

Resistência de Barras Flexionadas

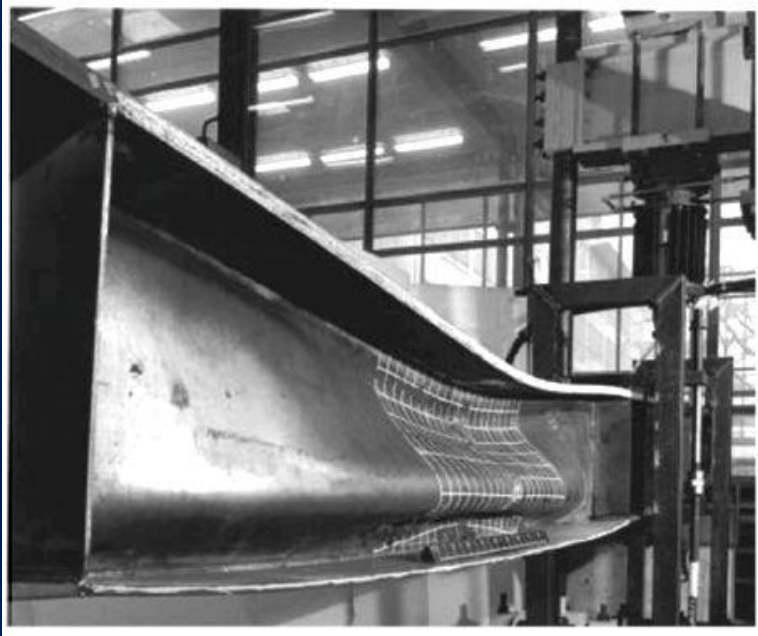


Tabela B.1 – Deslocamentos máximos

Descrição	δ^a
Travessas de fechamento	$L/250^b$
Terças de cobertura ^d	$L/250^c$
Vigas de cobertura ^d	$L/250$
Vigas de piso	$L/350^e$
Vigas que suportam pilares	$L/500^e$
Pilares de fechamento em relação a base	$H/250$
Pilares de fechamento entre os apoios	$L/250$
Vigas de rolamento (para pontes rolantes classificadas conforme o regime de trabalho) ^j :	
— Deslocamento vertical:	$L/750^f$
— Leve ou de uso eventual e moderado	$L/1000^f$
— Pesado	$L/1250^f$
— Severo	$L/500$
— Deslocamento horizontal	$L/750$
— Todos os regimes de trabalho, exceto o severo	
— Severo	
Galpões em geral e edificações de um pavimento:	
— Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/300$
— Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	$H/500^g, h$
Edificações de dois ou mais pavimentos:	
— Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400$
— Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$h/500^i$
Lajes mistas	Ver Anexo N

^a L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, H é a altura total do pilar (distância do topo à base) ou a distância do nível da viga de rolamento à base, h é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre centros das vigas e a base no caso do primeiro andar).

^b Considerar separadamente o deslocamento paralelo ao plano do fechamento (L é o vão da travessa ou o espaçamento entre linhas de tirantes, caso existam) e o perpendicular ao plano do fechamento.

^c Considerar separadamente o deslocamento paralelo ao plano da cobertura (L é o vão da terça ou o espaçamento entre linha de tirantes, caso existam) e o perpendicular ao plano da cobertura.

^d Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade.

^e Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não pode exceder 15 mm.

^f Carregamento não majorado pelo coeficiente de impacto vertical.

^g No caso de pontes rolantes com regime de trabalho severo, o deslocamento também não pode ser superior a 40 mm.

^h O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm.

ⁱ Considerar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes (verticais e horizontais) no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.

^j Conforme a NBR 8681:2003, Tabela 7.

Estabilidade Inelástica e Plastificação

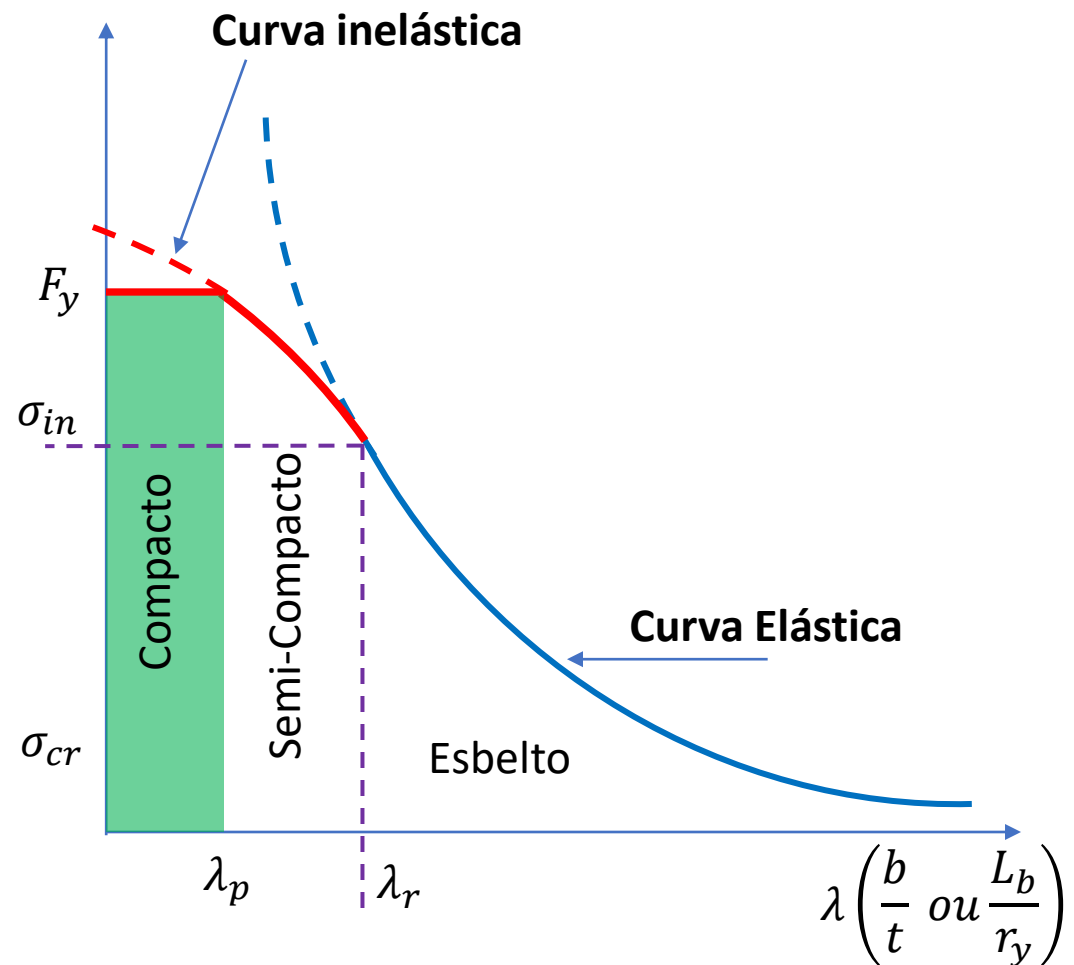


Tabela D.1 – Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limite aplicáveis	M_r	M_{cr} Ver D.2.8-k)	λ	λ_p	λ_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)	b/t 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)	b/t 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	$f_y W$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{\lambda}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$0,13E \frac{\sqrt{JA}}{M_{pl}}$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$

Para FLM e FLA

para $\lambda < \lambda_p$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \qquad M_{pl} = Z \cdot F_y$$

para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$$M_{rd} = \frac{M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}}{1,1}$$

para $\lambda > \lambda_r$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1}$$

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)	λ	λ_p	λ_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)	b/t 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)	b/t 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)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{p\ell}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
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)	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{\lambda}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$0,13E \frac{\sqrt{JA}}{M_{p\ell}}$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$
	FLM	Ver D.2.7				
	FLA	Ver D.2.7				
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{\lambda}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$0,13E \frac{\sqrt{JA}}{M_{p\ell}}$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$

Para FLT

para $\lambda < \lambda_p$

$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1}$ $M_{pl} = Z \cdot F_y$

para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$M_{rd} = \frac{M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}}{1,1}$

para $\lambda > \lambda_r$

$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1}$

Alternativamente

$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{cr}}}$

$\lambda_{LT} \leq 0,4:$ $\chi_{FLT} = 1,0$

$0,4 < \lambda_{LT} \leq 1,4:$ $\chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(\lambda_{LT} - 0,4)$

$\lambda_{LT} > 1,4:$ $\chi_{FLT} = \frac{1,0}{\lambda_{LT}^2}$

$M_{rd} = \frac{\chi_{FLT} \cdot M_{pl}}{1,1}$

D.2.3 Para as seções T:

— estado-limite FLA (aplicável apenas quando a extremidade livre da alma estiver comprimida):

$$M_{Rd} = \frac{f_y W_x}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_y$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(1,43 - 0,515\lambda \sqrt{\frac{f_y}{E}} \right) f_y W_x, \text{ para } \lambda_y < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{cr}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

$$M_{cr} = \frac{1,52 E W_x}{\lambda^2}$$

onde

$$\lambda = \frac{d}{t_w}$$

$$\lambda_y = 0,84 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 1,52 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

d é a altura total e t_w é a espessura da alma do perfil T.

— estado-limite FLM (aplicável apenas se a mesa estiver total ou parcialmente comprimida):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{p\ell}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{p\ell} - (M_{p\ell} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{cr}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) W_{xc} \leq f_y W_{xt} - \text{ver D.2.8-e);}$$

$$M_{cr} = \frac{0,7 E W_{xc}}{\lambda^2}$$

onde

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f}$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}}$$

D.2.3 Para as seções T:

— estado-limite FLT, aplicável quando a extremidade livre da alma estiver tracionada:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{p\ell}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{p\ell} - (M_{p\ell} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{cr}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

$$M_r = f_y W_x$$

$$M_{cr} = \frac{1,95E}{L_b} \sqrt{I_y J} \left(B + \sqrt{1 + B^2} \right)$$

$$B = 2,3 \frac{d}{L_b} \sqrt{\frac{I_y}{J}}$$

onde

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y}$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = \frac{1,95E}{r_y f_y} \frac{\sqrt{I_y J}}{W_x} \sqrt{2,36 \frac{f_y d W_x}{E J} + 1}$$

— estado-limite FLT, aplicável quando a extremidade livre da alma estiver comprimida:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{cr} \leq \frac{1}{\gamma_{a1}} f_y W_x$$

$$M_{cr} = \frac{1,95E}{L_b} \sqrt{I_y J} \left(-B + \sqrt{1 + B^2} \right)$$

D.2.4 Para as seções formadas por duas cantoneiras em T, fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma:

— estado-limite FLA (aplicável apenas quando a extremidade livre da alma estiver comprimida):

$$M_{Rd} = 1,5 \frac{f_y W_x}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_y$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(2,43 - 1,72 \lambda \sqrt{\frac{f_y}{E}} \right) f_y W_x, \text{ para } \lambda_y < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{cr}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

$$M_{cr} = \frac{0,7 E W_x}{\lambda^2}$$

onde

$$\lambda = \frac{b}{t}$$

$$\lambda_y = 0,54 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

— estado-limite FLM (aplicável apenas se a mesa estiver total ou parcialmente comprimida):

$$M_{Rd} = 1,5 \frac{f_y W_{xc}}{\gamma_{a1}} \leq 1,5 \frac{f_y W_x}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_y$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(2,43 - 1,72 \lambda \sqrt{\frac{f_y}{E}} \right) f_y W_{xc} \leq 1,5 \frac{f_y W_x}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_y < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{cr}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

$$M_{cr} = \frac{1}{\lambda^2} 0,7 E W_{xc}$$

onde

$$\lambda = \frac{b}{t}$$

$$\lambda_y = 0,54 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

D.2.4 Para as seções formadas por duas cantoneiras em T, fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma:

— estado-limite FLT, aplicável quando a extremidade livre da alma estiver tracionada:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{pe}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

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

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{cr}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

$$M_r = f_y W_x$$

$$M_{cr} = \frac{1,95E}{L_b} \sqrt{I_y J} (B + \sqrt{1 + B^2})$$

$$B = 2,3 \frac{b}{L_b} \sqrt{\frac{I_y}{J}}$$

onde

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y}$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = \frac{1,95E}{r_y f_y} \frac{\sqrt{I_y J}}{W_x} \sqrt{2,36 \frac{f_y b W_x}{E J} + 1}$$

— estado-limite FLT, aplicável quando a extremidade livre da alma estiver comprimida:

$$M_{Rd} = \left(1,92 - 1,17 \sqrt{\frac{f_y W_x}{M_{cr}}} \right) \frac{f_y W_x}{\gamma_{a1}} \leq 1,5 \frac{f_y W_x}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \frac{f_y W_x}{M_{cr}} \leq 1,0$$

$$M_{Rd} = \left(0,92 - 0,17 \frac{M_{cr}}{f_y W_x} \right) \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \frac{f_y W_x}{M_{cr}} > 1,0$$

$$M_{cr} = \frac{1,95E}{L_b} \sqrt{I_y J} (-B + \sqrt{1 + B^2})$$

D.2.5 Para as seções sólidas circulares e retangulares, fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia:

$$M_{Rd} = \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}$$

D.2.6 Para as seções tubulares circulares, para o estado-limite de flambagem local da parede do tubo, o único aplicável, com D/t_d não superior a $0,45 E/f_y$, é calculado conforme a seguir:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{p\ell}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(\frac{0,021}{D/t} E + f_y \right) W, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{cr}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

$$M_{cr} = \frac{0,33E}{D/t} W$$

onde

$$\lambda = \frac{D}{t}$$

$$\lambda_p = \frac{0,07E}{f_y}$$

$$\lambda_r = \frac{0,31E}{f_y}$$

D.2.7 Para as seções tubulares retangulares e seções-caixão, duplamente simétricas, fletidas — em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados:

— estado-limite FLM:

$$M_{Rd} = \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{p\ell} - (M_{p\ell} - f_y W) \left(3,57 \lambda \sqrt{\frac{f_y}{E}} - 4,0 \right) \right], \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} f_y W_{ef}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

onde

$$\lambda = \frac{b}{t}$$

$$\lambda_p = 1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \text{ para seções tubulares retangulares}$$

$$\lambda_r = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \text{ para seções-caixão}$$

W_{ef} é o módulo de resistência elástico efetivo, obtido com b_{ef} , calculado conforme 5.3.4.2, utilizando λ_r como $(b/t)_{lim}$ e considerando χ igual a 1,0;

b e t são a largura e a espessura da mesa comprimida, respectivamente (ver a Tabela 4).

