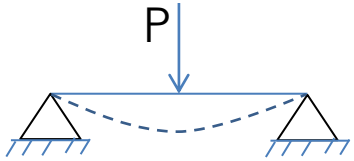


# **FLECHAS EM VIGAS E BARRAS FLEXIONADAS**

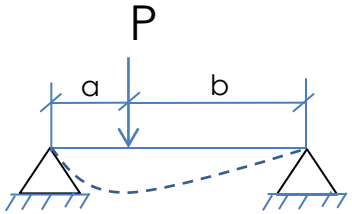
*Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas*

# Barras Flexionadas: ELS

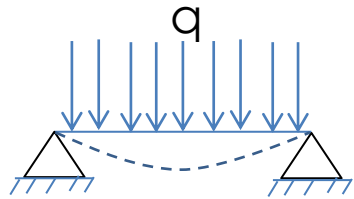
Fórmulas de Flexão e flechas em barras simples



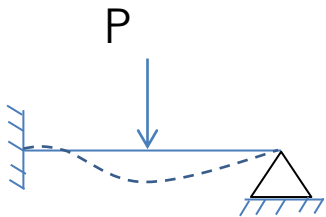
$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4} \quad y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$



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



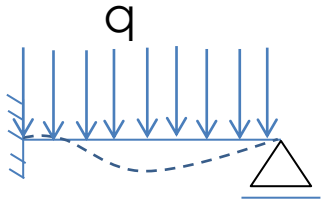
$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$



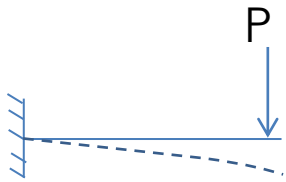
$$M_{max} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{16} \quad y = \frac{7 \cdot P \cdot L^3}{768 \cdot E \cdot I}$$

# Barras Flexionadas:

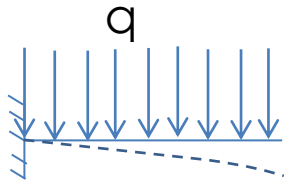
Fórmulas de Flexão e flechas em barras simples



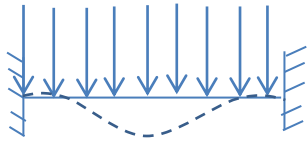
$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad y = \frac{q \cdot L^4}{185 \cdot E \cdot I}$$



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



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



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

# Barras Flexionadas:

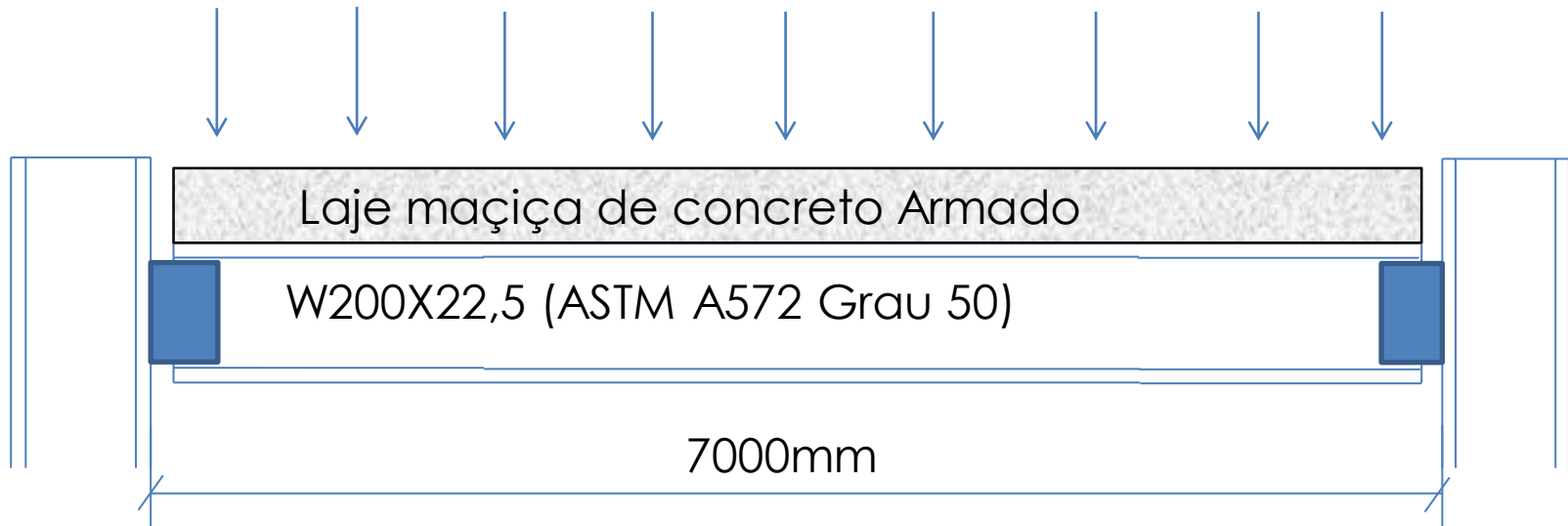
Tabela C.1 — Deslocamentos máximos

Descrição	$\delta^a$
- Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{cd}$
- Terças de cobertura <sup>g)</sup>	$L/180^e$
	$L/120^f$
- Vigas de cobertura <sup>g)</sup>	$L/250^h$
- Vigas de piso	$L/350^h$
- Vigas que suportam pilares	$L/500^h$
Vigas de rolamento: <sup>j)</sup>	
- 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:

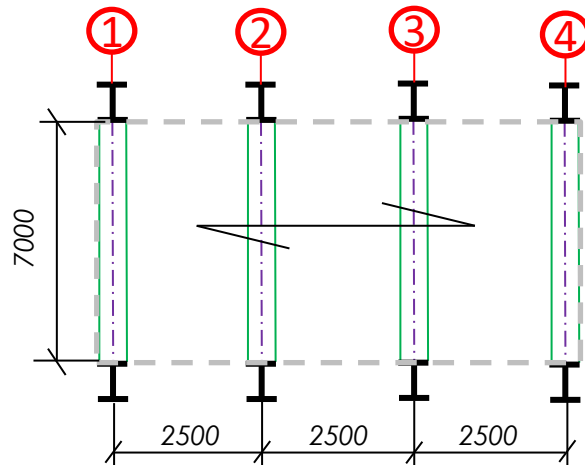
- <sup>a</sup>  $L$  é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço,  $H$  é a altura total do pilar (distância do topo à base) ou a distância do nível da viga de rolamento à base,  $h$  é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre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

