

# ESTRUTURAS EM AÇO

## 10 – Barras submetidas a momento fletor

(ABNT NBR 8800:2024)

## ABNT NBR 8800:2008

### 5.4 Barras prismáticas submetidas a momento fletor e força cortante

No dimensionamento, devem ser atendidas as seguintes condições:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \qquad V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

ou as taxas de utilização da barra:

$$\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1,0 \qquad \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

onde:

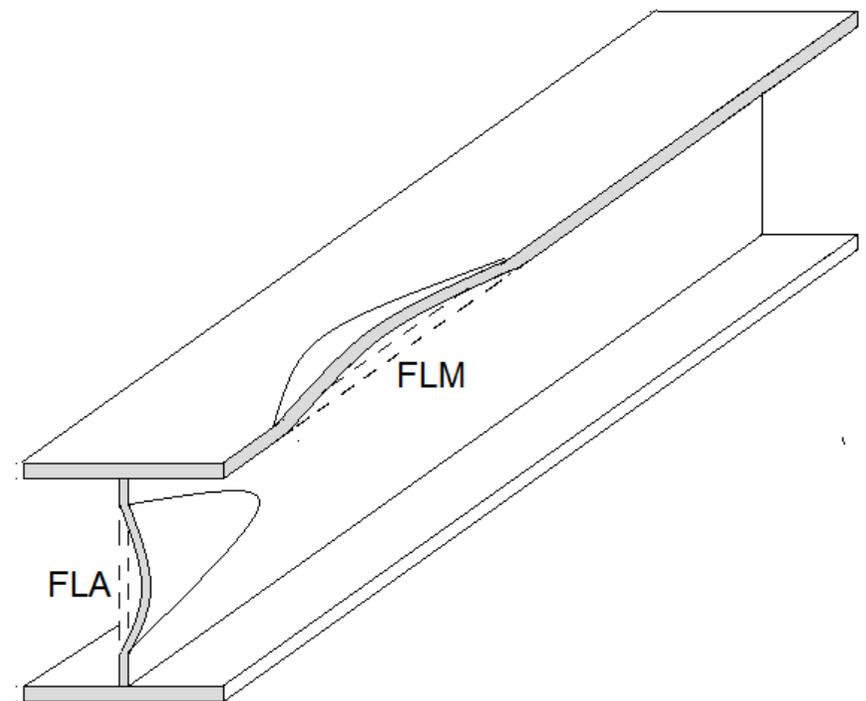
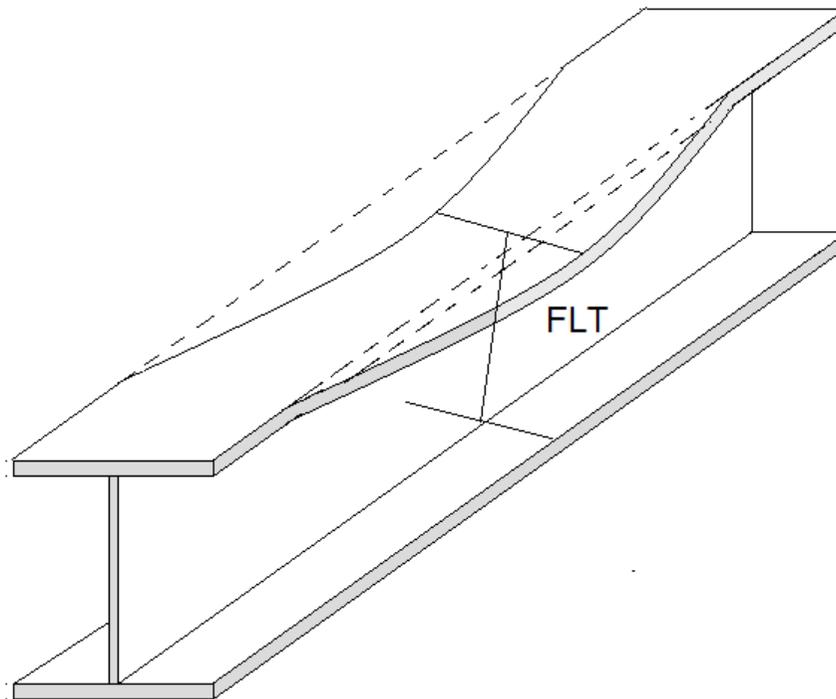
$M_{Sd}$  é o momento fletor solicitante de cálculo;  
 $V_{Sd}$  é a força cortante solicitante de cálculo;  
 $M_{Rd}$  é o momento fletor resistente de cálculo;  
 $V_{Rd}$  é a força cortante resistente de cálculo.



