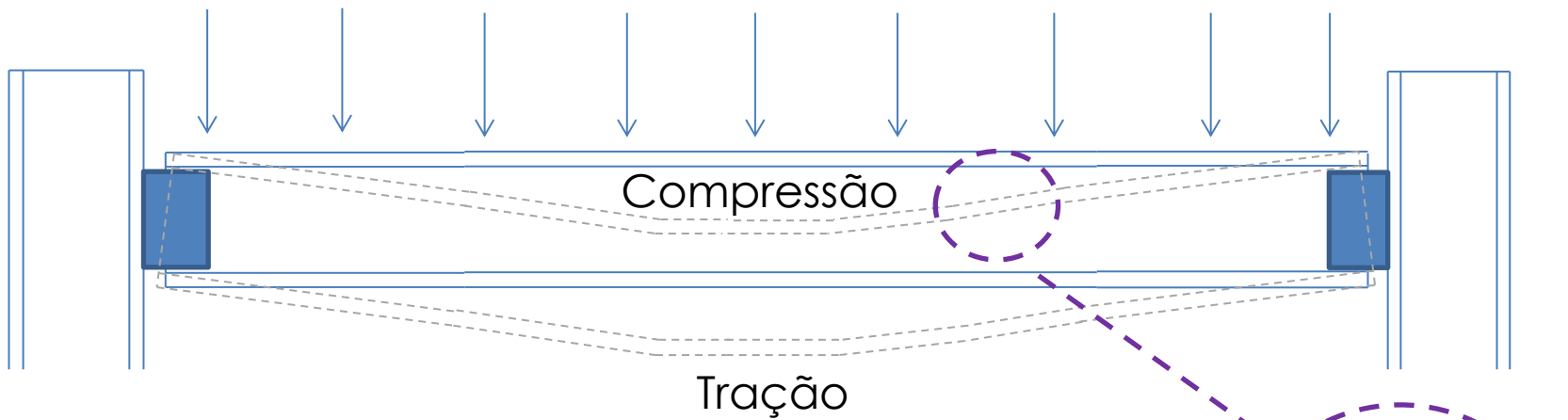


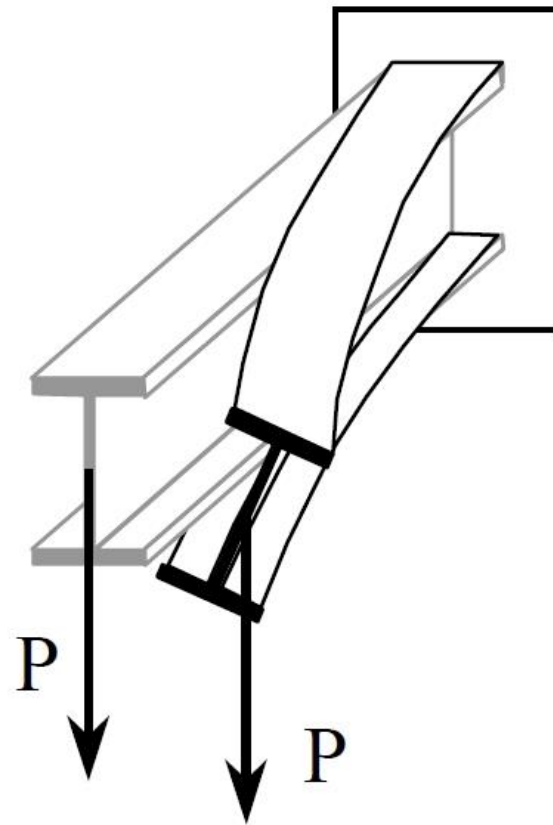
FLECHAS EM VIGAS E BARRAS FLEXIONADAS

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas



Barras Flexionadas:

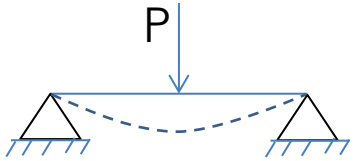
Flambagem lateral com Torção



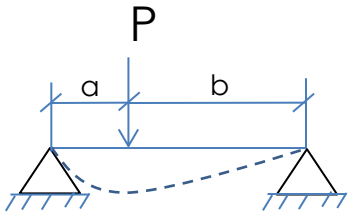
Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Barras Flexionadas:

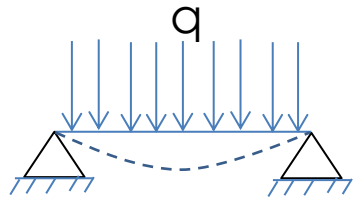
Fórmulas de Flexão e flechas em barras simples



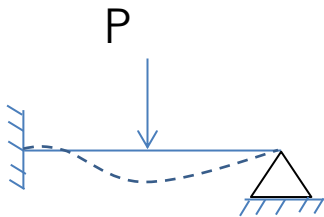
$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4} \quad y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$



$$M_{max} = \frac{P \cdot a \cdot b}{L} \quad y = \frac{P \cdot a^2 \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot I}$$



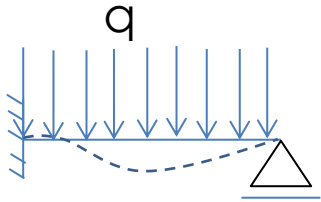
$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$



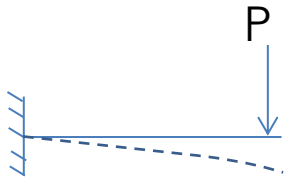
$$M_{max} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{16} \quad y = \frac{7 \cdot P \cdot L^3}{768 \cdot E \cdot I}$$

Barras Flexionadas:

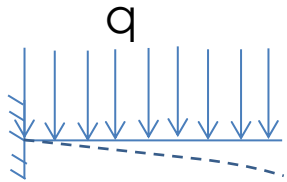
Fórmulas de Flexão e flechas em barras simples



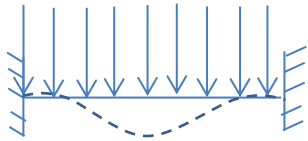
$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad y = \frac{q \cdot L^4}{185 \cdot E \cdot I}$$



$$M_{max} = P \cdot L \quad y = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$



$$M_{max} = \frac{P \cdot L^2}{2} \quad y = \frac{P \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot I}$$



$$M_{max} = \frac{P \cdot L^2}{12} \quad y = \frac{q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Barras Flexionadas:

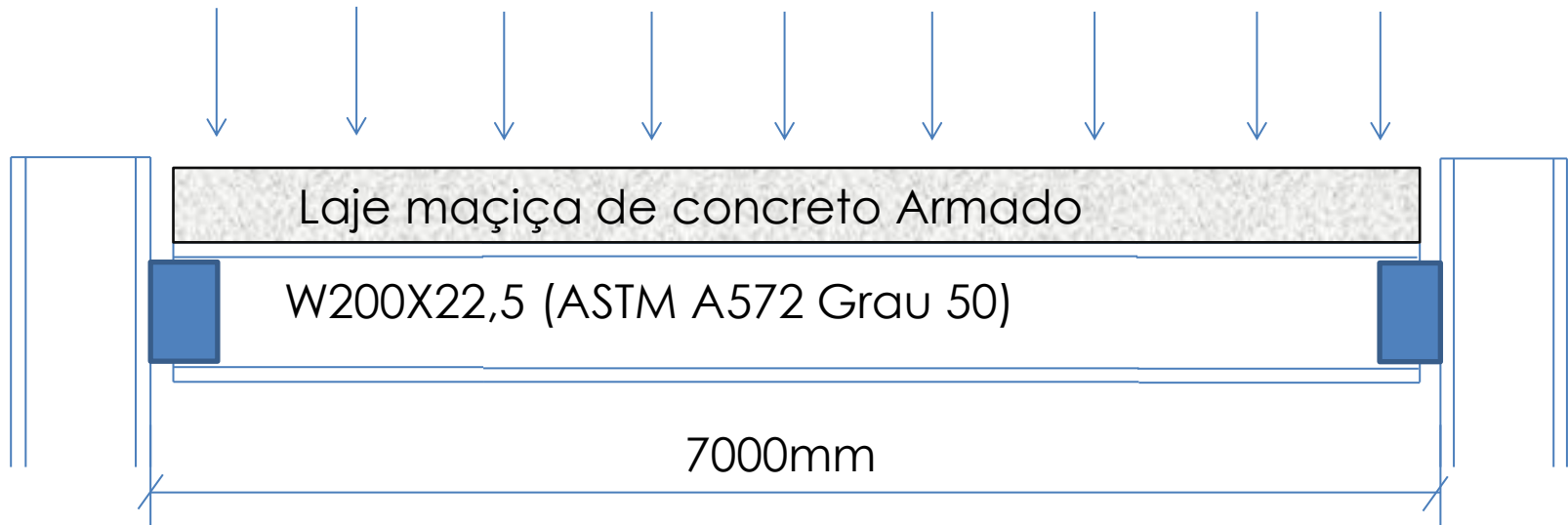
Tabela C.1 — Deslocamentos máximos

Descrição	δ^a
- Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{cd}$
- Terças de cobertura ^{g)}	$L/180^e$
	$L/120^f$
- Vigas de cobertura ^{g)}	$L/250^h$
- Vigas de piso	$L/350^h$
- Vigas que suportam pilares	$L/500^h$
Vigas de rolamento: ^{j)}	
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN	$L/600^i$
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas	$L/800^i$
- Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN	$L/1000^i$
- Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas	$L/400$
- Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas	$L/600$
Galpões em geral e edifícios 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	$H/400^{kl}$
Edifícios de dois ou mais pavimentos:	
- Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400$
- Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$h/500^m$
Lajes mistas	Ver Anexo Q

Barras Flexionadas:

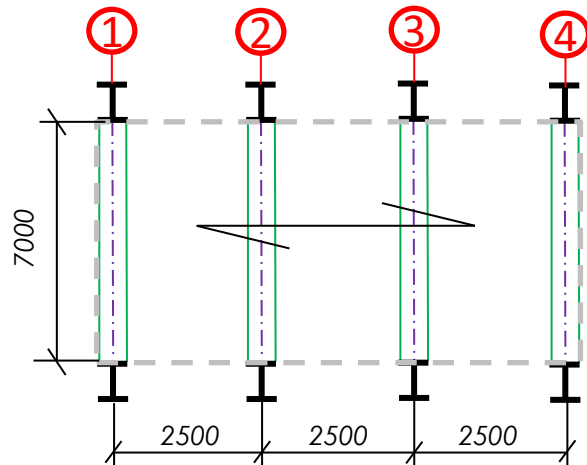
- ^a L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, H é a altura total do pilar (distância do topo à base) ou a distância do nível da viga de rolamento à base, h é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre centros das vigas e a base no caso do primeiro andar).
- ^b Deslocamento paralelo ao plano do fechamento (entre linhas de tirantes, caso estes existam).
- ^c Deslocamento perpendicular ao plano do fechamento.
- ^d Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento (vento no fechamento) com seu valor característico.
- ^e Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.
- ^f Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico.
- ^g Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade.
- ^h Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.
- ⁱ Valor não majorado pelo coeficiente de impacto.
- ^j Considerar combinações raras de serviço.
- ^k No caso de pontes rolantes siderúrgicas, o deslocamento também não pode ser superior a 50 mm.
- ^l O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm.
- ^m Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.

Barras Flexionadas:



A viga da imagem acima suporta uma laje de concreto maciça, de espessura 15cm.

