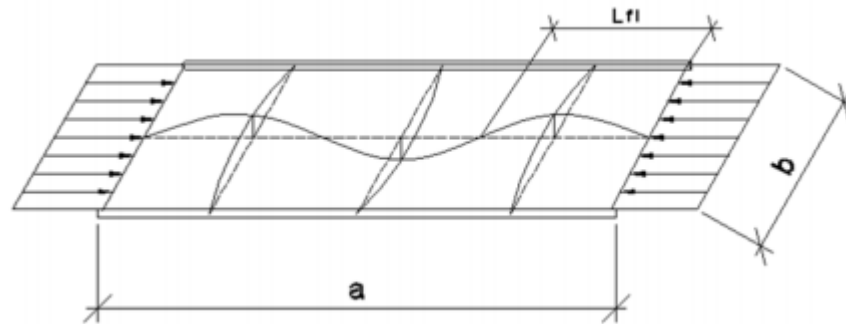


Perfis Formados a Frio – Método das Larguras Efetivas

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

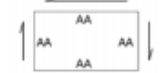
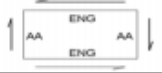
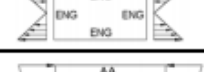
Dimensionamento de Perfis Formados a Frio Método das Larguras Efetivas – M.L.E

Flambagem de uma Placa retangular

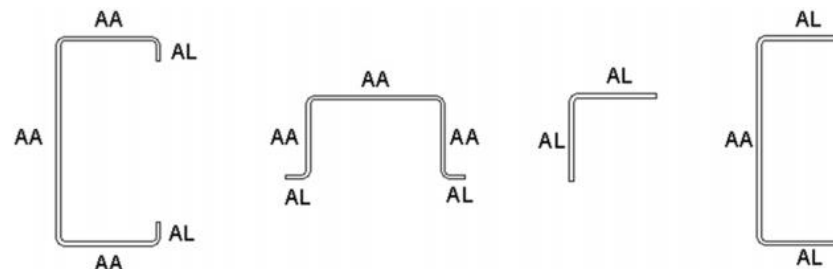


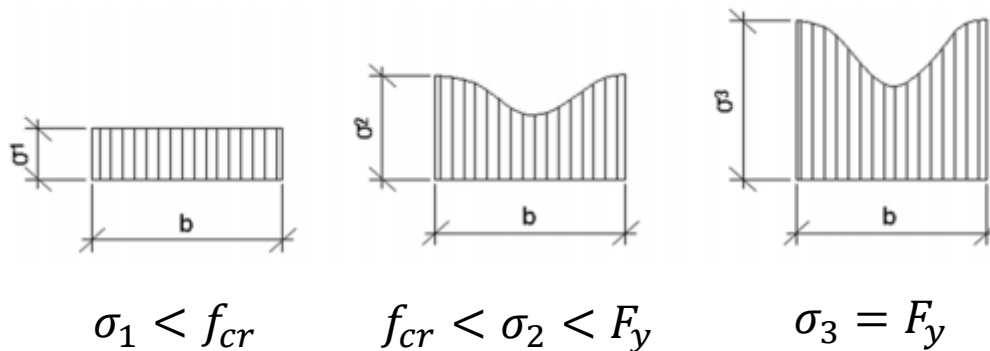
$$f_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2}$$

Onde k é o coeficiente de flambagem da placa

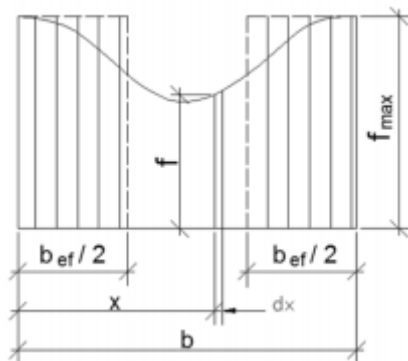
Caso	Tipo de apoio (Condições de contorno)	Tipo de Solicitação	Valor de k	Meio-Comprimento de onda
1		Compressão	4,0	$L_f = b$
2		Compressão	6,97	$L_f = 0,66 b$
3		Compressão	0,425 0,675	$L_f = \infty$ $L_f = 2 b$
4		Compressão	1,277	$L_f = 1,636 b$
5		Compressão	5,42	
6		Corte	5,34 9,35	$L_f = \infty$ $L_f = b$
7		Corte	8,98	
8		Flexão	23,9	$L_f = 0,7 b$
9		Flexão	41,8	
10		Compressão + Flexão	7,81	$L_f = b$
11		Compressão + Flexão	0,57	$L_f = \infty$

o termo “meio comprimento de onda” equivale ao L_f da figura anterior





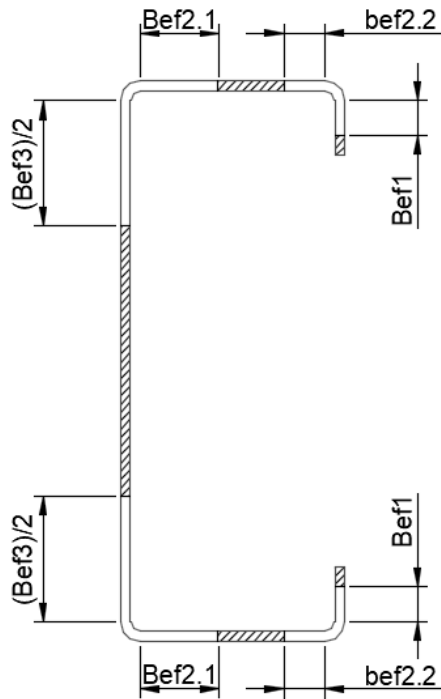
Devido à complexidade dessa análise no dia a dia do profissional, Vón Kárman propôs a substituição das tensões não uniformes por um modelo de tensões uniformes divididas em dois trechos de cada lado do elemento, desconsiderando a parte central, já flambada.



Assim obtemos o conceito de largura efetiva (b_{ef})

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}}$$

$$b_{ef} = b \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p}$$

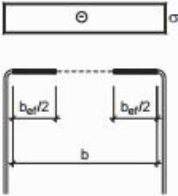
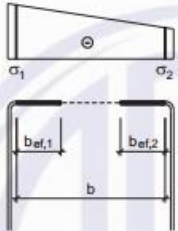
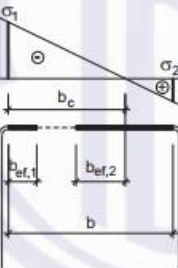
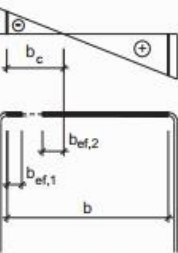


K = 4 para elementos AA **totalmente** enrijecidos

K = 0,43 para elementos AL

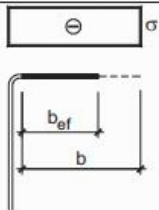
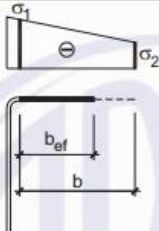
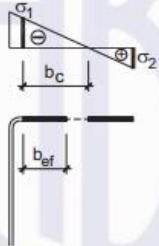
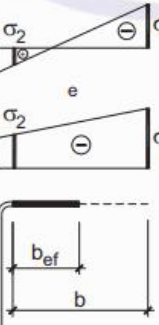
$$\text{para } \lambda_p \leq 0,673, b_{ef} = b$$

Tabela 5 — Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AA

Caso a		$k = 4,0$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$
Caso c	 A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.	$-0,236 < \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$
Caso d	 A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq -0,236$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = 0,5b_{ef}$ sendo $b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$

NOTA O sinal (-) indica compressão.