## 5.4.2 Momento fletor resistente de cálculo

Devem ser considerados os seguintes estados-limites últimos:

- Flambagem lateral com torção (FLT);
- Flambagem local da mesa comprimida (FLM);
- Flambagem local da alma (FLA).



**5.4.2.2** - O momento fletor resistente de cálculo não pode ser maior que:

$$M_{Rd} \leq \frac{1,5 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

**5.4.2.3** - Para determinação do estado-limite FLT, pode ser necessário calcular um fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme ( $C_b$ ), para o comprimento destravado ( $L_b$ ) analisado.

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

onde:

$M_{\max}$  é o valor do momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado;

$M_A$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado ( $1/4 \cdot L_b$ ), medido a partir da extremidade da esquerda;



$M_B$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado ( $1/2 \cdot L_b$ );

$M_C$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado ( $3/4 \cdot L_b$ ), medido a partir da extremidade da esquerda;

$R_m$  é um parâmetro de monossimetria da seção transversal, igual a:

1,0      seções duplamente simétricas;  
          seções I com um eixo de simetria, fletidas em relação ao eixo que não é de simetria, submetidas à curvatura simples;  
          seções U, fletidas em relação ao eixo de simetria;

$0,5 + 2 \left( \frac{I_{ym}}{I_y} \right)^2$       para seções I com um eixo de simetria, fletidas em relação ao eixo que não é de simetria, submetidas à curvatura reversa;



$I_{y,m}$  é o momento de inércia, em relação ao eixo de simetria, da mesa de menor momento de inércia;

$I_y$  é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo de simetria.

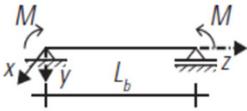
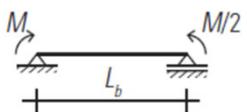
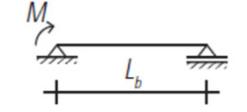
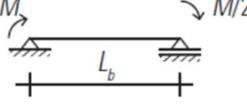
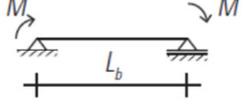
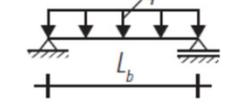
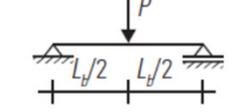
- em balanços em que o empenamento for impedido no apoio e a extremidade livre não for impedida de se deslocar lateralmente e de girar em torno de seu eixo longitudinal:

$$C_b = 1,0$$

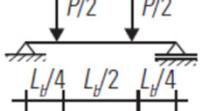
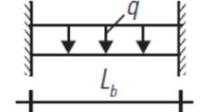
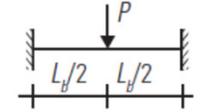
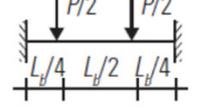
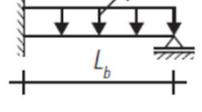
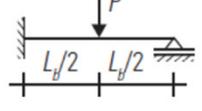
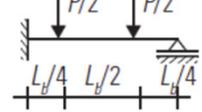
- nas demais situações, caso o carregamento seja aplicado na semialtura da seção transversal, para todas as seções duplamente simétricas e para seções I com um eixo de simetria, submetidas à curvatura simples e fletidas em relação ao eixo que não é de simetria:

$$C_b = 1,0$$



Carregamento e condições de contorno	Forma do diagrama de momento fletor	$C_b$
		1,00
		1,35
		1,67
		2,17
		2,27
		1,14
		1,32

Fonte: FAKURY, CASTRO E SILVA e CALDAS (2016).

Carregamento e condições de contorno	Forma do diagrama de momento fletor	$C_b$
		1,00
		2,38
		1,92
		2,14
		2,08
		1,71
		1,95

Prof. Dr. Rodrigo Bordignon



## ABNT NBR 8800:2024 - ANEXO D

### Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta

Vigas de alma não-esbelta são aquelas constituídas por:

➤ Seções I, H, U, caixão e tubos retangulares, cujas almas têm parâmetro de esbeltez  $\lambda \leq \lambda_r$  (definidos na Tabela G.1 para o estado-limite FLA);

➤ Seções tubulares circulares com relação:  $\frac{D}{t} \geq 0,45 \frac{E}{f_y}$

➤ Seções T;

➤ Seções formadas por duas cantoneiras em T;

➤ Seções sólidas circulares ou retangulares.



