

Dimensionamento de Perfis Formados a Frio Aula 04

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Início do escoamento da Seção Efetiva

$$W_c = \frac{I}{d} \text{ (mesa comprimida)} \longrightarrow M_l = \frac{k_l \cdot \pi^2 \cdot E \cdot W_c}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b_w}{t}\right)^2}$$

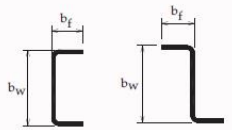
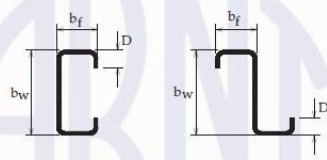
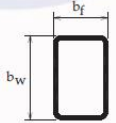
$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W \cdot F_y}{M_l}}$$

$$W_{ef} = W \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \cdot \frac{1}{\lambda_p} \text{ para } \lambda_p > 0,673$$

$$W_{ef} = W \text{ para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} \cdot F_y}{1,1}$$

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Caso a	Seção U simples e Seção Z simples  $k_t = \eta^{-1,843}$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
Caso b	Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido  As expressões a seguir são válidas para $0,2 \leq \eta \leq 1,0$ e para os valores de μ indicados $k_t = a - b(\mu - 0,2)$ $a = 81 - 730\eta + 4\,261\eta^2 - 12\,304\eta^3 + 17\,919\eta^4 - 12\,796\eta^5 + 3\,574\eta^6$ $b = 0 \quad \text{para } 0,1 \leq \mu \leq 0,2 \text{ e } 0,2 \leq \eta \leq 1,0$ $b = 0 \quad \text{para } 0,2 < \mu \leq 0,3 \text{ e } 0,6 < \eta \leq 1,0$ $b = 320 - 2\,788\eta + 13\,458\eta^2 - 27\,667\eta^3 + 19\,167\eta^4 \text{ para } 0,2 < \mu \leq 0,3 \text{ e } 0,2 \leq \eta \leq 0,6$
Caso c	Seção tubular retangular com solda de costura contínua (para seção tubular retangular formada por dois perfis U simples ou U enrijecido com solda de costura intermitente, k_t deve ser calculado para cada perfil isoladamente).  $k_t = 14,5 + 178\eta - 602\eta^2 + 649\eta^3 - 234\eta^4$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
NOTA 1	b_f , b_w e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado na Figura correspondente.
NOTA 2	$\eta = b_f / b_w$.
NOTA 3	$\mu = D / b_w$.

Valores de k_l

$\eta = b_f / b_w$	Caso a	Caso b			Caso c
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido			Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
		$\mu \leq 0,2$	$\mu = 0,25$	$\mu = 0,3$	
0,2	18,4	32,0	25,8	21,2	31,0
0,3	9,6	29,3	23,8	19,7	28,9
0,4	5,6	24,8	20,7	18,2	25,6
0,5	3,6	18,7	17,6	16,0	19,5
0,6	2,6	13,6	13,3	13,0	14,2
0,7	1,9	10,2	10,1	10,1	10,6
0,8	1,5	7,9	7,9	7,9	8,2
0,9	1,2	6,2	6,3	6,3	6,6
1,0	1,0	5,1	5,1	5,1	5,3
NOTA 1 b_f , b_w e D são a largura nominal da mesa, da alma e do enrijecedor de borda, respectivamente.					
NOTA 2 $\mu = D / b_w$.					
NOTA 3 Para valores intermediários interpolar lineamente.					

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Flambagem Lateral com Torção

$$\chi_{FLT} : \begin{cases} \chi_{FLT} = 1,0 \text{ para } \lambda_0 \leq 0,6 \\ \chi_{FLT} = 1,1 \cdot (1 - 0,278\lambda_0^2) \text{ para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \\ \chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2} \text{ para } \lambda_0 \geq 1,336 \end{cases}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c \cdot F_y}{M_e}}$$

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, dado por:

$$r_0 = [r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2]^{0,5}$$

Seções simétricas ou duplamente simétricas fletidas em relação ao eixo DE SIMETRIA

$$M_e = C_b \cdot r_0 \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{ez}} \quad C_b = \frac{12,5M_{max}}{2,5M_{max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 4 \cdot M_C} \text{ ou } C_b = 1,0 \text{ a favor da segurança}$$