— estado-limite FLA:

$$M_{Rd} = \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{p\ell} - (M_{p\ell} - M_r) \left(0,305 \lambda \sqrt{\frac{f_y}{E}} - 0,738 \right) \right] \leq \frac{1}{\gamma_{a1}} M_{p\ell}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

M_{Rd} = ver o Anexo E, para $\lambda > \lambda_r$

$$M_r = f_y W$$

onde

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda_p = 2,42 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

h é a distância entre as faces internas das mesas, para seções-caixão, com a distância entre as faces internas das mesas subtraída dos dois raios de concordância entre a mesa e alma, para perfis tubulares retangulares, e t_w é a espessura da alma; para seções tubulares, t_w deve ser considerada igual a t .

— estado-limite FLT (ver a Tabela D.1).

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

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

b)

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

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

onde

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

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

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

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

sendo α_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 χ 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, σ_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:

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

com k_c conforme Tabela 4, nota de rodapé a.

a $k_c = 4/\sqrt{h/t_w}$, sendo $0,35 \leq k_c \leq 0,76$

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.

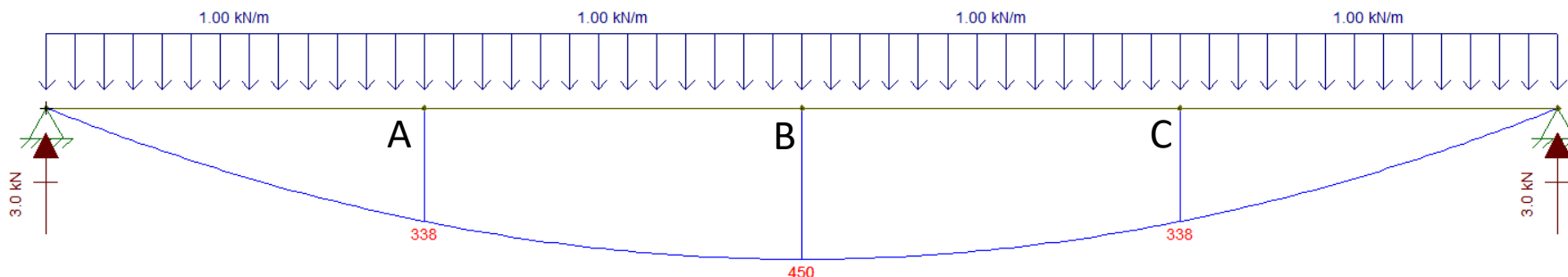
k) Alternativamente, M_{cr} pode ser obtido por análise de estabilidade elástica.

Cálculo de Cb

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

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, medido a partir da extremidade da esquerda;

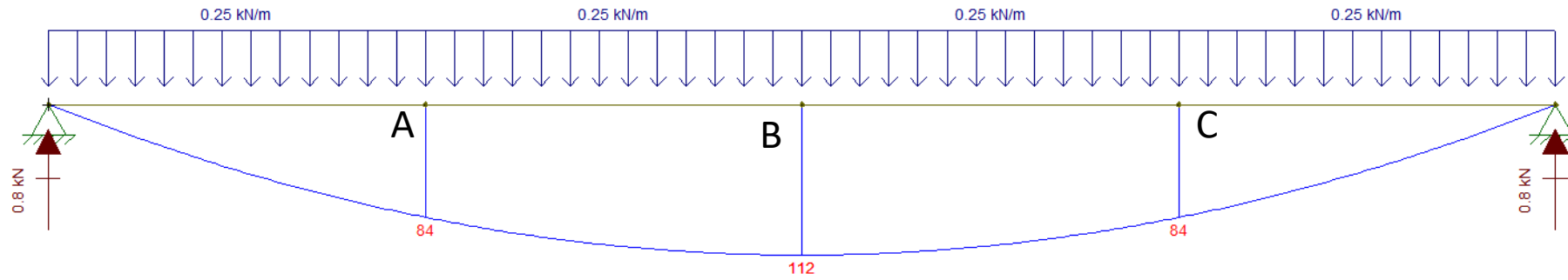
M_B é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado;

M_C é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

$$C_b = \frac{12,5 \cdot 450}{2,5 \cdot 450 + 3 \cdot 338 + 4 \cdot 450 + 3 \cdot 338} = 1,14$$

Cálculo de Cb

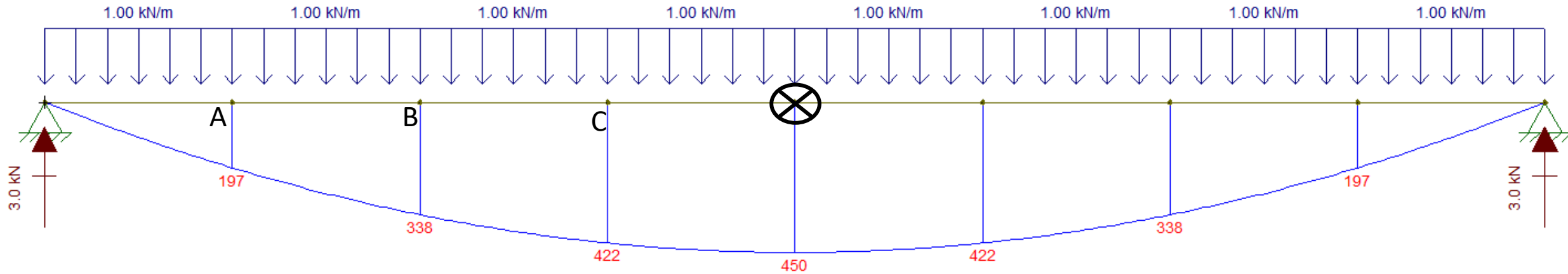
$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{Max}}{2,5 \cdot M_{Max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C}$$



$$C_b = \frac{12,5 \cdot 112}{2,5 \cdot 112 + 3 \cdot 84 + 4 \cdot 112 + 3 \cdot 84} = 1,14$$

Cálculo de Cb

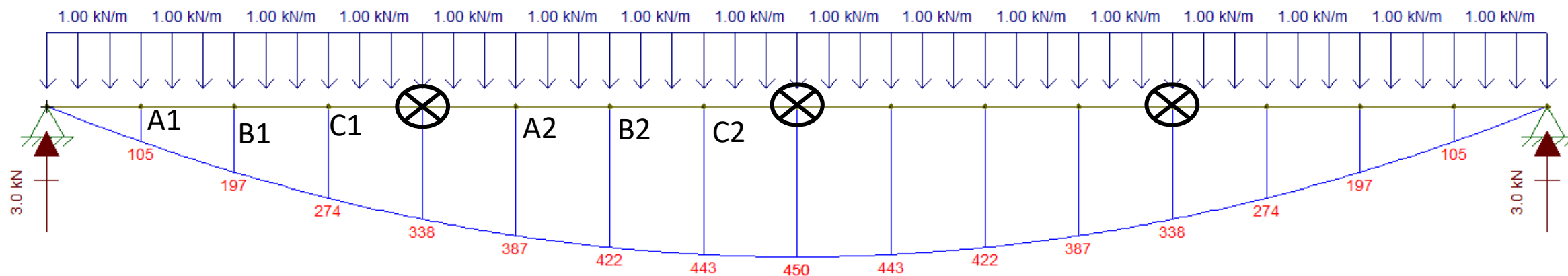
$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{Max}}{2,5 \cdot M_{Max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C}$$



$$C_b = \frac{12,5 \cdot 450}{2,5 \cdot 450 + 3 \cdot 197 + 4 \cdot 338 + 3 \cdot 422} = 1,30$$

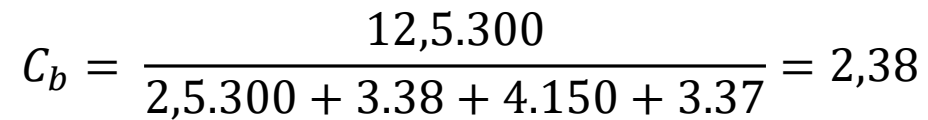
Cálculo de Cb

$$Cb = \frac{12,5 \cdot M_{Max}}{2,5 \cdot M_{Max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C}$$



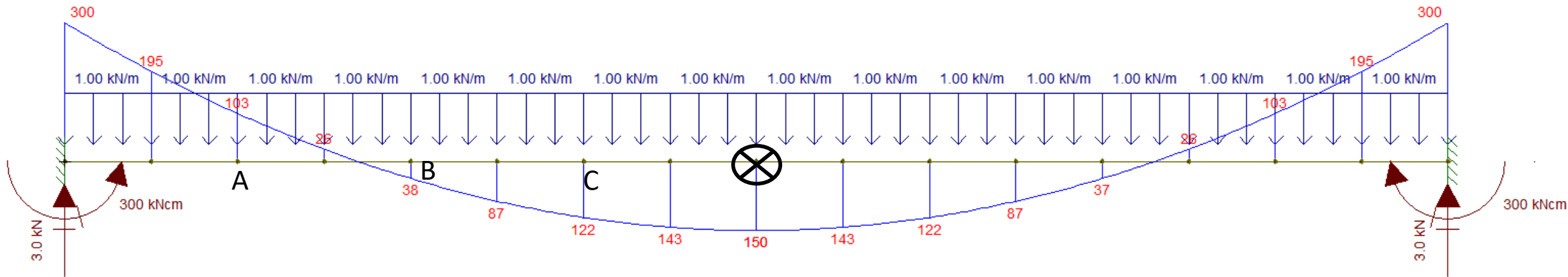
$$Cb_1 = \frac{12,5 \cdot 338}{2,5 \cdot 338 + 3 \cdot 105 + 4 \cdot 197 + 3 \cdot 274} = 1,52$$

$$Cb_2 = \frac{12,5 \cdot 450}{2,5 \cdot 450 + 3 \cdot 387 + 4 \cdot 422 + 3 \cdot 443} = 1,06$$

$$Cb = \frac{12,5. M_{Max}}{2,5. M_{Max} + 3. M_A + 4. M_B + 3. M_C}$$


Cálculo de Cb

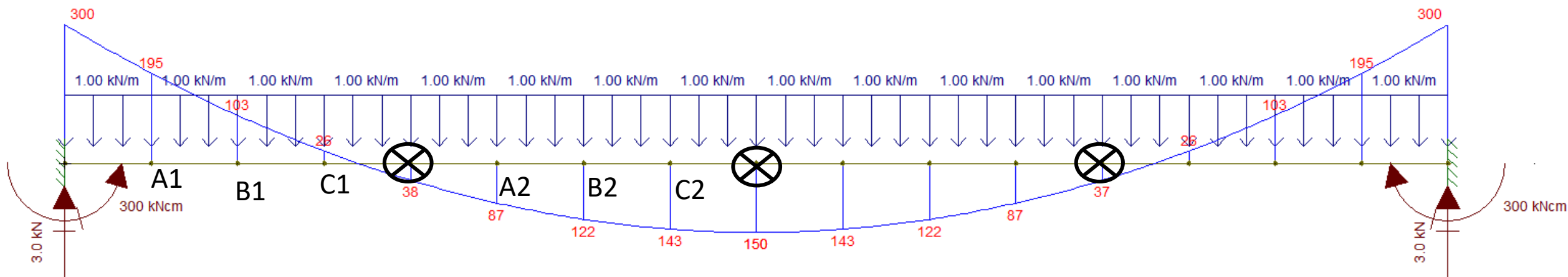
$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{Max}}{2,5 \cdot M_{Max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C}$$



$$C_b = \frac{12,5 \cdot 300}{2,5 \cdot 300 + 3 \cdot 103 + 4 \cdot 38 + 3 \cdot 122} = 2,38$$

Cálculo de Cb

$$Cb = \frac{12,5 \cdot M_{Max}}{2,5 \cdot M_{Max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C}$$



$$Cb_1 = \frac{12,5 \cdot 300}{2,5 \cdot 300 + 3 \cdot 195 + 4 \cdot 103 + 3 \cdot 26} = 2,05$$

$$Cb_2 = \frac{12,5 \cdot 150}{2,5 \cdot 150 + 3 \cdot 87 + 4 \cdot 122 + 3 \cdot 143} = 1,21$$

Casos especiais

Em caso de haver uma mesa com travamento contínuo, (Embutida em lajes, por exemplo) o procedimento a se adotar é:

- a) quando a mesa com contenção lateral contínua estiver tracionada em pelo menos uma extremidade do comprimento destravado e as forças transversais forem orientadas no sentido da mesa livre:

$$C_b = 3,00 - \frac{2 M_2}{3 M_1} - \frac{8}{3} \frac{M_{CL}}{(M_1 + M_2)}$$

onde

M_1 é o valor do maior momento fletor solicitante de cálculo que comprime a mesa livre nas extremidades do comprimento destravado, considerado com sinal negativo;

M_2 é o valor do momento fletor solicitante de cálculo na outra extremidade do comprimento destravado. Se esse momento comprimir a mesa livre, deve ser considerado com sinal negativo nos segundo e terceiro termos da equação. Se tracionar a mesa livre, deve ser considerado com sinal positivo no segundo termo da equação e igual a zero no terceiro termo;

M_{CL} é o momento fletor solicitante de cálculo na seção central do comprimento destravado, com sinal positivo se tracionar a mesa livre e sinal negativo se tracionar a mesa com contenção lateral contínua.