## Momento fletor resistente de cálculo para o estado-limite FLT:

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \rightarrow M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right]$$

$$\lambda > \lambda_r \rightarrow M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y$$



## Momento fletor resistente de cálculo para os estados-limites FLM e FLA:

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \rightarrow M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right]$$

$$\lambda > \lambda_r \rightarrow M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{FLA} - \text{Ver anexo E})$$



**Tabela D.1 – Parâmetros referentes ao momento fletor resistente**

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limite aplicáveis	$M_r$	$M_{cr}$ Ver D.2.8-k)	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver D.2.8-e)	Ver D.2.8-a)	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver D.2.8-a)
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver D.2.8-e)	Ver D.2.8-f)	$\frac{b/t}{\text{Ver D.2.8-h)}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver D.2.8-f)
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo E)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver D.2.8-i) e D.2.8-j))	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_c$ $\leq f_y W_t$ Ver D.2.8-e)	Ver D.2.8-b)	$\frac{L_b}{r_{yTc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver D.2.8-b)
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_c$ Ver D.2.8-e)	Ver D.2.8-f)	$\frac{b/t}{\text{Ver D.2.8-h)}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver D.2.8-f)
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo E)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pl}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$



Seções I e H e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver D.2.8-c)	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver D.2.8-e)	Ver D.2.8-f)	$b/t$ Ver D.2.8-h)	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver D.2.8-f)
	FLA Ver D.2.8-c)	$f_y W_{ef}$ Ver D.2.8-d)	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver D.2.8-d)	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções-caixão e tubulares retangulares duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados	FLT Ver D.2.8-g)	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver D.2.8-e)	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{\lambda}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$0,13E \frac{\sqrt{JA}}{M_{pl}}$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$
	FLM	Ver D.2.7				
	FLA	Ver D.2.7				
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{\lambda}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$0,13E \frac{\sqrt{JA}}{M_{pl}}$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$



**D.2.8** Os critérios relacionados à Tabela D.1 são indicados a seguir:

a)

$$\lambda_r = \frac{1,38C_b\sqrt{I_yJ}}{r_yJ\beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w\beta_1^2}{C_b^2I_y}}}$$
$$M_{cr} = \frac{C_b\pi^2EI_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039\frac{JL_b^2}{C_w}\right)}$$

onde

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{EJ}$$

$$C_w = \frac{I_y(d - t_f)^2}{4}, \text{ para seções I}$$

$$C_w = \frac{t_f(b_f - 0,5t_w)^3(d - t_f)^2}{12} \left[ \frac{3(b_f - 0,5t_w)t_f + 2(d - t_f)t_w}{6(b_f - 0,5t_w)t_f + (d - t_f)t_w} \right], \text{ para seções U}$$



$$b) \quad \lambda_r = \frac{1,38C_b\sqrt{I_yJ}}{r_{yTc}J\beta_1} \sqrt{\beta_2 + \sqrt{\beta_2^2 + \frac{27C_w\beta_1^2}{C_b^2I_y}}}$$

$$M_{cr} = \frac{C_b\pi^2EI_y}{L_b^2} \left[ \beta_3 + \sqrt{\beta_3^2 + \frac{C_w}{I_y} \left( 1 + 0,039\frac{JL_b^2}{C_w} \right)} \right]$$

onde

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W_c}{EJ} \leq \frac{f_yW_t}{EJ}$$

$$\beta_2 = \frac{5,2\beta_1\beta_3}{C_b} + 1$$

$$\beta_3 = 0,45 \left( d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right) (2\alpha_y - 1)$$

$$C_w = \frac{1}{12} \left( d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right)^2 \left( \frac{t_{fi}b_{fi}^3t_{fs}b_{fs}^3}{t_{fi}b_{fi}^3 + t_{fs}b_{fs}^3} \right)$$

sendo  $\alpha_y$  determinado conforme D.2.8-i).