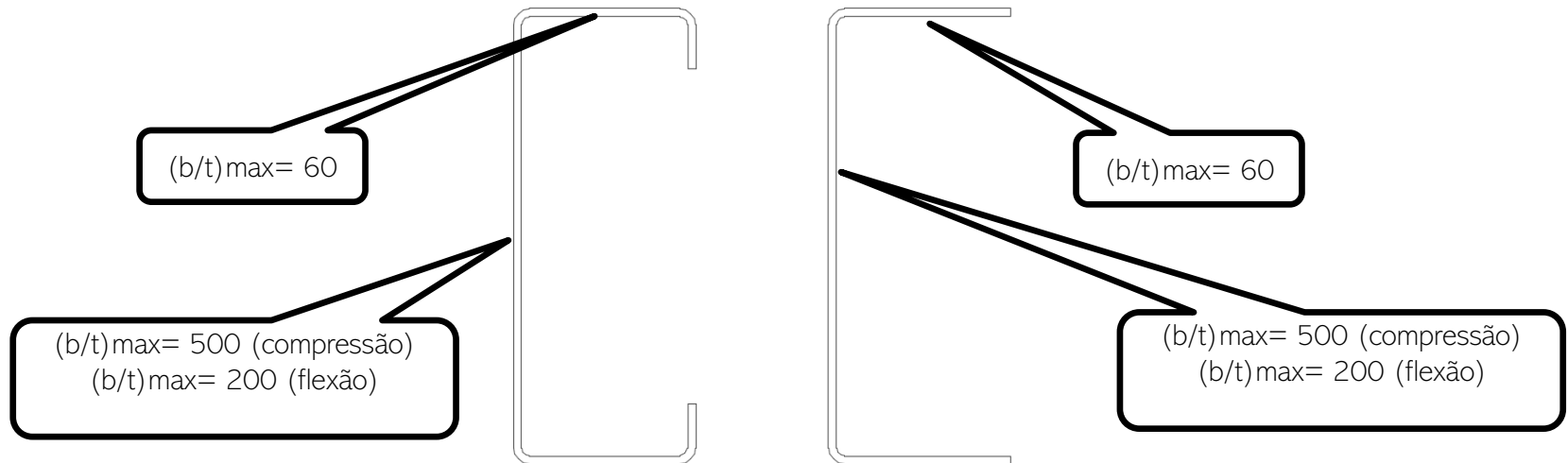
Tabela 6 — Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AL

Caso a		$k = 0,43$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $k = 0,578 / (\psi + 0,34)$
Caso c	 A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.	$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $k = 1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$
Caso d		$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq 1,0$ $k = 0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$

NOTA O sinal (-) indica compressão.

Tabela 4 — Valores máximos da relação largura-espessura

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura-espessura ^a
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma ou mesa e a outra a enrijecedor de borda simples	$(b/t)_{\max} = 60$ ^b
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma e a outra a mesa ou outro tipo de enrijecedor de borda com $I_s \geq I_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\max} = 90$
Alma de perfis U não enrijecidos sujeita à compressão uniforme	$(b/t)_{\max} = 90$
Elemento comprimido com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	$(b/t)_{\max} = 500$ ^c
Elemento comprimido AL ou AA com enrijecedor de borda tendo $I_s < I_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\max} = 60$ ^b
Alma de vigas sem enrijecedores transversais	$(b/t)_{\max} = 200$
Alma de vigas com enrijecedores transversais apenas nos apoios e satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\max} = 260$
Alma de vigas com enrijecedores transversais nos apoios e intermediários, satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\max} = 300$
^a b é a largura do elemento; t é a espessura. ^b Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\max} = 30$. ^c Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\max} = 250$.	



Eficácia dos Enrijecedores de Borda

para $\lambda_p \leq 0,673 \rightarrow b_{ef} = b$ e $d_s = d_{ef}$

para $\lambda_p > 0,673$

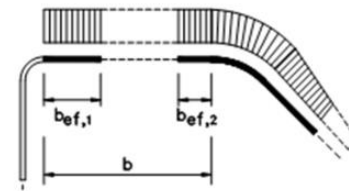
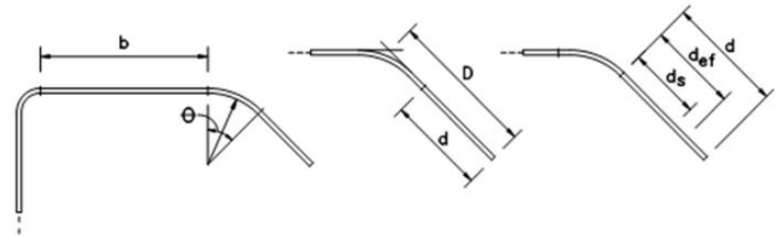
$$b_{ef1} = \left(\frac{I_s}{I_A} \right) \cdot \left(\frac{B_{ef}}{2} \right) \leq \frac{B_{ef}}{2}$$

$$b_{ef2} = b_{ef} - b_{ef1} \quad d_s = \left(\frac{I_s}{I_A} \right) \cdot d_{ef} \leq d_{ef}$$

$$\lambda_{p0} = \frac{\left(\frac{b}{t} \right)}{0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}}}$$

$$I_s = \frac{t \cdot d^3 \cdot \sin^2 \Theta}{12}$$

$$I_A = 399 t^4 (0,487 \cdot \lambda_{p0} - 0,328)^3 \leq t^4 (56 \lambda_{p0} + 5)$$



Eficácia dos Enrijecedores de Borda

Para $\frac{D}{b} < 0,25$

$$k = 3,57 \left(\frac{I_s}{I_A} \right)^n + 0,43 \leq 4$$

Para $0,25 < \frac{D}{b} < 0,80$

$$k = \left(4,82 - \frac{5D}{b} \right) \left(\frac{I_s}{I_A} \right)^n + 0,43 \leq 4$$

$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p_0}) \geq 0,333$$

Aços admitidos pela Norma

Tabela 1 — Chapas finas de aço especificadas por Normas Brasileiras para uso estrutural ^a

Especificação	Grau	f_y (MPa)	f_u (MPa)
ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650 Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono	CF-26	260/260	400/410
	CF-28	280/280	440/440
	CF-30	---/300	---/490
ABNT NBR 5004 Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica	F-32/Q-32	310	410
	F-35/Q-35	340	450
	Q-40	380	480
	Q-42	410	520
	Q-45	450	550
ABNT NBR 5920 / ABNT NBR 5921 Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica	CFR 400	---/250	---/380
	CFR 500	310/370	450/490
ABNT NBR 7008 / ABNT NBR 7013 / ABNT NBR 14964 Chapas finas e bobinas finas com revestimento metálico ^b	ZAR 250	250	360
	ZAR 280	280	380
	ZAR 320	320	390
	ZAR 345	345	430
	ZAR 400	400	450

^a A faixa de espessura disponível varia de acordo com o produtor de aço.

^b Graus conforme ABNT NBR 7008.

4.1.1 Esta Norma recomenda o uso de aços com qualificação estrutural e que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Devem apresentar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento f_u/f_y maior ou igual a 1,08 e o alongamento após ruptura não deve ser menor que 10 % para base de medida igual a 50 mm ou 7 % para base de medida igual a 200 mm, tomando-se como referência os ensaios de tração conforme ASTM A370.

4.1.2 A Tabela 1 apresenta os valores nominais mínimos da resistência ao escoamento (f_y) e da resistência à ruptura (f_u) de aços relacionados por Normas Brasileiras referentes a chapas finas para uso estrutural. Não são relacionados os aços com resistência ao escoamento inferior a 250 MPa, por não estarem sendo utilizados na prática. Informações completas sobre os aços relacionados na Tabela 1 encontram-se nas Normas correspondentes. Para aços destinados a chapas grossas, deve ser consultada a ABNT NBR 8800.

4.1.3 Aços não relacionados na Tabela 1 ou na ABNT NBR 8800 podem ser empregados, desde que atendam às exigências de 4.1.1. Nesse caso deve ser consultada a Norma correspondente.

Barras Comprimidas

1-Escoamento

2-Flambagem Local

3-Flambagem Global

a- Flambagem por Flexão

b – Flambagem por Torção

c – Flambagem por Flexo - Torção

4-Flambagem Por Distorção da Seção Transversal

5-Interação entre modos de falha

Resistência à compressão

1 – Verifica – se $\frac{k.L}{r} < 200$

2 – Calcula – se $N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}, N_{exz}$

3 – Com o menor dos valores calcula – se $\lambda_0 = \sqrt{\frac{A.F_y}{N_e}}$

4 – Calcula – se χ :

$$\text{Se } \lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2}$$

$$\text{Se } \lambda_0 \geq 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

5 – Calcula – se a Resistência do perfil à compressão :

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot F_y}{1,20}$$

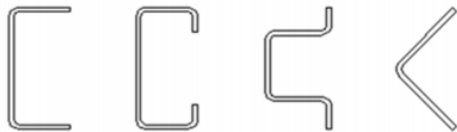
Resistência à compressão

Perfis com Dupla Simetria ou Simétricos em relação a um ponto



$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad ; \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad ; \quad N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

Perfis
Monossimétricos



$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

Perfis Assimétricos



Ne = Menor das raízes da equação abaixo

$$r_0^2(N_e - N_{ex})(N_e - N_{ey})(N_e - N_{ez}) - N_e^2(N_e - N_{ey})x_0^2 - N_e^2(N_e - N_{ex})y_0^2 = 0$$