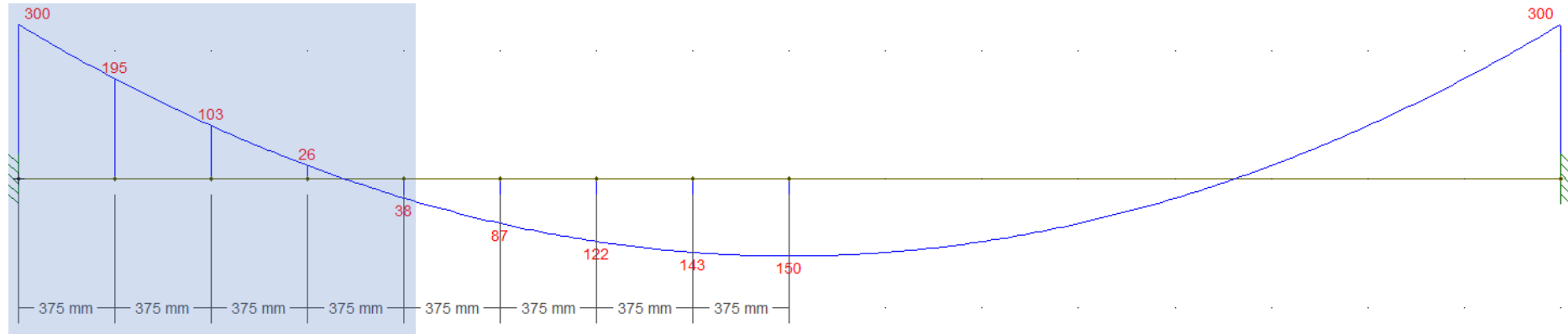
- b) em trechos com momento nulo nas extremidades ou com momento que tracione a mesa livre em uma ou nas duas extremidades, submetidos a força transversal uniformemente distribuída, aplicada na mesa com contenção lateral contínua, orientada no sentido oposto à mesa livre:

$$C_b = 2,0$$

- c) em todos os outros casos, desde que as forças transversais sejam aplicadas em qualquer posição entre a mesa com contenção lateral contínua e a semialtura da seção orientadas no sentido oposto à mesa livre::

$$C_b = 1,0$$

Cálculo de Cb




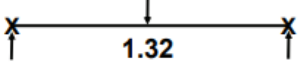
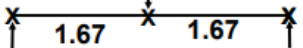
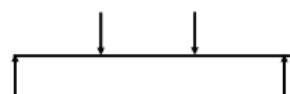
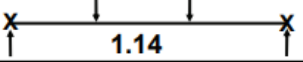
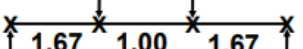
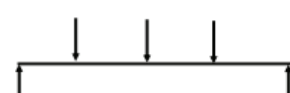
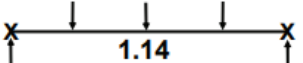
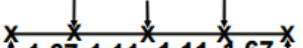


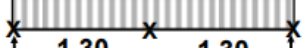
$$C_b = 3,00 - \frac{2M_2}{3M_1} - \frac{8 \cdot M_{cl}}{3(M_1 + M_2)}$$

$$C_b = 3,00 - \frac{2 \cdot 38}{3 \cdot (-300)} - \frac{8 \cdot (-103)}{3(-300 + 0)} = 2,17$$

TABELAS Cb

AISC Table 3-1. Values of C_b

For simply supported beams

Load	Lateral Bracing Along Span	C_b	L_b
	None		L
	At Load Points		L/2
	None		L
	At Load Points		L/3
	None		L
	At Load Points		L/4
	None		L
	At Centerline		L/2



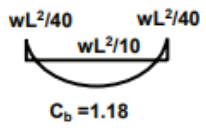
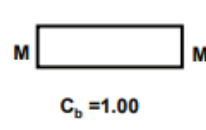
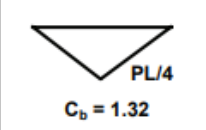
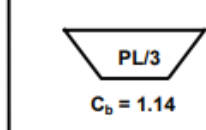
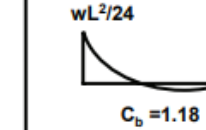
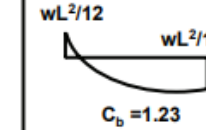
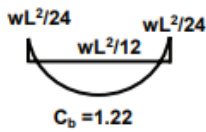
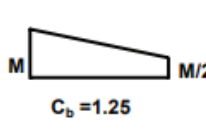
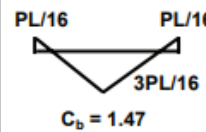
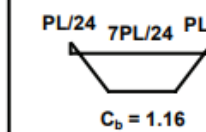
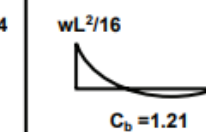
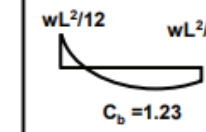
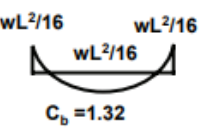
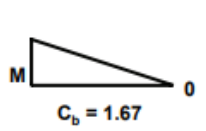
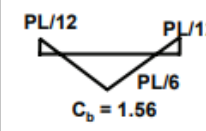
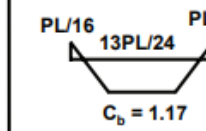
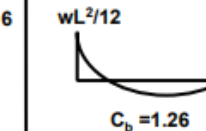
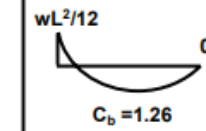
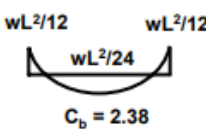
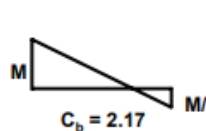

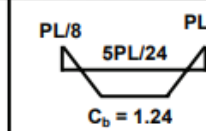
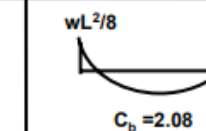
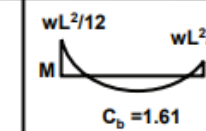
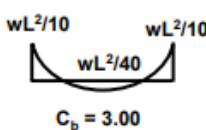
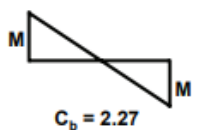

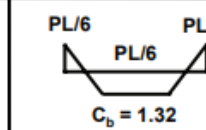
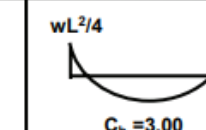
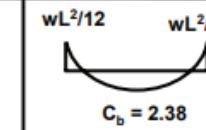
X = Brace Point.

Note That Beam Must Be Braced at Supports.

TABELAS C_b

C_b Values for Different Load Cases

AISC Equation F1-1

 C _b = 1.18	 C _b = 1.00	 C _b = 1.32	 C _b = 1.14	 C _b = 1.18	 C _b = 1.23
 C _b = 1.22	 C _b = 1.25	 C _b = 1.47	 C _b = 1.16	 C _b = 1.21	 C _b = 1.23
 C _b = 1.32	 C _b = 1.67	 C _b = 1.56	 C _b = 1.17	 C _b = 1.26	 C _b = 1.26
 C _b = 2.38	 C _b = 2.17	 C _b = 1.92	 C _b = 1.24	 C _b = 2.08	 C _b = 1.61
 C _b = 3.00	 C _b = 2.27	 C _b = 2.08	 C _b = 1.32	 C _b = 3.00	 C _b = 2.38



Condições para contenção de vigas ao FLT

4.12.3 Vigas

4.12.3.1 As vigas devem ser contidas à rotação em torno de seu eixo longitudinal nos apoios. A estabilidade lateral de vigas entre apoios pode ser proporcionada por contenções que impeçam o deslocamento lateral (contenção de translação) ou a torção (contenção de torção). Em barras sujeitas à flexão com curvatura reversa, o ponto de inflexão não pode ser considerado por si só como uma contenção.

4.12.3.2 As contenções de translação devem ser fixadas próximas da mesa comprimida. Adicionalmente, nas vigas em balanço, uma contenção na extremidade sem apoio deve ser fixada próxima da mesa tracionada. As contenções de translação devem ser fixadas próximas a ambas as mesas, quando situadas nas vizinhanças do ponto de inflexão nas vigas sujeitas a curvatura reversa.

4.12.3.3 A força resistente e a rigidez de cálculo necessárias das contenções de translação são dadas, respectivamente, conforme as seguintes equações:

$$F_{br} = 0,02 \frac{M_{sd} C_d}{h_o}$$

$$S_{br} = \frac{10 \gamma_r M_{sd} C_d}{L_{bb} h_o}$$

onde

γ_r é um coeficiente de ponderação da rigidez, igual a 1,35;

M_{sd} é o momento fletor solicitante de cálculo;

h_o é a distância entre os centros geométricos das mesas;

I_y é o momento de inércia da viga em relação ao eixo situado no plano de flexão;

t_w é a espessura da alma da viga;

t_{st} é a espessura do enrijecedor;

b_{st} é a largura do enrijecedor situado de um lado (usar duas vezes a largura do enrijecedor para pares de enrijecedores).

C_d é um coeficiente igual a 1,00, exceto para a contenção situada nas vizinhanças do ponto de inflexão, em barras sujeitas à flexão com curvatura reversa, quando deve ser considerado igual a 2,00;

L_{bb} é a distância entre contenções (comprimento destravado), observando-se o disposto em 4.12.3.4.

4.12.3.4 Quando a distância entre os pontos de contenção for menor que L_{qb} , em que L_{qb} é o comprimento máximo destravado que permite que a viga resista ao momento fletor solicitante de cálculo, pode-se considerar L_{bb} igual a L_{qb} .

4.12.3.5 As contenções de torção podem ser nodais ou contínuas ao longo do comprimento da viga. Estas contenções podem ser fixadas em qualquer posição da seção transversal, não precisando ficar próximas da mesa comprimida.

4.12.3.6 As contenções de torção nodais devem ter uma ligação com a viga que possua um momento fletor resistente de cálculo, M_{br} , e uma rigidez de cálculo mínima de pórtico ou de diafragma, S_{Tb} , cujos valores, respectivamente, são:

$$M_{br} = \frac{0,024 M_{sd} L}{n C_b L_{bb}}$$

$$S_{Tb} = \frac{S_T}{\left(1 - \frac{S_T}{S_{sec}}\right)}$$

onde

L é o vão da viga;

n é o número de pontos de contenções nodais no interior do vão;

C_b é um fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme, especificado em 5.4.2.3, 5.4.2.4 e 5.4.2.5;

S_T é a rigidez da contenção, excluindo a distorção da alma da viga, conforme a seguinte equação:

$$S_T = \frac{2,4 \gamma_r L M_{sd}^2}{n E I_y C_b^2}$$

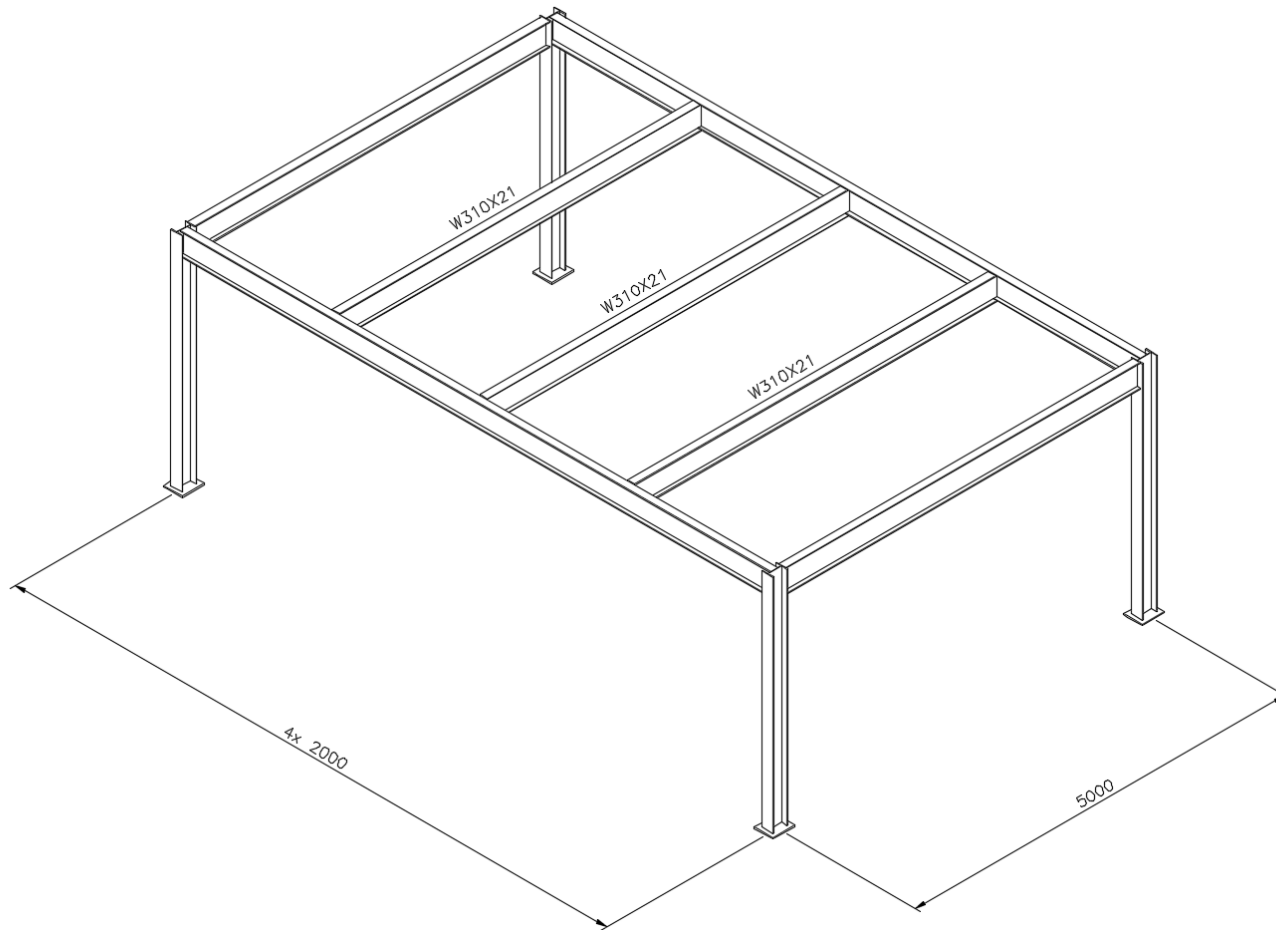
S_{sec} é a rigidez à distorção da alma da viga, incluindo o efeito dos enrijecedores transversais da alma, se existirem, conforme a seguinte equação:

$$S_{sec} = \frac{3,3E}{h_o} \left(\frac{1,5 h_o t_w^3}{12} + \frac{t_{st} b_{st}^3}{12} \right)$$

Exercício 1

Determinar se a viga secundária do mezanino pode ser aprovada, quanto à flexão

Desconsiderar o efeito de travamento da laje. Uso: Escritórios



Cargas Permanentes:

Laje: $2,30 \text{ kN/m}^2$

Contrapiso + Piso: $1,00 \text{ kN/m}^2$

Paredes: $1,00 \text{ kN/m}^2$

Sobrecarga de Uso: $2,50 \text{ kN/m}^2$

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)	λ	λ_p	λ_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)	b/t 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)	b/t 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)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{p\ell}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
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)	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{\lambda}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$0,13E \frac{\sqrt{JA}}{M_{p\ell}}$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$
	FLM	Ver D.2.7				
	FLA	Ver D.2.7				
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{\lambda}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$0,13E \frac{\sqrt{JA}}{M_{p\ell}}$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$

Para FLM e FLA

para $\lambda < \lambda_p$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \qquad M_{pl} = Z \cdot F_y$$

para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$$M_{rd} = \frac{M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}}{1,1}$$

para $\lambda > \lambda_r$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1}$$

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)	λ	λ_p	λ_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)	b/t 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)	b/t 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)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{p\ell}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
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)	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{\lambda}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$0,13E \frac{\sqrt{JA}}{M_{p\ell}}$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$
	FLM	Ver D.2.7				
	FLA	Ver D.2.7				
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{\lambda}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$0,13E \frac{\sqrt{JA}}{M_{p\ell}}$	$2EC_b \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$

Para FLT

para $\lambda < \lambda_p$

$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1}$ $M_{pl} = Z \cdot F_y$

para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$M_{rd} = \frac{M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}}{1,1}$

para $\lambda > \lambda_r$

$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1}$

Alternativamente

$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{cr}}}$

$\lambda_{LT} \leq 0,4:$ $\chi_{FLT} = 1,0$

$0,4 < \lambda_{LT} \leq 1,4:$ $\chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(\lambda_{LT} - 0,4)$

$\lambda_{LT} > 1,4:$ $\chi_{FLT} = \frac{1,0}{\lambda_{LT}^2}$

$M_{rd} = \frac{\chi_{FLT} \cdot M_{pl}}{1,1}$

Exercício 1



TABELA DE BITOLAS

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _f mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r _i cm	I _x cm ⁴	ESBELTEZ		C _w cm ⁶	u m ² /m	BITOLA mm x kg/m
				t _w mm	t _f mm				I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	Z _x cm ³	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	Z _y cm ³			ABA - λ _y b _f / 2t _f	ALMA - λ _w d' / t _w			
W 310 x 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	292	272	27,2	3.776	249,2	11,77	291,9	98	19,5	1,90	31,4	2,42	3,27	8,86	53,25	21.628	0,98	W 310 x 21,0
W 310 x 23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	292	272	30,7	4.346	285,0	11,89	333,2	116	22,9	1,94	36,9	2,45	4,65	7,54	48,50	25.594	0,99	W 310 x 23,8
W 310 x 28,3	28,3	309	102	6,0	8,9	291	271	36,5	5.500	356,0	12,28	412,0	158	31,0	2,08	49,4	2,55	8,14	5,73	45,20	35.441	1,00	W 310 x 28,3
W 310 x 32,7	32,7	313	102	6,6	10,8	291	271	42,1	6.570	419,8	12,49	485,3	192	37,6	2,13	59,8	2,58	12,91	4,72	41,12	43.612	1,00	W 310 x 32,7
W 310 x 38,7	38,7	310	165	5,8	9,7	291	271	49,7	8.581	553,6	13,14	615,4	727	88,1	3,82	134,9	4,38	13,20	8,51	46,66	163.728	1,25	W 310 x 38,7
W 310 x 44,5	44,5	313	166	6,6	11,2	291	271	57,2	9.997	638,8	13,22	712,8	855	103,0	3,87	158,0	4,41	19,90	7,41	41,00	194.433	1,26	W 310 x 44,5
W 310 x 52,0	52,0	317	167	7,6	13,2	291	271	67,0	11.909	751,4	13,33	842,5	1.026	122,9	3,91	188,8	4,45	31,81	6,33	35,61	236.422	1,27	W 310 x 52,0
HP 310 x 79,0 (H)	79,0	299	306	11,0	11,0	277	245	100,0	16.316	1.091,3	12,77	1.210,1	5.258	343,7	7,25	525,4	8,20	46,72	13,91	22,27	1.089.258	1,77	HP 310 x 79,0 (H)
HP 310 x 93,0 (H)	93,0	303	308	13,1	13,1	277	245	119,2	19.682	1.299,1	12,85	1.450,3	6.387	414,7	7,32	635,5	8,26	77,33	11,76	18,69	1.340.320	1,78	HP 310 x 93,0 (H)
W 310 x 97,0 (H)	97,0	308	305	9,9	15,4	277	245	123,6	22.284	1.447,0	13,43	1.594,2	7.286	477,8	7,68	725,0	8,38	92,12	9,90	24,77	1.558.682	1,79	W 310 x 97,0 (H)
W 310 x 107,0 (H)	107,0	311	306	10,9	17,0	277	245	136,4	24.839	1.597,3	13,49	1.768,2	8.123	530,9	7,72	806,1	8,41	122,86	9,00	22,48	1.754.271	1,80	W 310 x 107,0 (H)
HP 310 x 110,0 (H)	110,0	308	310	15,4	15,5	277	245	141,0	23.703	1.539,1	12,97	1.730,6	7.707	497,3	7,39	763,7	8,33	125,66	10,00	15,91	1.646.104	1,80	HP 310 x 110,0 (H)
W 310 x 117,0 (H)	117,0	314	307	11,9	18,7	277	245	149,9	27.563	1.755,6	13,56	1.952,6	9.024	587,9	7,76	893,1	8,44	161,61	8,21	20,55	1.965.950	1,80	W 310 x 117,0 (H)
HP 310 x 125,0 (H)	125,0	312	312	17,4	17,4	277	245	159,0	27.076	1.735,6	13,05	1.963,3	8.823	565,6	7,45	870,6	8,38	177,98	8,97	14,09	1.911.029	1,81	HP 310 x 125,0 (H)
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8.358	479,0	14,09	547,6	291	45,9	2,63	72,0	3,20	9,15	7,47	53,10	84.111	1,17	W 360 x 32,9
W 360 x 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10.331	585,3	14,35	667,7	375	58,6	2,73	91,9	3,27	15,83	5,98	47,32	109.551	1,18	W 360 x 39,0
W 360 x 44,0	44,0	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12.258	696,5	14,58	784,3	818	95,7	3,77	148,0	4,43	16,70	8,72	44,70	239.091	1,35	W 360 x 44,0
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8	14.222	801,2	14,81	899,5	968	113,3	3,87	174,7	4,49	24,65	7,37	42,75	284.994	1,36	W 360 x 51,0
W 360 x 57,8	57,8	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5	16.143	901,8	14,92	1.014,8	1.113	129,4	3,92	199,8	4,53	34,45	6,56	38,96	330.394	1,37	W 360 x 57,8
W 360 x 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17.890	1.031,1	14,80	1.145,5	1.885	185,7	4,80	284,5	5,44	44,57	7,52	37,40	523.362	1,46	W 360 x 64,0
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3	20.169	1.152,5	14,86	1.285,9	2.140	209,8	4,84	321,8	5,47	61,18	6,75	33,47	599.082	1,47	W 360 x 72,0
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22.713	1.283,2	14,98	1.437,0	2.416	235,7	4,89	361,9	5,51	82,41	6,10	30,68	685.701	1,48	W 360 x 79,0
W 360 x 91,0 (H)	91,0	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9	26.755	1.515,9	15,19	1.680,1	4.483	353,0	6,22	538,1	6,90	92,61	7,74	30,34	1.268.709	1,68	W 360 x 91,0 (H)
W 360 x 101,0 (H)	101,0	357	255	10,5	18,3	320	286	129,5	30.279	1.696,3	15,29	1.888,9	5.063	397,1	6,25	606,1	6,93	128,47	6,97	27,28	1.450.410	1,68	W 360 x 101,0 (H)
W 360 x 110,0 (H)	110,0	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6	33.155	1.841,9	15,36	2.059,3	5.570	435,2	6,29	664,5	6,96	161,93	6,43	25,28	1.609.070	1,69	W 360 x 110,0 (H)

Exercício 1

ELS: CFS

$$Q_{CFS} = (2,30 + 1,00 + 1,00) \cdot 2 + 0,6 \cdot 2,50 \cdot 2 = 11,6 \text{ kN/m}$$

$$y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad y = \frac{5 \cdot 0,116 \cdot 500^4}{384 \cdot 20000 \cdot 3776} = 1,25 \text{ cm} \quad y_{Máx} = \frac{500}{350} = 1,42 \text{ cm} \rightarrow OK!$$

ELU:

$$Q_{ELU} = (1,35 \cdot 2,30 + 1,35 \cdot 1,00 + 1,40 \cdot 1,00 + 1,50 \cdot 2,50) \cdot 2 = 19,21 \text{ kN/m}$$

$$M_{Sd} = \frac{q \cdot L^2}{8} \rightarrow \frac{0,1921 \cdot 500^2}{8} = 6003 \text{ kN.cm}$$

FLM:

$$\frac{b}{t} = \frac{101}{2 \cdot 5,7} = 8,86 \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 0,38 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15 \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLM}} = \frac{291,9 \cdot 34,5}{1,1} = 9155 \text{ kN.cm}$$

Exercício 1

FLA:

$$\frac{b}{t} = \frac{272}{5,1} = 53,33 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53 \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLA}} = \frac{291,9 \cdot 34,5}{1,1} = 9155 \text{ kN.cm}$$

FLT:

$$\frac{L_b}{r_y} = \frac{500}{1,90} = 263,16 \quad \text{Método 1: } \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 1,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 42,37 \rightarrow \text{calcular } \lambda_r \quad C_b = 1,14$$

$$\beta_1 = \frac{(F_y - \sigma_r) \cdot W}{EJ} \rightarrow \frac{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5) \cdot 249,2}{20000 \cdot 3,27} \rightarrow 0,092 \quad \lambda_r = \frac{1,38 \cdot C_b \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{C_b^2 \cdot I_y}}}$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot 1,14 \cdot \sqrt{98 \cdot 3,27}}{1,90 \cdot 3,27 \cdot 0,092} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 21628 \cdot 0,092^2}{1,14^2 \cdot 98}}} = 133,20 \rightarrow \text{calcular } M_{cr}$$

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

$$M_{Cr} = \frac{1,14 \cdot \pi^2 \cdot 20000 \cdot 98}{500^2} \cdot \sqrt{\frac{21628}{98} \left(1 + \frac{0,039 \cdot 3,24 \cdot 500^2}{21628} \right)} = 2055,59 \text{ kN.cm} \quad M_{RD_{FLT}} = \frac{M_{cr}}{1,1} = \frac{2055,59}{1,1} = 1868,72 \text{ kN.cm (Não OK!)}$$

Exercício 1

FLT: Método 2:

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad M_{cr} = \frac{1,14 \cdot \pi^2 \cdot 20000 \cdot 98}{500^2} \cdot \sqrt{\frac{21628}{98} \left(1 + \frac{0,039 \cdot 3,24 \cdot 500^2}{21628} \right)} = 2055,59 \text{ kN.cm}$$

$$M_{pl} = Z \cdot Fy = 291,9 \cdot 34,5 = 10070,55 \text{ kN.cm}$$

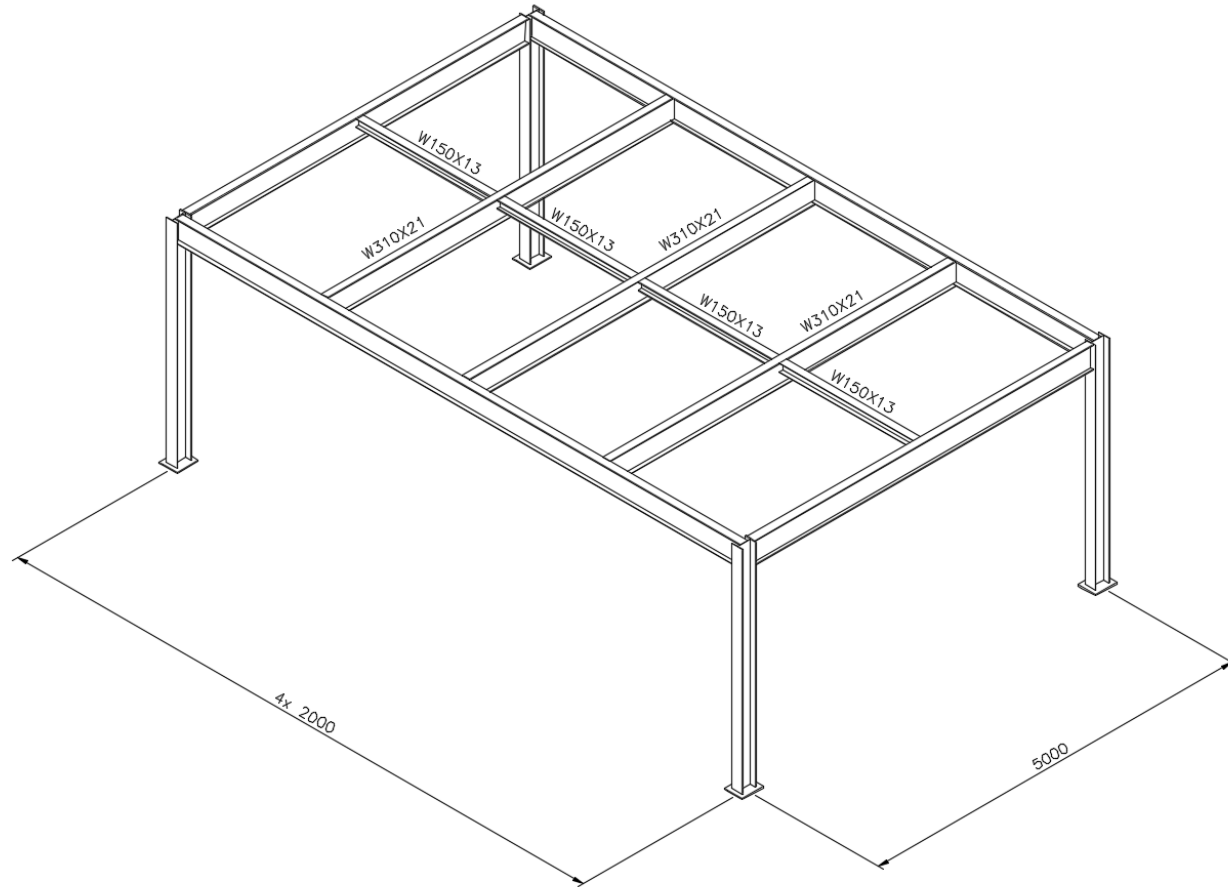
$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{cr}}} \quad \lambda_{LT} = \sqrt{\frac{10070,55}{2055,59}} = 2,21 \quad \lambda_{LT} > 1,4: \quad \chi_{FLT} = \frac{1,0}{\lambda_{LT}^2} \quad \chi_{FLT} = \frac{1,0}{2,21^2} = 0,2047$$

$$M_{rd_{FLT}} = \frac{\chi_{FLT} \cdot M_{pl}}{1,1} \rightarrow \frac{0,2047 \cdot 10070,55}{1,1} = 1874,46 \text{ kN.cm (Não OK!)}$$

Exercício 2

Determinar se a viga secundária W310X21 do mezanino pode ser aprovada, quanto à flexão

Desconsiderar o efeito de travamento da laje. Uso: Escritórios



Cargas Permanentes:

Laje: $2,30 \text{ kN/m}^2$

Contrapiso + Piso: $1,00 \text{ kN/m}^2$

Paredes: $1,00 \text{ kN/m}^2$

Sobrecarga de Uso: $2,50 \text{ kN/m}^2$

Exercício 2

ELS: CFS

$$Q_{CFS} = (2,30 + 1,00 + 1,00) \cdot 2 + 0,6 \cdot 2,50 \cdot 2 = 11,6 \text{ kN/m}$$

$$y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad y = \frac{5 \cdot 0,116 \cdot 500^4}{384 \cdot 20000 \cdot 3776} = 1,25 \text{ cm} \quad y_{Máx} = \frac{500}{350} = 1,42 \text{ cm} \rightarrow OK!$$

ELU:

$$Q_{ELU} = (1,35 \cdot 2,30 + 1,35 \cdot 1,00 + 1,40 \cdot 1,00 + 1,50 \cdot 2,50) \cdot 2 = 19,21 \text{ kN/m}$$

$$M_{Sd} = \frac{q \cdot L^2}{8} \rightarrow \frac{0,1921 \cdot 500^2}{8} = 6003 \text{ kN.cm}$$

FLM:

$$\frac{b}{t} = \frac{101}{2 \cdot 5,7} = 8,86 \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 0,38 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15 \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLM}} = \frac{291,9 \cdot 34,5}{1,1} = 9155 \text{ kN.cm}$$

Exercício 2

FLA:

$$\frac{b}{t} = \frac{272}{5,1} = 53,33 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53 \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLA}} = \frac{291,9 \cdot 34,5}{1,1} = 9155 \text{ kN.cm}$$

FLT: Método 2:

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad M_{cr} = \frac{1,30 \cdot \pi^2 \cdot 20000 \cdot 98}{250^2} \cdot \sqrt{\frac{21628}{98} \left(1 + \frac{0,039 \cdot 3,24 \cdot 250^2}{21628} \right)} = 6984 \text{ kN.cm}$$

$$M_{pl} = Z \cdot F_y = 291,9 \cdot 34,5 = 10070,55 \text{ kN.cm}$$

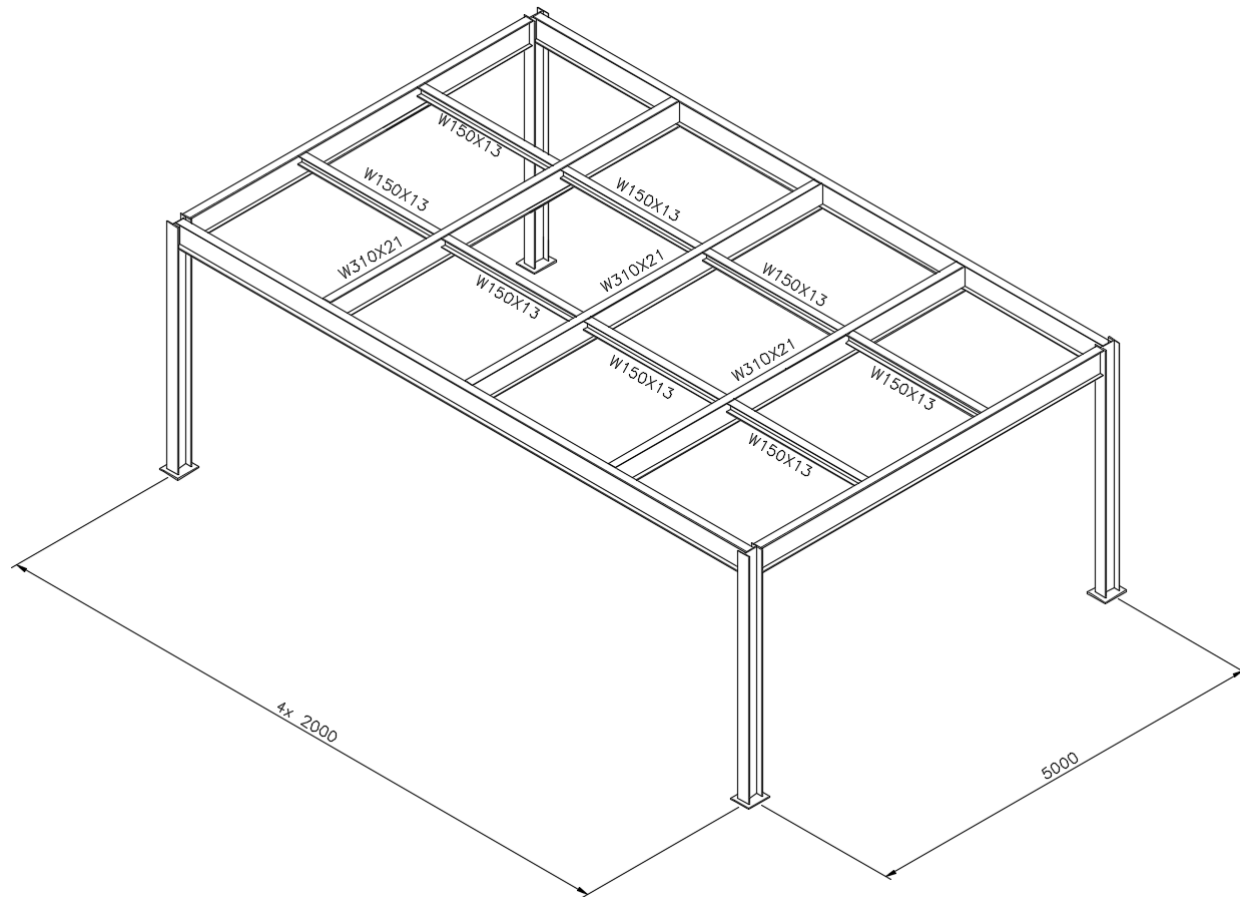
$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{cr}}} \quad \lambda_{LT} = \sqrt{\frac{10070,55}{6984}} = 1,20 \quad 0,4 < \lambda_{LT} \leq 1,4: \quad \chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(\lambda_{LT} - 0,4)$$
$$\chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(1,20 - 0,4) = 0,608$$

$$M_{rd_{FLT}} = \frac{\chi_{FLT} \cdot M_{pl}}{1,1} \rightarrow \frac{0,608 \cdot 10070,55}{1,1} = 5566,27 \text{ kN.cm (Não OK!)}$$

Exercício 3

Determinar se a viga secundária W310X21 do mezanino pode ser aprovada, quanto à flexão

Desconsiderar o efeito de travamento da laje. Uso: Escritórios



Cargas Permanentes:

Laje: $2,30 \text{ kN/m}^2$

Contrapiso + Piso: $1,00 \text{ kN/m}^2$

Paredes: $1,00 \text{ kN/m}^2$

Sobrecarga de Uso: $2,50 \text{ kN/m}^2$

Exercício 3

ELS: CFS

$$Q_{CFS} = (2,30 + 1,00 + 1,00) \cdot 2 + 0,6 \cdot 2,50 \cdot 2 = 11,6 \text{ kN/m}$$

$$y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad y = \frac{5 \cdot 0,116 \cdot 500^4}{384 \cdot 20000 \cdot 3776} = 1,25 \text{ cm} \quad y_{Máx} = \frac{500}{350} = 1,42 \text{ cm} \rightarrow OK!$$

ELU:

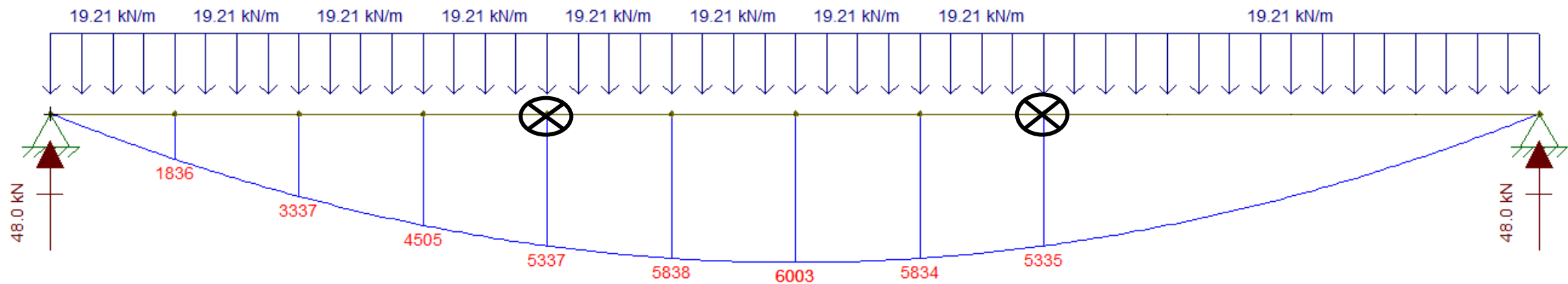
$$Q_{ELU} = (1,35 \cdot 2,30 + 1,35 \cdot 1,00 + 1,40 \cdot 1,00 + 1,50 \cdot 2,50) \cdot 2 = 19,21 \text{ kN/m}$$

$$M_{Sd} = \frac{q \cdot L^2}{8} \rightarrow \frac{0,1921 \cdot 500^2}{8} = 6003 \text{ kN.cm}$$