Considerando que a edificação será usada para escritórios comerciais, e que existe uma viga idêntica à da figura a cada 2,5m, Verifique se a viga pode ser considerada aprovada quanto ao Estado Limite de Serviço



Barras Flexionadas:

Resolução:

Passo 01: Determinar Cargas Atuantes

Permanentes (PP)

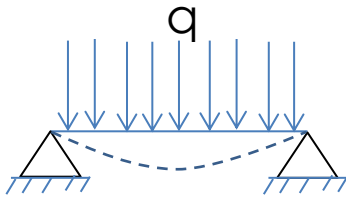
- Peso próprio da laje: $2500\text{kg/m}^3 \times 0,15\text{m} = 375 \text{ kg/m}^2 = 3,75\text{kN/m}^2$
 - Linearizando a Carga: $3,75 \text{ kN/m}^2 \times 2,5\text{m} = 9,375\text{kN/m}$
- Peso próprio da viga: $22,5\text{kg/m} = 0,225 \text{ kN/m}$, já linearizada.
 - TOTAL _____ 9,6 kN/m

Variáveis (SC)

- Sobrecargas em escritórios (NBR6120, item 14 da tabela 2): $SC = 2\text{kN/m}^2$
 - Linearizando a Carga: $2 \text{ kN/m}^2 \times 2,5\text{m} = 5\text{kN/m}$
 - TOTAL _____ 5kN/m

Barras Flexionadas:

DCL:



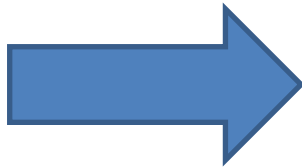
$$y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

ATENÇÃO PARA AS UNIDADES:

- L=cm
- E=kN/cm²
- I = cm⁴
- q=kN/cm

Combinações para E.L.S:

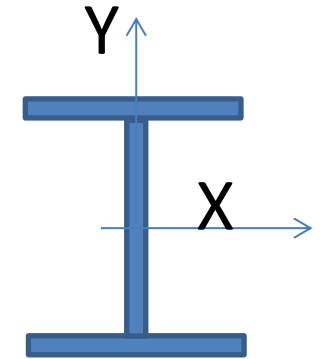
- 1) PP+SC
- ~~2) PP+V~~
- ~~3) PP+SC+V~~



$$PP + SC = 9,6 + 5,0 = 14,6 \text{ kN/m}$$

Convertendo para kN/cm:

$$14,6 / 100 = \mathbf{0,146 \text{ kN/cm}}$$



Cálculo da flecha máxima:

$$y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x}$$

$$y = \frac{5 \cdot 0,146 \cdot 700^4}{384 \cdot 20500 \cdot 2029}$$

$$y = \frac{5 \cdot 0,146 \cdot 700^4}{384 \cdot 20500 \cdot 2029} = 10,97 \text{ cm}$$

Flecha Máxima Admissível: Vigas de Piso = $L/350 = 700/350 = 2 \text{ cm}$ (**PERFIL NÃO ATENDE**)

Barras Flexionadas:

À partir da expressão da flecha, podemos encontrar o Momento de Inércia mínimo para a barra, uma vez que a flecha limite sempre é conhecida

$$y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad I = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot y}$$

No caso: $I_{x,\text{mín}} = \frac{5.0,146.700^4}{384.20500.2} \quad I_{x,\text{mín}} = \frac{5.0,146.700^4}{384.20500.2} = 11132 \text{ cm}^4$

O perfil mais leve que atende à inércia mínima na Tabela de Bitolas da Gerdau é o W410X38,8, com 12777 cm⁴

Barras Flexionadas:

Supondo que haja uma limitação na dimensão do perfil no exemplo anterior: A altura máxima do perfil não pode ultrapassar 260mm por questões arquitetônicas.

Solução Possível #01: Selecionar um perfil com $h < 260$ e inércia adequada

O perfil mais leve que se encontra com essas condições é o W250X73(H). Representa um aumento de 88% no peso de aço da estrutura.

Solução Possível #02: Diminuir o vão livre adicionando um pilar no centro.

No caso: flecha máx = $L/350 = 350/350 = 1\text{cm}$

No caso:
$$I_{x,\text{mín}} = \frac{5.0,146.350^4}{384.20500.1} = 1392\text{cm}^4$$

Nessas condições o W250X17,9 Atenderia. Com a penalidade de adicionar um pilar, e fabricar novas bases de concreto.

Barras Flexionadas:

Solução Possível #03: Diminuir a distância entre pilares:

Nesse caso selecionaremos o perfil desejado, que tenha maior inércia e menor peso dentro da altura desejada, e calcularemos a distância entre vigas.

PERFIL DESEJADO: W250X17,9. $I_x = 2291 \text{ cm}^4$

$$2291 = \frac{5 \cdot q \cdot 700^4}{384 \cdot 20500 \cdot 2} \quad q = \frac{2 \cdot 2291 \cdot 20500 \cdot 384}{5 \cdot 700^4} = \frac{0,03 \text{ kN}}{\text{cm}} = 3 \text{ kN/m}$$

Sabemos que a carga distribuída superficialmente sobre a viga, excluindo-se o peso próprio dela mesma é:

PP Laje = $3,75 \text{ kN/m}^2$
SC Escri. = $2,00 \text{ kN/m}^2$

$$\text{Portanto: } Qa \cdot D + PP_{\text{viga}} = q \quad d = \frac{0,277}{5,75} \quad d = 0,483 \text{ m}$$
$$5,75 \cdot d + 0,225 = 3$$

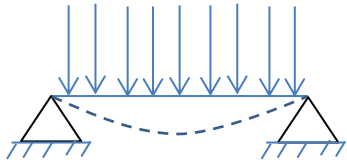
TOTAL = $5,75 \text{ kN/m}^2$

Para que o perfil W250X17,9 seja aprovado em ELS para o vão de 7m, deve haver uma barra a cada 483mm. Normalmente esse resultado inviabilizaria a solução.

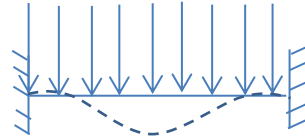
Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Barras Flexionadas:

Solução Possível #04: Engastar os extremos:



$$y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$



$$y = \frac{q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

A flecha em uma barra bi articulada é 5 vezes maior do que em uma barra bi engastada.

Logo a inércia necessária para uma viga bi-engastada é 5x menor (0,20) que a necessária para uma viga bi-articulada

No caso:
$$I_{x,\min} = \frac{0,146 \cdot 700^4}{384 \cdot 20500 \cdot 2} = 2226 \text{ cm}^4$$

Nessa condição a W250X17,9 passaria (PARA ELS) no vão de 7m.

Consequência disso é a transferência de momentos fletores para os pilares, provavelmente surgindo a necessidade de torná-los mais robustos e a necessidade da elaboração de ligações mais complexas para garantir grau de engastamento e a flecha calculada..

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:

Flambagem Local da Alma (FLA)

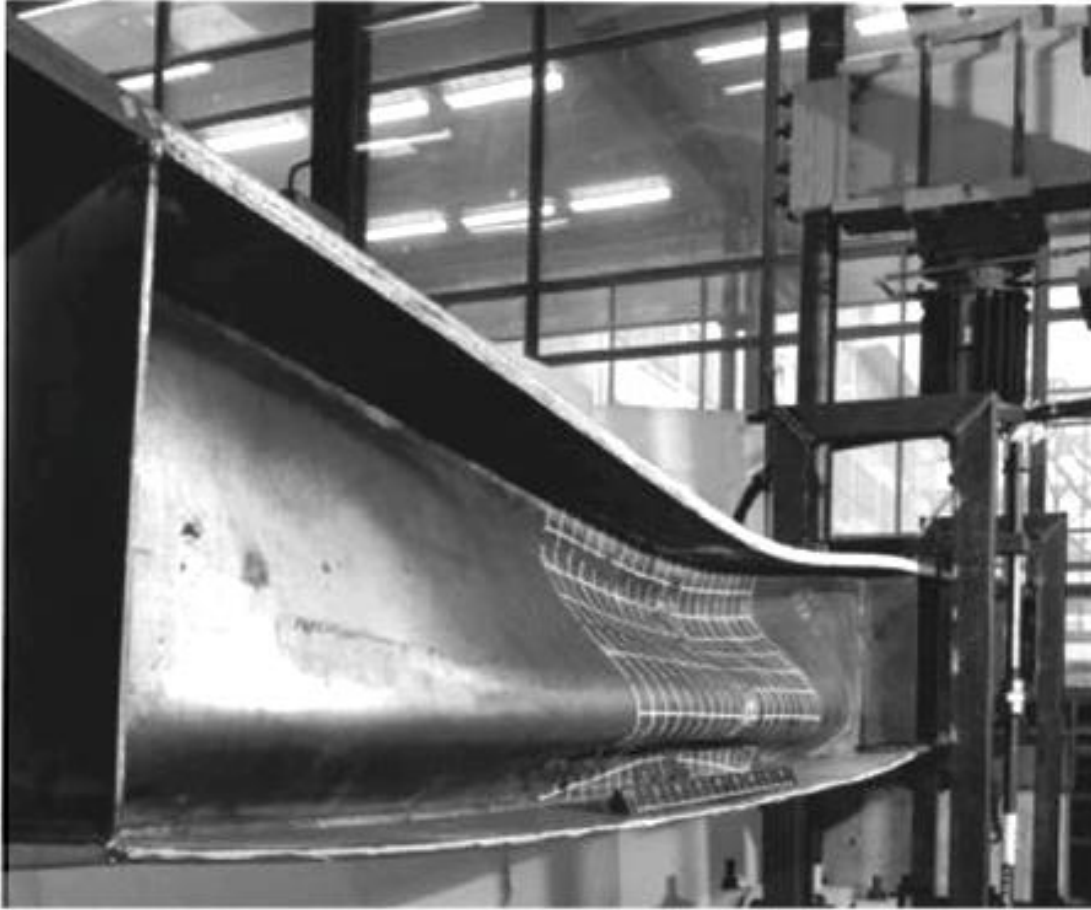


Figure 2. Vertical web buckling.

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:

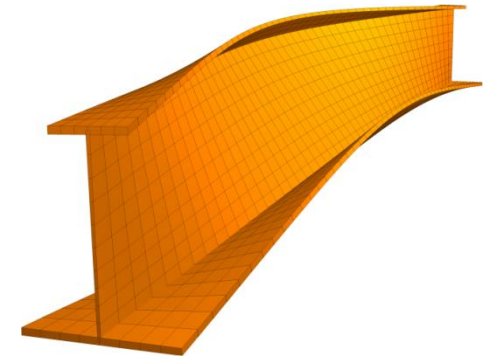
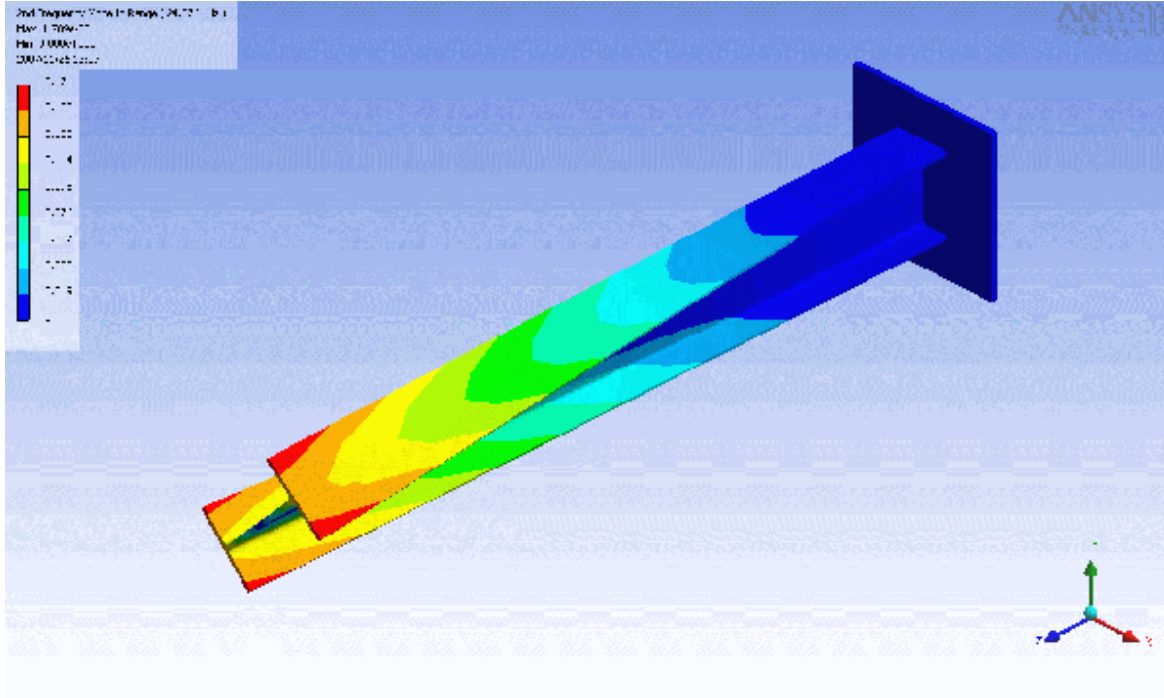
Flambagem Local da Mesa (FLM)



Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:

Flambagem Lateral com torção (FLT)



ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:

Tabela G.1 — Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fleçadas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	b/t Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fleçadas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver Nota 9)	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_c$ $\leq f_y W_t$ Ver Nota 5	Ver Nota 2	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 2
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_c$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	b/t Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{h_c}{h_y} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \lambda_r$ $\left(0,54 \frac{M_{pe}}{M_t} - 0,09\right)^2 \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fleçadas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver Nota 3	$(f_y - \sigma_r)W$	Ver Nota 6	b/t Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA Ver Nota 3	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fleçadas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_s E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pe}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_s} \sqrt{JA}$
Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fleçadas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados	FLT Ver Nota 7	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	$\frac{2,00 C_s E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pe}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_s} \sqrt{JA}$
	FLM	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	b/t Ver Nota 8	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	Ver Nota 10	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Para cada estado Limite:

Passo 1: Calcular λ

Passo 2: Comparar λ com λ_p e λ_r

Para FLT:

$$\begin{aligned}
 \text{a) } M_{Rd} &= \frac{M_{pe}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p & M_{pl} &= Z \cdot F_y \\
 \text{b) } M_{Rd} &= \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pe} - (M_{pe} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pe}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\
 \text{c) } M_{Rd} &= \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pe}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r
 \end{aligned}$$

Para FLM e FLA:

$$\begin{aligned}
 \text{a) } M_{Rd} &= \frac{M_{pe}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \\
 \text{b) } M_{Rd} &= \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pe} - (M_{pe} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\
 \text{c) } M_{Rd} &= \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \text{ (não aplicável à FLA - ver Anexo H)}
 \end{aligned}$$

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:

O Momento Fletor Resistente de cálculo é o menor dos resultados:

- Mrd do FLM
- Mrd do FLA
- Mrd do FLT

O valor de Mrd não pode ser superior a $1,5 \cdot W \cdot F_y / 1,1$

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:

As Notas relacionadas à Tabela G.1 são as seguintes:

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

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

onde:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_c}{E J}$$

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

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

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

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

onde:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_c}{E J}$$

$$\beta_2 = 5,2 \beta_1 \beta_3 + 1$$

$$\beta_3 = 0,45 \left(d - \frac{t_{fs} + t_{fb}}{2} \right) \left(\frac{\alpha_y - 1}{\alpha_y + 1} \right), \text{ com } \alpha_y \text{ conforme Nota 9 a seguir}$$

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

NA PRÁTICA SEMPRE BUSCAREMOS SEÇÕES COMPACTAS OU, NO MÁXIMO SEMI-COMPACTAS, SE NÃO TIVER OUTRO JEITO.

SEÇÕES ESBELTAS EM ÚLTIMO CASO. PARA O CASO DE ALMA ESBELTA, ADOTAR O ANEXO H DA NBR8800/08

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:

- 3) O estado-limite FLA aplica-se só 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.
- 4) W_{ef} é o módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem 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} , dada por F.3.2, com σ igual a f_y . Em alma comprimida de seção U fletida em relação ao eixo de menor momento de inércia, $b = h$, $t = t_w$ e $b_{ef} = h_{ef}$.
- 5) A tensão residual de compressão nas mesas, σ_r , deve ser tomada igual a 30 % da resistência ao escoamento do aço utilizado.

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

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

com k_c conforme F.2.

- 7) O estado-limite FLT só é aplicável quando o eixo de flexão for o de maior momento de inércia.
- 8) 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 e para perfis caixão, a distância livre entre almas).

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:

9) Para essas seções, devem ser obedecidas as seguintes limitações:

a) $\frac{1}{9} \leq \alpha_y \leq 9$

com

$$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}}$$

b) a soma das áreas da menor mesa e da alma deve ser superior à área da maior mesa.

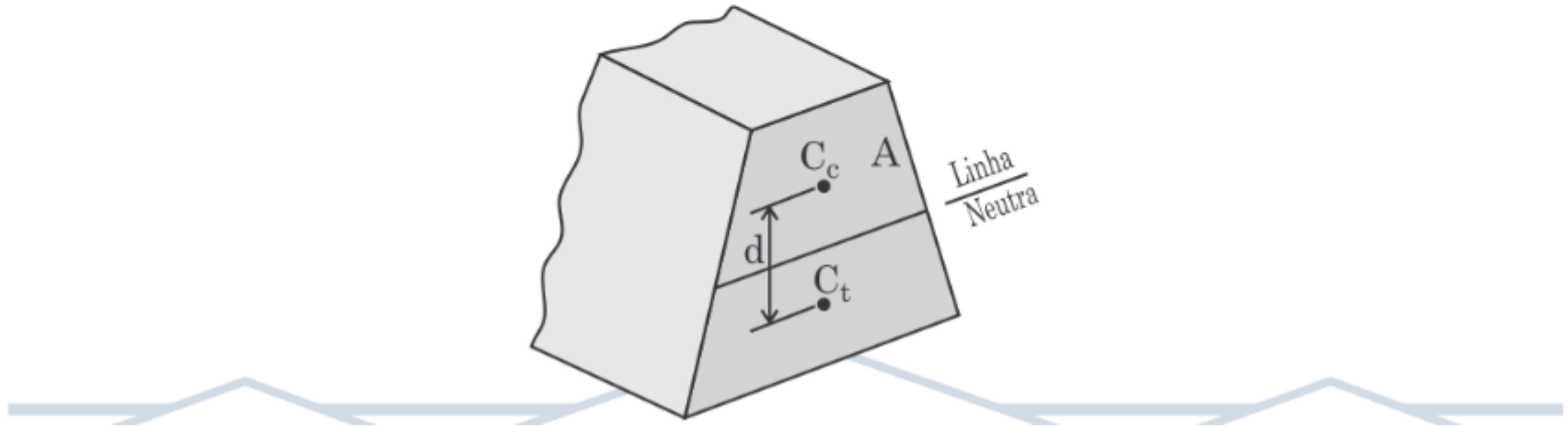
10) Para seções-caixão: $\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Para seções tubulares retangulares: $\lambda_p = 2,42 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:

$$Z = \frac{1}{2}Ad$$

Onde A é a área da seção transversal e d é a distância entre o centro geométrico da região comprimida e o centro geométrico da região tracionada. A Figura 4.11 ilustra essa ideia para um momento positivo.



Exemplo:

No caso do exemplo anterior tínhamos:

Perfil W250X17,9 (ASTM A572 Grau 50) no vão de 7 metros.

Determinação das cargas para verificação de ELU.

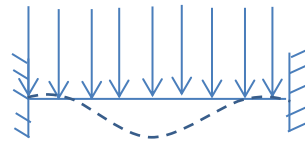
Combinações para E.L.U:

1) 1,4PP + 1,5 SC

~~2) PP+1,4V~~

~~3) 1,4PP+1,5SC+0,84V~~

$$q = 1,4 \cdot 9,6 + 1,5 \cdot 5,0 = 20,94 \text{ kN/m}$$



$$M_{sd} = \frac{q \cdot L^2}{12}$$

$$M_{sd} = \frac{0,2094 \cdot 700^2}{12}$$

$$M_{sd} = 8550,05 \text{ kN.cm}$$

Exemplo:

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r _t cm	I _t cm⁴	ESBELTEZ	
				t _l mm	t _t mm				I _x cm⁴	W _x cm³	r _x cm	Z _x cm³	I _y cm⁴	W _y cm³	r _y cm	Z _y cm³			MESA - λ _t b / 2t _t	ALMA - λ _w d' / t _l
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,9	2,63	6,18	6,38	27,42
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,10	76,3	3,54	7,65	7,92	29,34
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,0	3,60	12,59	6,57	26,50
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,0	4,50	14,51	8,09	25,90
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,7	4,53	23,19	7,03	21,86
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4543	447,6	8,81	495,3	1535	151,2	5,12	229,5	5,58	22,01	9,23	22,36
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5298	514,4	8,90	572,5	1784	174,9	5,16	265,8	5,61	33,34	8,10	19,85
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4977	488,0	8,55	551,3	1673	161,7	4,96	248,6	5,57	31,93	9,16	14,28
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6140	584,8	8,99	655,9	2041	199,1	5,18	303,0	5,64	47,69	7,22	17,32
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7660	709,2	9,17	803,2	2537	246,3	5,28	374,5	5,70	81,66	5,92	15,80
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9498	855,7	9,26	984,2	3139	300,4	5,32	458,7	5,77	142,19	5,07	12,06
W 200 x 100,0 (H)*	100,0	229	210	14,5	23,7	182	158	127,1	11355	991,7	9,45	1152,2	3664	349,0	5,37	533,4	5,80	212,61	4,43	10,87
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2291	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,8	2,48	2,54	9,53	45,92
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2939	231,4	10,09	267,7	123	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,39	37,97
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,4	2,58	7,06	6,07	36,10
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,9	2,62	10,34	5,10	34,38
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	99,7	3,86	10,44	8,02	36,03
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6057	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	6,56	33,27

Verificação da Esbeltez da Mesa

$$\lambda = \frac{b}{2t_f} = \frac{101}{2 \cdot 5,3} = 9,53 \quad \text{Comparar com} \quad \lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 9,26$$

Exemplo:

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r _t cm	I _t cm⁴	ESBELTEZ	
				t _l mm	t _t mm				I _x cm⁴	W _x cm³	r _x cm	Z _x cm³	I _y cm⁴	W _y cm³	r _y cm	Z _y cm³			MESA - λ _t b / 2t _t	ALMA - λ _w d' / t _w
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,9	2,63	6,18	6,38	27,42
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,10	76,3	3,54	7,65	7,92	29,34
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,0	3,60	12,59	6,57	26,50
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,0	4,50	14,51	8,09	25,90
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,7	4,53	23,19	7,03	21,86
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4543	447,6	8,81	495,3	1535	151,2	5,12	229,5	5,58	22,01	9,23	22,36
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5298	514,4	8,90	572,5	1784	174,9	5,16	265,8	5,61	33,34	8,10	19,85
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4977	488,0	8,55	551,3	1673	161,7	4,96	248,6	5,57	31,93	9,16	14,28
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6140	584,8	8,99	655,9	2041	199,1	5,18	303,0	5,64	47,69	7,22	17,32
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7660	709,2	9,17	803,2	2537	246,3	5,28	374,5	5,70	81,66	5,92	15,80
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9498	855,7	9,26	984,2	3139	300,4	5,32	458,7	5,77	142,19	5,07	12,06
W 200 x 100,0 (H)*	100,0	229	210	14,5	23,7	182	158	127,1	11355	991,7	9,45	1152,2	3664	349,0	5,37	533,4	5,80	212,61	4,43	10,87
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2291	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,8	2,48	2,54	9,53	45,92
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2939	231,4	10,09	267,7	123	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,39	37,97
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,4	2,58	7,06	6,07	36,10
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,9	2,62	10,34	5,10	34,38
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	99,7	3,86	10,44	8,02	36,03
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6057	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	6,56	33,27