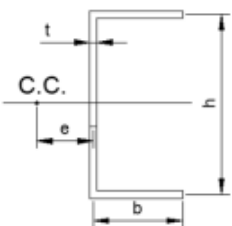
It Para seções abertas (Galambos , 1968)

$$I_t = \sum \frac{b' \cdot t^3}{3}$$

It Para seções fechadas de parede fina

$$I_t = \frac{4 \cdot A_0^2 \cdot t}{p}$$

Perfil U

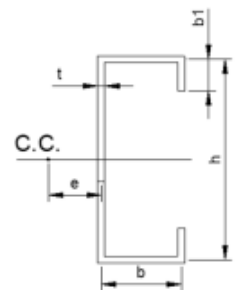


$$e = \frac{3b^2}{h + 6b}$$

$$C_w = \frac{h^2 b^3 t}{12} \frac{2h + 3b}{h + 6b}$$

$$I_t = \frac{t^3}{3} \cdot (h + 2b)$$

Perfil U enrijecido

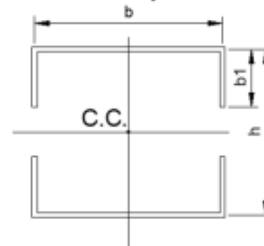


$$e = b \frac{3h^2 b + 6h^2 b_1 - 8b_1^3}{h^3 + 6h^2 b + 6h^2 b_1 + 8b_1^3 - 12hb_1^2}$$

$$I_t = \frac{t^3}{3} (h + 2b + 2b_1)$$

$$C_w = t \left[\frac{h^2 b^2}{2} \left(b_1 + \frac{b}{3} - e - \frac{2eb_1}{b} + \frac{2b_1^2}{h} \right) + \frac{h^2 e^2}{2} \left(b + b_1 + \frac{h}{6} - \frac{2b_1^2}{h} \right) + \frac{2b_1^3}{3} (b + e)^2 \right]$$

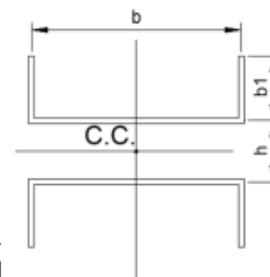
2 perfis U opostos pelas mesas



$$I_t = \frac{4 \cdot [(b - 2t) \cdot (2 \cdot b_1 - 2t)]^2 \cdot t}{(2b + 4 \cdot b_1)}$$

$$C_w = 0$$

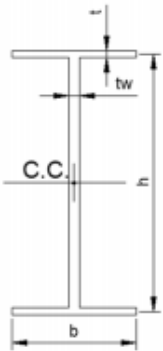
2 perfis U opostos pela alma



$$I_t = \frac{t^3}{3} (2b + 4b_1)$$

$$C_w = \frac{tb^2}{24} (8b_1^3 + 6h^2 b_1 + h^2 b - 12b_1^2 h)$$

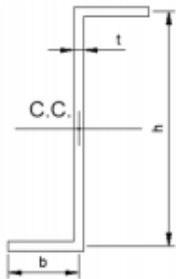
Perfil I



$$I_t = \frac{1}{3} (2b t^3 + h t_w^3)$$

$$C_w = \frac{h^2 t b^3}{24}$$

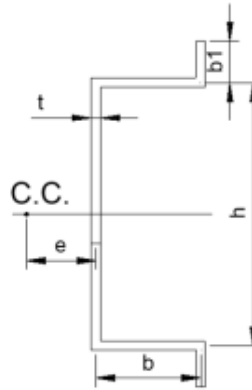
Perfil Z



$$I_t = \frac{t^3}{3} (2b + h)$$

$$C_w = \frac{t h^2 b^3}{12} \left(\frac{b + 2h}{2b + h} \right)$$

Perfil Cartola

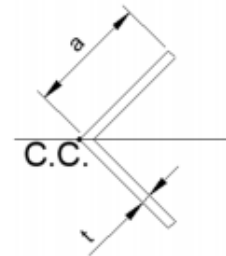


$$e = b \frac{3h^2 b + 6h^2 b_1 - 8b_1^3}{h^3 + 6h^2 b + 6h^2 b_1 + 8b_1^3 + 12h b_1^2}$$

$$I_t = \frac{t^3}{3} (h + 2b + 2b_1)$$

$$C_w = t \left[\frac{h^2 b^2}{2} \left(b_1 + \frac{b}{3} - e - \frac{2e b_1}{b} - \frac{2b_1^2}{h} \right) + \frac{h^2 e^2}{2} \left(b + b_1 + \frac{h}{6} + \frac{2b_1^2}{h} \right) + \frac{2b_1^3}{3} (b + e)^2 \right]$$

Perfil Cantoneira



$$I_t = \frac{t^3}{3} a \quad x_0 = \frac{a\sqrt{2}}{4}$$

$$C_w = 0$$

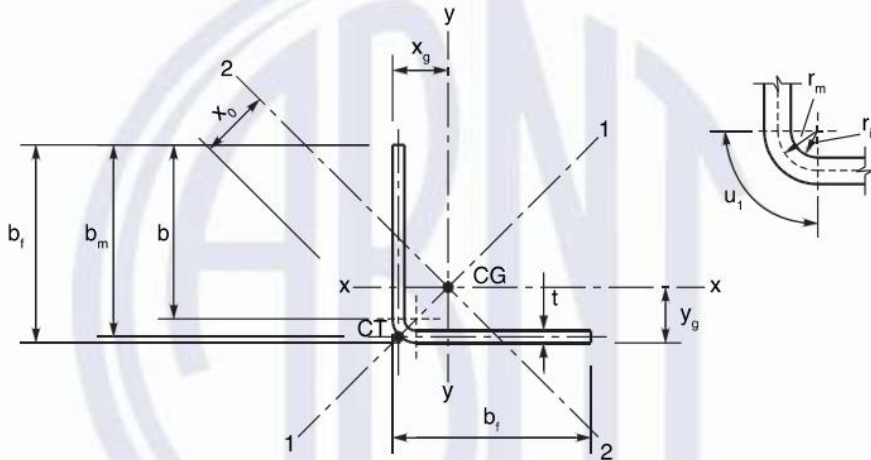


Figura A.1 – Cantoneira de abas iguais

9 Cantoneira de abas iguais

$$A = t(2b + u_1)$$

$$x_g = y_g = \frac{t}{A} [b(0,5b + r_m) + u_1(0,36r_m)] + 0,5t$$

$$x_0 = 1,414(x_g - 0,5t)$$

$$I_x = I_y = t \left[b(0,5b + r_m)^2 + 0,083b^3 + u_1(0,363r_m)^2 + 0,149r_m^3 \right] - A(x_g - 0,5t)^2$$

$$I_{xy} = t \left[u_1(0,363r_m)^2 - 0,137r_m^3 \right] - A(x_g - 0,5t)^2$$

$$I_1 = I_x + |I_{xy}|$$

$$I_2 = I_x - |I_{xy}|$$

$$I_t = 0,333t^3(2b + u_1)$$

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

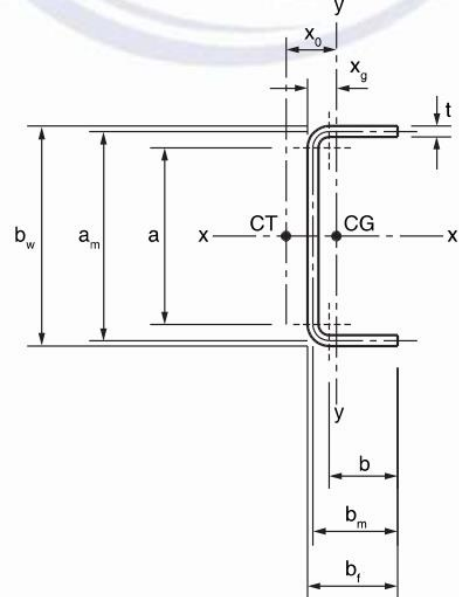


Figura A.2 – Perfil U simples

10 Perfil U simples

$$A = t(a + 2b + u_1)$$

$$x_g = \frac{2t}{A} [b(0,5b + r_m) + u_1(0,363r_m)] + 0,5t$$

$$x_0 = b_m \left(\frac{3a_m^2 b_m}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m} \right) + x_g - 0,5t$$

$$I_x = 2t \left[0,042a^3 + b(0,5a + r_m)^2 + u_1(0,5a + 0,637r_m)^2 + 0,149r_m^3 \right]$$

$$I_y = 2t \left[b(0,5b + r_m)^2 + 0,083b^3 + 0,356r_m^3 \right] - A(x_g - 0,5t)^2$$

$$I_t = 0,333t^3(a + 2b + 2u_1)$$

$$C_w = \frac{a_m^2 b_m^2 t}{12} \left(\frac{2a_m^3 b_m + 3a_m^2 b_m^2}{6a_m^2 b_m + a_m^3} \right)$$

