e
flexão composta oblíqua.

Disciplinas: *Estruturas Metálicas*
Prof. Dr. Celso Antonio Abrantes
2015



Universidade São Judas Tadeu

ENGENHARIA CIVIL

Capítulo XV

Segurança de elementos metálicos
sujeitos a flexão composta e
flexão composta oblíqua.

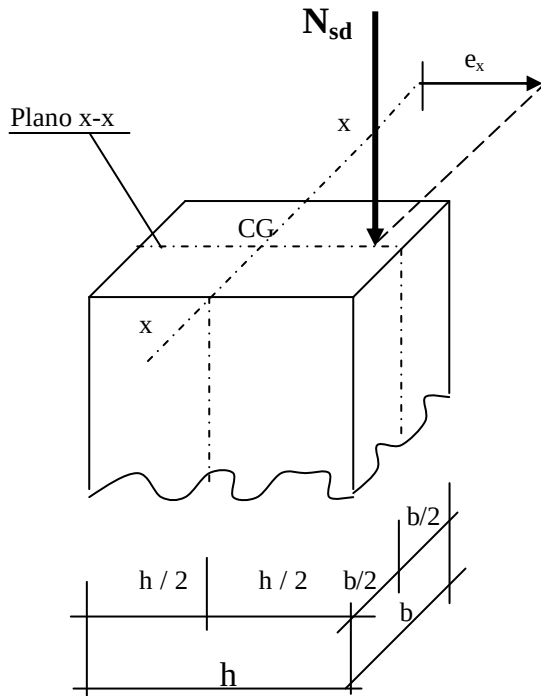
**Disciplinas: *Estruturas Metálicas
e de Madeiras***

**Prof. Dr. Celso Antonio Abrantes
2015**

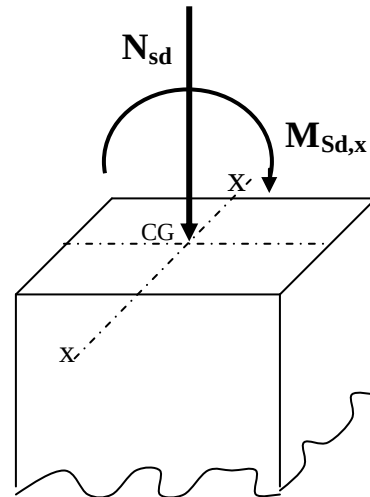
Flexão composta e flexão composta oblíqua

A verificação da suficiência de elementos sujeitos a flexão composta, envolve três etapas, a saber:

- a) Verificação a tração axial ou compressão simples;
- b) Verificação a flexão;
- c) Verificação a efeitos combinados de flexão e tração ou compressão.



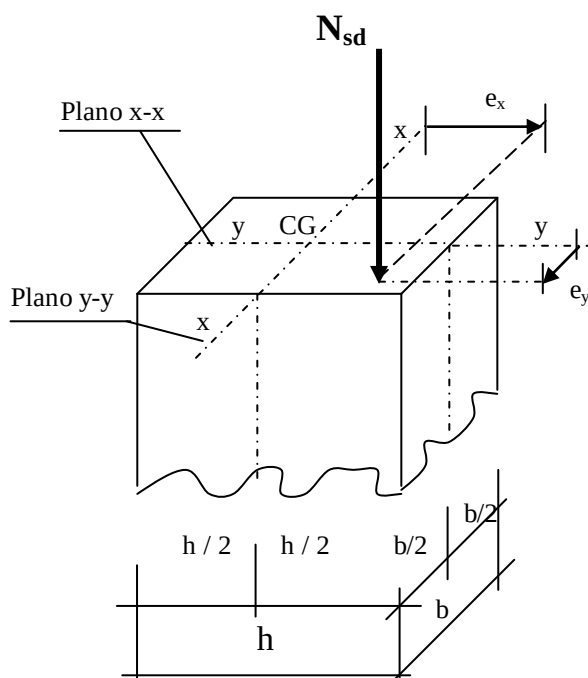
(a)



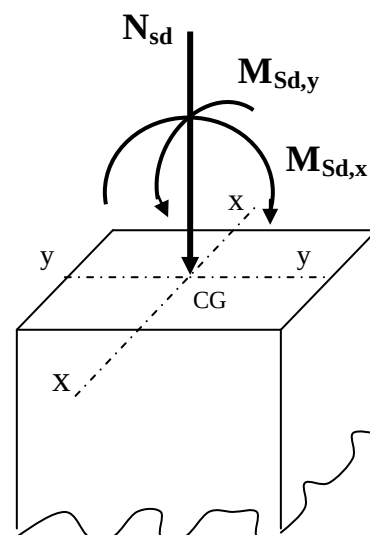
(b)

O plano x-x é perpendicular ao eixo x-x

Figura 01: Flexão composta (Flexo-compressão ou flexo-tração)



(a)



(b)

O plano x-x é perpendicular ao eixo x-x;
O plano y-y é perpendicular ao eixo y-y.