Verificação da Esbeltez da Mesa: Como a mesa não é compacta, comparar com

$$\lambda = \frac{b}{2t_f} = \frac{101}{2.5,3} = 9,53 \quad \text{Comparar com} \quad \lambda_r = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{E}{(F_y - \sigma)}} = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{20500}{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5)}} = 24,18$$

A SEÇÃO É SEMI – COMPACTA PARA O ESTADO LIMITE FLM

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Exemplo:

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 _x cm	I _x cm ⁴	ESBELTEZ	
				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			MESA - λ _z b _f /2t _f	ALMA - λ _z d'/t _w
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,9	2,63	6,18	6,38	27,42
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,10	76,3	3,54	7,65	7,92	29,34
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,0	3,60	12,59	6,57	26,50
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,0	4,50	14,51	8,09	25,90
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,7	4,53	23,19	7,03	21,86
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4543	447,6	8,81	495,3	1535	151,2	5,12	229,5	5,58	22,01	9,23	22,36
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5298	514,4	8,90	572,5	1784	174,9	5,16	265,8	5,61	33,34	8,10	19,85
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4977	488,0	8,55	551,3	1673	161,7	4,96	248,6	5,57	31,93	9,16	14,28
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6140	584,8	8,99	655,9	2041	199,1	5,18	303,0	5,64	47,69	7,22	17,32
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7660	709,2	9,17	803,2	2537	246,3	5,28	374,5	5,70	81,66	5,92	15,80
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9498	855,7	9,26	984,2	3139	300,4	5,32	458,7	5,77	142,19	5,07	12,06
W 200 x 100,0 (H)*	100,0	229	210	14,5	23,7	182	158	127,1	11355	991,7	9,45	1152,2	3664	349,0	5,37	533,4	5,80	212,61	4,43	10,87
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2291	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,8	2,48	2,54	9,53	45,92
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2939	231,4	10,09	267,7	123	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,39	37,97
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,4	2,58	7,06	6,07	36,10
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,9	2,62	10,34	5,10	34,38
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	99,7	3,86	10,44	8,02	36,03
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6057	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	6,56	33,27

Verificação da Esbeltez da Alma

$$\lambda = \frac{d'}{tw} = \frac{220}{4,8} = 45,9 \quad \text{Comparar com} \quad \lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 91,65$$

SEÇÃO COMPACTA QUANTO À ALMA

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Exemplo:

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 _t cm	I _t cm ⁴	ESBELTEZ	
				t _f mm	t _w 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			MESA - λ_y b _f /2t _f	ALMA - λ_w d'/t _w
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,9	2,63	6,18	6,38	27,42
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,10	76,3	3,54	7,65	7,92	29,34
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,0	3,60	12,59	6,57	26,50
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,0	4,50	14,51	8,09	25,90
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,7	4,53	23,19	7,03	21,86
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4543	447,6	8,81	495,3	1535	151,2	5,12	229,5	5,58	22,01	9,23	22,36
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5298	514,4	8,90	572,5	1784	174,9	5,16	265,8	5,61	33,34	8,10	19,85
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4977	488,0	8,55	551,3	1673	161,7	4,96	248,6	5,57	31,93	9,16	14,28
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6140	584,8	8,99	655,9	2041	199,1	5,18	303,0	5,64	47,69	7,22	17,32
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7660	709,2	9,17	803,2	2537	246,3	5,28	374,5	5,70	81,66	5,92	15,80
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9498	855,7	9,26	984,2	3139	300,4	5,32	458,7	5,77	142,19	5,07	12,06
W 200 x 100,0 (H)*	100,0	229	210	14,5	23,7	182	158	127,1	11355	991,7	9,45	1152,2	3664	349,0	5,37	533,4	5,80	212,61	4,43	10,87
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2291	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,8	2,48	2,54	9,53	45,92
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2939	231,4	10,09	267,7	123	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,39	37,97
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,4	2,58	7,06	6,07	36,10
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,9	2,62	10,34	5,10	34,38
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	99,7	3,86	10,44	8,02	36,03
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6057	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	6,56	33,27

Verificação da Flambagem Lateral com Torção

No caso de uma viga completamente contida por uma laje (com as devidas fixações), não é necessário verificar FLT. ($L_b=0$)

Exemplo:

Verificações a serem feitas:

FLM – Seção Semi compacta.

$$M_{Rd,Mesa} = \frac{M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right)}{1,1}$$

Lembrando que $M_{pl} = Z_x \cdot F_y$

$$M_{pl} = 211.34,5 = 7279,5 \text{ kN.cm}$$

$$M_r = (F_y - \sigma_r) \cdot W_x$$

$$M_r = (34,5 - 0,3 \cdot 34,5) \cdot 182,6$$

$$M_r = 4409,79 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rd,Mesa} = \frac{7279,5 - (7279,5 - 4409,79) \cdot \left(\frac{9,53 - 9,26}{24,18 - 9,26} \right)}{1,1} = 6570,5 \text{ kN.cm}$$

$$M_{sd} = 8550,05 \text{ kN.cm}$$

Já sabemos que a peça não será aprovada. Poderíamos parar o dimensionamento aqui e selecionar outra peça, pois não atende a um Estado Limite Último

Exemplo:

Verificações a serem feitas:

$$M_{Rd,Alma} = \frac{M_{pl}}{1,1} = \frac{Zx \cdot Fy}{1,1}$$

FLA – Seção Compacta.

$$M_{Rd,Alma} = \frac{211.34,5}{1,1} = 6617,72 \text{ kN.cm}$$

PEÇA REPROVADA QUANTO AO ESTADO LIMITE ÚLTIMO, Para os Estados Limites FLM e FLA.

Exemplo:

Vamos descobrir qual peça atende:

Supondo que obrigatoriamente selecionaremos uma peça com alma e mesa compactos, já de posse do Momento Fletor atuante (M_{sd}) encontraremos o Z_x necessário para vencer a flexão:

$$M_{Rd,Alma} = \frac{Z_x \cdot F_y}{1,1}$$

A partir de agora temos três restrições:

1: $I_x > 2226 \text{ cm}^4$

2: $Z_x > 272,61 \text{ cm}^3$

3: $h < 260 \text{ mm}$

$$Z_{x,\min} = \frac{1,1 \cdot M_{sd}}{F_y}$$

$$Z_{x,\min} = \frac{1,1 \cdot 8550,05}{34,5} = 272,61 \text{ cm}^3$$

Exemplo:

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 _t cm	I _t cm ⁴	ESBELTEZ	
				t _f mm	t _w 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			MESA - λ _t b _f /2t _f	ALMA - λ _w d'/t _w
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,9	2,63	6,18	6,38	27,42
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,10	76,3	3,54	7,65	7,92	29,34
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,0	3,60	12,59	6,57	26,50
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,0	4,50	14,51	8,09	25,90
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,7	4,53	23,19	7,03	21,86
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4543	447,6	8,81	495,3	1535	151,2	5,12	229,5	5,58	22,01	9,23	22,36
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5298	514,4	8,90	572,5	1784	174,9	5,16	265,8	5,61	33,34	8,10	19,85
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4977	488,0	8,55	551,3	1673	161,7	4,96	248,6	5,57	31,93	9,16	14,28
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6140	584,8	8,99	655,9	2041	199,1	5,18	303,0	5,64	47,69	7,22	17,32
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7660	709,2	9,17	803,2	2537	246,3	5,28	374,5	5,70	81,66	5,92	15,80
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9498	855,7	9,26	984,2	3139	300,4	5,32	458,7	5,77	142,19	5,07	12,06
W 200 x 100,0 (H) *	100,0	229	210	14,5	23,7	182	158	127,1	11355	991,7	9,45	1152,2	3664	349,0	5,37	533,4	5,80	212,61	4,43	10,87
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2291	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,8	2,48	2,54	9,53	45,92
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2939	231,4	10,09	267,7	123	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,39	37,97
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,4	2,58	7,06	6,07	36,10
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,9	2,62	10,34	5,10	34,38
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	99,7	3,86	10,44	8,02	36,03
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6057	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	6,56	33,27

<9,26

<92

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Exemplo:

Recalculando:

ELS: Flecha atuante $y = \frac{q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} = \frac{0,146 \cdot 700^4}{384 \cdot 20500 \cdot 3473} = 1,28 \text{ cm} < 2 \text{ cm} \text{ OK!!!!}$

E.L.U:
FLM - $M_{Rd,Mesa} = \frac{Z_x \cdot F_y}{1,1} = \frac{311,1 \cdot 34,5}{1,1} = 9757,22 \text{ kN.cm} > 8550,05 \text{ OK!!!!}$

E.L.U:
FLA - $M_{Rd,Alma} = \frac{Z_x \cdot F_y}{1,1} = \frac{311,1 \cdot 34,5}{1,1} = 9757,22 \text{ kN.cm} > 8550,05 \text{ OK!!!!}$

E.L.U
Mrd Max: $M_{Rd,Máx} = \frac{1,5 \cdot W_x \cdot F_y}{1,1} = \frac{1,5 \cdot 270,2 \cdot 34,5}{1,1} = 12711 \text{ kN.cm} > 8550,05 \text{ OK!!!!}$

Exemplo:

Verificações E.L.U do perfil W250X25,3

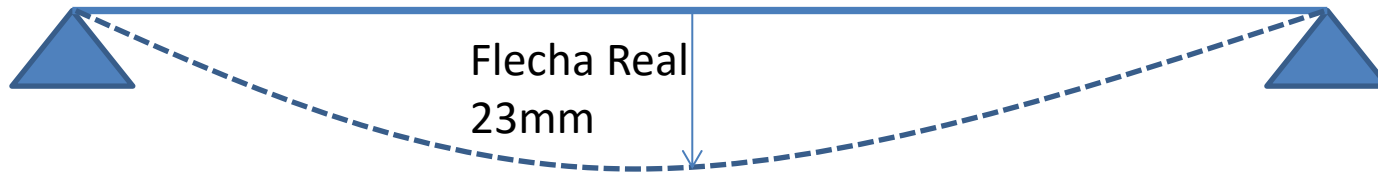
E.L.U:
FLM - $M_{Rd,Mesa} = \frac{Zx.Fy}{1,1} = \frac{311,1 \cdot 34,5}{1,1} = 9757,22 \text{ kN.cm} > 8550,05 \text{ OK!!!!}$

E.L.U:
FLA - $M_{Rd,Alma} = \frac{Zx.Fy}{1,1} = \frac{311,1 \cdot 34,5}{1,1} = 9757,22 \text{ kN.cm} > 8550,05 \text{ OK!!!!}$

E.L.U
Mrd Max: $M_{Rd,Máx} = \frac{1,5.Wx.Fy}{1,1} = \frac{1,5 \cdot 270,2 \cdot 34,5}{1,1} = 12711 \text{ kN.cm} > 8550,05 \text{ OK!!!!}$

CONTRA-FLECHAS EM VIGAS:

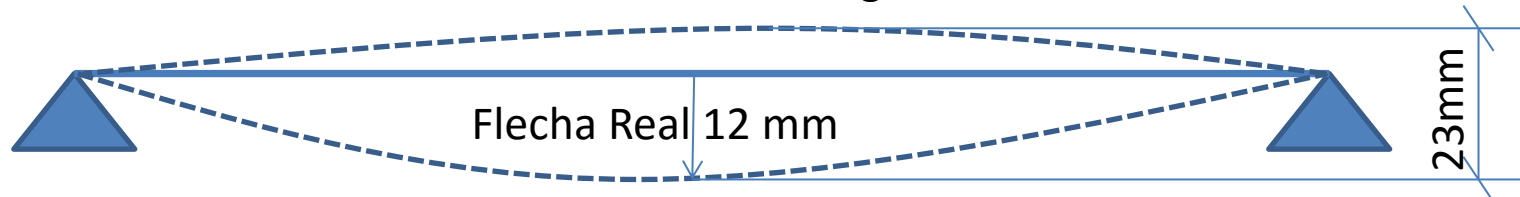
6000mm, Flecha máx = $L/350 = 17,14\text{mm}$



Caso a viga esteja passando na resistência à flexão, mas a limitação seja a flecha limite (E.L.S)

Em alguns casos pode-se usar o artifício de aplicar contraflecha na peça, equivalente à flecha resultante das cargas permanentes. Dessa forma gera-se economia em peso.