FLM:

$$\frac{b}{t} = \frac{101}{2 \cdot 5,7} = 8,86 \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 0,38 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15 \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLM}} = \frac{291,9 \cdot 34,5}{1,1} = 9155 \text{ kN.cm}$$

Exercício 3



$$Cb_1 = \frac{12,5.5337}{2,5.5337 + 3.1836 + 4.3337 + 3.4505} = 1,46 \quad Cb_2 = \frac{12,5.6003}{2,5.6003 + 3.5838 + 4.6003 + 3.5834} = 1,01$$

Exercício 3

FLA:

$$\frac{b}{t} = \frac{272}{5,1} = 53,33 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53 \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLA}} = \frac{291,9 \cdot 34,5}{1,1} = 9155 \text{ kN.cm}$$

FLT: Método 2 (Trecho 1)

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad M_{cr} = \frac{1,46 \cdot \pi^2 \cdot 20000 \cdot 98}{167^2} \cdot \sqrt{\frac{21628}{98} \left(1 + \frac{0,039 \cdot 3,24 \cdot 167^2}{21628} \right)} = 16223,7 \text{ kN.cm}$$

$$M_{pl} = Z \cdot F_y = 291,9 \cdot 34,5 = 10070,55 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{cr}}} \quad \lambda_{LT} = \sqrt{\frac{10070,55}{16223,7}} = 0,79 \quad 0,4 < \lambda_{LT} \leq 1,4: \quad \chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(\lambda_{LT} - 0,4) \\ \chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(0,79 - 0,4) = 0,809$$

$$M_{rd_{FLT}} = \frac{\chi_{FLT} \cdot M_{pl}}{1,1} \rightarrow \frac{0,809 \cdot 10070,55}{1,1} = 7406,43 \text{ cm} > 5337 \text{ OK!}$$

Exercício 3

FLA:

$$\frac{b}{t} = \frac{272}{5,1} = 53,33 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53 \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLA}} = \frac{291,9 \cdot 34,5}{1,1} = 9155 \text{ kN.cm}$$

FLT: Método 2 (Trecho 2)

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad M_{cr} = \frac{1,01 \cdot \pi^2 \cdot 20000 \cdot 98}{167^2} \cdot \sqrt{\frac{21628}{98} \left(1 + \frac{0,039 \cdot 3,24 \cdot 167^2}{21628} \right)} = 11223,24 \text{ kN.cm}$$

$$M_{pl} = Z \cdot F_y = 291,9 \cdot 34,5 = 10070,55 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{cr}}} \quad \lambda_{LT} = \sqrt{\frac{10070,55}{11223,24}} = 0,95 \quad 0,4 < \lambda_{LT} \leq 1,4: \quad \chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(\lambda_{LT} - 0,4)$$
$$\chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(0,95 - 0,4) = 0,73$$

$$M_{rd_{FLT}} = \frac{\chi_{FLT} \cdot M_{pl}}{1,1} \rightarrow \frac{0,73 \cdot 10070,55}{1,1} = 6687,76 \text{ cm} > 60030 \text{ K!}$$

Exercício 4

Verificação se a viga W150X13 é eficaz para contenção da viga W310X21

Considerando ligação rígida e contenção exclusivamente à torção:

$$M_{br} = \frac{0,024 \cdot M_{sd} \cdot L}{n \cdot C_b \cdot L_{bb}} \quad M_{br} = \frac{0,024 \cdot 6003 \cdot 500}{2,1 \cdot 0,1 \cdot 167} = 213 \text{ kN.cm}$$

Resistência do Perfil W150X13 à flexão:

FLM:

$$\frac{b}{t} = \frac{100}{2 \cdot 4,9} = 10,20 \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 0,38 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15 \quad \lambda_p = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(F_y - \sigma_r)}} \rightarrow 0,83 \sqrt{\frac{20000}{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5)}} = 23,88$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot F_y \rightarrow 96,4 \cdot 34,5 = 3326 \text{ kN.cm} \quad M_r = (F_y - \sigma_r) \cdot W_x \rightarrow M_r = (34,5 - 0,3 \cdot 34,5) \cdot 85,8 = 2072 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = \frac{M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}}{1,1} \quad M_{rd} = \frac{3326 - (3326 - 2072) \cdot \frac{10,20 - 9,15}{23,88 - 10,20}}{1,1} = 2936,13 \text{ kN.cm}$$

Exercício 4

FLA:

$$\frac{b}{t} = \frac{118}{4,3} = 27,49 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53 \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLA}} = \frac{96,4.34,5}{1,1} = 3023 \text{ kN.cm}$$

FLT: Método 2

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad M_{cr} = \frac{1,00 \cdot \pi^2 \cdot 20000 \cdot 82}{200^2} \cdot \sqrt{\frac{4181}{82} \left(1 + \frac{0,039 \cdot 1,72 \cdot 200^2}{4181} \right)} = 3702 \text{ kN.cm}$$

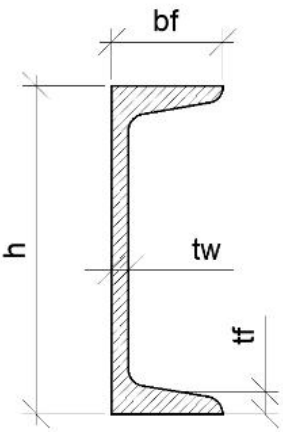
$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{cr}}} \quad \lambda_{LT} = \sqrt{\frac{3326}{3702}} = 0,95$$

$$0,4 < \lambda_{LT} \leq 1,4: \quad \chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(\lambda_{LT} - 0,4)$$

$$\chi_{FLT} = 1,0 - 0,49(0,95 - 0,4) = 0,73$$

$$M_{rd_{FLT}} = \frac{\chi_{FLT} \cdot M_{pl}}{1,1} \rightarrow \frac{0,73 \cdot 3326}{1,1} = 2207 \text{ kN.cm} > 273 \text{ OK!}$$

Exercício 5 Verificação se a viga U3'' na primeira alma é eficaz para contenção da viga W310X21



Perfil	Massa (kg/m)	A(cm²)	h(mm)	tw(mm)	tf(mm)	bf(mm)	xCG(cm)	Ix(cm⁴)	Wx(cm³)	rx(cm)	Zx(cm³)	Iy(cm⁴)	Wy(cm³)	ry(cm)	Zy(cm³)	rt(cm)	It(cm⁴)	Cw(cm⁹)	h/tw	bf/tf	u(m²/m)	m-1
U76,2 X6,11	6,11	7,78	76,2	4,32	6,93	35,8	11,1	68,9	18,1	2,98	21,3	8,2	3,3	1,03	6,6	1,27	1	64	3	2,6	0,29	369
U 76,2 x 7,44	7,44	9,48	76,2	6,55	6,93	38	11,1	77,2	20,3	2,85	24,6	10,3	3,8	1,04	7,6	1,37	1	76	2	2,7	0,29	307
U 102 x 7,9	7,93	10,1	101,6	4,57	7,52	40,1	11,6	159,5	31,4	3,97	37	13,1	4,6	1,14	9,3	1,45	1	179	3	2,7	0,35	351
U 102 x 9,3	9,34	11,9	101,6	6,27	7,52	41,8	11,5	174,4	34,3	3,83	41,5	15,5	5,1	1,14	10,3	1,54	2	203	2	2,8	0,36	301
U 102 x 10,8	10,75	13,7	101,6	8,13	7,52	43,7	11,7	190,6	37,5	3,73	46	18	5,6	1,15	11,4	1,62	3	231	1	2,9	0,36	264
U 152 x 12,2	12,17	15,5	152,4	5,08	8,71	48,8	13	546	71,7	5,94	84,1	28,8	8,2	1,36	16,3	1,82	3	871	3	2,8	0,49	316
U 152 x 15,6	15,62	19,9	152,4	7,98	8,71	51,7	12,7	632	82,9	5,64	101	36	9,2	1,35	18,8	1,96	5	1035	2	3	0,5	249
U 152 x 19,4	19,39	24,7	152,4	11,1	8,71	56,8	13,1	724	95	5,41	119	43,9	10,5	1,33	22,3	2,06	9	1373	1	3,3	0,51	206
U 203 x 17,1	17,11	21,8	203,2	5,59	9,5	57,4	14,7	1344	132,3	7,85	156	54,1	12,9	1,58	25,9	2,2	4	2809	3	3	0,62	287
U 203 x 20,5	20,49	26,1	203,2	7,7	9,5	59,5	14,2	1490	146,7	7,56	179	62,4	14,1	1,55	28,4	2,31	6	3128	2	3,1	0,63	241
U 254 x 22,8	22,77	29	254	6,1	11,1	66	16,1	2800	220,5	9,83	259	95	19	1,81	38,5	2,52	8	7859	3	3	0,76	262
U 254 x 29,8	29,75	37,9	254	9,63	11,1	69,6	15,4	3290	259,1	9,32	316	117	21,6	1,76	44,4	2,71	14	9188	2	3,1	0,77	202

Exercício 5

Verificação se a viga U3'' na primeira alma é eficaz para contenção da viga W310X21

Considerando ligação rígida e contenção exclusivamente à torção:

$$M_{br} = \frac{0,024 \cdot M_{sd} \cdot L}{n \cdot C_b \cdot L_{bb}} \quad M_{br} = \frac{0,024 \cdot 6003,500}{2,1 \cdot 0,167} = 213 \text{ kN.cm}$$

Resistência do Perfil U à flexão:

FLM:

$$\frac{b}{t} = \frac{35,8}{6,93} = 5,16 \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 0,38 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 10,74 \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLM}} = \frac{21,3 \cdot 25}{1,1} = 484 \text{ kN.cm}$$

FLA:

$$\frac{b}{t} = \frac{76,2 - 4,6,93}{4,32} = 11,22 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 3,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 106,3 \quad M_{Rd} = \frac{Z \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd_{FLM}} = \frac{21,3 \cdot 25}{1,1} = 484 \text{ kN.cm}$$

Exercício 5

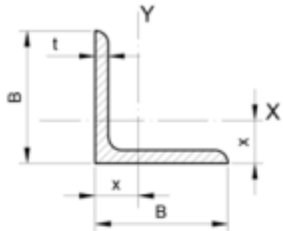
FLT: Método 2

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad M_{cr} = \frac{1,00 \cdot \pi^2 \cdot 20000 \cdot 8,2}{200^2} \cdot \sqrt{\frac{64}{8,2} \left(1 + \frac{0,039 \cdot 1 \cdot 200^2}{64} \right)} = 8014 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{cr}}} \quad \lambda_{LT} = \sqrt{\frac{21,3 \cdot 25}{8014}} = 0,26 \quad \lambda_{LT} \leq 0,4: \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

$$M_{rd_{FLT}} = \frac{\chi_{FLT} \cdot M_{pl}}{1,1} \rightarrow \frac{1,00 \cdot 21,3 \cdot 25}{1,1} = 484 \text{ kN.cm} > 273 \text{ OK!}$$

Exercício 6 Verificação se a cantoneira L2" X 3/16 é eficaz para contenção da viga W310X21

		<p>TABELA DE PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS</p> <p>CANTONEIRA LAMINADA DE ABAS IGUAIS</p> <p>www.calculistadeaco.com.br</p>											
Aba		Peso	Área	Área de Pintura	Espessura		Esbeltezz		Momento de Inércia	Módulo Resistente Elástico	Raio de Giração		Centro Geométrico
B		P	A	u	t		B/t	Qs (A36)	Ix = Iy cm ⁴	Wx = Wy cm ³	rx=ry cm	rz min cm	x cm
pol	cm	kg/m	cm ²	m ² /m	pol	cm							
1/2"	1,27	0,55	0,70	0,05	1/8"	0,32	4,01	1,00	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
5/8"	1,59	0,71	0,90	0,06	1/8"	0,32	5,01	1,00	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
3/4"	1,91	0,87	1,11	0,08	1/8"	0,32	6,01	1,00	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
7/8"	2,22	1,04	1,32	0,09	1/8"	0,32	7,00	1,00	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66
		1,49	1,90	0,09	3/16"	0,48	4,66	1,00	0,79	0,54	0,66	0,48	0,74
1"	2,54	1,19	1,48	0,10	1/8"	0,32	8,01	1,00	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76
		1,73	2,19	0,10	3/16"	0,48	5,34	1,00	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
		2,22	2,84	0,10	1/4"	0,64	4,00	1,00	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86
1 1/4"	3,18	1,50	1,93	0,13	1/8"	0,32	10,02	1,00	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89
		2,20	2,77	0,13	3/16"	0,48	6,67	1,00	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
		2,86	3,62	0,13	1/4"	0,64	5,00	1,00	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02
1 1/2"	3,81	1,83	2,32	0,15	1/8"	0,32	12,02	1,00	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07
		2,68	3,42	0,15	3/16"	0,48	8,00	1,00	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12
		3,48	4,45	0,15	1/4"	0,64	6,00	1,00	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19
3 3/4"	4,45	2,14	2,71	0,18	1/8"	0,32	14,02	0,96	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22
		3,15	4,00	0,18	3/16"	0,48	9,34	1,00	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30
		4,12	5,22	0,18	1/4"	0,64	7,00	1,00	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35
		5,04	6,45	0,18	5/16"	0,79	5,60	1,00	11,20	3,77	1,32	0,86	1,41
2"	5,08	2,46	3,10	0,20	1/8"	0,32	16,03	0,91	7,91	2,13	1,60	1,02	1,40
		3,63	4,58	0,20	3/16"	0,48	10,67	1,00	11,70	3,13	1,58	1,02	1,45
		4,74	6,06	0,20	1/4"	0,64	8,00	1,00	14,60	4,10	1,55	0,99	1,50
		5,83	7,42	0,20	5/16"	0,79	6,40	1,00	17,50	4,91	1,53	0,99	1,55
		6,99	8,76	0,20	3/8"	0,95	5,34	1,00	20,00	5,73	1,50	0,99	1,63