- c) O estado-limite FLA aplica-se somente à alma da seção U, quando comprimida pelo momento fletor. Para seção U, o estado-limite FLM aplica-se somente quando a extremidade livre das mesas for comprimida pelo momento fletor;
- d)  $W_{ef}$  é o módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tenha uma mesa comprimida (ou alma comprimida, no caso de perfil U fletido em relação ao eixo de menor inércia) de largura igual a  $b_{ef}$ , obtida em 5.3.4.2, considerando  $\chi$  igual a 1,0. Em alma comprimida de seção U fletida em relação ao eixo de menor momento de inércia,  $b = h$ ,  $t = t_w$  e  $b_{ef} = h_{ef}$ ;
- e) A tensão residual de compressão nas mesas,  $\sigma_r$ , deve ser considerada igual a 30 % da resistência ao escoamento do aço utilizado;
- f) Para perfis laminados:

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c, \quad \lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}}$$

Para perfis soldados:

$$M_{cr} = \frac{0,90Ek_c}{\lambda^2} W_c, \quad \lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}}$$

com  $k_c$  conforme Tabela 4, nota de rodapé a.



- g) O estado-limite FLT somente é aplicável quando o eixo de flexão for o de maior momento de inércia;
- h)  $b/t$  é a relação entre largura e espessura aplicável à mesa do perfil; no caso de seções I e H com um eixo de simetria,  $b/t$  refere-se à mesa comprimida (para mesas de seções I e H,  $b$  é a metade da largura total; para mesas de seções U, a largura total; para seções tubulares retangulares, a largura da parte plana; para seções-caixão, a distância livre entre almas);
- i) Para essas seções, devem ser atendidas as seguintes limitações:

$0,1 \leq \alpha_y \leq 0,9$  e a soma das áreas da menor mesa e da alma deve ser superior à área da maior mesa;

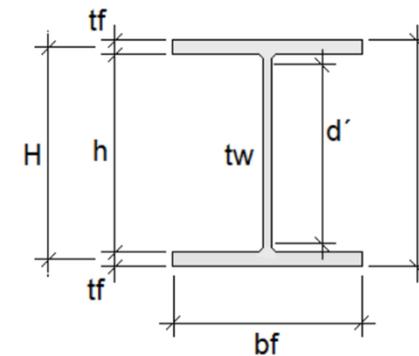
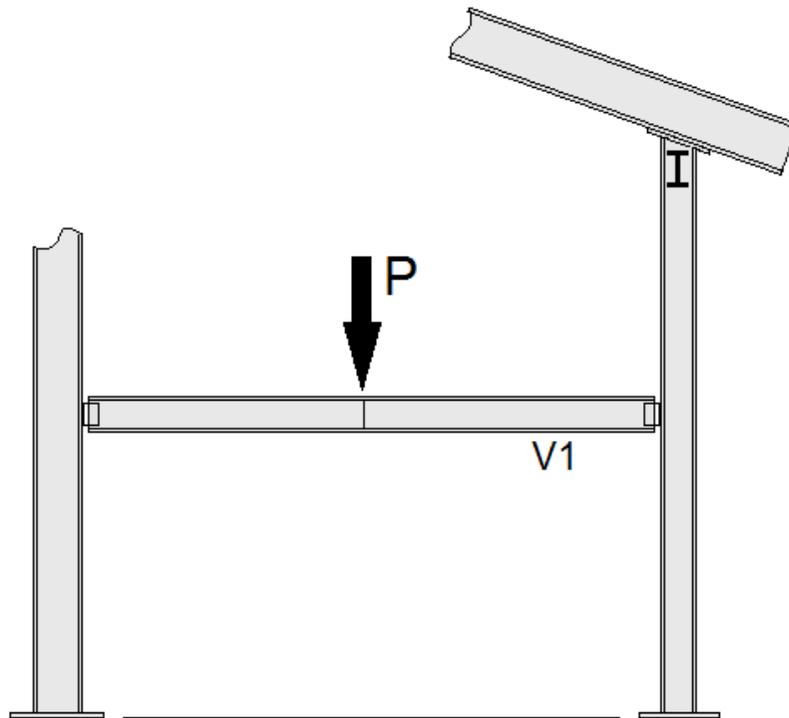
onde

$$\alpha_y = \frac{I_{yTc}}{I_y}$$

- j) Se houver inversão de momentos no comprimento destravado (curvatura reversa), a verificação deve ser feita para as duas mesas (cada mesa possui um momento fletor resistente de cálculo, que deve ser igual ou superior ao máximo momento solicitante de cálculo que causa compressão nessa mesa). Nos demais casos, o momento fletor resistente de cálculo é constante ao longo do comprimento destravado e deve ser igual ou superior ao máximo momento solicitante de cálculo (positivo ou negativo) nesse comprimento.
- k) Alternativamente,  $M_{cr}$  pode ser obtido por análise de estabilidade elástica.