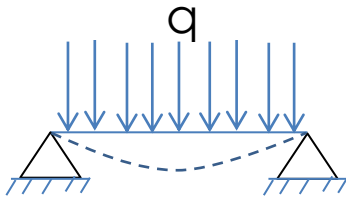
## Variáveis (SC)

- 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:



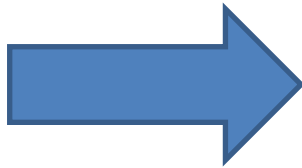
$$y = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

ATENÇÃO PARA AS UNIDADES:

- L=cm
- E=kN/cm<sup>2</sup>
- I = cm<sup>4</sup>
- q=kN/cm

Combinações para E.L.S:

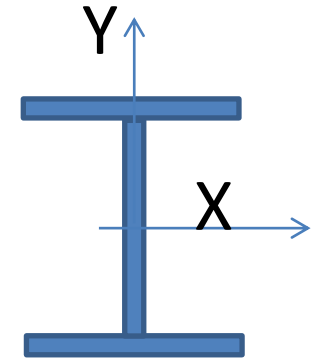
- 1) PP+SC
- ~~2) PP+V~~
- ~~3) PP+SC+V~~



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

Convertendo para kN/cm:

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



Cálculo da flecha máxima:

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

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:  $I_{x,\min} = \frac{5.0,146.700^4}{384.20500.2} \quad I_{x,\min} = \frac{5.0,146.700^4}{384.20500.2} = 11132 \text{ cm}^4$

O perfil mais leve que atende à inércia mínima na Tabela de Bitolas da Gerdau é o W410X38,8, com 12777 cm<sup>4</sup>

# 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.=  $2,00 \text{ kN/m}^2$

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

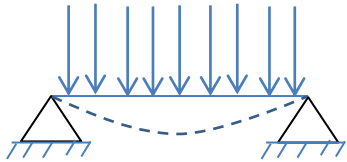
-----  
TOTAL =  $5,75 \text{ kN/m}^2$

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.

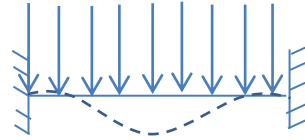
*Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas*

# 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

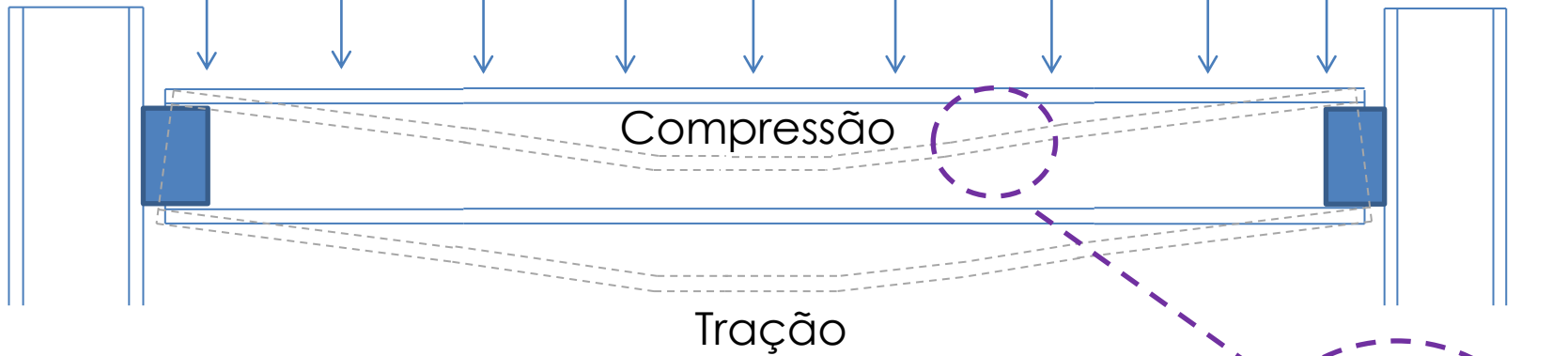
No caso: 
$$I_{x,\min} = \frac{0,146 \cdot 700^4}{384 \cdot 20500 \cdot 2} = 2226 \text{ cm}^4$$

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..

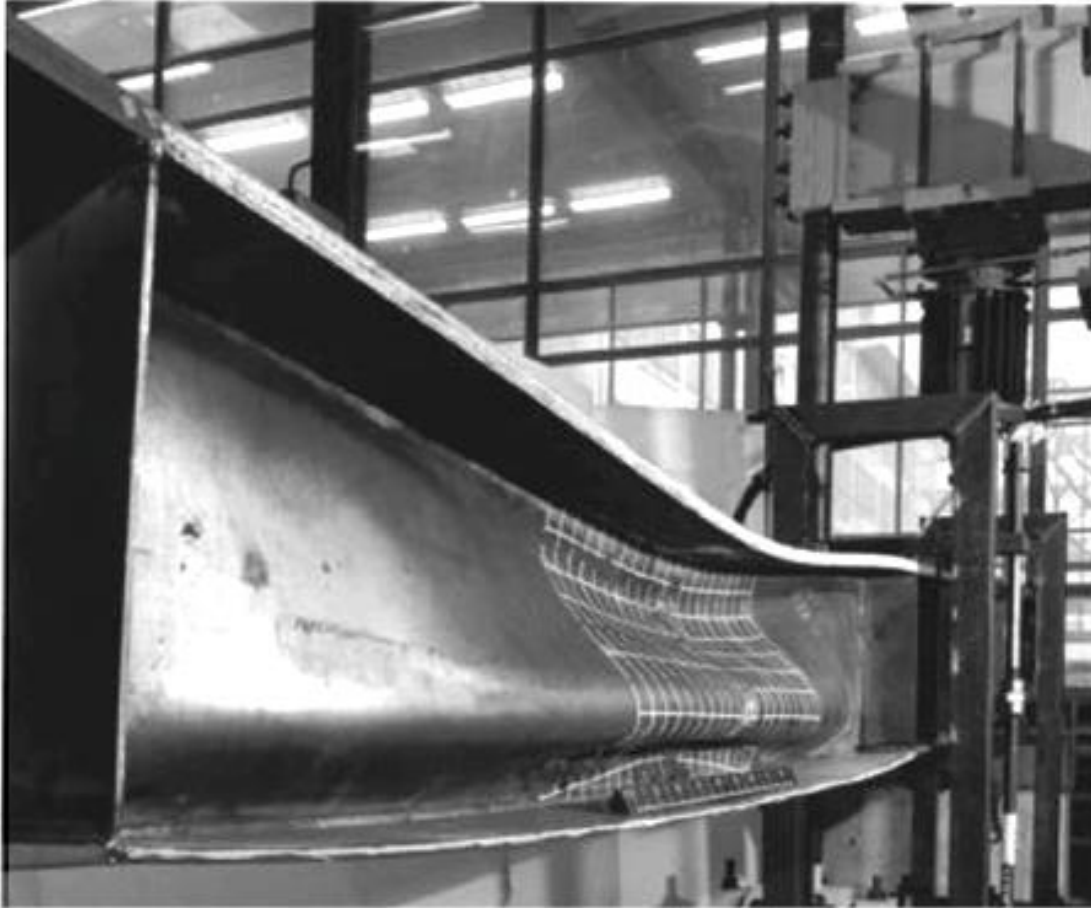
*Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas*

# ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS:



# 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)

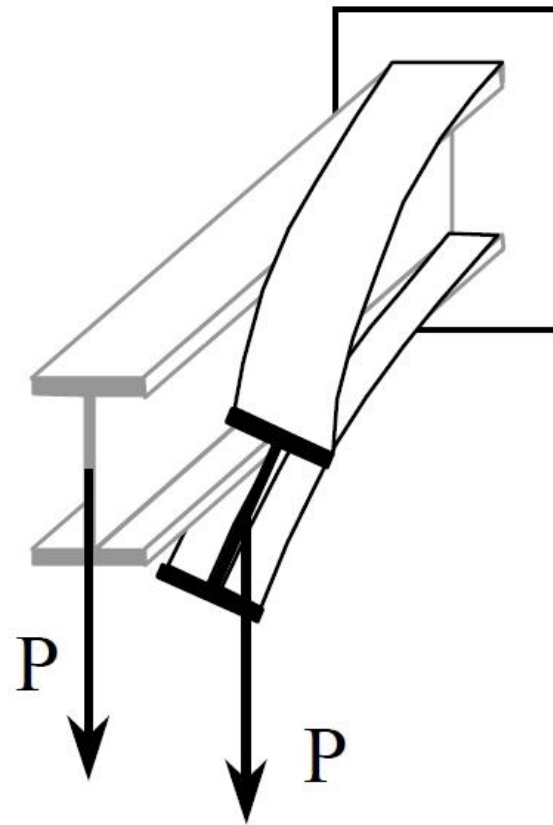


*Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas*



# Barras Flexionadas:

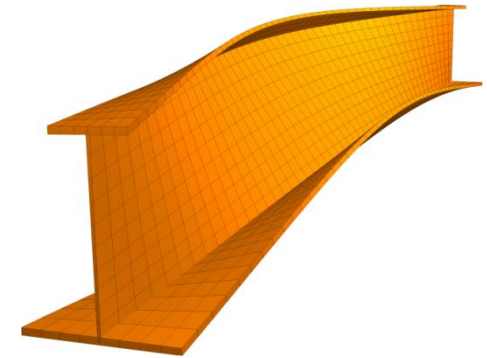
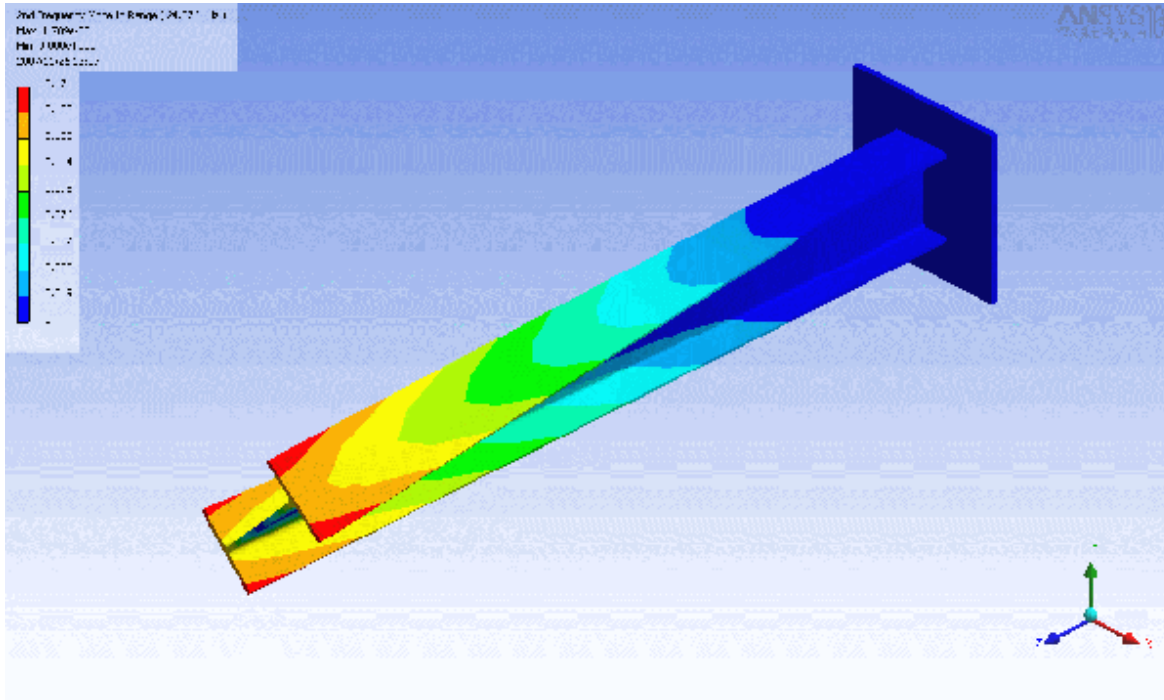
Flambagem lateral com Torção