Figura 02: Flexão composta oblíqua

Verificação a efeitos combinados de força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores (segundo 5.5.1.2 da NBR 8800:2008)

Segundo o item 5.5.1.2, pag 54 da NBR 8800:2008, 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:

a) Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

b) Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{2 N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

Onde:

N_{Sd} = Força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão;

N_{Rd} = Força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão;

$M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal;

$M_{Rd,x}$ e $M_{Rd,y}$ são momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal;

Obs: Na verificação do estado limite de Flambagem Lateral com Torção dos elementos sujeitos a esforços combinados, adotar $C_b = 1,0$.

Análise elástica de segunda ordem – Efeito global $P-\Delta$ e local $P-\delta$, Anexo D da NBR 8800:2008:

Método da amplificação dos esforços solicitantes:

Este método é aplicado para a execução de análise elástica aproximada de segunda ordem, levando em conta os efeitos global $P\Delta$ e local $P\delta$.

Neste método, consideram-se combinações das ações de cálculo de forças verticais e, se houverem, horizontais (item 4.7.7.2), considerando-se o efeito das imperfeições geométricas iniciais e das imperfeições iniciais e material conforme 4.9.7.

Uso do método:

Em cada andar das estruturas analisadas momento fletor e a força axial solicitantes de cálculo, M_{sd} e N_{sd} , devem ser determinados por (figura D1):

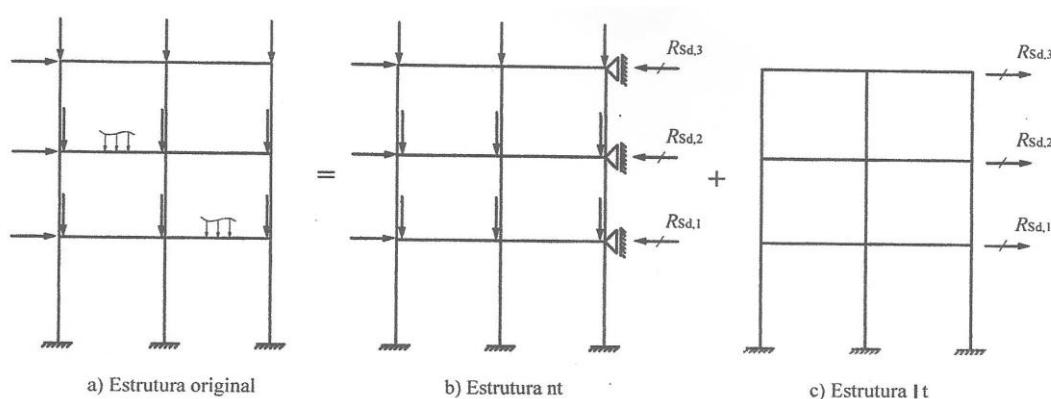


Figura: Anexo D da NBR 8800:2008

Figura D.1 — Modelo para análise

$$M_{sd} = \beta_1 M_{nt} + \beta_2 M_{lt} \quad \text{e}$$

$$N_{sd} = N_{nt} + \beta_2 N_{lt}$$

M_{nt} e N_{nt} são, respectivamente, momento fletor e força axial solicitantes de cálculo, obtidos por análise elástica de 1ª (primeira) ordem, com os nós da estrutura impedidos de se deslocar horizontalmente (figura D1-b da NBR 8800:2008);

M_{lt} e N_{lt} são, respectivamente, momento fletor e força axial solicitantes de cálculo, obtidos por análise elástica de 1ª (primeira) ordem, correspondente apenas ao efeito os deslocamentos horizontais dos nós da estrutura (efeito das reações das contenções fictícias aplicadas em sentido contrário, nos mesmos pontos onde tais contenções foram colocadas - Estrutura lt Figura D.1-c).

O coeficiente β_1 é dado por:

- Se a força axial solicitante de cálculo for de tração: $\beta_1 = \dots 1,0$;

- Se a força axial solicitante de cálculo for de compressão:

$$\beta_{1,x} = \frac{C_{m,x}}{1 - \frac{N_{sd1}}{N_{e,x}}} \geq 1,0 \quad \text{e} \quad \beta_{1,y} = \frac{C_{m,y}}{1 - \frac{N_{sd1}}{N_{e,y}}} \geq 1,0 ,$$

com: $N_{e,x}$ e $N_{e,y}$ calculados com $(KL) = (1L)$;

$$N_{sd1} = N_{nt} + N_{lt}$$

Valores de C_m

- Se houver forças transversais na barra entre as suas extremidades, no plano de flexão:

$$C_m = 1,0$$

- Se não houver forças transversais na barra entre as suas extremidades, no plano de flexão:

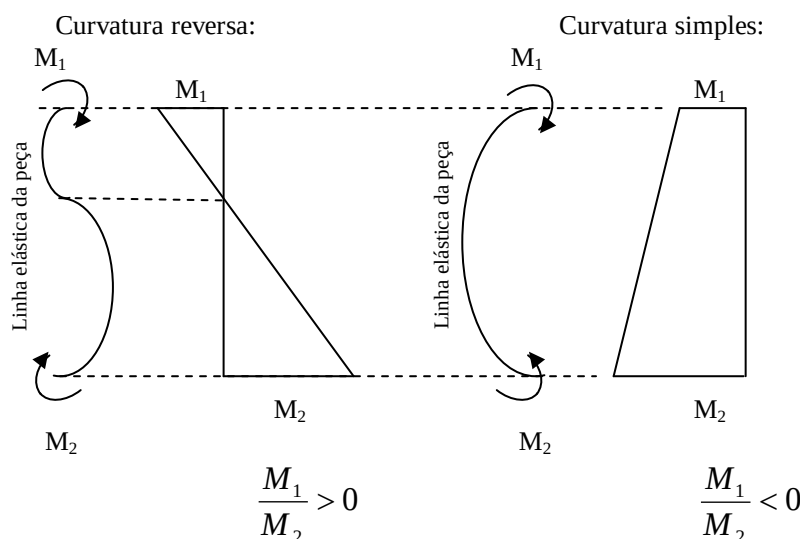
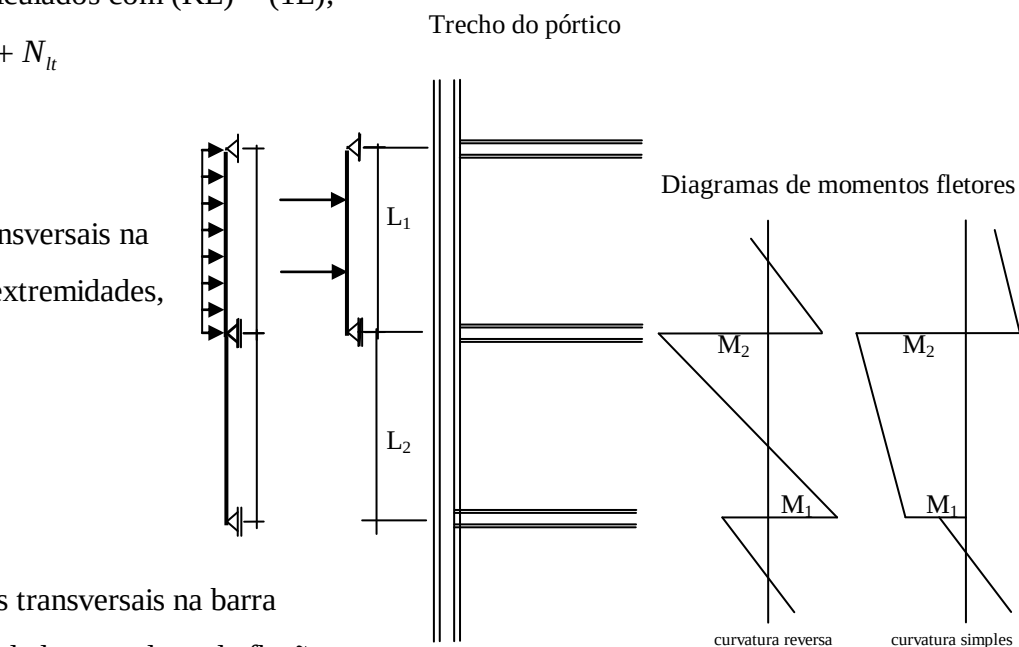
$$C_m = 0,6 - 0,4 \frac{M_1}{M_2} , \text{ onde:}$$

$M_1 = M_{nt1}$, é o menor momento numa das extremidades da barra, no plano de flexão.

$M_2 = M_{nt2}$, é o maior momento na outra extremidade da barra, no plano de flexão.

A relação $\frac{M_1}{M_2} > 0$ (positiva) quando os momentos provocarem curvatura reversa;

A relação $\frac{M_1}{M_2} < 0$ (negativa) quando os momentos provocarem curvatura simples.



O coeficiente β_2 :

$$\beta_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_s} \frac{\Delta_h}{h} \frac{\sum N_{sd}}{\sum H_{sd}}}$$

Para estudo pormenorizado de β_2 , ver item D.2.3, pag. 119 da NBR 8800:2008.

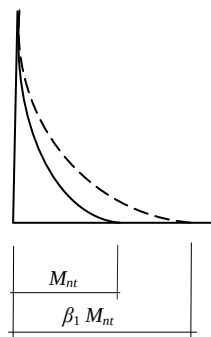
Aplicação do Método da amplificação dos esforços solicitantes:

Pela facilidade de cálculo, considerando apenas o efeito de segunda ordem local P δ , com boa aproximação, vem:

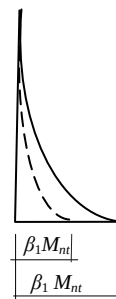
$$M_{sd} = \beta_1 M_{nt} + \beta_2 M_{lt} = \beta_1 M_{nt}$$

e

$$N_{sd} = N_{nt} + \beta_2 N_{lt} = N_{nt}$$



Para $\beta_1 > 1,0$



Para $\beta_1 < 1,0$

(Não se adota)

a) Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\beta_{1x} \frac{M_{x,sd}}{M_{x,Rd}} + \beta_{1y} \frac{M_{y,sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

b) Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{2 N_{Rd}} + \left(\beta_{1x} \frac{M_{x,sd}}{M_{x,Rd}} + \beta_{1y} \frac{M_{y,sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