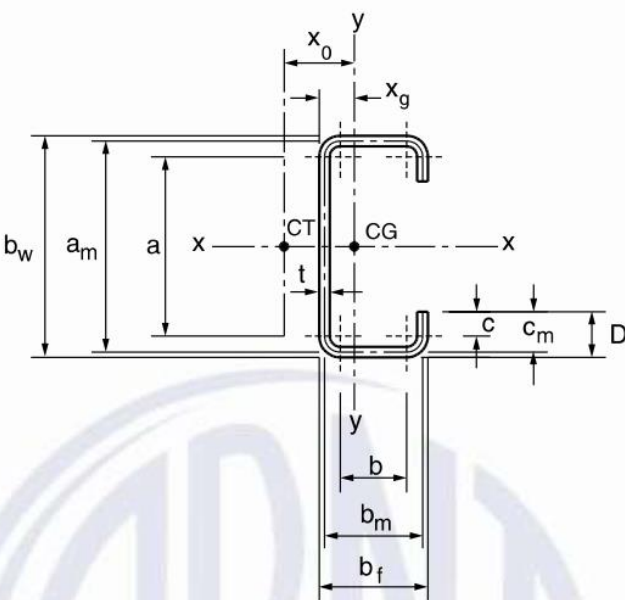


Figura A.3 – Perfil U enrijecido

11 Perfil U enrijecido

$$A = t(a + 2b + 2c + 4u_1)$$

$$x_g = \frac{2t}{A} [b(0,5b + r_m) + (u_1 + c)(b + 2r_m)] + 0,5t$$

$$x_0 = b_m \left[\frac{3a_m^2 b_m + c_m (6a_m^2 - 8c_m^2)}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m + c_m (8c_m^2 - 12a_m c_m + 6a_m^2)} \right] + x_g - 0,5t$$

$$I_x = 2t \left[0,042a^3 + b(0,5a + r_m)^2 + 2u_1 (0,5a + 0,637r_m)^2 \right] + 0,298r_m^3 + 0,083c^3 + 0,25c(a - c)^2$$

$$I_y = 2t \left[b(0,5b + r_m)^2 + 0,083b^3 + 0,505r_m^3 + c(b + 2r_m)^2 \right] + u_1(b + 1,637r_m)^2 - A(x_g - 0,5t)^2$$

$$C_w = \frac{a_m^2 b_m^2 t}{12} \left[\frac{2a_m^3 b_m + 3a_m^2 b_m^2 + 48c_m^4 + 112b_m c_m^3 + 8a_m c_m^3 + 48a_m b_m c_m^2 + 12a_m^2 c_m^2 + 12a_m^2 b_m c_m + 6a_m^3 c_m}{6a_m^2 b_m + (a_m + 2c_m)^3 - 24a_m c_m^2} \right]$$

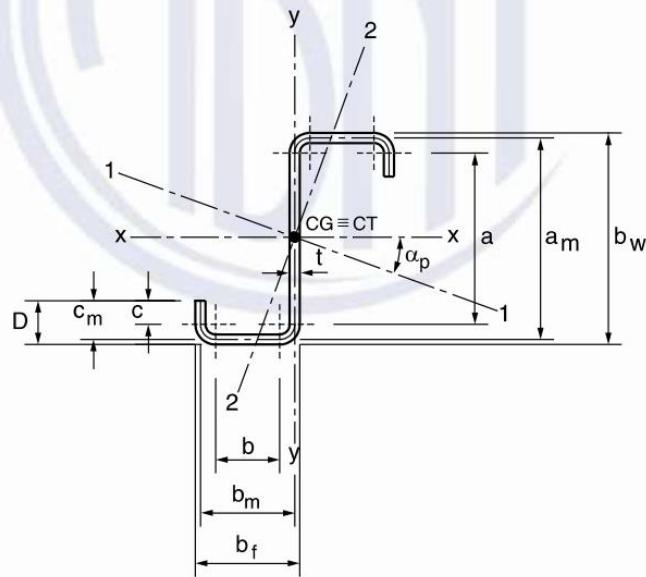


Figura A.4 – Perfil Z enrijecido a 90°

12 Perfil Z enrijecido a 90°

$$A = t (a + 2b + 2c + 4u_1)$$

$$I_x = 2t \left[0,042a^3 + b (0,5a + r_m)^2 + 2u_1 (0,5a + 0,637r_m)^2 + 0,298r_m^3 \right. \\ \left. + 0,083c^3 + c (0,5a - 0,5c)^2 \right]$$

$$I_y = 2t \left[b (0,5b + r_m)^2 + 0,083b^3 + 0,505r_m^3 + c (b + 2r_m)^2 + u_1 (b + 1,637r_m)^2 \right]$$

$$I_{xy} = 2t \left[b (0,5a + r_m) (0,5b + r_m) + 0,5r_m^3 + 0,285ar_m^2 + c (b + 2r_m) (0,5a - 0,5c) \right. \\ \left. - 0,137r_m^3 + u_1 (b + 1,637r_m) (0,5a + 0,637r_m) \right]$$

$$I_1 = \frac{I_x + I_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{I_x - I_y}{2} \right)^2 + I_{xy}^2}$$

$$I_2 = \frac{I_x + I_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{I_x - I_y}{2} \right)^2 + I_{xy}^2}$$

$$\alpha_p = 0,5 \arctg \left(\frac{2I_{xy}}{I_x - I_y} \right)$$

$$I_t = 0,333t^3 (a + 2b + 2c + 4u_1)$$

$$C_w = \frac{t}{12} \left[\frac{a_m^2 b_m^3 (2a_m + b_m) + b_m^2 (4c_m^4 + 16 b_m c_m^3 + 6a_m^3 c_m + 4a_m^2 b_m c_m + 8a_m c_m^3) + 12a_m b_m^2 c_m^2 (a_m + b_m)}{a_m + 2 (b_m + c_m)} \right]$$

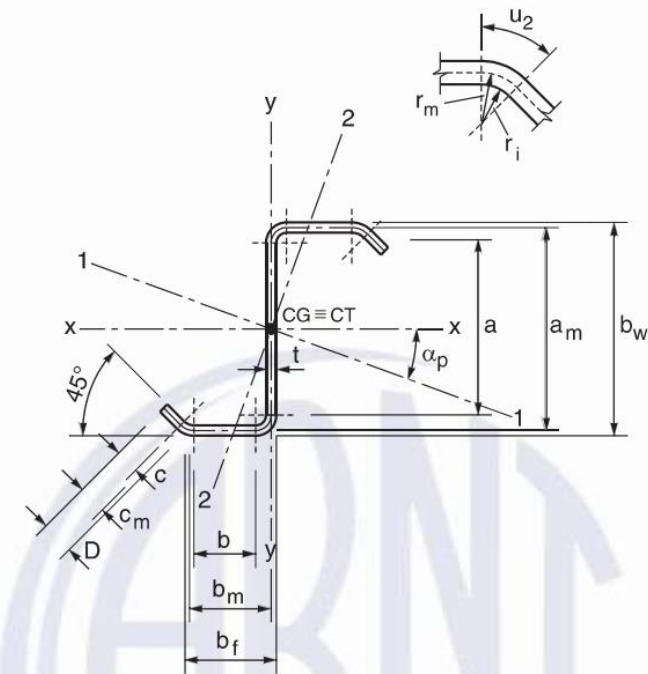


Figura A.5 – Perfil Z enrijecido a 45°

$$A = t(a + 2b + 2c + 2u_1 + 2u_2)$$

$$I_x = 2t \left[0,042a^3 + b(0,5a + r_m)^2 + u_1(0,5a + 0,637r_m)^2 + 0,155r_m^3 + u_2(0,5a + 0,9r_m)^2 + 0,042c^3 + c(0,5a + 0,707r_m - 0,354c)^2 \right]$$

$$I_y = 2t \left[b(0,5b + r_m)^2 + 0,083b^3 + 0,389r_m^3 + c(b + 1,707r_m + 0,354c)^2 + 0,042c^3 + u_2(b + 1,373r_m)^2 \right]$$

$$I_{xy} = 2t \left[b(0,5a + r_m)(0,5b + r_m) + c(b + 1,707r_m + 0,354c)(0,5a + 0,707r_m - 0,354c) + 0,486r_m^3 + 0,285ar_m^2 - 0,042c^3 + u_2(b + 1,373r_m)(0,5a + 0,9r_m) \right]$$

$$I_1 = \frac{I_x + I_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{I_x - I_y}{2}\right)^2 + I_{xy}^2}$$