**Exemplo - 10.1:** A viga V1 (W 310x44,5) possui 5,0 metros de vão teórico e é usada unicamente para apoio de um equipamento fixo de 70 kN ( $F_{Q,k}$ ), que admite um deslocamento vertical máximo de 8 mm para seu funcionamento. Desconsiderando o peso próprio da viga, verificar a capacidade resistente ao ELU ( $V_{Rd}$ ,  $M_{Rd}$ ) e ao ELS.



W 310x44,5  
 $A_g = 57,2\text{cm}^2$   
 $m = 44,5\text{kg/m}$   
 $d = 313\text{mm}$   
 $b_f = 166\text{mm}$   
 $t_w = 6,6\text{mm}$   
 $t_f = 11,2\text{mm}$   
 $h = 291\text{mm}$   
 $d' = 271\text{mm}$   
 $I_x = 9997\text{cm}^4$   
 $W_x = 633,8\text{cm}^3$   
 $r_x = 13,22\text{cm}$   
 $Z_x = 712,8\text{cm}^3$   
 $I_y = 855\text{cm}^4$   
 $W_y = 103\text{cm}^3$   
 $r_y = 3,87\text{cm}$   
 $Z_y = 158,0\text{cm}^3$   
 $C_w = 194433\text{cm}^6$   
 $I_t = 19,9\text{cm}^4$

## 1 - Combinação última normal (ELU):

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k})$$

$$F_d = \gamma_{q1} F_{Q1,k} = 1,5(70) = 105 \text{ kN}$$

$$V_{S,d} = P/2 = 105/2 = 52,50 \text{ kN}$$

$$M_{S,d} = P \cdot L/4 = 105 \cdot 5/4 = 131,25 \text{ kNm}$$



## 2 - Força cortante resistente de cálculo:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{d'}{t_w} = \frac{271}{6,6} = 41,06$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{5,34 \cdot 200 \cdot 10^3}{345}} = 61,20$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 0,6(313 \cdot 6,6)345 = 427620 \text{ N}$$

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{427620}{1,1} = 388746 \text{ N}$$

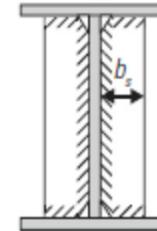
Taxa de utilização do perfil à força cortante:  $\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} = \frac{52500 \text{ N}}{388746 \text{ N}} = 0,135$



## 2.1 - Enrijecedores na seção com carga concentrada:

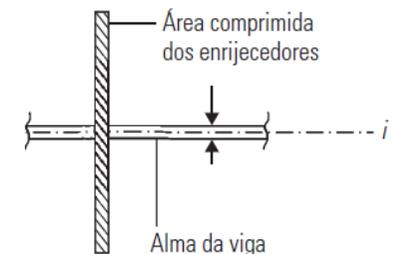
$$b_s \geq \frac{b_f}{3} - \frac{t_w}{2} \rightarrow b_s \geq \frac{166}{3} - \frac{6,6}{2} \rightarrow b_s \geq 52,03 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{b_s = 65 \text{ mm}}$$

$$t_s \geq \begin{cases} \frac{t_f}{2} = \frac{11,2}{2} = 5,6 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{t_s = 6,35 \text{ mm}} \\ \frac{b_s}{0,56 \sqrt{\frac{E_a}{f_{y,s}}}} = \frac{65}{0,56 \sqrt{\frac{200 \cdot 10^3}{345}}} = 4,82 \text{ mm} \end{cases}$$



$$A_g = 6,35(65 + 6,6 + 65) = 867,41 \text{ mm}^2$$

$$I_s = \frac{6,35(65 + 6,6 + 65)^3}{12} = 1348790 \text{ mm}^4$$



$$N_e \cong \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_s}{h^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 1348790}{(291)^2} = 10007791 \text{ N}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_s}{N_e}} = \sqrt{\frac{867,41 \cdot 345}{10007791}} = 0,173$$

$$\lambda_0 = 0,173 \rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \rightarrow \chi = 0,988$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,988 \cdot 867,41 \cdot 345}{1,1} = 268667 \text{ N} = 268,67 \text{ kN}$$

268,67 kN > 105 kN → enrijecedores OK para o ponto de aplicação da carga.