Exercícios resolvidos:

- Do trecho A-B da coluna abaixo, para as solicitações de cálculo indicadas, empregando-se os procedimentos da NBR 8800:2008, pede-se:
 - Verificar a suficiência a compressão simples, para o mais desfavorável plano de flambagem dentre o plano do desenho e o plano perpendicular ao mesmo (não representado);
 - Verificar a suficiência a flexão simples no plano do desenho, para a ação de momentos fletores representados no Diagrama de Momentos Fletores (DMF);
 - Verificar a suficiência a flexão simples no plano perpendicular ao do desenho, para a ação de momentos fletores não representados;
 - Verificar a suficiência a flexão composta;
 - Determinar o valor da máxima força cortante de cálculo V_{sd} a ser aplicada na seção transversal da coluna;

Dados:

- Aço ASTM A-36 com: $f_y = 250$ MPa, $f_u = 400$ MPa; $E = 200000$ MPa e $G = 70000$ MPa.
- Pontos travados lateralmente contra a perda de estabilidade, no plano perpendicular ao pórtico: A e B, com comprimento de flambagem $K.L = 1$ L;
- No plano do pórtico os nós apresentam rotação impedida;
- No nó de apoio (A) a translação é impedida no plano do pórtico e no nó B, é livre, com $KL = 1,2$ L;
- A rotação nos planos horizontais, em torno do eixo longitudinal z da barra é impedida nos nós A e B por esquema estrutural não representado;
- Adotar $C_b = 1$;
- Estrutura não sujeita a cargas transversais entre apoios;
- Na base, a coluna está engastada nos dois planos principais de inércia;
- Nervuras (enrijecedores): Placa de base no nó A e as representadas no nó B;
- Considerar a coluna suficiente a deformações (deslocamentos do pórtico);
- Resistência de cálculo da coluna a momento fletor, no plano perpendicular ao do pórtico do desenho: $M_{sd} = 18,41$ kN.m;
- Solicitações de cálculo:

Carga axial de compressão: $N_{cs,d} = 300$ kN;

Momentos fletores no plano do pórtico (desenho):

$M_{dA} = -9$ kN.m, $M_{dB} = +17$ kN.m,

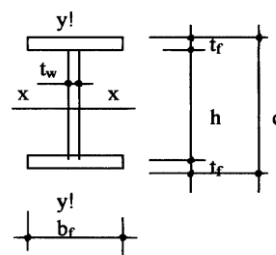
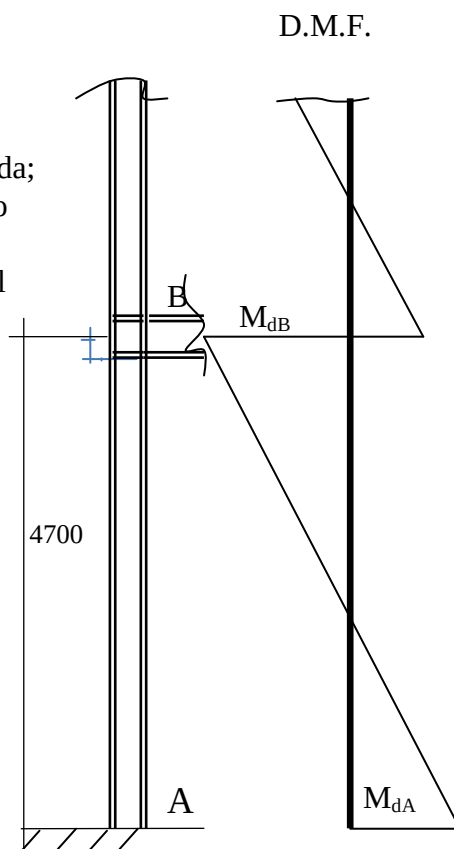
Momentos fletores no plano perpendicular ao do pórtico (não representado):

$M_{dA} = +2$ kN.m, $M_{dB} = +2,5$ kN.m,

- Características geométricas da seção empregada:

$d = 250,0$ mm	$b_f = 160,0$ mm
$t_f = 9,5$ mm	$t_w = 4,75$ mm
$A_g = 41,4$ cm ²	$I_x = 4.886,0$ cm ⁴
$I_y = 649,0$ cm ⁴	$Z_x = 429,0$ cm ³
$W_x = 391,0$ cm ³	$W_y = 81,0$ cm ³
$r_x = 10,87$ cm	$r_y = 3,96$ cm
$r_T = 1,5$ cm	$I_T = J = 9,59$ cm ⁴
$Z_y = 123,0$ cm ³	$C_w = 93.808,0$ cm ⁶

- A altura da viga que chega no nó B é $d = 400$ mm.



Solução:

a) Suficiência a compressão simples:

a.1. Verificação da estabilidade local: Relações b/t da tabela F1 da NBR 8800:2008:

(FLA) Flambagem local da alma: Elementos comprimidos AA, grupo 2.