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Seções Z ponto-simétricas com carregamentos no plano da alma

$$M_e = 0,5 \cdot C_b \cdot r_0 \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{ez}}$$

Seções Caixão fechadas sujeitas a flexão em relação ao eixo X-X

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot J}$$

a) força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2}$$

b) força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2}$$

c) força axial de flambagem global elástica por torção:

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

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

$$W_c = \frac{I}{d} (\text{mesa comprimida}) \longrightarrow M_l = \frac{k_l \cdot \pi^2 \cdot E \cdot W_c}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b_w}{t}\right)^2}$$

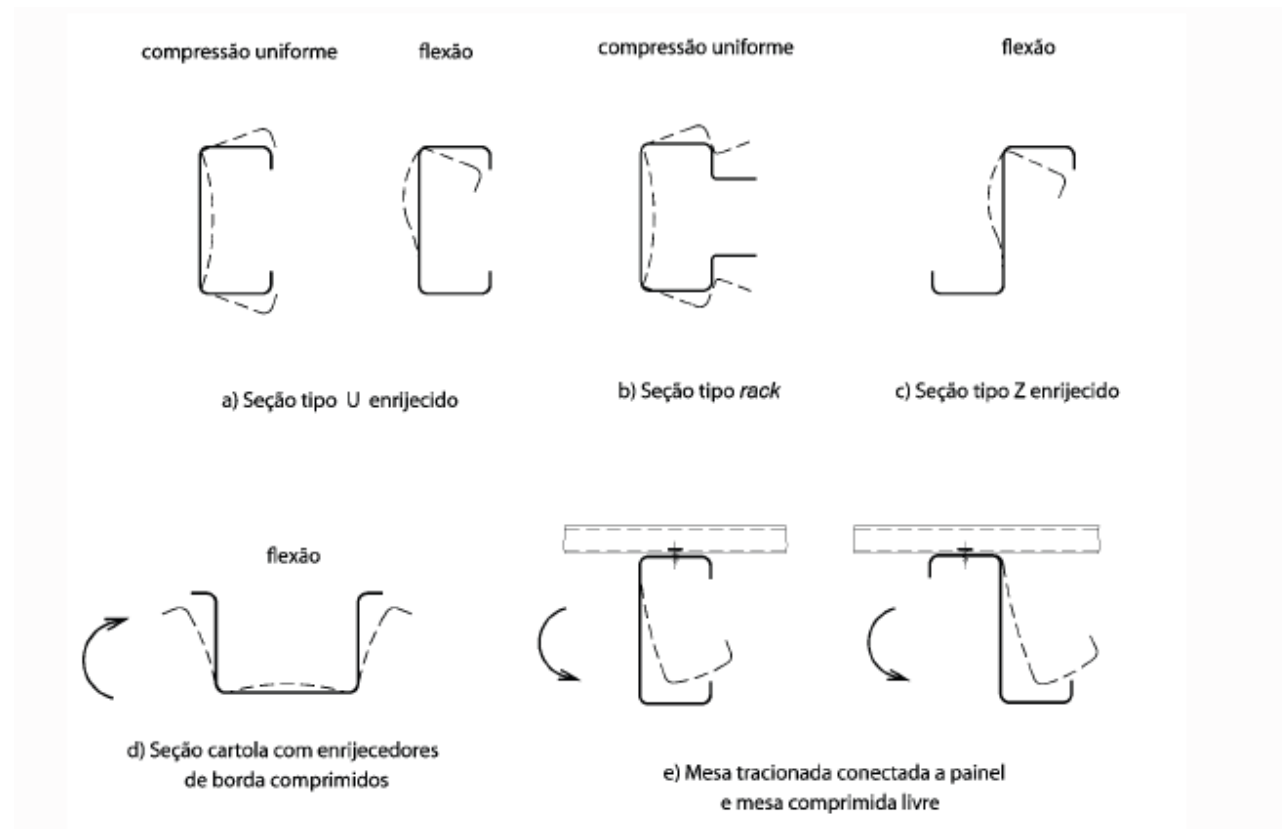
$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi_{FLT} \cdot W_c \cdot F_y}{M_l}} \longrightarrow W_{c,ef} = W_c \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \cdot \frac{1}{\lambda_p} \text{ para } \lambda_p > 0,673$$

$$W_{c,ef} = W_c \text{ para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} \cdot F_y}{1,1}$$

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Flambagem Distorcional



MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

DICA:

A flambagem distorcional requer cálculos mais complexos, mas nem todos os perfis estão sujeitos a esse modo de flambagem.