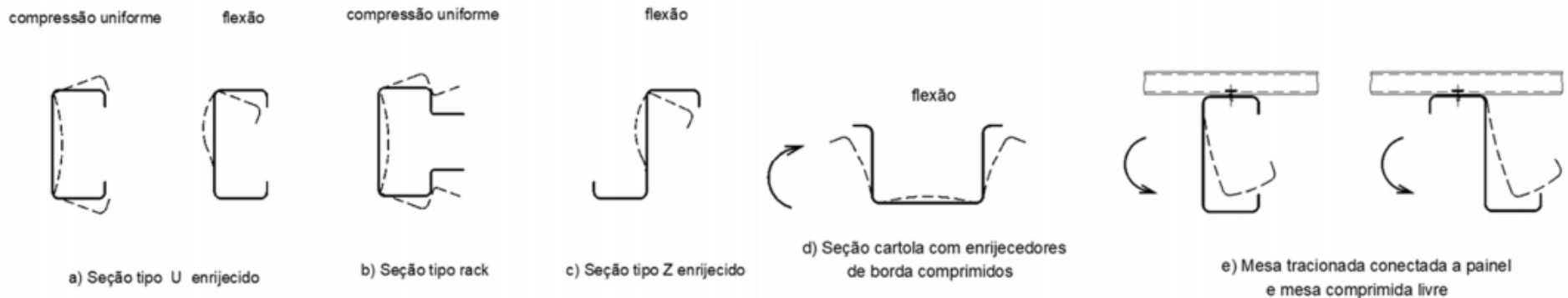
$$I_2 = \frac{I_x + I_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{I_x - I_y}{2}\right)^2 + I_{xy}^2}$$

$$\alpha_p = 0,5 \arctg \left(\frac{2I_{xy}}{I_x - I_y} \right)$$

$$I_t = 0,333t^3(a + 2b + 2c + 2u_1 + 2u_2)$$

$$C_w = \frac{t}{12} \left[\frac{a_m^2 b_m^3 (2a_m + b_m) + b_m^2 (4c_m^4 + 16b_m c_m^3 + 6a_m^3 c_m + 4a_m^2 b_m c_m + 8a_m c_m^3) + 6a_m b_m c_m^2 (a_m + b_m) (1,414b_m + 0,707a_m) + 2a_m b_m c_m^3 (2a_m + 4b_m + c_m) + 0,5c_m^3 (2a_m^3 + 4a_m^2 b_m - 8a_m b_m^2 + a_m^2 c_m - 16b_m^3 - 4b_m^2 c_m)}{a_m + 2(b_m + c_m)} \right]$$

Flambagem por distorção da seção transversal



$$N_{c,Rd} = \chi_{dist} A f_y / 1,20$$

onde:

χ_{dist} é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional, calculado por:

$$\chi_{dist} = 1 \quad \text{para} \quad \lambda_{dist} \leq 0,561$$

$$\chi_{dist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}} \right) \frac{1}{\lambda_{dist}^{1,2}} \quad \text{para} \quad \lambda_{dist} > 0,561$$

A é área bruta da seção transversal da barra;

$\lambda_{dist} = (A f_y / N_{dist})^{0,5}$ é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;

N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica, a qual deve ser calculada com base na análise de estabilidade elástica.

Flambagem por distorção da seção transversal

Tabela 10 - Valores mínimos da relação D/b_w de barras com seção U enrijecido e seção Z enrijecido submetidas à compressão centrada, para dispensar a verificação da flambagem distorcional

	b_w/t				
b_f/b_w	250	200	125	100	50
0,4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08
0,6	0,03	0,04	0,06	0,06	0,15
0,8	0,05	0,06	0,08	0,10	0,22
1,0	0,06	0,07	0,10	0,12	0,27
1,2	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27
1,4	0,06	0,08	0,12	0,15	0,27
1,6	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
1,8	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
2,0	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
b_f , b_w , e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas figuras da Tabela 8. Para valores intermediários interpolar linearmente.					

Exercício 1

Calcular as larguras efetivas, e a Área Efetiva (A_{ef}) para solicitação de compressão (Tensão Uniforme em todos os elementos do perfil) considerando $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$
Área Bruta do perfil: $5,70 \text{ cm}^2$

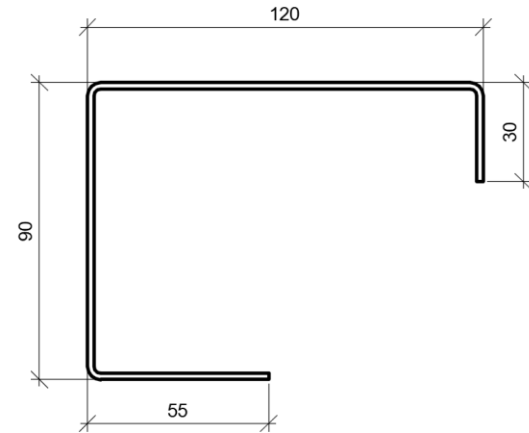
1 – Enrijecedor – Elemento AL: $k = 0,43$

$$b_1 = 3 - (0,2 \cdot 2) = 2,6 \text{ cm}$$

$$\frac{b}{t} = \frac{2,6}{0,2} = 13$$

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{(13)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,43 \cdot 20000}{24}}} = 0,722 > 0,673$$

$$b_{ef1} = b \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \quad b_{ef1} = 2,6 \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{0,722}\right)}{0,722} = 2,50 \text{ cm}$$



$$I_s = \frac{0,2 \cdot 2,6^3}{12} = 0,293 \text{ cm}^4$$

Exercício 1

2 – Mesa Superior – Verificar eficácia do enrijecedor

$$b_2 = 12 - 0,2.4 = 11,2\text{cm} \quad \frac{b}{t} = \frac{11,2}{0,2} = 56 < 60 \text{ OK}$$

$$\lambda_{p_0} = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_{p_0} = \frac{(56)}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{20000}{24}}} = 3,11$$

$$I_A = 399t^4(0,487 \cdot \lambda_{p_0} - 0,328)^3 \leq t^4(56\lambda_{p_0} + 5)$$

$$D/b = \frac{3}{11,2} = 0,2678$$

$$I_A = 399 \cdot 0,2^4(0,487 \cdot 3,11 - 0,328)^3 = 1,07$$

$$I_A = 0,2^4(56 \cdot 3,11 + 5) = \mathbf{0,287}$$

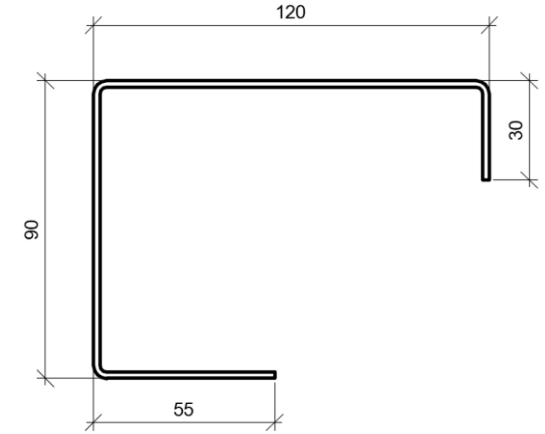
$$\frac{I_s}{I_A} = \frac{0,293}{0,287} = 1,02 - \text{Adotar } 1$$

$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p_0}) \geq 0,333 \quad n = (0,582 - 0,122 \cdot 3,11) \geq 0,20 - \text{Adotar } 0,333$$

$$k = \left(4,82 - \frac{5D}{b}\right) \left(\frac{I_s}{I_A}\right)^n + 0,43 \leq 4 \quad k = \left(4,82 - \frac{5 \cdot 3}{11,2}\right) (1)^{0,333} + 0,43 = 3,91 < 4$$

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{\frac{11,2}{0,2}}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{3,91 \cdot 20000}{24}}} = 1,03 > 0,673$$

$$b_{ef2} = b \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \quad b_{ef2} = 11,2 \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{1,06}\right)}{1,06} = \mathbf{8,37\text{cm}}$$



Exercício 1

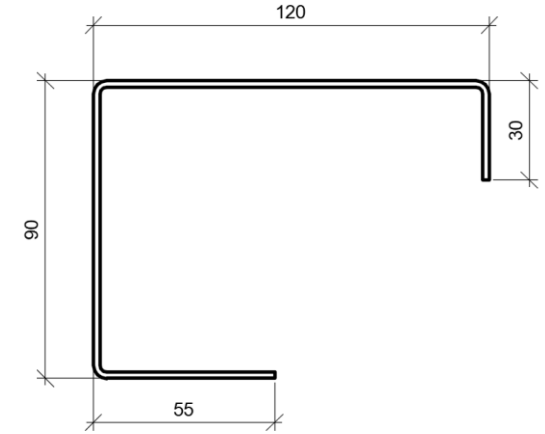
3 – Mesa Inferior – Elemento A.L k = 0,43

$$b_3 = 5,5 - 0,2 \cdot 2 = 5,1 \text{ cm}$$

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{\frac{5,1}{0,2}}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,43 \cdot 20000}{24}}} = 1,42 > 0,673$$

$$b_{ef3} = b \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \quad b_{ef1} = 5,1 \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{1,43}\right)}{1,43} = \mathbf{3,02 \text{ cm}}$$

$$I_s = \frac{0,2 \cdot 5,1^3}{12} = 2,21 \text{ cm}^4$$



Exercício 1

4 – Alma – Verificar eficácia do Enrijecedor

$$b_4 = 9 - 0,2.4 = 8,2\text{cm} \quad \frac{b}{t} = \frac{8,2}{0,2} = 41 < 60 \text{ OK}$$

$$\lambda_{p_0} = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_{p_0} = \frac{(41)}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{20000}{24}}} = 2,28$$

$$I_A = 399t^4(0,487 \cdot \lambda_{p_0} - 0,328)^3 \leq t^4(56\lambda_{p_0} + 5)$$