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{200.000}{250}} \cong 42$$

$$\frac{b}{t} = \frac{h}{t_w} = \frac{231}{4,75} = 48,63 > \left(\frac{b}{t}\right)_{\lim} = 42, \text{ como } \frac{b}{t} > \left(\frac{b}{t}\right)_{\lim}, \text{ calcula-se } b_{ef}.$$

$$\text{Segundo F.3.2: } b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{ca}{b/t} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b$$

$$ca = 0,34 \text{ e } b_{ef} = 1,92 \times 0,475 \sqrt{\frac{200.000}{250}} \left[1 - \frac{0,34}{48,63} \sqrt{\frac{200.000}{250}} \right] \leq 23,1 \text{ cm}$$

$$A_{ef} = 2 b_f t_f + b_{ef} t_w$$

$$A_{ef} = 2 \times 16 \times 0,95 + 20,7 \times 0,475 \Rightarrow A_{ef} = 40,23 \text{ cm}^2$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{40,23}{41,4} \Rightarrow Q_a = 0,972$$

(FLM) Flambagem local da mesa: Elementos comprimidos AL, grupo 5.

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y k_c}}, \text{ com } k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \text{ e } 0,35 \leq k_c \leq 0,76$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{231/4,75}} = 0,57 \Rightarrow 0,35 \leq k_c \leq 0,76. \text{ Portanto adota-se } k_c = 0,57$$

$$\frac{b}{t} = \frac{b_f/2}{t_f} = \frac{160/2}{9,5} = 8,42 < \left(\frac{b}{t}\right)_{\lim} = 0,64 \sqrt{\frac{200.000}{250/0,57}} = 13,7.$$

Portanto não há FLM, $Q_s = 1,0$.

$$\text{Assim, } Q = Q_s \cdot Q_a = 1 \times 0,972 \Rightarrow \mathbf{Q = 0,972}$$

a.2. Verificação da estabilidade global:

Força axial de flambagem elástica (N_e) em **seção com dupla simetria**.

Segundo E.1.1 da NBR 8800:2008, adota-se para N_e o menor dos valores abaixo;

Segundo E.2.1.2 da NBR 8800:2008, para barras contraventadas, adota-se $K_x = 1,2$ e $K_y = 1,0$;

Segundo E.2.2 da NBR 8800:2008, para barras com rotação impedida nas extremidade, $K_z = 1,0$.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(k_x l_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 20.000 \times 4.886}{(1,2 \times 470)^2} = 3.028,89 \text{ kN} \cong 3029 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(k_y l_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20.000 \times 649}{(1 \times 470)^2} = 579,35 \text{ kN} \cong 579 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z l_z)^2} + GJ \right] \text{ onde:}$$

$$k_z = 1 ; \text{ Perfil I: como } G = C, x_0 = y_0 = 0$$

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} = \sqrt{(10,87^2 + 3,96^2 + 0^2 + 0^2)} = 11,57 \text{ cm}$$

$$\therefore N_{ez} = \frac{1}{11,57^2} \left[\frac{\pi^2 \times 20.000 \times 93.808}{(1 \times 470)^2} + 7.700 \times 9,59 \right] = 1127 \text{ kN}$$

Adota-se $N_E = N_{Ey} = 579 \text{ kN}$ (o menor)

Índice e esbeltez reduzido:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{0,972 \times 41,4 \times 25}{579}} = 1,32 < 1,5$$

Portanto $\lambda_0 < 1,5 \Rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2}$ ou com o uso da tabela 4:

$$\lambda_0 = 1,32 = 1,30 + 0,02 \Rightarrow \chi = 0,482$$

Determinação da Força axial resistente de cálculo:

$$N_{C,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,482 \times 1 \times 0,972 \times 25}{1,1}$$

$$N_{C,Rd} = 440,81 \text{ kN}$$

a.3. Conclusão:

Como $N_{cs,d} = 300,00 \text{ kN} < N_{C,Rd} = 440,81 \text{ kN}$, aceita-se a compressão simples.

b) Suficiência a flexão simples em estados limites últimos, para flexão no plano do desenho (neste caso, em torno do eixo de maior inércia = eixo x-x):

b.1. Verificação da estabilidade local: (Parâmetros de esbeltez λ da tabela G1)

b.1.1.) Estado Limite nº 1: Flambagem Local da Alma (FLA)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{231}{4,75} = 48,63 < \lambda_p = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 161,2 \quad \therefore \text{ não há F.L.A.}$$

$$\text{Assim, } M_{R,d} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{429,0 \times 25}{1,1} \Rightarrow M_{R,d} = 9.750,0 \text{ kN.cm}$$

b.1.2) Estado Limite nº 2: Flambagem Local da Mesa (FLM)

$$\lambda = \frac{\frac{b_f}{2}}{t_f} = \frac{160}{9,5} = 8,42 < \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 10,74 \quad \therefore \text{ não há F.L.M.}$$

$$\text{Assim, } M_{R,d} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{429,0 \times 25}{1,1} \Rightarrow M_{R,d} = 9.750,0 \text{ kN.cm}$$

b.1.3) Verificação da estabilidade geral (F.L.T).