*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	$M_r$	$M_{cr}$	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
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  $\lambda$

**Passo 2:** Comparar  $\lambda$  com  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$

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:

EQ. A

$\lambda_p$

EQ. B

$\lambda_r$

EQ. C

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  $1,5.W.F_y/1,1$

*Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas*

# 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:

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

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

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

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

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  $\sigma$  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,  $\sigma_r$ , 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:  $\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

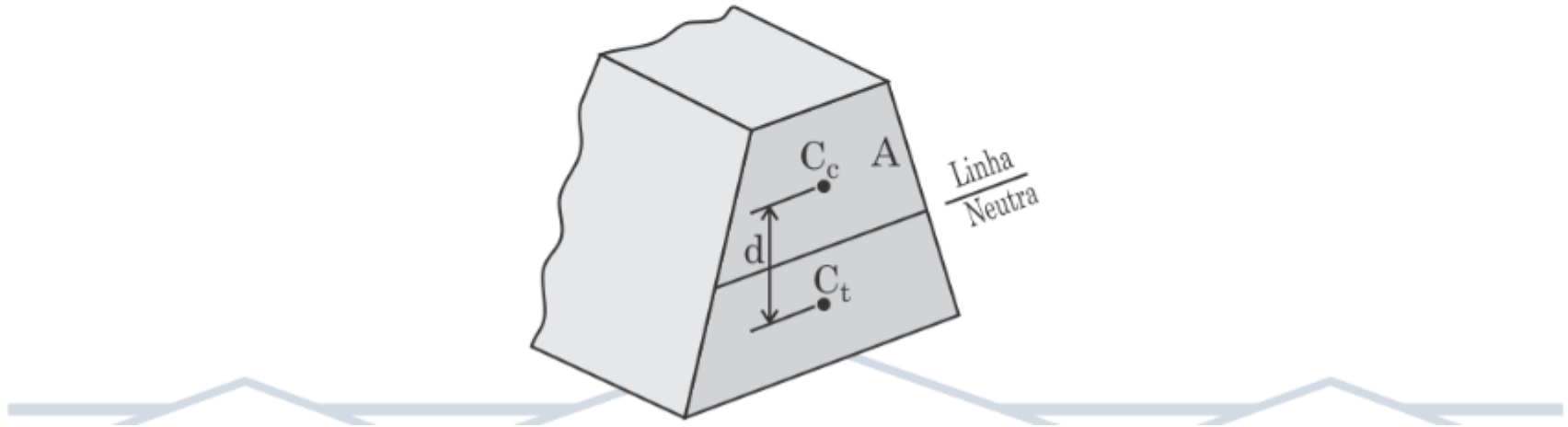
Para seções tubulares retangulares:  $\lambda_p = 2,42 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$



# 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.

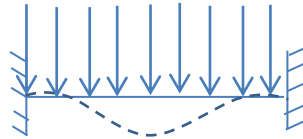
Combinações para E.L.U:

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 <sub>t</sub> cm	I <sub>t</sub> cm⁴	ESBELTEZ	
				t <sub>l</sub> mm	t <sub>t</sub> mm				I <sub>x</sub> cm⁴	W <sub>x</sub> cm³	r <sub>x</sub> cm	Z <sub>x</sub> cm³	I <sub>y</sub> cm⁴	W <sub>y</sub> cm³	r <sub>y</sub> cm	Z <sub>y</sub> cm³			MESA - λ <sub>t</sub> b / 2t <sub>t</sub>	ALMA - λ <sub>w</sub> d' / t <sub>l</sub>
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 <sub>t</sub> cm	I <sub>t</sub> cm⁴	ESBELTEZ	
				t <sub>t</sub> mm	t <sub>w</sub> mm				I <sub>x</sub> cm⁴	W <sub>x</sub> cm³	r <sub>x</sub> cm	Z <sub>x</sub> cm³	I <sub>y</sub> cm⁴	W <sub>y</sub> cm³	r <sub>y</sub> cm	Z <sub>y</sub> cm³			MESA - λ <sub>t</sub> b / 2t <sub>t</sub>	ALMA - λ <sub>w</sub> d' / t <sub>w</sub>
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 <sub>f</sub> mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm <sup>2</sup>	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r <sub>x</sub> cm	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	ESBELTEZ	
				t <sub>w</sub> mm	t <sub>f</sub> mm				I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>x</sub> cm	Z <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>y</sub> cm	Z <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>			MESA - λ <sub>x</sub> b <sub>f</sub> /2t <sub>f</sub>	ALMA - λ <sub>y</sub> d'/t <sub>w</sub>
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 <sub>f</sub> mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm <sup>2</sup>	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r <sub>t</sub> cm	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	ESBELTEZ	
				t <sub>f</sub> mm	t <sub>w</sub> mm				I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>x</sub> cm	Z <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>y</sub> cm	Z <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>			MESA - $\lambda_y$ b <sub>f</sub> /2t <sub>f</sub>	ALMA - $\lambda_w$ d'/t <sub>w</sub>
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 <sub>f</sub> mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm <sup>2</sup>	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r <sub>t</sub> cm	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	ESBELTEZ	
				t <sub>f</sub> mm	t <sub>w</sub> mm				I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>x</sub> cm	Z <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>y</sub> cm	Z <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>			MESA - λ <sub>t</sub> b <sub>f</sub> /2t <sub>f</sub>	ALMA - λ <sub>w</sub> d'/t <sub>w</sub>
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