### 3 - Momento resistente de cálculo

#### 3.1 - Flambagem Lateral com Torção - FLT

Parâmetro de esbeltez (Tabela D.1):

$$\lambda_{FLT} = \frac{L_b}{r_y} = \frac{5000 \text{ mm}}{38,7 \text{ mm}} = 129,20$$

Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação (Tabela G1):

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{200 \cdot 10^3}{345}} = 42,38$$

Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (Tabela G1):

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot C_b \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{C_b^2 \cdot I_y}}}$$

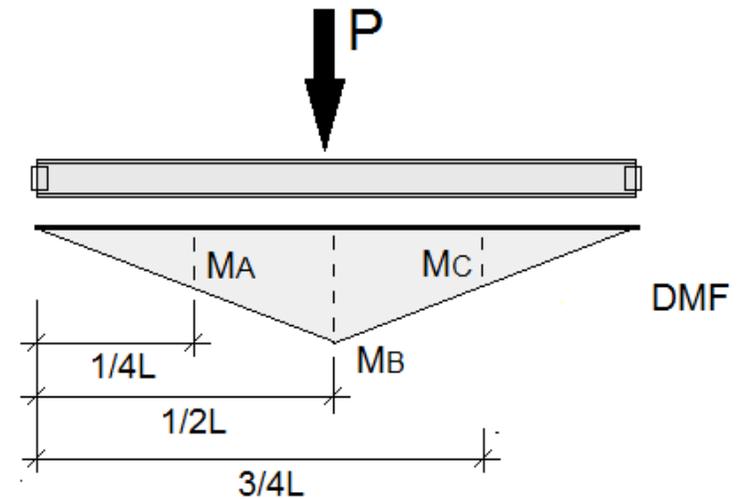


$$C_b = \frac{12,5M_{\max}}{2,5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m$$

$$M_B = M_{\max} = \frac{PL}{4} = \frac{105 \text{ kN} \cdot 5\text{m}}{4} = 131,25 \text{ kNm}$$

$$M_A = M_C = 65,625 \text{ kNm}$$

$$C_b = \frac{12,5(131,25)}{2,5(131,25) + 3(65,625) + 4(131,25) + 3(65,625)} 1,0 = 1,32$$



$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W_x}{E \cdot J} = \frac{(345 - 0,3 \cdot 345)(638,8 \cdot 10^3)}{(200 \cdot 10^3)(19,9 \cdot 10^4)} = 0,00388$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot 1,32 \sqrt{(855 \cdot 10^4)(19,9 \cdot 10^4)}}{38,7 \cdot (19,9 \cdot 10^4) \cdot 0,00388} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot (194433 \cdot 10^6) \cdot 0,00388^2}{(1,32 \cdot 855 \cdot 10^4)}}} = 123,47$$

$$\begin{cases} \lambda_{FLT} = 129,2 \\ \lambda_p = 42,38 \\ \lambda_r = 155,60 \end{cases}$$

$$\lambda_{FLT} > \lambda_r \rightarrow M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}$$

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



$$M_{cr} = \frac{1,32 \cdot \pi^2 \cdot (200 \cdot 10^3)(855 \cdot 10^4)}{5000^2} \sqrt{\frac{(194433 \cdot 10^6)}{(855 \cdot 10^4)} \left(1 + 0,039 \frac{(19,9 \cdot 10^4) \cdot 5000^2}{194433 \cdot 10^6}\right)}$$

$$M_{cr} = 189941016 \text{ Nmm} = 189,94 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} = \frac{189,94}{1,1} = 172,67$$

$$M_{Rd,FLT} = 172,67 \text{ kNm}$$



## 3.2 - Flambagem Local da Mesa Comprimida FLM

Parâmetro de esbeltez (Tabela D.1):

$$\lambda_{FLM} = \frac{b}{t} = \frac{b_f/2}{t} = \frac{166/2}{11,2} = 7,41$$

Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação (Tabela D.1):

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{200 \cdot 10^3}{345}} = 9,15$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por (D.2.2):