Exercício 6 Verificação se a cantoneira L2" X 3/16 é eficaz para contenção da viga W310X21

Procedimento extraído do AISC360/16 – Capítulo F10

P/ flambagem local

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad \lambda_p = 0,54 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_r = 0,91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$M_{Rd} = \frac{1,5 \cdot W \cdot F_y}{1,1} \text{ se } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{\left[2,73 - 1,72 \left(\frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right] \cdot W \cdot F_y}{1,1} \text{ se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{\left[\frac{0,71 \cdot E}{\left(\frac{b}{t} \right)^2} \right] \cdot W \cdot F_y}{1,1} \text{ se } \lambda > \lambda_r$$

Exercício 6 Verificação se a cantoneira L2" X 3/16 é eficaz para contenção da viga W310X21

Procedimento extraído do AISC360/16 – Capítulo F10

P/ flambagem lateral com torção

$$M_{cr} = \frac{0,58 \cdot E \cdot b^4 \cdot t \cdot C_b}{L_b^2} \left[\sqrt{1 + 0,88 \left(\frac{L_b \cdot t}{b^2} \right)} - 1 \right] \quad \text{Para compressão na aba horizontal}$$

$$M_{cr} = \frac{0,58 \cdot E \cdot b^4 \cdot t \cdot C_b}{L_b^2} \left[\sqrt{1 + 0,88 \left(\frac{L_b \cdot t}{b^2} \right)} + 1 \right] \quad \text{Para tração na aba horizontal}$$

$$\text{Se } W \cdot F_y \leq M_{cr} \rightarrow M_{Rd} = \frac{\left(1,92 - 1,17 \sqrt{\frac{W \cdot F_y}{M_{cr}}} \right) \cdot W \cdot F_y}{1,1} \leq \frac{1,5 \cdot W \cdot F_y}{1,1}$$

$$\text{Se } W \cdot F_y > M_{cr} \rightarrow M_{Rd} = \frac{\left(0,92 - \frac{0,17 M_{cr}}{W \cdot F_y} \right) M_{cr}}{1,1}$$

Exercício 6 Verificação se a cantoneira L2" X 3/16 é eficaz para contenção da viga W310X21

Procedimento extraído do AISC360/16 – Capítulo F10

P/ flambagem local

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad \lambda = \frac{51}{4,76} = 10,71 \quad \lambda_p = 0,54 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_p = 0,54 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 15,27$$

$$M_{Rd} = \frac{1,5 \cdot W \cdot F_y}{1,1} \quad M_{Rd} = \frac{1,5 \cdot 3,13 \cdot 25}{1,1} = 106,70 \text{ kN.cm} < 273 \text{ kN.cm Não OK!}$$

Estimativa de W necessário

$$M_{Rd} = \frac{1,5 \cdot W \cdot F_y}{1,1} \quad 273 = \frac{1,5 \cdot W \cdot 25}{1,1} \rightarrow W \approx 8 \text{ cm}^2 \dots$$

Exercício 7 Verificação se a cantoneira L3” X 1/4 é eficaz para contenção da viga W310X21

Procedimento extraído do AISC360/16 – Capítulo F10

Aba		Peso	Área	Área de Pintura	Espessura		Esbeltez		de Inércia	Resistente Elástico	Raio de Giração		Centro Geométrico
B		P	A	u	t		B/t	Qs (A36)	Ix = Iy	Wx = Wy	rx=ry	rz min	x
pol	cm	kg/m	cm²	m²/m	pol	cm			cm⁴	cm³	cm	cm	cm
1/2"	1,27	0,55	0,70	0,05	1/8"	0,32	4,01	1,00	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
5/8"	1,59	0,71	0,90	0,06	1/8"	0,32	5,01	1,00	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
3/4"	1,91	0,87	1,11	0,08	1/8"	0,32	6,01	1,00	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
7/8"	2,22	1,04	1,32	0,09	1/8"	0,32	7,00	1,00	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66
		1,49	1,90	0,09	3/16"	0,48	4,66	1,00	0,79	0,54	0,66	0,48	0,74
1"	2,54	1,19	1,48	0,10	1/8"	0,32	8,01	1,00	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76
		1,73	2,19	0,10	3/16"	0,48	5,34	1,00	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
		2,22	2,84	0,10	1/4"	0,64	4,00	1,00	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86
1 1/4"	3,18	1,50	1,93	0,13	1/8"	0,32	10,02	1,00	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89
		2,20	2,77	0,13	3/16"	0,48	6,67	1,00	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
		2,86	3,62	0,13	1/4"	0,64	5,00	1,00	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02
1 1/2"	3,81	1,83	2,32	0,15	1/8"	0,32	12,02	1,00	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07
		2,68	3,42	0,15	3/16"	0,48	8,00	1,00	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12
		3,48	4,45	0,15	1/4"	0,64	6,00	1,00	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19
3/4"	4,45	2,14	2,71	0,18	1/8"	0,32	14,02	0,96	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22
		3,15	4,00	0,18	3/16"	0,48	9,34	1,00	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30
		4,12	5,22	0,18	1/4"	0,64	7,00	1,00	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35
		5,04	6,45	0,18	5/16"	0,79	5,60	1,00	11,20	3,77	1,32	0,86	1,41
2"	5,08	2,46	3,10	0,20	1/8"	0,32	16,03	0,91	7,91	2,13	1,60	1,02	1,40
		3,63	4,58	0,20	3/16"	0,48	10,67	1,00	11,70	3,13	1,58	1,02	1,45
		4,74	6,06	0,20	1/4"	0,64	8,00	1,00	14,60	4,10	1,55	0,99	1,50
		5,83	7,42	0,20	5/16"	0,79	6,40	1,00	17,50	4,91	1,53	0,99	1,55
		6,99	8,76	0,20	3/8"	0,95	5,34	1,00	20,00	5,73	1,50	0,99	1,63
2 1/2"	6,35	4,57	5,80	0,25	3/16"	0,48	13,34	0,98	23,00	4,91	1,98	1,24	1,75
		6,10	7,67	0,25	1/4"	0,64	10,00	1,00	29,00	6,40	1,96	1,24	1,83
		7,44	9,48	0,25	5/16"	0,79	8,00	1,00	35,00	7,87	1,93	1,24	1,88
		8,78	11,16	0,25	3/8"	0,95	6,67	1,00	41,00	9,35	1,91	1,22	1,93
3"	7,62	5,52	7,03	0,30	3/16"	0,48	16,01	0,91	40,00	7,21	2,39	1,50	2,08
		7,29	9,29	0,30	1/4"	0,64	12,00	1,00	50,00	9,50	2,36	1,50	2,13
		9,07	11,48	0,30	5/16"	0,79	9,60	1,00	62,00	11,60	2,34	1,50	2,21
		10,71	13,61	0,30	3/8"	0,95	8,00	1,00	75,00	13,60	2,31	1,47	2,26
		12,34	15,67	0,30	7/16"	1,11	6,86	1,00	83,00	15,60	2,31	1,47	2,31
		14,00	17,74	0,30	1/2"	1,27	6,00	1,00	91,00	18,00	2,29	1,47	2,36

Nova tentativa com L3”X1/4

Flambagem Local:

$$\lambda = \frac{b}{t} \qquad \lambda = \frac{76,2}{6,35} = 12 \qquad \lambda_p = 0,54 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 15,27$$

$$M_{Rd} = \frac{1,5.9,50.25}{1,1} = 323,87 \text{ kN.cm}$$

Exercício 7 Verificação se a cantoneira L3” X 1/4 é eficaz para contenção da viga W310X21

Procedimento extraído do AISC360/16 – Capítulo F10

Aba		Peso	Área	Área de Pintura	Espessura		Esbeltez		de Inércia	Resistente Elástico	Raio de Giração		Centro Geométrico
B		P	A	u	t		B/t	Qs (A36)	lx = ly	Wx = Wy	rx = ry	rz min	x
pol	cm	kg/m	cm²	m²/m	pol	cm			cm⁴	cm³	cm	cm	cm
1/2"	1,27	0,55	0,70	0,05	1/8"	0,32	4,01	1,00	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
5/8"	1,59	0,71	0,90	0,06	1/8"	0,32	5,01	1,00	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
3/4"	1,91	0,87	1,11	0,08	1/8"	0,32	6,01	1,00	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
7/8"	2,22	1,04	1,32	0,09	1/8"	0,32	7,00	1,00	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66
		1,49	1,90	0,09	3/16"	0,48	4,66	1,00	0,79	0,54	0,66	0,48	0,74
1"	2,54	1,19	1,48	0,10	1/8"	0,32	8,01	1,00	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76
		1,73	2,19	0,10	3/16"	0,48	5,34	1,00	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
		2,22	2,84	0,10	1/4"	0,64	4,00	1,00	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86
1 1/4"	3,18	1,50	1,93	0,13	1/8"	0,32	10,02	1,00	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89
		2,20	2,77	0,13	3/16"	0,48	6,67	1,00	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
		2,86	3,62	0,13	1/4"	0,64	5,00	1,00	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02
1 1/2"	3,81	1,83	2,32	0,15	1/8"	0,32	12,02	1,00	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07
		2,68	3,42	0,15	3/16"	0,48	8,00	1,00	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12
		3,48	4,45	0,15	1/4"	0,64	6,00	1,00	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19
3/4"	4,45	2,14	2,71	0,18	1/8"	0,32	14,02	0,96	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22
		3,15	4,00	0,18	3/16"	0,48	9,34	1,00	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30
		4,12	5,22	0,18	1/4"	0,64	7,00	1,00	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35
		5,04	6,45	0,18	5/16"	0,79	5,60	1,00	11,20	3,77	1,32	0,86	1,41
2"	5,08	2,46	3,10	0,20	1/8"	0,32	16,03	0,91	7,91	2,13	1,60	1,02	1,40
		3,63	4,58	0,20	3/16"	0,48	10,67	1,00	11,70	3,13	1,58	1,02	1,45
		4,74	6,06	0,20	1/4"	0,64	8,00	1,00	14,60	4,10	1,55	0,99	1,50
		5,83	7,42	0,20	5/16"	0,79	6,40	1,00	17,50	4,91	1,53	0,99	1,55
2 1/2"	6,35	6,99	8,76	0,20	3/8"	0,95	5,34	1,00	20,00	5,73	1,50	0,99	1,63
		4,57	5,80	0,25	3/16"	0,48	13,34	0,98	23,00	4,91	1,98	1,24	1,75
		6,10	7,67	0,25	1/4"	0,64	10,00	1,00	29,00	6,40	1,96	1,24	1,83
		7,44	9,48	0,25	5/16"	0,79	8,00	1,00	35,00	7,87	1,93	1,24	1,88
		8,78	11,16	0,25	3/8"	0,95	6,67	1,00	41,00	9,35	1,91	1,22	1,93
3"	7,62	5,52	7,03	0,30	3/16"	0,48	16,01	0,91	40,00	7,21	2,39	1,50	2,08
		7,29	9,29	0,30	1/4"	0,64	12,00	1,00	50,00	9,50	2,36	1,50	2,13
		9,07	11,48	0,30	5/16"	0,79	9,60	1,00	62,00	11,60	2,34	1,50	2,21
		10,71	13,61	0,30	3/8"	0,95	8,00	1,00	75,00	13,60	2,31	1,47	2,26
		12,34	15,67	0,30	7/16"	1,11	6,86	1,00	83,00	15,60	2,31	1,47	2,31
		14,00	17,74	0,30	1/2"	1,27	6,00	1,00	91,00	18,00	2,29	1,47	2,36

Flambagem Lateral com Torção (desconsiderando parafusos)

$$M_{cr} = \frac{0,58 \cdot E \cdot b^4 \cdot t \cdot C_b}{L_b^2} \left[\sqrt{1 + 0,88 \left(\frac{L_b \cdot t}{b^2} \right)} - 1 \right]$$

$$M_{cr} = \frac{0,58 \cdot 20000 \cdot 7,62^4 \cdot 0,635 \cdot 1,14}{200^2} \left[\sqrt{1 + 0,88 \left(\frac{200 \cdot 0,635}{7,62^2} \right)} - 1 \right] = 1362,3 \text{ kN.cm}$$

$$W \cdot F_y = 9,50 \cdot 25 = 237,5 \text{ kN.cm} < 1362,3$$

$$M_{Rd} = \frac{\left(1,92 - 1,17 \sqrt{\frac{W \cdot F_y}{M_{cr}}} \right) \cdot W \cdot F_y}{1,1} \qquad M_{Rd} = \frac{\left(1,92 - 1,17 \sqrt{\frac{237,5}{1362,3}} \right) \cdot 237,5}{1,1}$$

$$M_{Rd} = \frac{1,43 \cdot 237,5}{1,1} = 309,07 \text{ kN.cm} > 273 \text{ kN.cm OK!}$$

I.5 Generalidades

I.5.1 Estruturas de pisos com pouca massa e amortecimento reduzido podem estar sujeitas a vibrações que causam desconforto durante as atividades humanas normais ou que causam prejuízo ao funcionamento de equipamentos. Este Anexo trata dos princípios básicos necessários para a realização de análise dinâmica de estruturas de pisos que suportam laje de concreto, submetidas a ações induzidas por pessoas cujas respostas possam ser consideradas estados-limite de serviço. Excitações que possam conduzir a estados-limite últimos não são tratadas neste Anexo.