Estado limite nº3: Flambagem Lateral com Torção (FLT):

Verificação a momento fletor, para travamentos laterais apenas nos apois:

$L_b = L = 470 \text{ cm}$ (distância entre pontos travados)

$$\text{Como } \lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{470}{3,96} = 118,7 > \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 49,78 \Rightarrow \text{calcula-se } \lambda_r$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad \text{com:}$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_x}{E J} \Rightarrow \beta_1 = \frac{(250 - 0,3 \times 250) \times 391}{200.000 \times 1297,9} = 2,636 \cdot 10^{-4}$$

$$J = I_T = 2 \frac{b_f t_f^3}{3} + \frac{h t_w^3}{3} \Rightarrow J = I_T = 2 \frac{1,6 \times 0,95^3}{3} + \frac{23,1 \times 0,475^3}{3} = 9,59 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{649 \times 1297,9}}{3,96 \times 1.297,9 \times 2,636 \cdot 10^{-4}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \times 93.808 \times (2,636 \cdot 10^{-4})^2}{649}}} = 1.322,09$$

$$\therefore \lambda_r \cong 1.322,0 \text{ cm}$$

Como $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, dimensiona-se no regime elasto-plástico com:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) W_x = (25 - 0,3 \cdot 25) 391,0 = 6.842,5 \text{ kN.cm};$$

$$C_b = 1,0 \text{ (dado)}$$

$$\therefore M_{Rdx} = \frac{1,0}{1,1} \left[10.725,0 - (10.725,0 - 6.842,5) \frac{118,7 - 49,78}{1322,0 - 49,78} \right]$$

$$M_{Rdx} = 9.558,8 \text{ kN.cm} = 95,59 \text{ kN.m}$$

$$\text{Como } M_{Rdx} = 9.558,8 \text{ kN.cm} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{10.725,0}{1,1} = 9750,0 \text{ kN.cm},$$

$$\text{e } M_{Rdx} = 9.558,8 \text{ kN.cm} \leq \frac{1,5 W_x f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{1,5 \times 391 \times 25}{1,1} = 13.329,5 \text{ kN.cm}$$

$$\text{Aceita-se } M_{Rdx} = 9.558,8 \text{ kN.cm} \cong 9.559,0 \text{ kN.cm}$$

b.2) Conclusão:

Dos três estados limites acima, adota-se o menor dos valores de M_{Rdx} .

Neste caso, o menor é $M_{Rdx} = 9.559,0 \text{ kN.cm}$.

$$\text{Como: } M_{Sdx} = 1.700,0 \text{ kN.cm} < M_{Rdx} = 9.559,0 \text{ kN.cm},$$

Aceita-se a seção a flexão simples, para flexão em torno do eixo de maior inércia.

c) Suficiência a flexão simples em estados limites últimos, para flexão no plano perpendicular ao do desenho (neste caso, em torno do eixo de menor inércia = eixo y-y):

$$M_{sdy} = M_{dB} = + 2,5 \text{ kN.m} < M_{Rdy} = 18,41 \text{ kN.m} \text{ (dado)}$$

Aceita-se a seção a flexão simples, para flexão em torno do eixo de menor inércia.

d) Verificação da suficiência a efeitos combinados. (flexão composta oblíqua), segundo anexo D.

$$M_{Sd} = \beta_1 M_{nt} + \beta_2 M_{lt} = \beta_1 M_{nt} \quad \text{e} \quad N_{Sd} = N_{nt} + \beta_2 N_{lt} = N_{nt}$$

$$\text{Obs: Desprezando } \beta_2, \text{ vem: } M_{Sd} = \beta_1 M_{nt} \quad \text{e} \quad N_{Sd} = N_{nt}$$

$$\beta_{1,x} = \frac{C_{m,x}}{1 - \frac{N_{Sd1}}{N_{e,x}}} \geq 1,0 \quad \text{e} \quad \beta_{1,y} = \frac{C_{m,y}}{1 - \frac{N_{Sd1}}{N_{e,y}}} \geq 1,0, \text{ com } N_{e,x} \text{ e } N_{e,y} \text{ calculados com (KL)} = (1L)$$

$$N_{S,d} = 300,0 \text{ kN} \text{ (dado)}$$

$$N_{e,y} = 579 \text{ kN calculado para } K_y = 1,0 \text{ no item a.2);}$$

Calculando-se $N_{e,x}$ para $K_x = 1,0$, vem:

$$N_{e,x} = \frac{\pi^2 E I_x}{(k_x l_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 20.000 \times 4.886}{(1,0 \times 470)^2} = 4.361,6 \text{ kN}$$

$$C_{m,x} = 0,6 - 0,4 \frac{M_{1x}}{M_{2x}}, \text{ onde:}$$

$$\frac{M_{1x}}{M_{2x}} = \frac{M_{dA,x}}{M_{dB,x}} = \frac{9}{17} > 0 \text{ (curvatura reversa)}$$

$$C_{m,x} = 0,6 - 0,4 \frac{9}{17} = 0,388$$

$$\beta_{1,x} = \frac{C_{m,x}}{1 - \frac{N_{Sd1}}{N_{e,x}}} = \frac{0,388}{1 + \frac{300}{461,6}} = 0,417 < 1,0$$