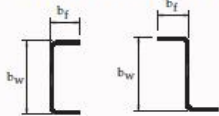
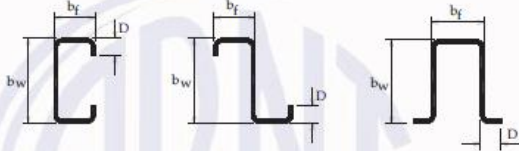
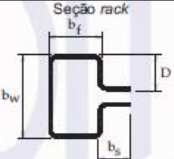
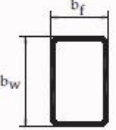
Por isso, sempre que possível e viável vamos selecionar perfis que dispensem essa verificação

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Valores mínimos de D/b_w para Seções U enrijecidas e Seções Z enrijecidas que dispensam verificação de Flambagem Distorcional

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,6	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,8	0,05	0,06	0,09	0,12	0,22
1,0	0,05	0,06	0,09	0,11	0,22
1,2	0,05	0,06	0,09	0,11	0,20
1,4	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,6	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,8	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
2,0	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
NOTA 1 b_f , b_w , e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas figuras da Tabela 9.					
NOTA 2 Para valores intermediários, interpolar linearmente.					

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Caso a	Seção U simples e Seção Z simples  $k_t = 4,0 + 3,4 \eta + 21,8 \eta^2 - 174,3 \eta^3 + 319,9 \eta^4 - 237,6 \eta^5 + 63,6 \eta^6$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
Caso b	Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola  $k_t = 6,8 - 5,8 \eta + 9,2 \eta^2 - 6,0 \eta^3$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0 \text{ e } 0,1 \leq D/b_w \leq 0,3)$
Caso c	Seção rack  $k_t = 6,5 - 3,0 \eta + 2,8 \eta^2 - 1,6 \eta^3$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0 ; 0,1 \leq D/b_w \leq 0,3 \text{ e } 0,1 \leq b_s/b_w \leq 0,4)$
Caso d	Seção tubular retangular com solda de costura contínua (para seção tubular retangular formada por dois perfis U simples ou U enrijecido com solda de costura intermitente, k_t deve ser calculado para cada perfil isoladamente).  $k_t = 6,6 - 5,8 \eta + 8,6 \eta^2 - 5,4 \eta^3$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
NOTA 1 b_f, b_w, b_s e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado na Figura correspondente. NOTA 2 $\eta = b_f / b_w$.	

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Exemplo: Determinar o Mrd de um perfil U enrijecido 150X60X1,50 ASTM A36 sujeito ao esforço de flexão simples em relação ao eixo X-X

Considerar: $L_x = 5000\text{mm}$, $L_y = 5000\text{mm}$ e $L_z = 5000\text{mm}$

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Propriedades no CameliaX

CameliaX

Projet ?

Type de profil

☐ Profil type cornière ☐ Profil type U ☒ Profil type Cé ☐ Profil type Sigma ☐ Profil type Zed

ou

Données

h = mm

t = mm

re = mm

b1 = mm

c1 = mm

b2 = mm

c2 = mm

Galvanisation :

Section :