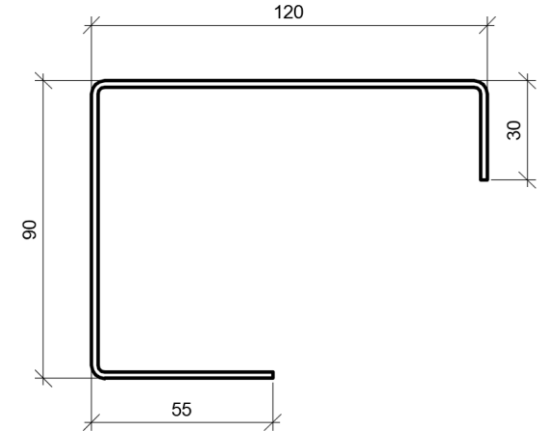
$$D/b = \frac{5,5}{8,2} = 0,67 \quad I_A = 399 \cdot 0,2^4(0,487 \cdot 2,28 - 0,328)^3 = 0,305 \quad \frac{I_s}{I_A} = \frac{2,21}{0,212} = 10,42 - \text{Adotar } 1$$

$$I_A = 0,2^4(56 \cdot 2,28 + 5) = \mathbf{0,212}$$

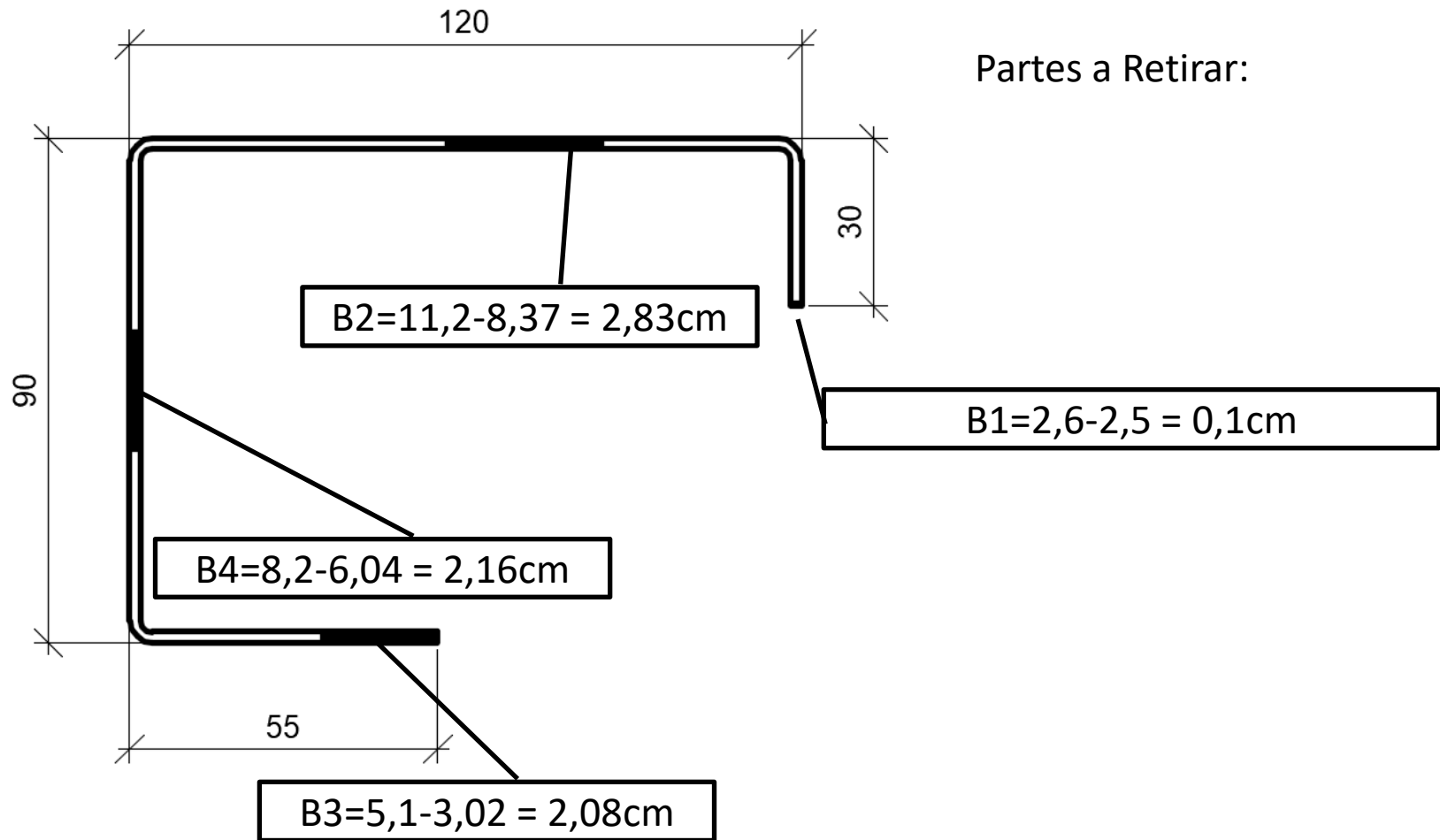
$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p_0}) \geq 0,333 \quad n = (0,582 - 0,122 \cdot 2,28) = 0,304 - \text{Adotar } 0,333$$

$$k = \left(4,82 - \frac{5D}{b}\right) \left(\frac{I_s}{I_A}\right)^n + 0,43 \leq 4 \quad k = \left(4,82 - \frac{5 \cdot 5,5}{8,2}\right) (1)^{0,333} + 0,43 = 1,90 < 4$$

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{\frac{8,2}{0,2}}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{1,90 \cdot 20000}{24}}} = 1,08 > 0,673 \quad b_{ef4} = b \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \quad b_{ef4} = 8,2 \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{1,08}\right)}{1,08} = \mathbf{6,04\text{cm}}$$



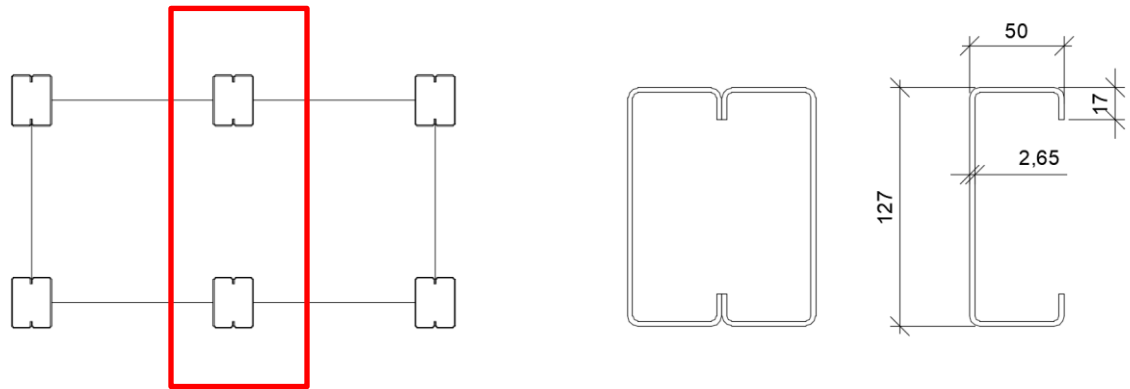
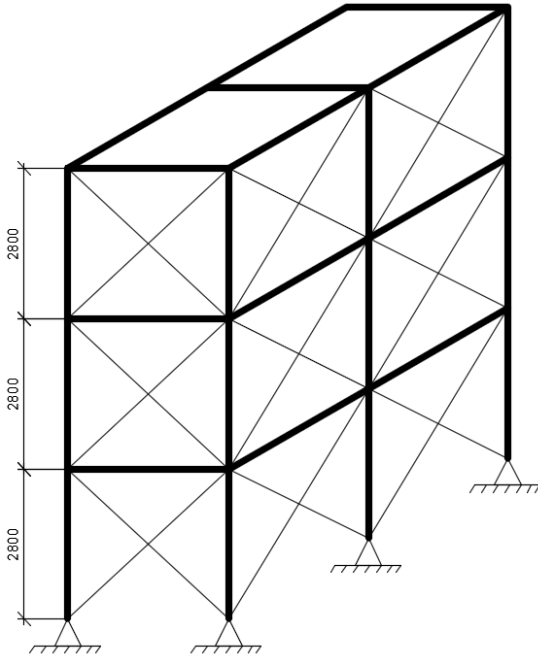
Exercício 1