Adota-se $\beta_{1,x} = 1,0$

$$C_{m,y} = 0,6 - 0,4 \frac{M_{1y}}{M_{2y}}, \text{ onde:}$$

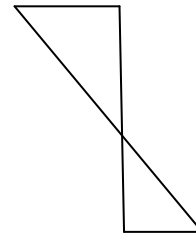
$$\frac{M_{1y}}{M_{2y}} = \frac{M_{dA,y}}{M_{dB,y}} = -\frac{2}{2,5} < 0 \text{ (curvatura simples)}$$

$$C_{m,y} = 0,6 - 0,4 \left(-\frac{2}{2,5} \right) = 0,92$$

$$\beta_{1,y} = \frac{C_{m,y}}{1 - \frac{N_{Sd1}}{N_{e,y}}} = \frac{0,92}{1 - \frac{300}{579}} = 1,91 > 1$$

Adota-se $\beta_{1,y} = 1,91$

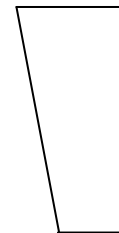
$M_{dB,x} = 17,0 \text{ kNm}$



$M_{dA,x} = -9,0 \text{ kNm}$

Plano x-x
Curvatura reversa

$M_{dB,y} = 2,5 \text{ kNm}$



$M_{dA,y} = 2,0 \text{ kNm}$

Plano y-y
Curvatura simples

$$\text{Assim, } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = \frac{300,0}{440,81} = 0,69 \geq 0,2 \Rightarrow \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\beta_{1,x} \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \beta_{1,y} \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

$$\frac{300}{440,81} + \frac{8}{9} \left(1 \frac{17}{95,59} + 1,91 \frac{2,5}{18,41} \right) = 1,07 > 1,0 ,$$

Portanto não passa, rejeita-se a peça.

e) **Máxima força cortante de cálculo V_{Sd} a ser aplicada na seção transversal da coluna;**

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{231}{4,75} = 48,63$$

$$a = 4700 - 200 = 4500 \text{ mm (vide figura);}$$

$$\frac{a}{h} = \frac{4.500}{231} = 19,4 > 3 \quad \therefore K_v = 5,0$$

$$\lambda_p = 1,1 \sqrt{\frac{K_v E}{f_y}}$$

$$\lambda_p = 1,1 \sqrt{\frac{5,0 \times 200.000}{250}} = 69,9$$

$$\text{Como } \lambda < \lambda_p \Rightarrow V_{R,d} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{pl} = 0,6 A_w \cdot f_y = 0,6 d t_w f_y$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot 25,0 \cdot 0,475 \cdot 25$$

$$V_{pl} = 178,5 \text{ kN}$$

$$V_{R,d} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{178,5}{1,4}$$

$$V_{R,d} = 162,27 \text{ kN}$$

$$\text{Fazendo } V_{dA} = V_{Rd} = \underline{V_{Sd}} = 162,27 \text{ kN ,}$$

$$\text{Vem: } \underline{V_{Sd}} = 162,27 \text{ kN}$$

Exercícios propostos:

1. Da coluna abaixo, pelos critérios da NBR 8800:2008, pede-se:

- Determinar a resistência a compressão simples do trecho AC; (valor: 2,0 pontos)
- Verificar no trecho AC, a suficiência a efeitos combinados de carga axial de compressão de cálculo e momentos fletores de cálculo de primeira e segunda ordem, nos dois planos representados. (valor: 2,0 pontos)

Dados:

- Considerar verificados e atendidos os estados limites últimos de Cisalhamento e Flambagem Local da Mesa (FLM) e Flambagem Local da Alma (FLA) para flexão e compressão axial;
- Considerar verificado e atendido o estado limite último de serviço referente a deformações (flechas);
- Aço ASTM A-572, grupo 3, grau 50 com:

$$E = 200000 \text{ MPa}, f_y = 345 \text{ MPa} \text{ e } f_u = 450 \text{ MPa}; \sigma_R = 0,3 f_y \text{ e } G = 77000 \text{ MPa};$$

4) Coluna engastada na base nos planos x-x e y-y; adotar os valores recomendados de k_x e k_y ;

5) Pontos travados contra a torção axial: A, B, C e D;

6) Solicitações de cálculo no trecho AC:

Carga axial de compressão: $N_{C,Sd} = 253,70 \text{ kN}$;

Momentos fletores no pórtico do plano A-A: $MS_{d,A-A} = \dots\dots\dots \text{ kN.m}$; (ver DMF)

Momentos fletores no pórtico do plano B-B: $MS_{d,B-B} = \dots\dots\dots \text{ kN.m}$; (ver DMF)

7) Resistências de cálculo:

Resistência a compressão axial: $N_{C,Rd} = \dots\dots\dots$ (a determinar) (kN);

Resistência a momento fletor no plano x-x: $M_{Rd,x} = 1259,83 \text{ kN.m}$;

Resistência a momento fletor no plano y-y: $M_{Rd,y} = 563,80 \text{ kN.m}$;