# 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:

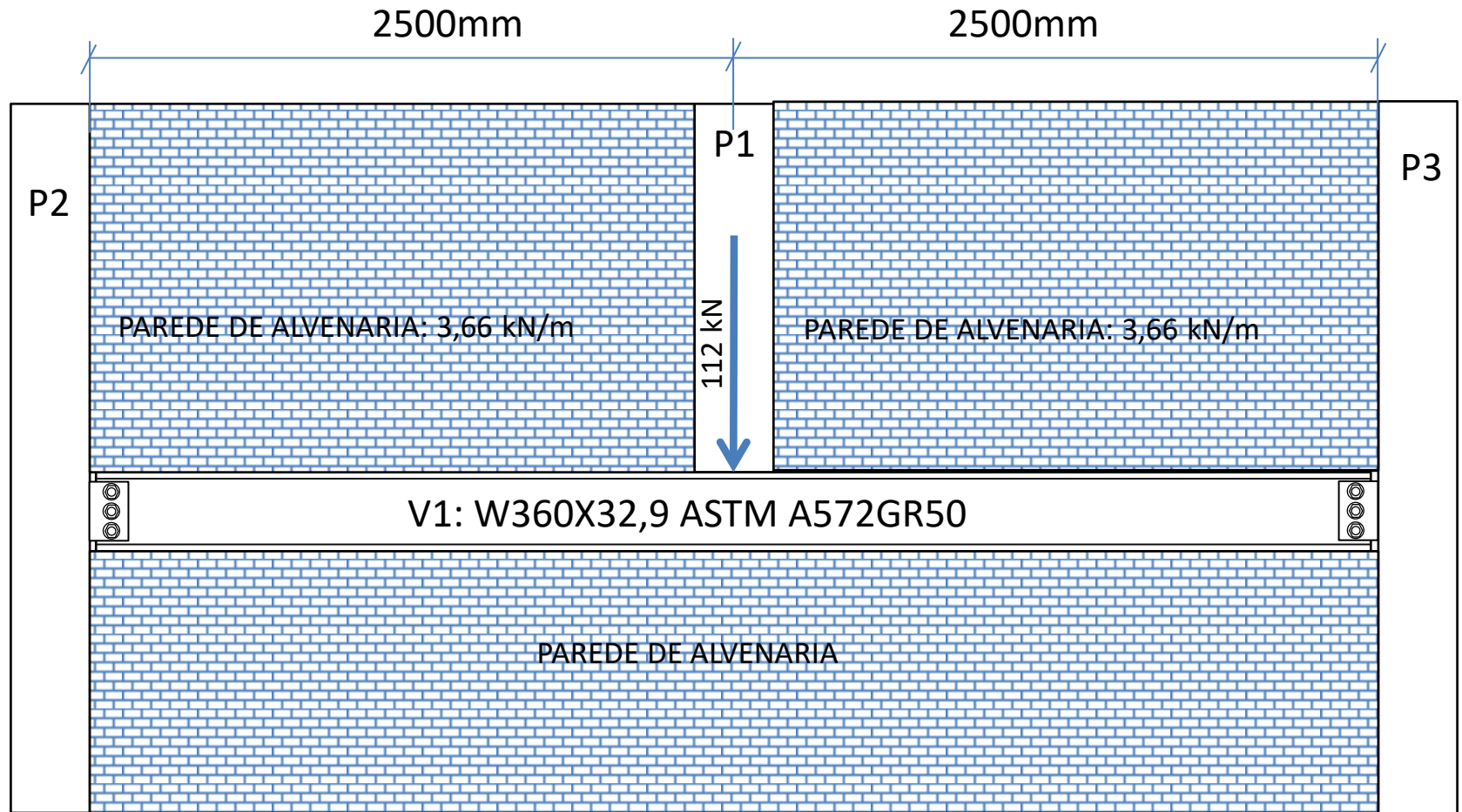
## Verificações E.L.U do perfil W250X25,3

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

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

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

# 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 Açomina ASTM A572GR50. Assuma ligação articulada entre a viga V1 e os pilares P2 e P3. Assuma também que os pilares P2 e P3 permanecem indesejáveis durante o carregamento. As cargas já foram devidamente majoradas na combinação mais desfavorável. Assuma que o coeficiente de majoração médio das cargas é igual a 1,47

# EXERCÍCIO 01

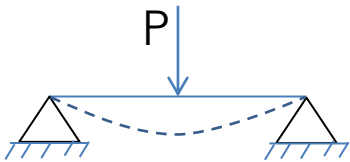
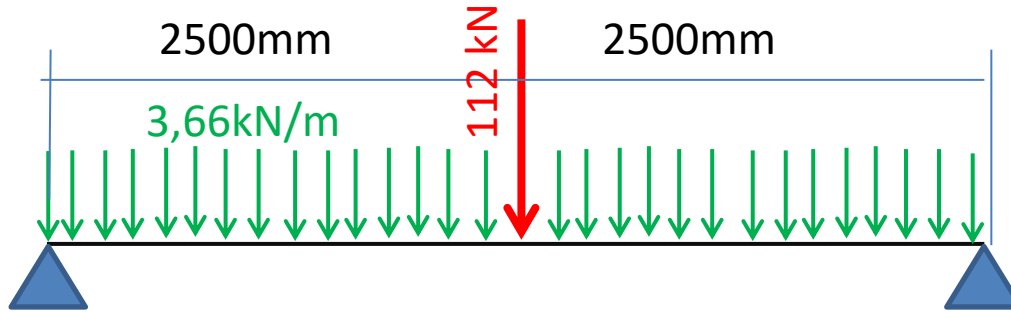
BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b <sub>1</sub> mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm <sup>2</sup>	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r <sub>1</sub> cm	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	ESBELTEZ		C <sub>w</sub> cm <sup>6</sup>	u m <sup>2</sup> /m	BITOLA in x lb/ft
				t <sub>w</sub> mm	t <sub>f</sub> mm				I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>x</sub> cm	Z <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>y</sub> cm	Z <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>			MESA - λ <sub>1</sub>	ALMA - λ <sub>2</sub>			
																			b <sub>1</sub> /2t <sub>w</sub>	d'/t <sub>w</sub>			
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	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	1482,4	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*

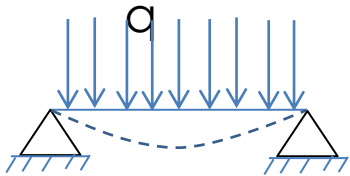


# EXERCÍCIO 01

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:

PONTUAL

PAREDE

PP-VIGA

$$y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} + \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} + \frac{5 \cdot q_{pp} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} = \frac{\left(\frac{112}{1,47}\right) \cdot 500^3}{48 \cdot 20500 \cdot 8358} + \frac{5 \cdot \left(\frac{0,0366}{1,47}\right) \cdot 500^4}{384 \cdot 20500 \cdot 8358} + \frac{5 \cdot (0,00329) \cdot 500^4}{384 \cdot 20500 \cdot 8358} = 1,29 \text{ cm}$$

*Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas*

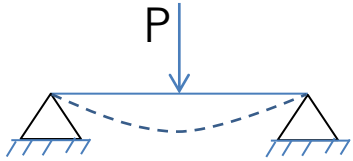
# EXERCÍCIO 01

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

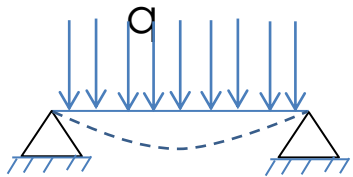
PERFIL ATENDE ESTADO LIMITE DE SERVIÇO > PROCEDER COM AS VERIFICAÇÕES ELU

# EXERCÍCIO 01

## Passo 2 – VERIFICAR ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (Flexão)



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



$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{(0,0366 + 1,47 \cdot 0,00329) \cdot 500^2}{8} = 1295 \text{ kN.cm}$$

$$MSd = 15295 \text{ kN.cm}$$

## Verificação Flambagem Local da Mesa (FLM)

$$\frac{b}{t} = \frac{bf}{2tf} = 7,47$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 9,26 \rightarrow \text{FLM COMPACTO}$$

# EXERCÍCIO 01

Passo 2 – VERIFICAR ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (Flexão)

Verificação Flambagem Local da Alma (FLA)

$$\frac{h}{tw} = \frac{d'}{tw} = 53,10 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 91,62 \rightarrow FLA - COMPACTO$$

Verificação Flambagem Lateral com Torção (FLT)

$$\frac{Lb}{ry} = \frac{500}{2,63} = 190,11 \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 42,90 \rightarrow \text{calcular } \lambda_r$$

# EXERCÍCIO 01

## Passo 2 – VERIFICAR ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (Flexão)

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

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

$$\beta_1 = \frac{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5) \cdot 479}{20500 \cdot 9,15} = 0,0617$$

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

onde:

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

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

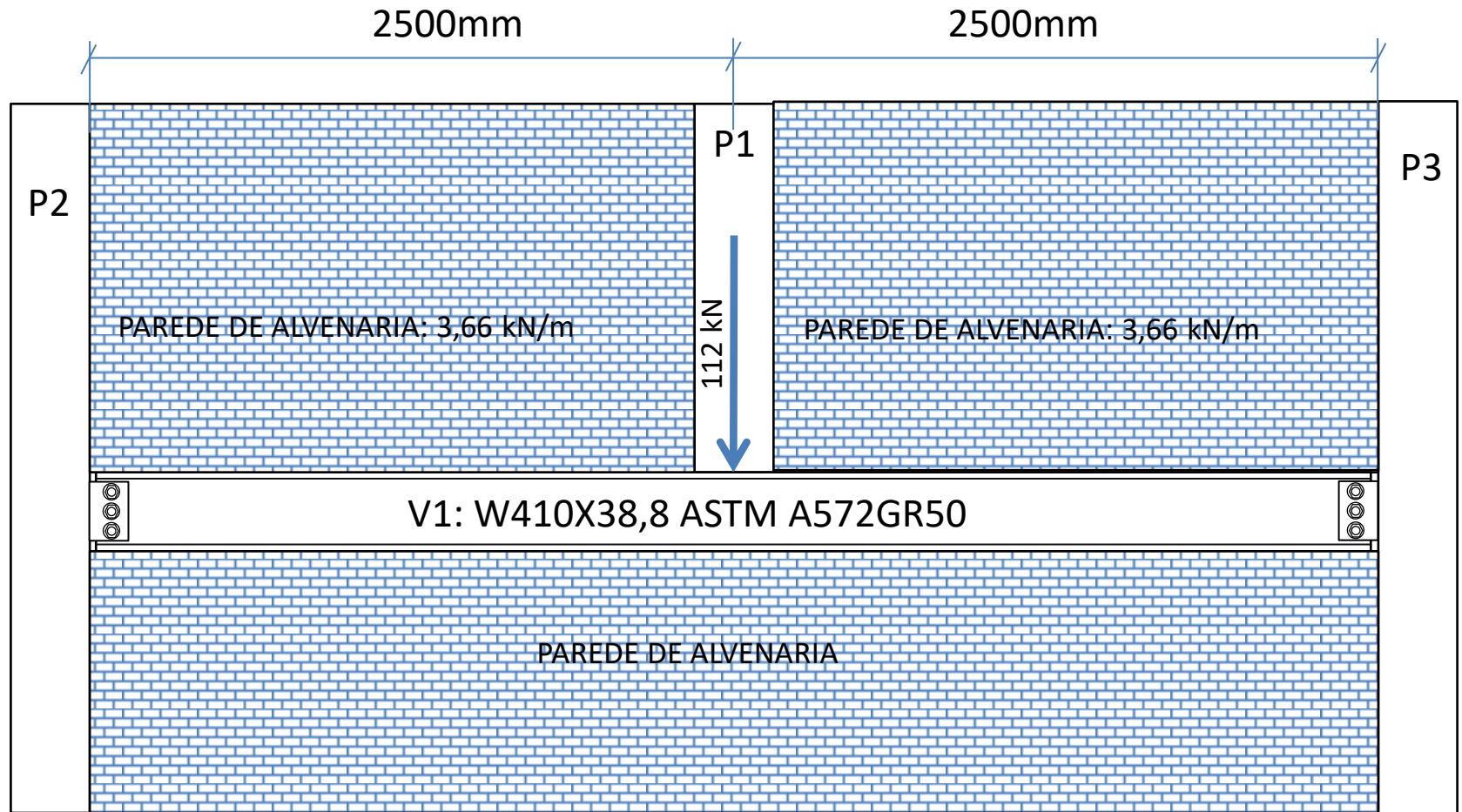
$$C_w = \frac{t_f (b_f - 0,5 t_w)^3 (d - t_f)^2}{12} \left[ \frac{3(b_f - 0,5 t_w) t_f + 2(d - t_f) t_w}{6(b_f - 0,5 t_w) t_f + (d - t_f) t_w} \right], \text{ para seções U}$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{291 \cdot 9,15}}{2,63 \cdot 9,15 \cdot 0,0617} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 84111 \cdot 0,0617^2}{291}}} = 122,66 \rightarrow \text{calcular } M_{cr}$$

$$M_{cr} = \frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 20500 \cdot 291}{500^2} \cdot \sqrt{\frac{84111}{291} \cdot \left( 1 + 0,039 \cdot \frac{9,15 \cdot 500^2}{84111} \right)} = 5747 \text{ kN.cm} - \text{Eq. C}$$

$$M_{Rd,FLT} = \frac{M_{cr}}{1,1} = \frac{5747}{1,1} = 5224 \text{ kN.cm} < 15295 \text{ kNcm} \quad \text{VIGA REPROVADA PELO ESTADO LIMITE FLT (293\%)}$$