Contraflecha 11mm referente às Cargas Permanentes



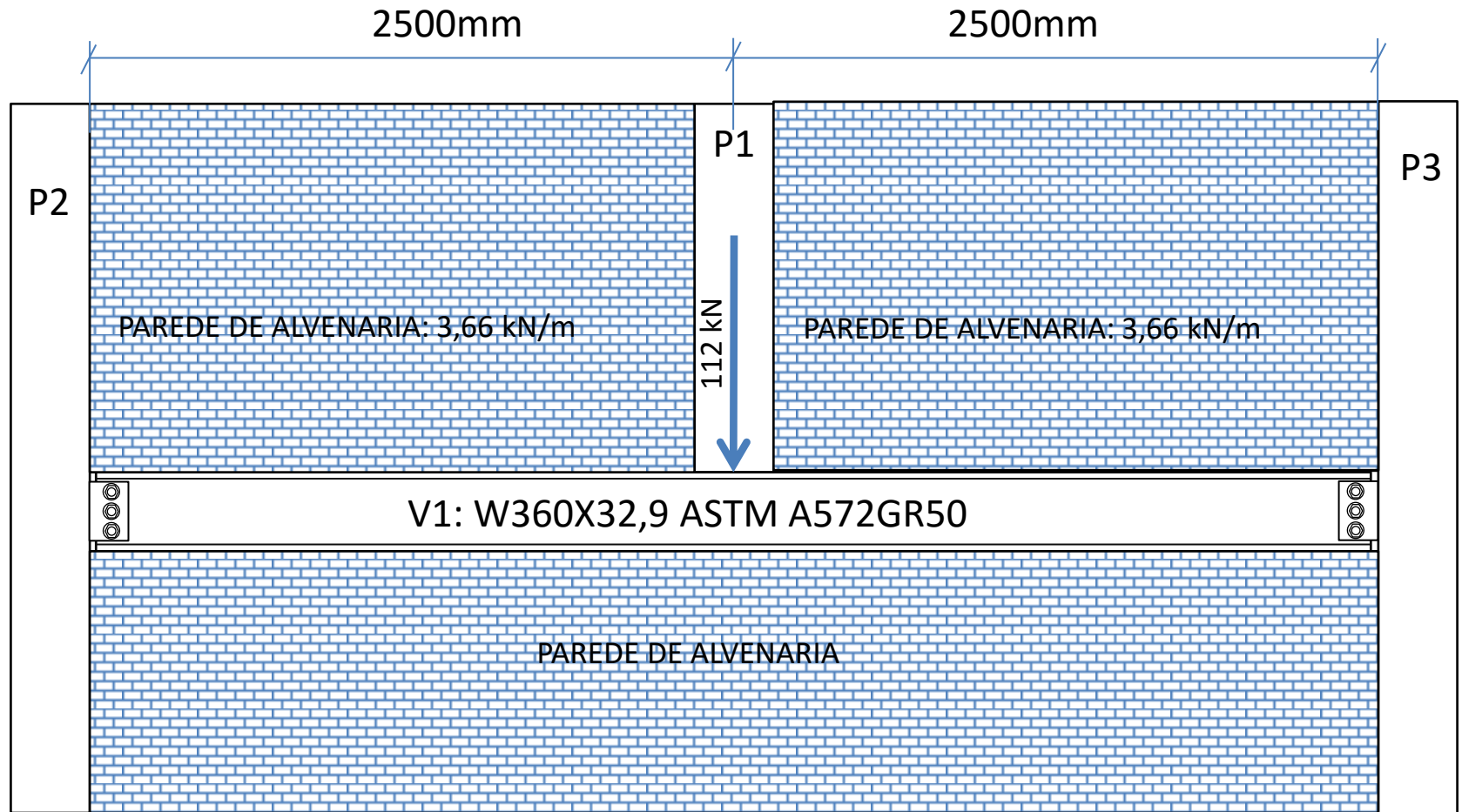
CONTRA-FLECHAS EM VIGAS:

Contraflechas geram economia real nas seguintes situações:

- Grandes vãos
- Altas cargas permanentes (Lajes, equipamentos, etc.)
- Necessidade de reduzir a altura do perfil em função da arquitetura.

Em casos de baixas cargas permanentes, a economia é muito pequena, pois não há flecha suficiente para gerar uma contraflecha razoável e economizar na inércia.

EXERCÍCIO 01



Determine se a bitola da Viga de transição V1 pode ser aprovada relativamente à flexão na situação acima. Utilize Perfis W, H ou HP Açominas ASTM A572GR50. Assuma ligação articulada entre a viga V1 e os pilares P2 e P3. Assuma também que os pilares P2 e P3 permanecem indeslocáveis durante o carregamento. As cargas já foram devidamente majoradas na combinação mais desfavorável. Desconsidere a possibilidade de contraflecha

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

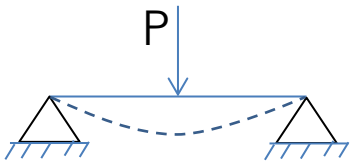
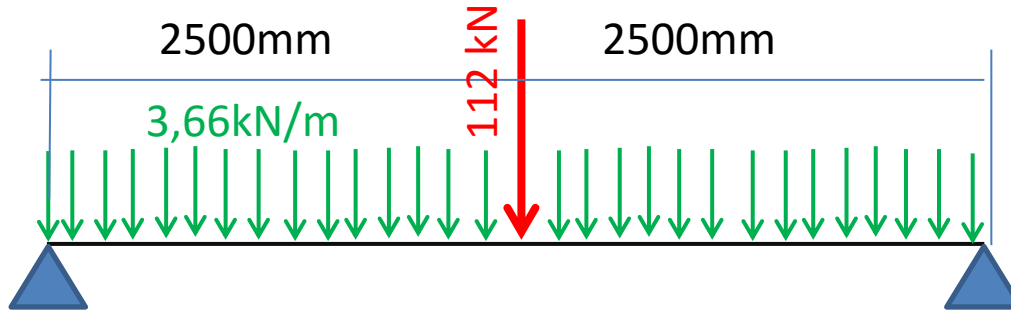
EXERCÍCIO 01

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b ₁ mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r ₁ cm	I _x cm ⁴	ESBELTEZ		C _w cm ⁶	u m ² /m	BITOLA in x lb/ft
				t _x mm	t _y 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			MESA - λ _x b ₁ /2t _x	ALMA - λ _y d'/t _y			
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8358	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 14 x 22
W 360 x 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10331	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 14 x 26
W 360 x 44,6	44,6	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12258	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 14 x 30
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8	14222	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 14 x 34
W 360 x 58	58,0	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5	16143	901,8	14,92	1014,8	1113	129,4	3,92	199,8	4,53	34,45	6,56	38,96	330.394	1,37	W 14 x 38
W 360 x 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17890	1031,1	14,80	1145,5	1885	185,7	4,80	284,5	5,44	44,57	7,52	37,40	523.382	1,46	W 14 x 43
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3	20169	1152,5	14,86	1285,9	2140	209,8	4,84	321,8	5,47	61,18	6,75	33,47	599.082	1,47	W 14 x 48
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22713	1263,2	14,98	1437,0	2416	235,7	4,89	361,9	5,51	82,41	6,10	30,68	685.701	1,48	W 14 x 53
W 360 x 91,0 (H)	91,0	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9	26755	1515,9	15,19	1680,1	4483	353,0	6,22	538,1	6,90	92,61	7,74	30,34	1.268.709	1,68	W 14 x 61
W 360 x 101,0 (H)	101,0	357	255	10,5	18,3	320	288	129,5	30279	1696,3	15,29	1888,9	5063	397,1	6,25	606,1	6,93	128,47	6,97	27,28	1.450.410	1,68	W 14 x 68
W 360 x 110,0 (H)	110,0	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6	33155	1841,9	15,36	2059,3	5570	435,2	6,29	664,5	6,96	161,93	6,43	25,28	1.609.070	1,69	W 14 x 74
W 360 x 122,0 (H)	122,0	363	257	13,0	21,7	320	288	155,3	36599	2016,5	15,35	2269,8	6147	478,4	6,29	732,4	6,98	212,70	5,92	22,12	1.787.806	1,70	W 14 x 82
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12777	640,5	15,94	736,8	404	57,7	2,83	90,9	3,49	11,69	7,95	55,84	153.190	1,32	W 16 x 26
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	381	357	59,2	15690	778,7	16,27	891,1	514	73,4	2,95	115,2	3,55	20,06	6,25	50,94	196.571	1,33	W 16 x 31
W 410 x 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18734	929,7	16,55	1052,2	1009	114,0	3,84	176,9	4,56	23,38	8,12	47,63	387.194	1,48	W 16 x 36
W 410 x 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2	21707	1066,7	16,88	1201,5	1205	135,4	3,98	209,2	4,65	33,78	6,95	46,42	467.404	1,49	W 16 x 40
W 410 x 67,0	67,0	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24678	1203,8	16,91	1362,7	1379	154,1	4,00	239,0	4,67	48,11	6,22	40,59	538.546	1,50	W 16 x 45
W 410 x 75,0	75,0	413	180	9,7	16,0	381	357	95,8	27616	1337,3	16,98	1518,6	1559	173,2	4,03	269,1	4,70	65,21	5,63	36,80	612.784	1,51	W 16 x 50
W 410 x 85,0	85,0	417	181	10,9	18,2	381	357	108,6	31658	1518,4	17,07	1731,7	1804	199,3	4,08	310,4	4,74	94,48	4,97	32,72	715.165	1,52	W 16 x 57
W 460 x 52,0	52,0	450	152	7,6	10,8	428	404	66,6	21370	949,8	17,91	1095,9	634	83,5	3,09	131,7	3,79	21,79	7,04	53,21	304.837	1,47	W 18 x 35
W 460 x 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	428	404	76,2	25652	1127,6	18,35	1292,1	796	104,1	3,23	163,4	3,89	34,60	5,75	50,55	387.230	1,49	W 18 x 40
W 460 x 68,0	68,0	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6	29851	1300,7	18,46	1495,4	941	122,2	3,28	192,4	3,93	52,29	5,00	44,42	461.163	1,50	W 18 x 46
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	428	404	94,9	33415	1462,4	18,77	1657,4	1661	174,8	4,18	271,3	4,93	52,97	6,55	44,89	811.417	1,64	W 18 x 50
W 460 x 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	428	404	104,7	37157	1615,5	18,84	1836,4	1862	195,0	4,22	303,3	4,96	70,62	5,97	40,81	915.745	1,64	W 18 x 55
W 460 x 89,0	89,0	463	192	10,5	17,7	428	404	114,1	41105	1775,6	18,98	2019,4	2093	218,0	4,28	339,0	5,01	92,49	5,42	38,44	1.035.073	1,65	W 18 x 60
W 460 x 97,0	97,0	466	193	11,4	19,0	428	404	123,4	44658	1916,7	19,03	2187,4	2283	236,6	4,30	368,8	5,03	115,05	5,08	35,44	1.137.180	1,66	W 18 x 65
W 460 x 106,0	106,0	469	194	12,6	20,6	428	404	135,1	48978	2088,6	19,04	2394,6	2515	259,3	4,32	405,7	5,05	148,19	4,71	32,05	1.260.063	1,67	W 18 x 71