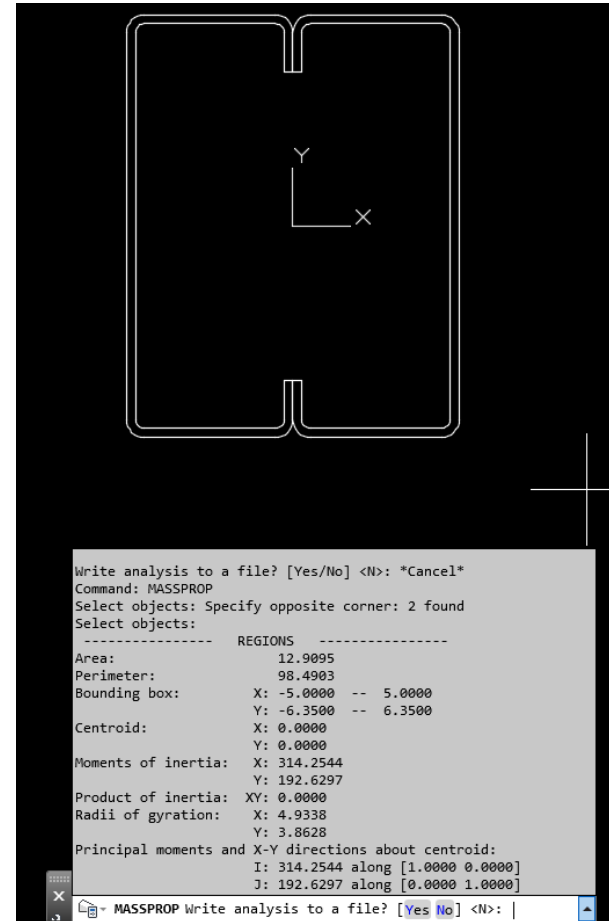
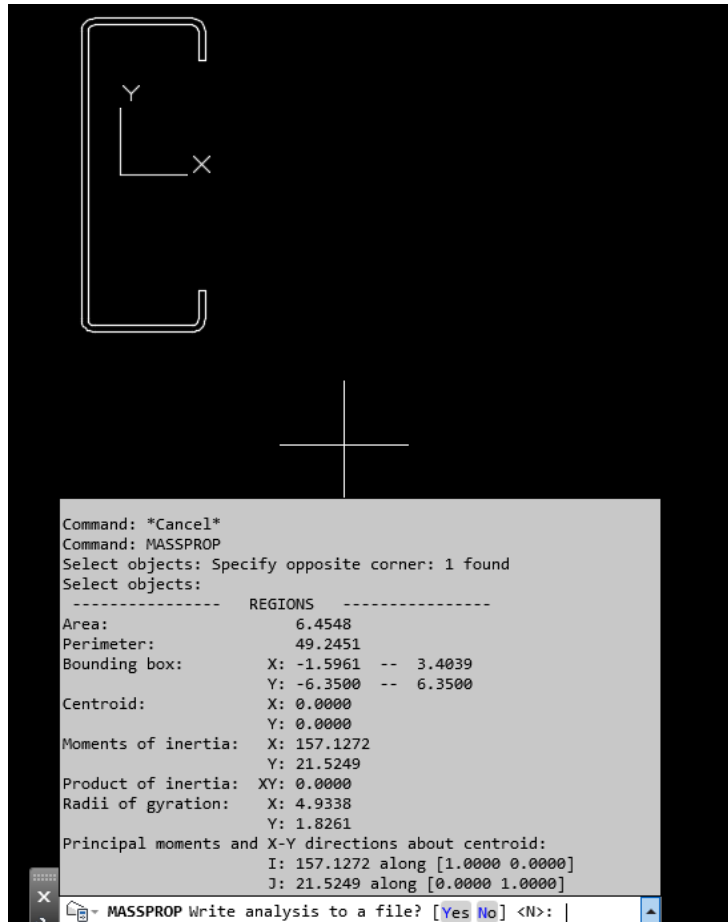
$$A_{ef} = 5,70 - 0,2 \cdot (0,1 + 2,83 + 2,16 + 2,08) = 4,26\text{cm}^2$$

Exercício 2

Verificar a resistência à compressão do perfil abaixo, considerando Material SAE 1020 ($F_y = 24 \text{ kN/cm}^2$ e $F_u = 38 \text{ kN/cm}^2$)



Exercício 2



Exercício 2

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1.840}{4,93} = 170$$

$$\frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1.280}{3,86} = 72,53$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 314,25}{(1.840)^2} = \mathbf{87,91 \text{ kN}}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 192,63}{(1.280)^2} = 485 \text{ kN}$$

$$I_t = \frac{4 \cdot 127^2 \cdot 0,265}{52,2} = 327,5 \text{ cm}^4$$

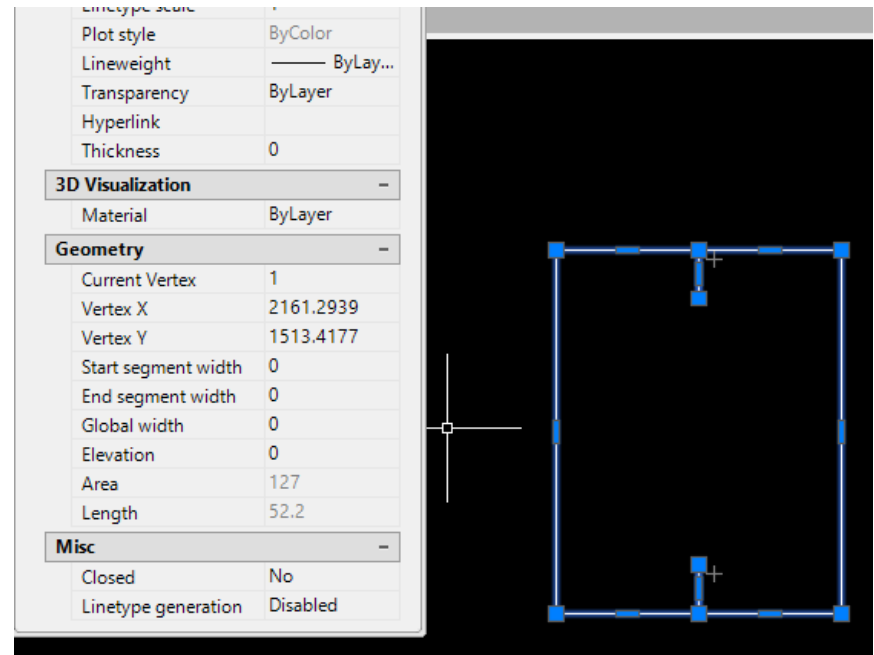
$$C_w = 0$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{317,25 + 192,63}{12,91}} = 6,28 \text{ cm}$$

$$N_{Ez} = \frac{1}{6,28^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot 0}{280^2} + 7700 \cdot 327,5 \right] = 63941 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot F_y}{N_e}} \rightarrow \sqrt{\frac{12,91 \cdot 24}{87,91}} = 1,877 > 1,5$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \rightarrow \frac{0,877}{1,877^2} = 0,25$$



Exercício 2

Cálculo da área efetiva na tensão

$$\sigma = 0,25 \cdot 24 = 6 \text{ kN/cm}^2$$

1 - Enrijecedor: $b = 1,7 - 2 \cdot 0,265 = 1,17 \text{ cm}$ $k = 0,43$ (Elemento AL)

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{\left(\frac{1,17}{0,265}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,43 \cdot 20000}{6}}} = 0,1227 < 0,673 \rightarrow b_{ef} = b = 1,17 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{0,265 \cdot 1,17^3}{12} = 0,035 \text{ cm}^4$$

2 – Mesas – Elemento com enrijecedor de borda (verificar eficácia do enrijecedor)

$$b_2 = 5 - 0,265 \cdot 4 = 3,94 \text{ cm} \quad \frac{b}{t} = \frac{3,94}{0,265} = 14,86 < 60 \text{ OK} \quad \lambda_{p_0} = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{max}}}}$$

$$\lambda_{p_0} = \frac{14,86}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{20000}{6}}} = 0,4131 < 0,673 \text{ – Enrijecedor de borda não é necessário, } b_{ef} = b = 3,94 \text{ cm}$$