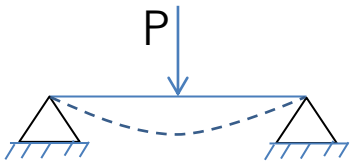
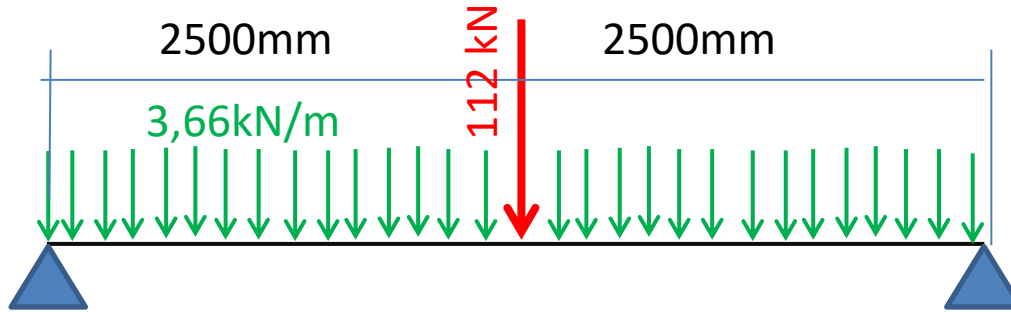
# EXERCÍCIO 02



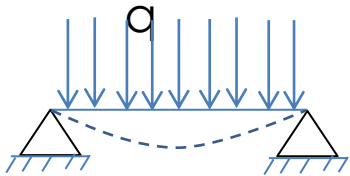
Determine se a bitola da Viga de transição V1 pode ser aprovada relativamente à flexão na situação acima. Utilize Perfis W, H ou HP Açomina ASTM A572GR50. Assuma ligação articulada entre a viga V1 e os pilares P2 e P3. Assuma também que os pilares P2 e P3 permanecem indesejáveis durante o carregamento. As cargas já foram devidamente majoradas na combinação mais desfavorável. Adote 1,47 como coeficiente de majoração médio das cargas

# 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:

PONTUAL

PAREDE

PP-VIGA

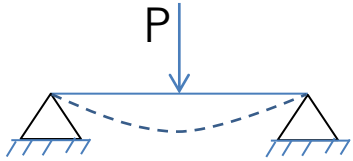
$$y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} + \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} + \frac{5 \cdot q_{pp} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} = \frac{(\frac{112}{1,47}) \cdot 500^3}{48 \cdot 20500 \cdot 12777} + \frac{5 \cdot (\frac{0,0366}{1,47}) \cdot 500^4}{384 \cdot 20500 \cdot 12777} + \frac{5 \cdot 0,00388 \cdot 500^4}{384 \cdot 20500 \cdot 12777} = 0,85 \text{ cm}$$

*Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas*

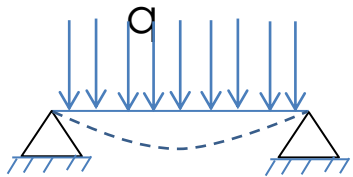


# EXERCÍCIO 02

## Passo 2 – VERIFICAR ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (Flexão)



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



$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{(0,0366 + 1,47 \cdot 0,00388) \cdot 500^2}{8} = 1322 \text{ kN.cm}$$

$$MSd = 15322 \text{ kN.cm}$$

## Verificação Flambagem Local da Mesa (FLM)

$$\frac{b}{t} = \frac{bf}{2tf} = 7,95$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 9,26 \rightarrow \text{FLM COMPACTO}$$

# EXERCÍCIO 02

Passo 2 – VERIFICAR ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (Flexão)

Verificação Flambagem Local da Alma (FLA)

$$\frac{h}{tw} = \frac{d'}{tw} = 55,84 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 91,62 \rightarrow \text{FLA COMPACTO}$$

Verificação Flambagem Lateral com Torção (FLT)