I.5.2 As formulações apresentadas em I.2 referem-se a um método simplificado para avaliação da resposta de pisos com geometria regular e carregamento que possa ser considerado uniformemente distribuído em relação à excitação provocada pelo caminhar de pessoas.

I.5.3 Em pisos com geometria e carregamentos mais complexos ou sujeitos a outros tipos de excitação, como, por exemplo, excitações rítmicas oriundas de atividades aeróbicas, é necessária uma avaliação mais precisa, conforme apresentada em I.3.

I.5.4 Em I.4 são apresentados critérios de aceitabilidade da resposta da estrutura em relação ao conforto dos usuários, em função da ocupação do piso.

I.5.5 Para esse estado-limite de serviço, devem-se utilizar as combinações frequentes de serviço, dadas em 4.8.7.3.3. Porém, no caso específico de análise de vibrações decorrentes do caminhar de pessoas, devem-se considerar os fatores de redução ψ_1 e ψ_2 iguais a 0,1. Em alguns casos, entretanto, esses valores devem ser considerados iguais a zero, como no caso de garagens, escadas, passarelas e áreas de circulação de público de centros comerciais (*mall*), de aeroportos, rodoviárias e assemelhados.

I.5.6 Para evitar que a estrutura de piso entre em ressonância com o primeiro harmônico do caminhar de pessoas, recomenda-se que sua frequência natural não seja inferior a 3 Hz. Em pisos com frequências naturais inferiores a 3 Hz, a critério do responsável técnico pelo projeto, deve-se demonstrar, por meio de uma avaliação precisa (ver I.3), que a resposta da estrutura do piso, mesmo em ressonância com o primeiro harmônico do caminhar de pessoas, não ultrapasse os valores apresentados em I.4.

I.5.7 Para os efeitos deste Anexo, os elementos da estrutura (laje, vigas e pilares) podem ser considerados contínuos nos apoios, mesmo que tenham sido calculados como simplesmente apoiados. Além disso, as vigas que apoiam laje podem ser consideradas mistas de aço e concreto, mesmo que tenham sido calculadas como não mistas, com base no valor dinâmico do módulo de elasticidade do concreto. Simplificadamente, esse valor pode ser considerado igual a 38 GPa, para concreto de densidade normal, e igual a 22 GPa, para concreto de baixa densidade. Vigas de borda conectadas à fachada podem ser consideradas verticalmente apoiadas ao longo de seu comprimento.

I.6.2 Em pisos com geometria regular e carregamento uniformemente distribuído, compreendendo laje sobre vigas secundárias, suportadas por vigas principais, dois modos de vibração devem ser avaliados: o modo das vigas secundárias e o modo das vigas principais, conforme ilustrados na Figura I.1. No primeiro modo, formam-se linhas nodais sobre as vigas principais, de forma que as vigas secundárias vibrem como simplesmente apoiadas. No segundo modo, as vigas principais vibram simplesmente apoiadas nos pilares e as vigas secundárias vibram como se fossem engastadas nos apoios. Para cada modo, a frequência fundamental f_0 (em hertz) pode ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{\delta}}$$

onde

δ é o deslocamento vertical total máximo do piso, expresso em milímetros (mm), calculado conforme Tabela I.1.

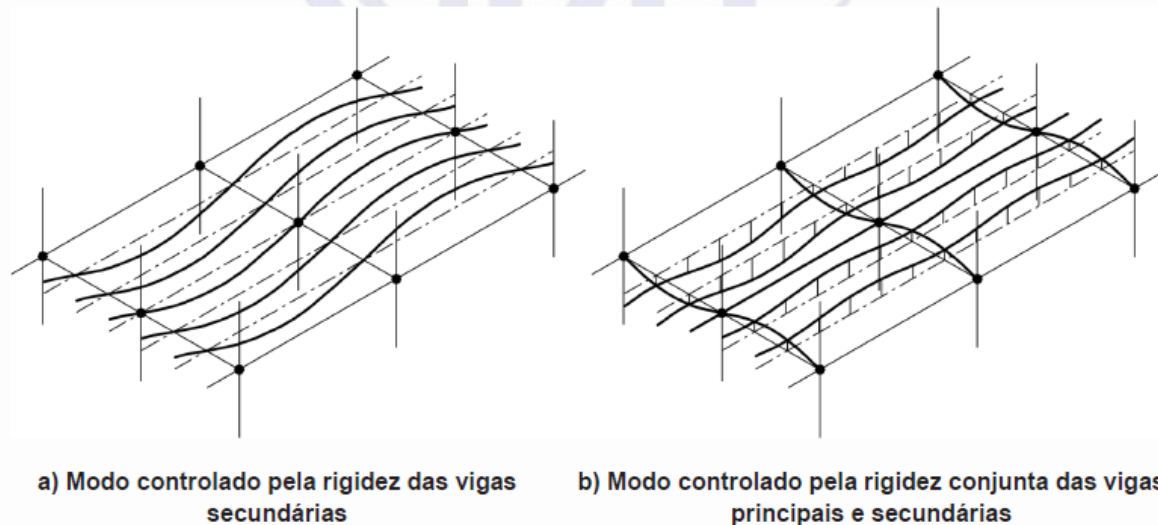


Figura I.1 – Modos de vibração do piso

Avaliação Simplificada (Vigas não Mistas)

$f_n > 4\text{Hz}$ (Escritórios e Residências)

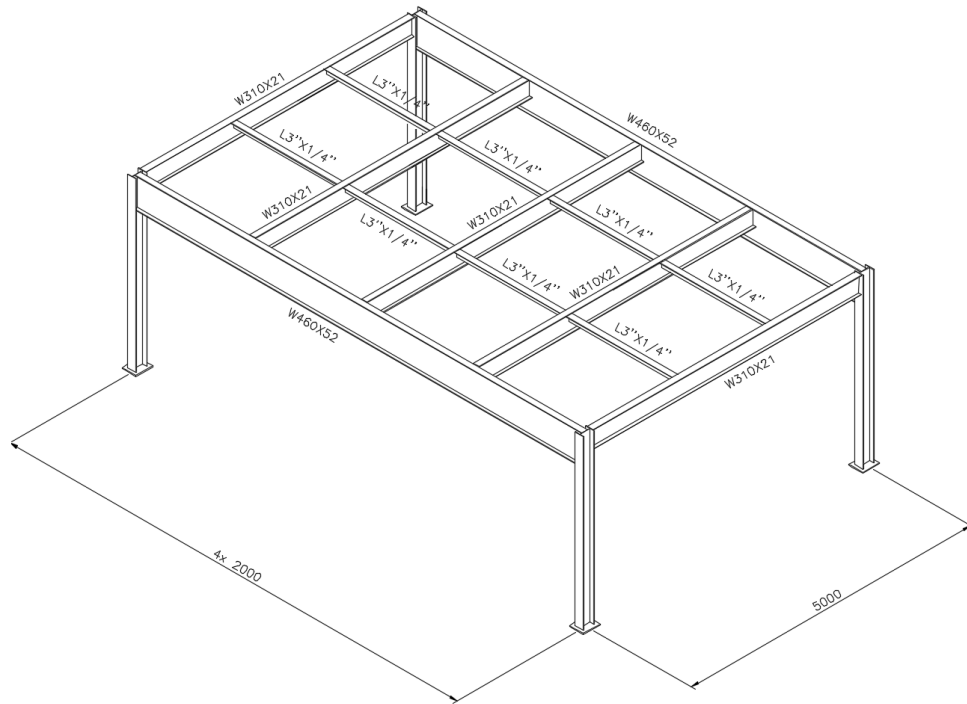
$f_n > 6\text{Hz}$ (Academias)

$f_n > 8\text{Hz}$ (Danceterias)

Este método é suficiente para os casos mais comuns. Métodos mais precisos serão tratados em aulas posteriores

Exercício 8

Verificar as vigas secundárias e primárias quanto às vibrações devido ao caminhar humano



Peso próprio da estrutura metálica $\sim 25\text{kg/m}^2$

$$m = (230 + 100 + 100) + 0,1 \cdot 250 + 25 = 480\text{kg/m}^2 \cdot 2\text{m} = 960\text{kg/m} \quad \text{Vigas Secundárias}$$

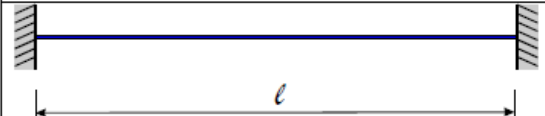
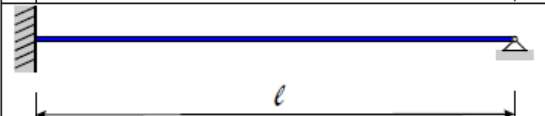
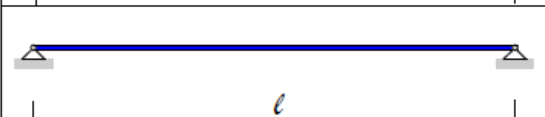
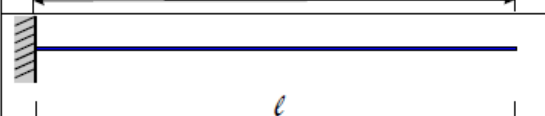
$$m = (230 + 100 + 100) + 0,1 \cdot 250 + 25 = 480\text{kg/m}^2 \cdot 2,5\text{m} = 1200\text{kg/m} \quad \text{Vigas Primárias}$$

A.2. Frequência natural e massa modal para viga

A primeira frequência natural de uma viga pode ser determinada, em função das condições de apoio nas extremidades, tendo por base as fórmulas apresentadas na Tabela 4, em que as seguintes quantidades representam:

- E o Módulo de Young [N/m²]
- I o momento de inércia da secção transversal [m⁴]
- μ a massa distribuída [kg/m]
- ℓ o comprimento da viga

Tabela 4: Determinação da primeira frequência natural de uma viga

Condições de apoio	Frequência natural	Massa modal
	$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.37\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,41 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.2\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,45 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.49 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,5 \mu l$
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.24\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,64 \mu l$

Modo A – Vigas Secundárias

$$F_n = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3.E.I}{0,49.\mu.L^4}} \rightarrow \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3.(2000000000000).0,00003776}{0,49.960.5^4}} = 5,59Hz$$

Método prático

$$\delta = \frac{5.q.L^4}{384.E.I} \rightarrow \frac{5.0,0960.500^4}{384.20000.3776} = 1,034cm$$

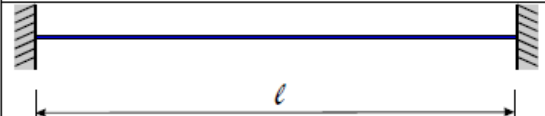
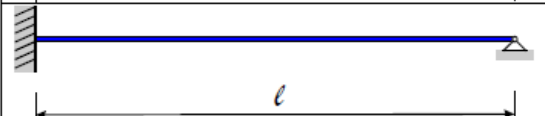
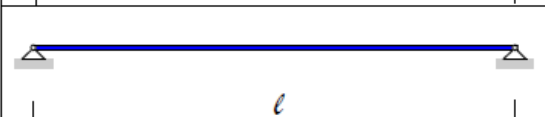
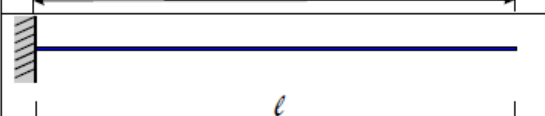
$$f_n = \frac{18}{\sqrt{\delta}} \rightarrow \frac{18}{\sqrt{10,34}} = 5,59Hz > 4Hz \text{ OK}$$

A.2. Frequência natural e massa modal para viga

A primeira frequência natural de uma viga pode ser determinada, em função das condições de apoio nas extremidades, tendo por base as fórmulas apresentadas na Tabela 4, em que as seguintes quantidades representam:

- E o Módulo de Young [N/m²]
- I o momento de inércia da secção transversal [m⁴]
- μ a massa distribuída [kg/m]
- ℓ o comprimento da viga

Tabela 4: Determinação da primeira frequência natural de uma viga

Condições de apoio	Frequência natural	Massa modal
	$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,37\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,41 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,2\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,45 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,49 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,5 \mu l$
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,24\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,64 \mu l$

Modo B – Vigas Secundárias

$$F_n = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3.E.I}{0,37.\mu.L^4}} \rightarrow \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3.(2000000000000).0,00003776}{0,37.960.5^4}} = 12,86Hz$$

Método prático

$$\delta = \frac{q.L^4}{384.E.I} \rightarrow \frac{0,0960.500^4}{384.20000.3776} = 0,2069cm$$

$$f_n = \frac{18}{\sqrt{\delta}} \rightarrow \frac{18}{\sqrt{2,069}} = 12,51Hz > 4Hz OK$$

Modo B – Vigas Primárias

$$F_n = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3.E.I}{0,49.\mu.L^4}} \rightarrow \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3.(2000000000000).0,00021370}{0,49.1200.8^4}} = 4,65Hz$$

$$\delta = \frac{5.q.L^4}{384.E.I} \rightarrow \frac{5.0,1200.800^4}{384.20000.21370} = 1,497cm$$

$$f_n = \frac{18}{\sqrt{\delta}} \rightarrow \frac{18}{\sqrt{14,97}} = 4,65Hz > 4Hz OK$$