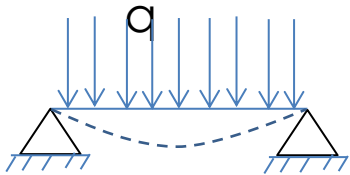
Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

EXERCÍCIO 01

Passo 1 – Criar o diagrama de corpo livre e verificar flecha



$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4} \quad y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$



$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Flecha atuante:

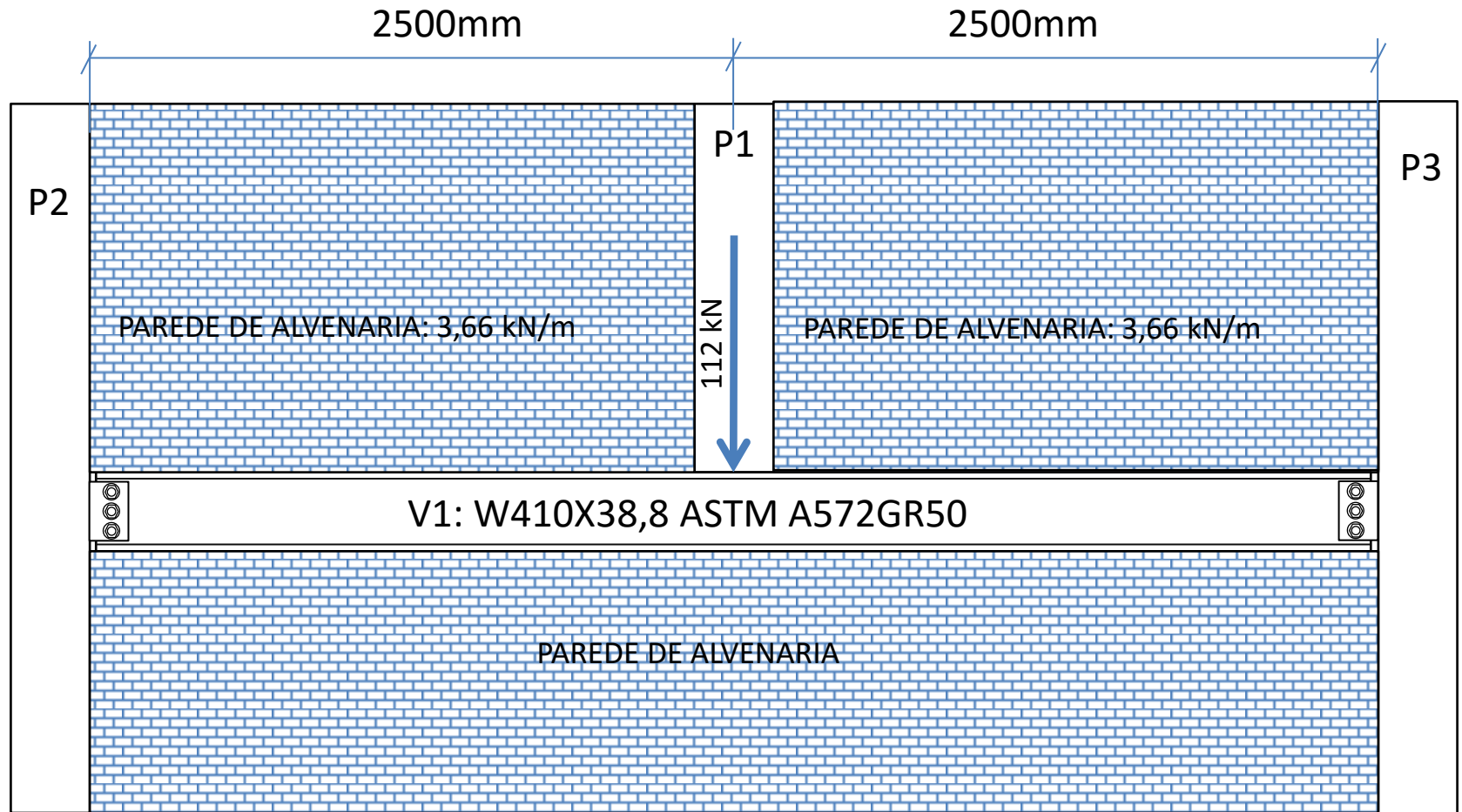
$$y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} + \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} + \frac{5 \cdot q_{pp} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} = \frac{112 \cdot 500^3}{48 \cdot 20500 \cdot 8358} + \frac{5 \cdot 0,0366 \cdot 500^4}{384 \cdot 20500 \cdot 8358} + \frac{5 \cdot 0,00329 \cdot 500^4}{384 \cdot 20500 \cdot 8358} = 1,892 \text{ cm}$$

EXERCÍCIO 01

- ^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 Deslocamento paralelo ao plano do fechamento (entre linhas de tirantes, caso estes existam).
- ^c Deslocamento perpendicular ao plano do fechamento.
- ^d Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento (vento no fechamento) com seu valor característico.
- ^e Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.
- ^f Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico.
- ^g Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade.
- ^h Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.
- ⁱ Valor não majorado pelo coeficiente de impacto.
- ^j Considerar combinações raras de serviço.
- ^k No caso de pontes rolantes siderúrgicas, o deslocamento também não pode ser superior a 50 mm.
- ^l O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm.
- ^m Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.

PERFIL NÃO APROVADO PARA ESTADO LIMITE DE SERVIÇO.

EXERCÍCIO 02

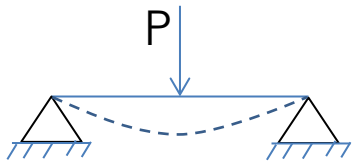
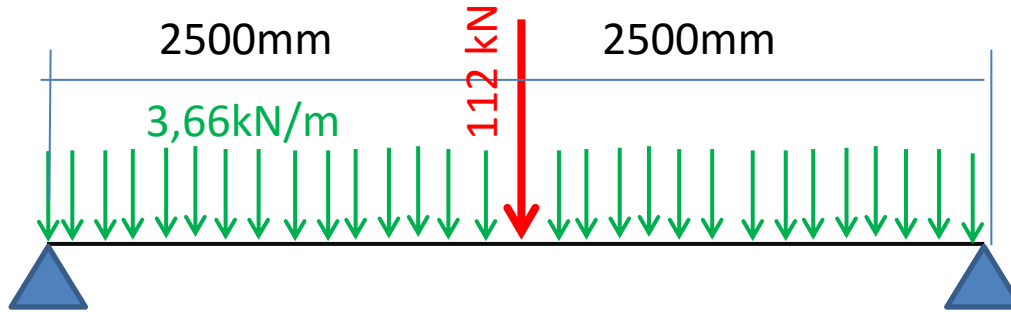


Determine se a bitola da Viga de transição V1 pode ser aprovada relativamente à flexão na situação acima. Utilize Perfis W, H ou HP Açominas ASTM A572GR50. Assuma ligação articulada entre a viga V1 e os pilares P2 e P3. Assuma também que os pilares P2 e P3 permanecem indeslocáveis durante o carregamento. As cargas já foram devidamente majoradas na combinação mais desfavorável. Desconsidere a possibilidade de contraflecha

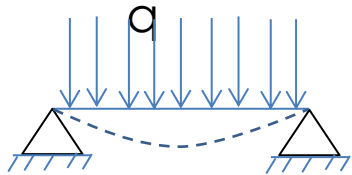
Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

EXERCÍCIO 02

Passo 1 – Criar o diagrama de corpo livre.



$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4} \quad y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$



$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Flecha atuante:

$$y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} + \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} + \frac{5 \cdot q_{pp} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} = \frac{112 \cdot 500^3}{48 \cdot 20500 \cdot 12777} + \frac{5 \cdot 0,0366 \cdot 500^4}{384 \cdot 20500 \cdot 12777} + \frac{5 \cdot 0,00388 \cdot 500^4}{384 \cdot 20500 \cdot 12777} = 1,239 \text{ cm}$$

LEMBRETE:

Tabela G.1 — Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-límites aplicáveis	M_r	M_{cr}	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 Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	b/t Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
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 Nota 9)	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_c$ $\leq f_y W_t$ Ver Nota 5	Ver Nota 2	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 2
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_c$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	b/t Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{h_c}{h_y} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \lambda_r$ $\left(0,54 \frac{M_{pe}}{M_t} - 0,09\right)^2 \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver Nota 3	$(f_y - \sigma_r)W$	Ver Nota 6	b/t Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA Ver Nota 3	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_s E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pe}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_s} \sqrt{JA}$
Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados	FLT Ver Nota 7	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	$\frac{2,00 C_s E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pe}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_s} \sqrt{JA}$
	FLM	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	b/t Ver Nota 8	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	Ver Nota 10	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Para cada estado Limite:

Passo 1: Calcular λ

Passo 2: Comparar λ com λ_p e λ_r

Para FLT:

$$a) \quad M_{Rd} = \frac{M_{pe}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad M_{pl} = Z \cdot F_y$$

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

$$c) \quad M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pe}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

Para FLM e FLA:

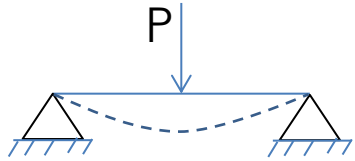
$$a) \quad M_{Rd} = \frac{M_{pe}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

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

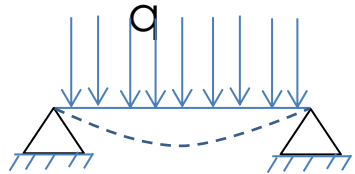
$$c) \quad M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \text{ (não aplicável à FLA - ver Anexo H)}$$

EXERCÍCIO 02

Passo 2 – VERIFICAR ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (Flexão)



$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4} = \frac{112.500}{4} = 14000 \text{ kN.cm}$$



$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{(0,0366 + 0,00388) \cdot 500^2}{8} = 1265 \text{ kN.cm}$$

$$MSd = 15265 \text{ kN.cm}$$

Verificação Flambagem Local da Mesa (FLM)

$$\frac{b}{t} = \frac{bf}{2tf} = 7,95 \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 9,26 \rightarrow \text{calcular pela equação a)}$$

$$M_{Rd,FLM} = \frac{M_{pl}}{1,1} = \frac{Z_x \cdot F_y}{1,1} = \frac{736,8 \cdot 34,5}{1,1} = 23108,72 \text{ kN.cm}$$

EXERCÍCIO 02

Passo 2 – VERIFICAR ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (Flexão)

Verificação Flambagem Local da Alma (FLA)

$$\frac{h}{tw} = \frac{d'}{tw} = 55,84 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 91,62 \rightarrow \text{calcular pela equação a)}$$

$$M_{Rd,FLA} = \frac{M_{pl}}{1,1} = \frac{Z_x \cdot F_y}{1,1} = \frac{736,8 \cdot 34,5}{1,1} = 23108,72 \text{ kN.cm}$$

Verificação Flambagem Lateral com Torção (FLT)

$$\frac{Lb}{r_y} = \frac{500}{2,83} = 176,68 \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 42,90 \rightarrow \text{calcular } \lambda_r$$

EXERCÍCIO 02

Passo 2 – VERIFICAR ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (Flexão)

As Notas relacionadas à Tabela G.1 são as seguintes:

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

$$\beta_1 = \frac{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5) \cdot 640,5}{20500 \cdot 11,69} = 0,0645$$

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

onde:

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

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

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

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{404 \cdot 11,69}}{2,83 \cdot 11,69 \cdot 0,0645} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 153190 \cdot 0,0645^2}{404}}} = 122,54 \rightarrow \text{calcular } M_{cr}$$

$$M_{cr} = \frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 20500 \cdot 404}{500^2} \cdot \sqrt{\frac{153190}{404} \cdot \left(1 + 0,039 \cdot \frac{11,69 \cdot 500^2}{153190} \right)} = 8408 \text{ kN.cm} - \text{Eq. C}$$

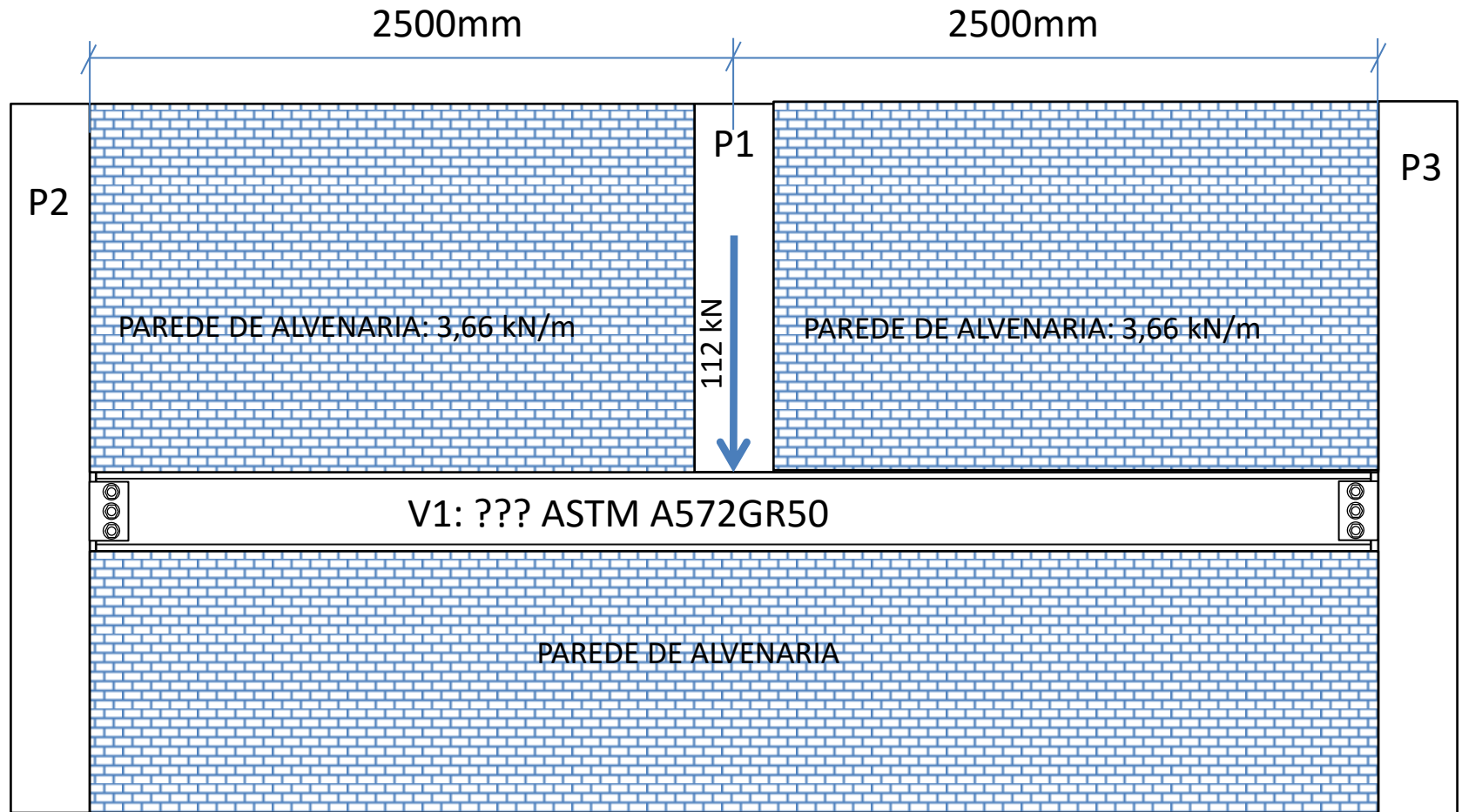
$$M_{Rd,FLT} = \frac{M_{cr}}{1,1} = \frac{8408}{1,1} = 7643,63 \text{ kN.cm} < 15265 \text{ kNcm} \quad \text{VIGA REPROVADA PELO ESTADO LIMITE FLT}$$

EXERCÍCIO 02

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b ₁ mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r ₁ cm	I _x cm ⁴	ESBELTEZ		C _w cm ⁶	u m ² /m	BITOLA in x lb/ft
				t _x mm	t _y 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			MESA - λ _x b ₁ /2t _x	ALMA - λ _y d' /t _y			
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8358	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 14 x 22
W 360 x 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10331	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 14 x 26
W 360 x 44,6	44,6	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12258	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 14 x 30
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8	14222	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 14 x 34
W 360 x 58	58,0	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5	16143	901,8	14,92	1014,8	1113	129,4	3,92	199,8	4,53	34,45	6,56	38,96	330,394	1,37	W 14 x 38
W 360 x 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17890	1031,1	14,80	1145,5	1885	185,7	4,80	284,5	5,44	44,57	7,52	37,40	523,382	1,46	W 14 x 43
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3	20169	1152,5	14,86	1285,9	2140	209,8	4,84	321,8	5,47	61,18	6,75	33,47	599,082	1,47	W 14 x 48
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22713	1283,2	14,98	1437,0	2416	235,7	4,89	361,9	5,51	82,41	6,10	30,68	685,701	1,48	W 14 x 53
W 360 x 91,0 (H)	91,0	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9	26755	1515,9	15,19	1680,1	4483	353,0	6,22	538,1	6,90	92,61	7,74	30,34	1.268,709	1,68	W 14 x 61
W 360 x 101,0 (H)	101,0	357	255	10,5	18,3	320	286	129,5	30279	1696,3	15,29	1888,9	5063	397,1	6,25	606,1	6,93	128,47	6,97	27,28	1.450,410	1,68	W 14 x 68
W 360 x 110,0 (H)	110,0	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6	33155	1841,9	15,36	2059,3	5570	435,2	6,29	664,5	6,96	161,93	6,43	25,28	1.609,070	1,69	W 14 x 74
W 360 x 122,0 (H)	122,0	363	257	13,0	21,7	320	288	155,3	36599	2016,5	15,35	2269,8	6147	478,4	6,29	732,4	6,98	212,70	5,92	22,12	1.787,806	1,70	W 14 x 82
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12777	640,5	15,94	736,8	404	57,7	2,83	90,9	3,49	11,69	7,95	55,84	153,190	1,32	W 16 x 26
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	381	357	59,2	15690	778,7	16,27	891,1	514	73,4	2,95	115,2	3,55	20,06	6,25	50,94	196,571	1,33	W 16 x 31
W 410 x 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18734	929,7	16,55	1052,2	1009	114,0	3,84	176,9	4,56	23,38	8,12	47,63	387,194	1,48	W 16 x 36
W 410 x 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2	21707	1066,7	16,88	1201,5	1205	135,4	3,98	209,2	4,65	33,78	6,95	46,42	467,404	1,49	W 16 x 40
W 410 x 67,0	67,0	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24678	1203,8	16,91	1362,7	1379	154,1	4,00	239,0	4,67	48,11	6,22	40,59	538,546	1,50	W 16 x 45
W 410 x 75,0	75,0	413	180	9,7	16,0	381	357	95,8	27616	1337,3	16,98	1518,6	1559	173,2	4,03	269,1	4,70	65,21	5,63	36,80	612,784	1,51	W 16 x 50
W 410 x 85,0	85,0	417	181	10,9	18,2	381	357	108,6	31658	1518,4	17,07	1731,7	1804	199,3	4,08	310,4	4,74	94,48	4,97	32,72	715,165	1,52	W 16 x 57
W 460 x 52,0	52,0	450	152	7,6	10,8	428	404	66,6	21370	949,8	17,91	1095,9	634	83,5	3,09	131,7	3,79	21,79	7,04	53,21	304,837	1,47	W 18 x 35
W 460 x 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	428	404	76,2	25652	1127,6	18,35	1292,1	796	104,1	3,23	163,4	3,89	34,60	5,75	50,55	387,230	1,49	W 18 x 40
W 460 x 68,0	68,0	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6	29851	1300,7	18,46	1495,4	941	122,2	3,28	192,4	3,93	52,29	5,00	44,42	461,163	1,50	W 18 x 46
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	428	404	94,9	33415	1462,4	18,77	1657,4	1661	174,8	4,18	271,3	4,93	52,97	6,55	44,89	811,417	1,64	W 18 x 50
W 460 x 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	428	404	104,7	37157	1615,5	18,84	1836,4	1862	195,0	4,22	303,3	4,96	70,62	5,97	40,81	915,745	1,64	W 18 x 55
W 460 x 89,0	89,0	463	192	10,5	17,7	428	404	114,1	41105	1775,6	18,98	2019,4	2093	218,0	4,28	339,0	5,01	92,49	5,42	38,44	1.035,073	1,65	W 18 x 60
W 460 x 97,0	97,0	466	193	11,4	19,0	428	404	123,4	44658	1916,7	19,03	2187,4	2283	236,6	4,30	368,8	5,03	115,05	5,08	35,44	1.137,180	1,66	W 18 x 65
W 460 x 106,0	106,0	469	194	12,6	20,6	428	404	135,1	48978	2088,6	19,04	2394,6	2515	259,3	4,32	405,7	5,05	148,19	4,71	32,05	1.260,063	1,67	W 18 x 71

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

EXERCÍCIO 02



Determine a bitola da Viga de transição V1 relativamente à flexão na situação acima. Utilize Perfis W, H ou HP Açominas ASTM A572GR50. Assuma ligação articulada entre a viga V1 e os pilares P2 e P3. Assuma também que os pilares P2 e P3 permanecem indeslocáveis durante o carregamento. As cargas já foram devidamente majoradas na combinação mais desfavorável. Desconsidere a possibilidade de contraflecha