Section en C

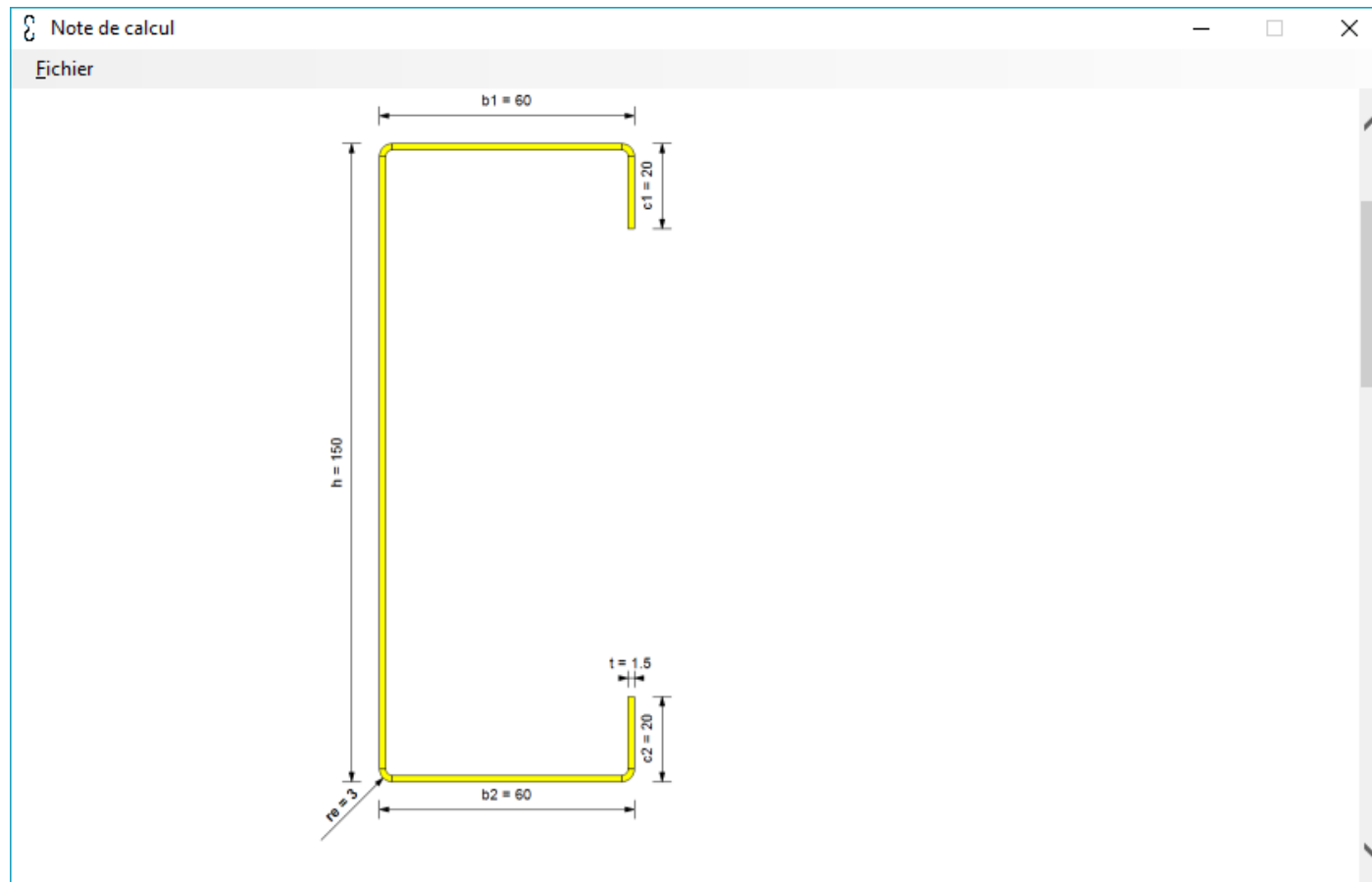
- les semelles peuvent être dissymétriques
- les bords tombés peuvent être absents (c1 et/ou c2 = 0)

Référence du projet :

Exécuter le calcul...

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Propriedades no CameliaX



MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Propriedades no CameliaX

Note de calcul

Fichier

Unités de calcul: cm & degré
Orientation du premier élément $\gamma_0 = -180^\circ$

1	droit	t=0.15	b=1.7	
2	courbe	t=0.15	re=0.3	$\gamma=-90^\circ$
3	droit	t=0.15	b=5.4	
4	courbe	t=0.15	re=0.3	$\gamma=-90^\circ$
5	droit	t=0.15	b=14.4	
6	courbe	t=0.15	re=0.3	$\gamma=-90^\circ$
7	droit	t=0.15	b=5.4	
8	courbe	t=0.15	re=0.3	$\gamma=-90^\circ$
9	droit	t=0.15	b=1.7	

Développée théorique = 30.0137 cm

$A = 4.502 \text{ cm}^2$ $p = 3.534 \text{ Kg/m}$ $J = 0.0338 \text{ cm}^4$

Caractéristiques par rapport aux axes de référence

Coordonnées du centre de gravité : $Y_g = 1.928 \text{ cm}$ $Z_g = 7.5 \text{ cm}$