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

# 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:

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

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

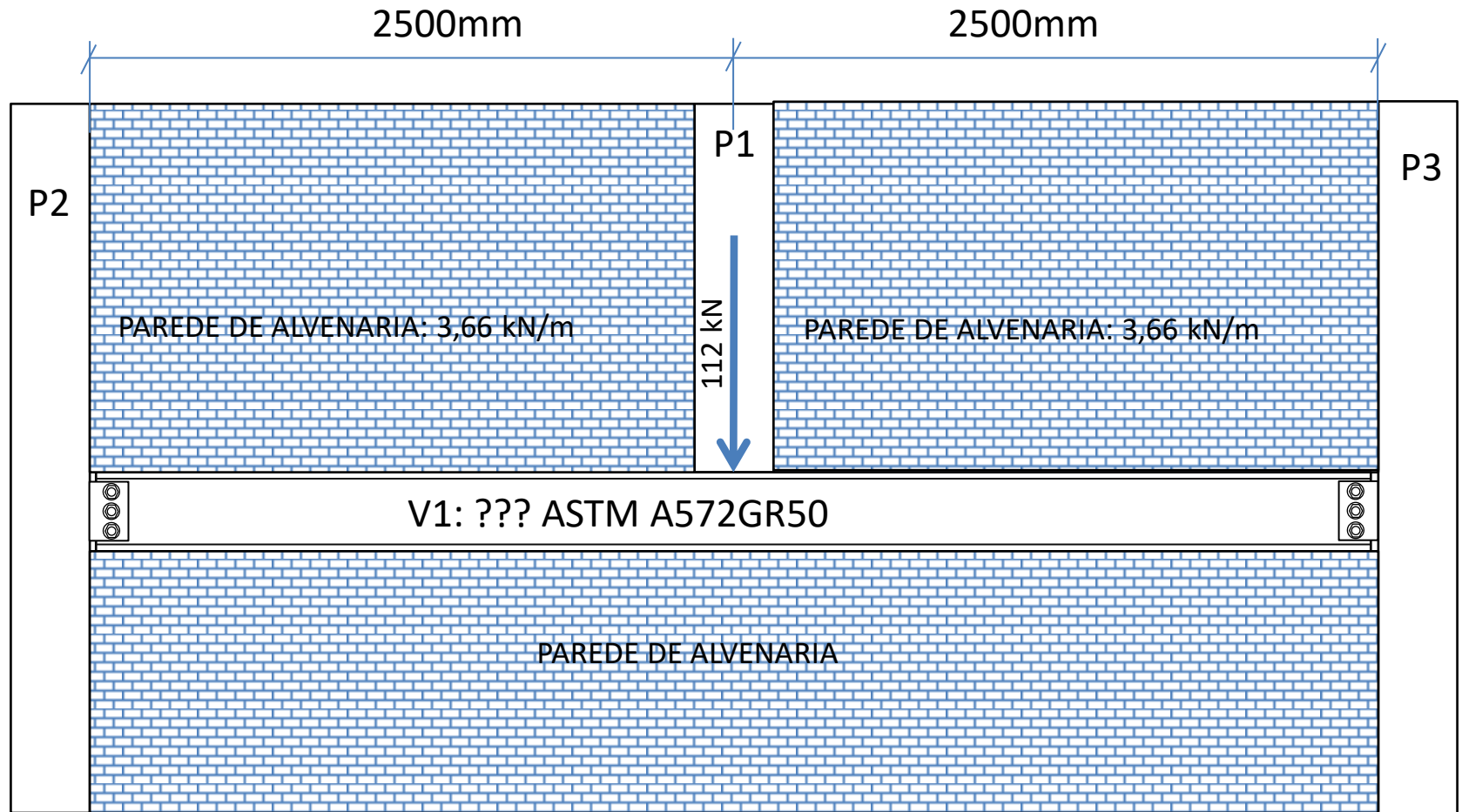
$$C_w = \frac{t_f (b_f - 0,5 t_w)^3 (d - t_f)^2}{12} \left[ \frac{3(b_f - 0,5 t_w) t_f + 2(d - t_f) t_w}{6(b_f - 0,5 t_w) t_f + (d - t_f) t_w} \right], \text{ para seções U}$$

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

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

$$M_{Rd,FLT} = \frac{M_{cr}}{1,1} = \frac{8408}{1,1} = 7643,63 \text{ kN.cm} < 15322 \text{ kNcm} \quad \text{VIGA REPROVADA PELO ESTADO LIMITE FLT (200\%)}$$

# EXERCÍCIO 03



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 indelocáveis durante o carregamento. As cargas já foram devidamente majoradas na combinação mais desfavorável. ADOTAR COEFICIENTE MÉDIO DE MAJORAÇÃO = 1,47

*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

$$\frac{Lb}{r_y} = \frac{500}{4,41} = 113,4 \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 42,90 \rightarrow \text{calcular } \lambda_r$$

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

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{2028 \cdot 51,23}}{4,41 \cdot 51,23 \cdot 0,04143} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 1340255 \cdot 0,04143^2}{2028}}} = 122,30 \rightarrow \text{Eq. B}$$

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  $\lambda > \lambda_r$

$$M_{Rd,FLT} = \frac{1}{1,1} \cdot \left( 2058,5 \cdot 34,5 - (2058,5 \cdot 34,5 - (0,7 \cdot 34,5 \cdot 1801,8)) \cdot \frac{113,4 - 42,90}{122,30 - 42,90} \right) = 42358 \text{ kN.cm}$$

PERFIL APROVADO: 15322 kN.cm / 42358 kN.cm = 36% (VAMOS REDUZIR O PESO)

*Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas*

# EXERCÍCIO 03

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

$$\frac{Lb}{r_y} = \frac{500}{3,98} = 125,62 \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 42,90 \rightarrow \text{calcular } \lambda_r$$

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

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{1205 \cdot 33,78}}{3,98 \cdot 33,78 \cdot 0,0372} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 467404 \cdot 0,0372^2}{1205}}} = 125,13 \rightarrow \text{calcular } M_{cr}$$

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

$$M_{Rd,FLT} = \frac{M_{cr}}{1,1} = \frac{25076}{1,1} = 22796 \text{ kN.cm} > 15322 \text{ kNcm} \quad \text{VIGA APROVADA 67,2\% (VAMOS REDUZIR O PESO)}$$

# EXERCÍCIO 03

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

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

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

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

$$M_{cr} = \frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 20500 \cdot 1009}{500^2} \cdot \sqrt{\frac{387194}{1009} \cdot \left(1 + 0,039 \cdot \frac{23,38 \cdot 500^2}{387194}\right)} = 20162 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rd,FLT} = \frac{M_{cr}}{1,1} = \frac{20162}{1,1} = 18329 \text{ kN.cm} > 15322 \text{ kNcm} \quad \text{VIGA APROVADA 83,5\% (VALOR RAZOÁVEL)}$$



# EXERCÍCIO 03

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

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

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

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

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

O PERFIL MAIS LEVE QUE É APROVADO É O W410X53

# EXERCÍCIO 03

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

$$\frac{b}{t} = \frac{bf}{2tf} = 8,12 \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 9,26 \rightarrow \textit{COMPACTO}$$

Verificação Flambagem Local da Alma (FLA)

$$\frac{h}{tw} = \frac{d'}{tw} = 47,63 \quad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 91,62 \rightarrow \textit{COMPACTO}$$

## EXERCÍCIO 03

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

$$M_{max} = \frac{q.L^2}{8} = \frac{(0,0366 + 1,47 \cdot 0,0053) \cdot 500^2}{8} = 1387 \text{ kN.cm}$$

$$MSd = 15387 \text{ kN.cm} < M_{Rd,FLT} = 18329 \text{ kN.cm} \text{ (84\% de aproveitamento)}$$