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = (712,8 \cdot 10^3)345 = 245916000 \text{ Nmm} = 245,91 \text{ kNm}$$

$$\lambda_{FLM} < \lambda_p \rightarrow M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{245,91 \text{ kNm}}{1,1} = 223,55 \text{ kNm}$$

### 3.3 - Flambagem Local da Alma FLA

Parâmetro de esbeltez (Tabela G1):

$$\lambda_{FLA} = \frac{h}{t_w} = \frac{d'}{t_w} = \frac{271 \text{ mm}}{6,6 \text{ mm}} = 41,06$$

Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação (Tabela G1):

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{200 \cdot 10^3}{345}} = 90,53$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por (G.2.2):

$$\lambda_{FLA} < \lambda_p \rightarrow M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{245,91 \text{ kNm}}{1,1} = 223,55 \text{ kNm}$$



**Momento resistente de cálculo:** é o menor dos momentos fletores resistentes calculados para os estados limites últimos de FLT, FLM e FLA:

$$M_{Rd} = \text{menor}(M_{FLT}; M_{FLM}; M_{FLA})$$

$$M_{Rd} = (172,67 \text{ kNm}; 223,55 \text{ kNm}; 223,55 \text{ kNm})$$

$$M_{Rd} = 172,67 \text{ kNm} \leq \frac{1,5 \cdot W_x \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{1,5(633,8 \cdot 10^3)345}{1,1} = 298174091 \text{ Nmm} = 298,17 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 172,67 \text{ kNm}$$

Taxa de utilização do perfil ao momento fletor:  $\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} = \frac{131,25 \text{ kNm}}{172,67 \text{ kNm}} = 0,76$



## 4 - Estado Limite de Serviço (ELS)

### Combinação frequente de serviço:

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k})$$

$$F_{d,ser} = 0,6 (70 \text{ kN}) = 42 \text{ kN}$$

$$\delta_{eq} = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{42 \text{ kN}(5000 \text{ mm})^3}{48(200 \text{ kN/mm}^2)(9997 \cdot 10^4 \text{ mm}^4)} = 5,47 \text{ mm}$$

$$\delta_{lim} = 8,0 \text{ mm}$$

$$\frac{\delta_{eq}}{\delta_{lim}} = \frac{5,47 \text{ mm}}{8,0 \text{ mm}} = 0,68$$



- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-16**: Specification for Structural Steel Buildings. Chicago: AISC, 2016.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Steel Construction Manual**, 15 ed. Chicago: AISC, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5884**: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.
- BAIÃO F. O. T.; SILVA, A. C. V.; QUEIROZ, G.. **Ligações para Estruturas de Aço** – Guia Prático para Estruturas com Perfis Laminados. 3 ed. São Paulo: Gerdau Açominas, 2006.
- BORDIGNON, R. **Modelo momento-rotação de ligações parafusadas entre viga e coluna em aço com dupla cantoneira de alma**. 2022. 212 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022.
- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Manual de Construção em Aço**: Galpões para usos gerais. 4 ed. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010.
- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Manual de Construção em Aço**: Ligações em estruturas metálicas. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2017.
- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Manual de Construção em Aço**: Uso fácil: ABNT NBR 8800. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2022.
- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Manual de Construção em Aço**: Transporte e montagem. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2005.
- CHAMBERLAIN PRAVIA, Z. M.; FICANHA R.; FABEANE R. **Projeto e cálculo de estruturas de aço**: Edifício industrial detalhado. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson, 2016.
- FISHER, J. M.; KLOIBER, L. A. **Steel Design Guide 1**: Base plate and anchor rod design. 2 ed. Ed. Chicago: AISC, 2006.
- LEET, K. M.; UANG, C.; e GILBERT, A. M **Fundamentos da análise estrutural**. Porto Alegre: AMGH, 2010.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático de acordo com a NBR8800:2008. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- RCSC. **Specification for structural joints using high strength bolts**. Research Council on Structural Connections, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2020.





EDUCAÇÃO  
PÚBLICA  
**100%**  
GRATUITA

# MUITO OBRIGADO

Prof. Rodrigo Bordignon  
Engenheiro Civil, Dr.

*[www.ifsul.edu.br](http://www.ifsul.edu.br)  
[rodrigobordignon@ifsul.edu.br](mailto:rodrigobordignon@ifsul.edu.br)*