Coordonnées du centre de cisailment : $Y_c = -2.793 \text{ cm}$ $Z_c = 7.5 \text{ cm}$

$I_y = 158.779 \text{ cm}^4$ $i_y = 5.9387 \text{ cm}$

$v_y = 7.5 \text{ cm}$ $W_{el,y} = 21.171 \text{ cm}^3$

$I_z = 23.333 \text{ cm}^4$ $i_z = 2.2766 \text{ cm}$

$v_{z,max} = 4.072 \text{ cm}$ $W_{el,z,min} = 5.73 \text{ cm}^3$

$v_{z,min} = 1.928 \text{ cm}$ $W_{el,z,max} = 12.102 \text{ cm}^3$

Moment d'inertie sectoriel = 1135.2021 cm⁶

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Há necessidade de verificação de Instabilidade por distorção?

$$\frac{bw}{t} = \frac{150}{1,5} = 100$$

$$\frac{bf}{bw} = \frac{60}{150} = 0,4$$

$$\frac{D}{bw} = \frac{20}{150} = 0,1333 < 0,12$$

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,6	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,8	0,05	0,06	0,09	0,12	0,22
1,0	0,05	0,06	0,09	0,11	0,22
1,2	0,05	0,06	0,09	0,11	0,20
1,4	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,6	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,8	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
2,0	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
NOTA 1 b_f , b_w , e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas figuras da Tabela 9.					
NOTA 2 Para valores intermediários, interpolar linearmente.					

A tensão crítica de flambagem por distorção não é fator crítico para esse perfil

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Início do escoamento da Seção Efetiva

$$W_c = \frac{I}{d} \text{ (mesa comprimida)} \longrightarrow M_l = \frac{k_l \cdot \pi^2 \cdot E \cdot W_c}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b_w}{t}\right)^2}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W \cdot F_y}{M_l}}$$

$$W_{ef} = W \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \cdot \frac{1}{\lambda_p} \text{ para } \lambda_p > 0,673$$

$$W_{ef} = W \text{ para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} \cdot F_y}{1,1}$$

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Início do escoamento da Seção Efetiva

$$W_c = 21,171 \text{ (CameliaX)}$$

Note de calcul

Fichier

Unités de calcul: cm & degré
Orientation du premier élément $\gamma_0 = -180^\circ$

1	droit	t=0.15	b=1.7	
2	courbe	t=0.15	re=0.3	$\gamma=-90^\circ$
3	droit	t=0.15	b=5.4	
4	courbe	t=0.15	re=0.3	$\gamma=-90^\circ$
5	droit	t=0.15	b=14.4	
6	courbe	t=0.15	re=0.3	$\gamma=-90^\circ$
7	droit	t=0.15	b=5.4	
8	courbe	t=0.15	re=0.3	$\gamma=-90^\circ$
9	droit	t=0.15	b=1.7	

Développée théorique = 30.0137 cm

A = 4.502 cm² p = 3.534 Kg/m J = 0.0338 cm⁴

Caractéristiques par rapport aux axes de référence

Coordonnées du centre de gravité : $Y_g = 1.928 \text{ cm}$ $Z_g = 7.5 \text{ cm}$

Coordonnées du centre de cisaillement : $Y_c = -2.793 \text{ cm}$ $Z_c = 7.5 \text{ cm}$

$I_y = 158.779 \text{ cm}^4$ $I_y = 5.9387 \text{ cm}$

$v_y = 7.5 \text{ cm}$ $W_{el,y} = 21.171 \text{ cm}^3$ ←

$I_z = 23.333 \text{ cm}^4$ $I_z = 2.2766 \text{ cm}$

$v_{z,max} = 4.072 \text{ cm}$ $W_{el,z,min} = 5.73 \text{ cm}^3$

$v_{z,min} = 1.928 \text{ cm}$ $W_{el,z,max} = 12.102 \text{ cm}^3$

Moment d'inertie sectoriel = 1135.2021 cm⁶

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Início do escoamento da Seção Efetiva

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{20}{150} = 0,1333$$

$$\eta = \frac{bf}{b_w} = \frac{60}{150} = 0,4$$

$$M_l = \frac{k_l \cdot \pi^2 \cdot E \cdot W_c}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b_w}{t}\right)^2}$$