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

EXERCÍCIO 03

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b ₁ mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r _t cm	I _t cm ⁴	ESBELTEZ		C _w cm ⁴	u m ² /m	BITOLA in x lb/ft
				t _e 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			MESA-λ _y b ₁ /2t _e	ALMA-λ _x d'/t _e			
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8358	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 14 x 22
W 360 x 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10331	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 14 x 26
W 360 x 44,6	44,6	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12258	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 14 x 30
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8	14222	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 14 x 34
W 360 x 58	58,0	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5	16143	901,8	14,92	1014,8	1113	129,4	3,92	199,8	4,53	34,45	8,56	38,96	330,394	1,37	W 14 x 38
W 360 x 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17890	1031,1	14,80	1145,5	1885	185,7	4,80	284,5	5,44	44,57	7,52	37,40	523,362	1,46	W 14 x 43
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3	20169	1152,5	14,86	1285,9	2140	209,8	4,84	321,8	5,47	61,18	6,75	33,47	599,082	1,47	W 14 x 48
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22713	1283,2	14,98	1437,0	2416	235,7	4,89	361,9	5,51	82,41	6,10	30,68	685,701	1,48	W 14 x 53
W 360 x 91,0 (H)	91,0	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9	26755	1515,9	15,19	1680,1	4483	353,0	6,22	538,1	6,90	92,61	7,74	30,34	1.268.709	1,68	W 14 x 61
W 360 x 101,0 (H)	101,0	357	255	10,5	18,3	320	288	129,5	30279	1696,3	15,29	1888,9	5063	397,1	6,25	606,1	6,93	128,47	6,97	27,28	1.450.410	1,68	W 14 x 68
W 360 x 110,0 (H)	110,0	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6	33155	1841,9	15,36	2059,3	5570	435,2	6,29	664,5	6,96	161,93	6,43	25,28	1.609.070	1,69	W 14 x 74
W 360 x 122,0 (H)	122,0	363	257	13,0	21,7	320	288	155,3	36599	2016,5	15,35	2269,8	6147	478,4	6,29	732,4	6,98	212,70	5,92	22,12	1.787.806	1,70	W 14 x 82
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12777	640,5	15,94	738,8	404	57,7	2,83	90,9	3,49	11,69	7,95	55,84	153,190	1,32	W 16 x 26
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	381	357	59,2	15690	778,7	16,27	891,1	514	73,4	2,95	115,2	3,55	20,06	6,25	50,94	196,571	1,33	W 16 x 31
W 410 x 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18734	929,7	16,55	1052,2	1009	114,0	3,84	176,9	4,56	23,38	8,12	47,63	387,194	1,48	W 16 x 36
W 410 x 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2	21197	1090,7	16,88	1201,5	1205	130,4	3,86	209,4	4,59	33,78	9,95	40,42	497,404	1,48	W 16 x 40
W 410 x 67,0	67,0	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24678	1203,8	16,91	1362,7	1379	154,1	4,00	239,0	4,67	48,11	6,22	40,59	538,546	1,50	W 16 x 45
W 410 x 75,0	75,0	413	180	9,7	16,0	381	357	95,8	27616	1337,3	16,98	1518,6	1559	173,2	4,03	269,1	4,70	65,21	5,63	36,80	612,784	1,51	W 16 x 50
W 410 x 85,0	85,0	417	181	10,9	18,2	381	357	108,6	31658	1518,4	17,07	1731,7	1804	199,3	4,08	310,4	4,74	94,48	4,97	32,72	715,165	1,52	W 16 x 57
W 460 x 52,0	52,0	450	152	7,6	10,8	428	404	66,6	21370	949,8	17,91	1095,9	634	83,5	3,09	131,7	3,79	21,79	7,04	53,21	304,837	1,47	W 18 x 35
W 460 x 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	428	404	76,2	25652	1127,6	18,35	1292,1	796	104,1	3,23	163,4	3,89	34,60	5,75	50,55	387,230	1,49	W 18 x 40
W 460 x 68,0	68,0	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6	29851	1300,7	18,46	1495,4	941	122,2	3,28	192,4	3,93	52,29	5,00	44,42	461,163	1,50	W 18 x 46
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	428	404	94,9	33415	1462,4	18,77	1657,4	1661	174,8	4,18	271,3	4,93	52,97	6,55	44,89	811,417	1,64	W 18 x 50
W 460 x 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	428	404	104,7	37157	1615,5	18,84	1836,4	1862	195,0	4,22	303,3	4,96	70,62	5,97	40,81	915,745	1,64	W 18 x 55
W 460 x 89,0	89,0	463	192	10,5	17,7	428	404	114,1	41105	1775,6	18,98	2019,4	2093	218,0	4,28	339,0	5,01	92,49	5,42	38,44	1.035.073	1,65	W 18 x 60
W 460 x 97,0	97,0	466	193	11,4	19,0	428	404	123,4	44658	1916,7	19,03	2187,4	2283	236,6	4,30	368,8	5,03	115,05	5,08	35,44	1.137.180	1,66	W 18 x 65
W 460 x 106,0	106,0	469	194	12,6	20,6	428	404	135,1	48978	2088,6	19,04	2394,6	2515	259,3	4,32	405,7	5,05	148,19	4,71	32,05	1.260.063	1,67	W 18 x 71
W 530 x 66,0	66,0	525	165	8,9	11,4	502	478	83,6	34971	1332,2	20,46	1558,0	857	103,9	3,20	166,0	4,02	31,52	7,24	53,73	562,854	1,67	W 21 x 44
W 530 x 72,0	72,0	524	207	9,0	10,9	502	478	91,6	39989	1525,5	20,89	1755,9	1615	156,0	4,20	244,6	5,16	33,41	9,50	53,13	1.060.548	1,84	W 21 x 48
W 530 x 74,0	74,0	529	166	9,7	13,6	502	478	95,1	40969	1548,9	20,76	1804,9	1041	125,5	3,31	200,1	4,10	47,39	6,10	49,26	688,558	1,68	W 21 x 50
W 530 x 82,0	82,0	528	209	9,5	13,3	501	477	104,5	47589	1801,8	21,34	2058,5	2028	194,1	4,41	302,7	5,31	51,23	7,86	50,25	1.340.255	1,85	W 21 x 55
W 530 x 85,0	85,0	535	166	10,3	16,5	502	478	107,7	48453	1811,3	21,21	2099,8	1263	152,2	3,42	241,6	4,17	72,93	5,03	46,41	845,463	1,69	W 21 x 57
W 530 x 92,0	92,0	533	209	10,2	15,6	502	478	117,6	55157	2069,7	21,65	2359,8	2379	227,6	4,50	354,7	5,36	75,50	6,70	48,84	1.588,565	1,86	W 21 x 62
W 530 x 101,0	101,0	537	210	10,9	17,4	502	470	130,0	62198	2316,5	21,87	2640,4	2693	256,5	4,55	400,6	5,40	106,04	6,03	43,14	1.812.734	1,86	W 21 x 68
W 530 x 109,0	109,0	539	211	11,6	18,8	501	469	139,7	67226	2494,5	21,94	2847,0	2952	279,8	4,60	437,4	5,44	131,38	5,61	40,47	1.991.291	1,87	W 21 x 73
W 530 x 123,0*	123,0	544	212	13,1	21,2	502	470	157,8	76577	2815,3	22,03	3228,1	3378	318,7	4,63	500,2	5,47	186,69	5,00	35,85	2.300.400	1,88	W 21 x 83
W 530 x 138,0*	138,0	549	214	14,7	23,8	501	469	177,8	87079	3172,3	22,13	3653,3	3904	364,8	4,69	574,5	5,53	262,76	4,50	31,93	2.680.751	1,90	W 21 x 93

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

EXERCÍCIO 03

PARTIREMOS DA VERIFICAÇÃO DE FLT POIS ESSE É NOSSO MAIOR PROBLEMA AGORA

Verificação Flambagem Lateral com Torção(FLT) - Tentativa com Perfil W530X82

$$\frac{Lb}{r_y} = \frac{500}{5,31} = 94,16 \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 42,90 \rightarrow \text{calcular } \lambda_r$$

$$\beta_1 = \frac{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5) \cdot 1801,8}{20500 \cdot 51,23} = 0,04143$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{2028 \cdot 51,23}}{5,31 \cdot 51,23 \cdot 0,04143} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 1340255 \cdot 0,04143^2}{2028}}} = 709,75 \rightarrow \text{Eq. B}$$

a) $M_{Rd} = \frac{M_{pf}}{\gamma_{a1}}$, para $\lambda \leq \lambda_p$

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

c) $M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pf}}{\gamma_{a1}}$, para $\lambda > \lambda_r$

$$M_{Rd,FLT} = \frac{1}{1,1} \cdot \left(2058,5 \cdot 34,5 - (2058,5 \cdot 34,5 - (0,7 \cdot 34,5 \cdot 2058,5)) \cdot \frac{94,16 - 42,90}{709,75 - 42,90} \right) = 63072,6 \text{ kN.cm}$$

Resistência é alta demais (Perfil Pesado), devemos buscar algo em torno de 30% maior que Msd

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

EXERCÍCIO 03

Verificação Flambagem Lateral com Torção (FLT) - Tentativa com Perfil W410X60

$$\frac{Lb}{r_y} = \frac{500}{4,65} = 107,52 \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 42,90 \rightarrow \text{calcular } \lambda_r$$

$$\beta_1 = \frac{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5) \cdot 1066,7}{20500 \cdot 33,78} = 0,0372$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{1205 \cdot 33,78}}{4,65 \cdot 33,78 \cdot 0,0372} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 467404 \cdot 0,0372^2}{1205}}} = 107,45 \rightarrow \text{calcular } M_{cr}$$

$$M_{cr} = \frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 20500 \cdot 1205}{500^2} \cdot \sqrt{\frac{467404}{1205} \cdot (1 + 0,039 \cdot \frac{33,78 \cdot 500^2}{467404})} = 25076 \text{ kN.cm} - \text{Ainda está pesado}$$

EXERCÍCIO 03

Verificação Flambagem Lateral com Torção (FLT) - Tentativa com Perfil W410X53

$$\frac{Lb}{r_y} = \frac{500}{3,84} = 130,20 \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 42,90 \rightarrow \text{calcular } \lambda_r$$

$$\beta_1 = \frac{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5) \cdot 929,7}{20500 \cdot 23,38} = 0,0468$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{1009 \cdot 23,38}}{3,84 \cdot 23,38 \cdot 0,0468} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 387194 \cdot 0,0468^2}{1009}}} = 122,71 \rightarrow \text{calcular } M_{cr}$$

$$M_{cr} = \frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 20500 \cdot 1009}{500^2} \cdot \sqrt{\frac{387194}{1009} \cdot \left(1 + 0,039 \cdot \frac{23,38 \cdot 500^2}{387194}\right)} = 20162 \text{ kN.cm} - \text{Valor aceitável (Aprox. 32\% a mais que MSd)}$$

EXERCÍCIO 03

Verificação Flambagem Lateral com Torção(FLT) - Tentativa com Perfil W410X46,1

$$\frac{Lb}{r_y} = \frac{500}{2,95} = 169,49 \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 42,90 \rightarrow \text{calcular } \lambda_r$$

$$\beta_1 = \frac{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5) \cdot 778,7}{20500 \cdot 20,06} = 0,0457$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{514 \cdot 20,08}}{2,95 \cdot 20,08 \cdot 0,0457} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 196571 \cdot 0,0457^2}{514}}} = 124,18 \rightarrow \text{calcular } M_{cr}$$

$$M_{cr} = \frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 20500 \cdot 514}{500^2} \cdot \sqrt{\frac{196571}{514} \cdot (1 + 0,039 \cdot \frac{20,08 \cdot 500^2}{196571})} = 11,493 \text{ kN.cm} - \text{PERFIL REPROVADO}$$

O PERFIL MAIS LEVE QUE É APROVADO É O W410X53

NÃO HÁ NECESSIDADE DE VERIFICAR FLECHA POIS $I_x = 18734 > 12777$

EXERCÍCIO 03

Verificação Flambagem Local da Mesa (FLM) **W410X53,00**

$$\frac{b}{t} = \frac{bf}{2tf} = 8,12 \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 9,26 \rightarrow \text{calcular pela equação a)}$$

$$M_{Rd,FLM} = \frac{M_{pl}}{1,1} = \frac{Z_x \cdot F_y}{1,1} = \frac{1052,2 \cdot 34,5}{1,1} = 33000 \text{ kN.cm}$$

Verificação Flambagem Local da Alma (FLA)

$$\frac{h}{tw} = \frac{d'}{tw} = 47,63 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 91,62 \rightarrow \text{calcular pela equação a)}$$

$$M_{Rd,FLM} = \frac{M_{pl}}{1,1} = \frac{Z_x \cdot F_y}{1,1} = \frac{1052,2 \cdot 34,5}{1,1} = 33000 \text{ kN.cm}$$

EXERCÍCIO 03

$$M_{max} = \frac{P.L}{4} = \frac{112.500}{4} = 14000 \text{ kN.cm}$$

$$M_{max} = \frac{q.L^2}{8} = \frac{(0,0366 + 0,0053).500^2}{8} = 1309 \text{ kN.cm}$$

$$MSd = 15309 \text{ kN.cm} < M_{Rd,FLT} = 20162 \text{ kN.cm} \text{ (75\% de aproveitamento)}$$