8) Considerar análise de segunda ordem para efeitos locais;

9) Desprezar os efeitos de β_{2x} e β_{2y} nos cálculos das solicitações;

10) Características geométricas do perfil caixão empregado:

$$A_g = 162,57 \text{ cm}^2; d = 720,00 \text{ mm}; h = 695,00 \text{ mm}; t_w = 6,30 \text{ mm}$$

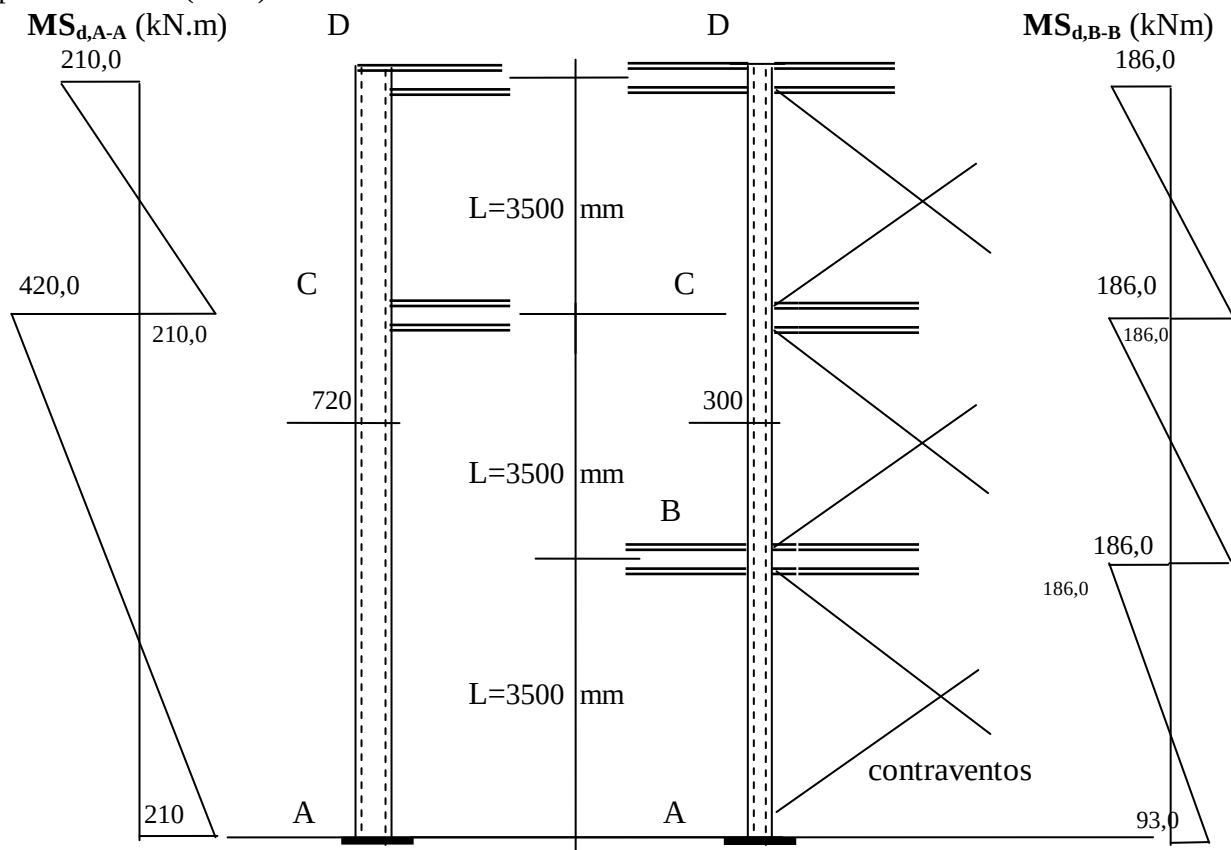
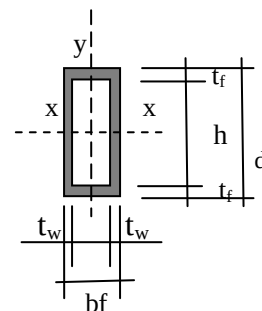
$$b_f = 300,00 \text{ mm}; t_f = 12,50 \text{ mm}; I_x = 129112,80 \text{ cm}^4; W_x = 3586,47 \text{ cm}^3$$

$$Z_x = 4016,85 \text{ cm}^3; r_x = 28,18 \text{ cm}; I_y = 24512,30 \text{ cm}^4; W_y = 1634,20 \text{ cm}^3; C_w = 0$$

$$Z_y = 1634,20 \text{ cm}^3; r_y = 12,29 \text{ cm}; r_t = \dots\dots\dots \text{ cm}; J = 63591,00 \text{ cm}^4; x_0 = y_0 = 0$$

11) Não existem forças transversais entre as extremidades das barras nos planos de flambagem;

12) Planos perpendiculares entre si (pórticos parciais) e respectivos diagramas de momentos fletores de primeira ordem (DMF).



Plano do pórtico = Plano A-A

Plano perpendicular ao do pórtico = Plano B-B