$\eta = b_f / b_w$	Caso a	Caso b			Caso c
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido			Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
		$\mu \leq 0,2$	$\mu = 0,25$	$\mu = 0,3$	
0,2	18,4	32,0	25,8	21,2	31,0
0,3	9,6	29,3	23,8	19,7	28,9
0,4	5,6	24,8	20,7	18,2	25,6
0,5	3,6	18,7	17,6	16,0	19,5
0,6	2,6	13,6	13,3	13,0	14,2
0,7	1,9	10,2	10,1	10,1	10,6
0,8	1,5	7,9	7,9	7,9	8,2
0,9	1,2	6,2	6,3	6,3	6,6
1,0	1,0	5,1	5,1	5,1	5,3

NOTA 1 b_f , b_w e D são a largura nominal da mesa, da alma e do enrijecedor de borda, respectivamente.

NOTA 2 $\mu = D/b_w$.

NOTA 3 Para valores intermediários interpolar linearmente.

$$M_l = \frac{24,8 \cdot \pi^2 \cdot 20500 \cdot 21,17}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot \left(\frac{150}{1,5}\right)^2} = 972,75 \text{ kN.cm}$$

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Início do escoamento da Seção Efetiva

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W \cdot F_y}{M_l}} \rightarrow \sqrt{\frac{21,17 \cdot 25}{972,75}} = 0,7376$$

$$W_{ef} = W \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \cdot \frac{1}{\lambda_p} \text{ para } \lambda_p > 0,673$$

$$W_{ef} = 21,17 \cdot \left(1 - \frac{0,22}{0,7376}\right) \cdot \frac{1}{0,7376} = 20,14 \text{ cm}^3$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} \cdot F_y}{1,1} \rightarrow \frac{20,14 \cdot 25}{1,1} = 457,74 \text{ kN.cm}$$

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Flambagem Lateral com Torção (FLT)

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, dado por:

$$r_0 = [r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2]^{0,5}$$

$$r_0 = \sqrt{[5,94^2 + 2,28^2 + 1,928^2 + 7,5^2]} = 10,02 \text{ cm}$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20500 \cdot 158,78}{(500)^2} = 128,50 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20500 \cdot 23,33}{(500)^2} = 18,88 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] = \frac{1}{10,02^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot 20500 \cdot 1135,2}{500^2} + 7700 \cdot 0,0338 \right] = 11,74 \text{ kN}$$

$$M_e = C_b \cdot r_0 \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{ez}} \rightarrow 1 \cdot 10,02 \cdot \sqrt{18,88 \cdot 11,74} = 149,95 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c \cdot F_y}{M_e}} \rightarrow \sqrt{\frac{21,17 \cdot 25}{149,95}} = 1,88$$

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Flambagem Lateral com Torção (FLT)

$$\chi_{FLT} : \begin{cases} \chi_{FLT} = 1,0 \text{ para } \lambda_0 \leq 0,6 \\ \chi_{FLT} = 1,1 \cdot (1 - 0,278\lambda_0^2) \text{ para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \\ \chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2} \text{ para } \lambda_0 \geq 1,336 \end{cases} \rightarrow \chi_{FLT} = \frac{1}{1,88^2} = 0,2829$$

$$M_l = \frac{k_l \cdot \pi^2 \cdot E \cdot W_c}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} \rightarrow M_l = \frac{24,8 \cdot \pi^2 \cdot 20500 \cdot 21,17}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot \left(\frac{150}{1,5}\right)^2} = 972,75 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi_{FLT} \cdot W_c \cdot F_y}{M_l}} \rightarrow \lambda_p = \sqrt{\frac{0,2829 \cdot 21,17 \cdot 25}{972,75}} = 0,3923$$

$$W_{c,ef} = W_c \text{ para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} \cdot F_y}{1,1} \rightarrow \frac{0,2829 \cdot 21,17 \cdot 25}{1,1} = 136,11 \text{ kN.cm}$$

MÉTODO DAS SEÇÕES EFETIVAS: DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO COMPOSTA

A força normal solicitante de cálculo e os momentos fletores solicitantes de cálculo devem satisfazer a expressão de interação indicada a seguir:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$