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Exercício 2

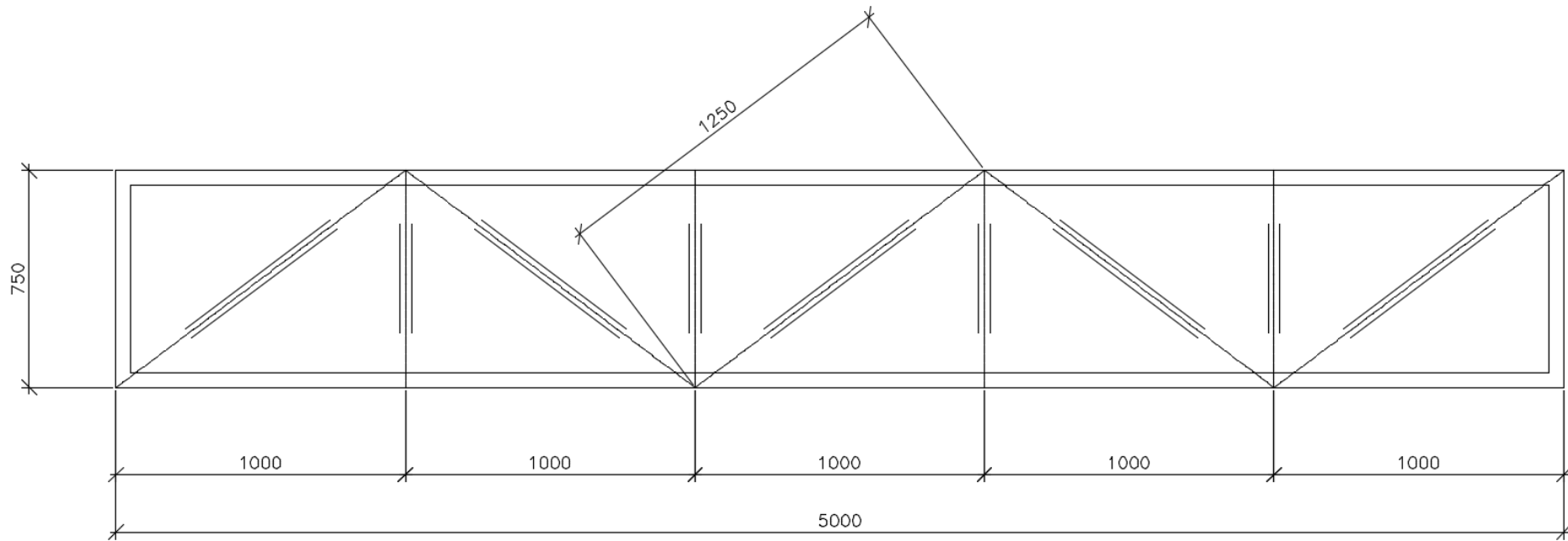
3 – Alma – $b = 12,7 - 4 \cdot 0,265 = 11,64$ (Elemento A.A; $k=4$)

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{\left(\frac{11,64}{0,265}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 20000}{6}}} = 0,40 < 0,673, b_{ef} = b = 11,64 \text{ cm}$$

Toda a seção é efetiva na tensão de flambagem global, portanto não se retira nada da seção transversal e $A_{ef} = A$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot F_y}{1,20} \quad N_{c,Rd} = \frac{0,25 \cdot 12,91 \cdot 24}{1,20} = 64,55 \text{ kN}$$

Exercício 3



Verificar a resistência à compressão do perfil da diagonal acima, considerando Material SAE 1008 ($F_y = 18 \text{ kN/cm}^2$) – Perfil U 150X60X2,00

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1.125}{5,85} = 21,36$$

$$\frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1.125}{1,85} = 67,56$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 180,43}{(1.125)^2} = 2279,40 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 18,19}{(1.125)^2} = \mathbf{229,8 \text{ kN}}$$

$$I_t = \frac{0,2^3}{3} (15 + 2.6) = 0,072 \text{ cm}^4$$

$$C_w = \frac{15^2 \cdot 6^3 \cdot 0,2}{12} \cdot \left(\frac{2 \cdot 15 + 3 \cdot 6}{15 + 6 \cdot 6} \right) = 762,35 \text{ cm}^6$$

$$X_0 = (6 - 0,1) \cdot \left(\frac{3 \cdot (15 - 0,2) \cdot (6 - 0,1)}{(15 - 0,2)^3 + 6(15 - 0,2)^2 \cdot (6 - 0,1)} \right) + 1,4217 - 0,5 \cdot 0,2 = 1,4622$$

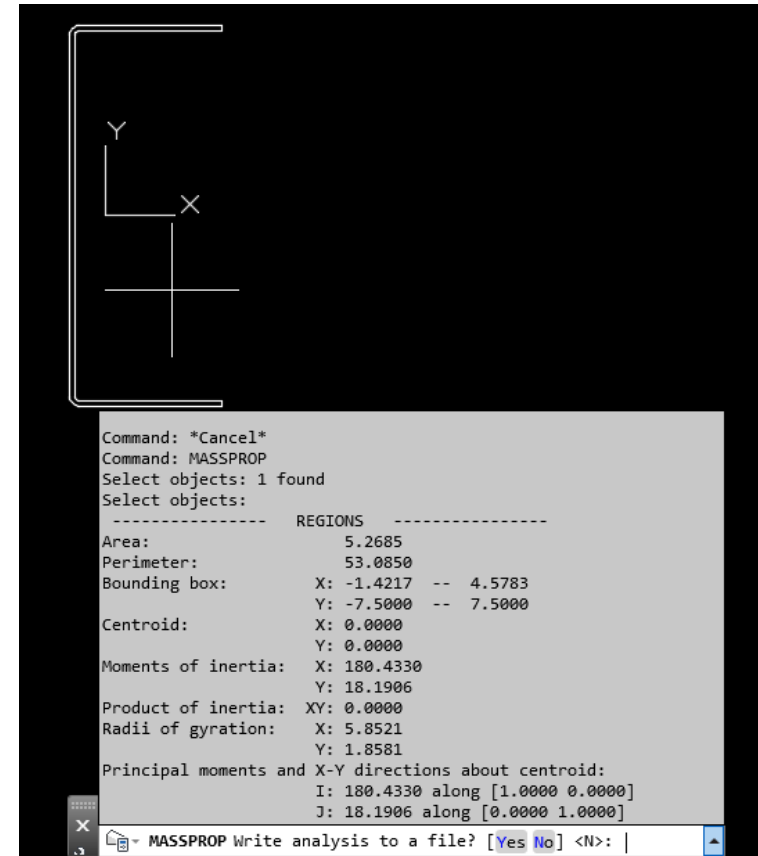
$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x^2 + y^2} \rightarrow \sqrt{5,85^2 + 1,85^2 + 1,4622^2 + 0^2} = 6,30 \text{ cm}$$

$$N_{Ez} = \frac{1}{6,30^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 762,35}{125^2} + 7700 \cdot 0,072 \right] = 256,61 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$N_{Exz} = \frac{2279,4 + 256,61}{2 \left[1 - \left(\frac{1,4622}{6,30} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 2279,4 \cdot 256,61 \left[1 - \left(\frac{1,4622}{6,30} \right)^2 \right]}{(2279,4 + 256,61)^2}} \right] = 483,5 \text{ kN}$$

Exercício 3



Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot F_y}{N_e}} \rightarrow \sqrt{\frac{5,2685 \cdot 18}{229,8}} = 0,64 > 1,5 \quad \chi = 0,658^{0,64^2} = 0,8424$$

Cálculo da área efetiva na tensão

$$\sigma = 0,8424 \cdot 18 = 15,16 \text{ kN/cm}^2$$

1 - Mesa: $b = 6 - 2 \cdot 0,2 = 5,6 \text{ cm}$ $k = 0,43$ (Elemento AL)

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{\left(\frac{5,6}{0,20}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,43 \cdot 20000}{15,16}}} = 1,24 > 0,673$$

$$b_{ef1} = b \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \quad b_{ef1} = 5,6 \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{1,24}\right)}{1,24} = 3,71 \text{ cm} \quad \text{remover } 2 \cdot (5,6 - 3,71) \cdot 0,2 = 0,756 \text{ cm}^2$$

2 - Alma - $b = 15 - 4 \cdot 0,2 = 14,2 \text{ cm}$ $k = 4$ Elemento AA

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{\left(\frac{14,2}{0,20}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 20000}{15,16}}} = 1,02 > 0,673 \quad b_{ef2} = 14,2 \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{1,02}\right)}{1,02} = 10,91$$

$$\text{remover } 1 \cdot (14,2 - 10,91) \cdot 0,2 = 0,658 \text{ cm}^2$$

$$A_{ef} = 5,2685 - 0,756 - 0,658 = 3,85 \text{ cm}^2 \quad N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot F_y}{1,20} \quad N_{c,Rd} = \frac{0,8424 \cdot 3,85 \cdot 18}{1,20} = 48,64 \text{ kN}$$

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Barras Flexionadas

1-Escoamento da seção efetiva

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



Perfil Efetivo na Compressão



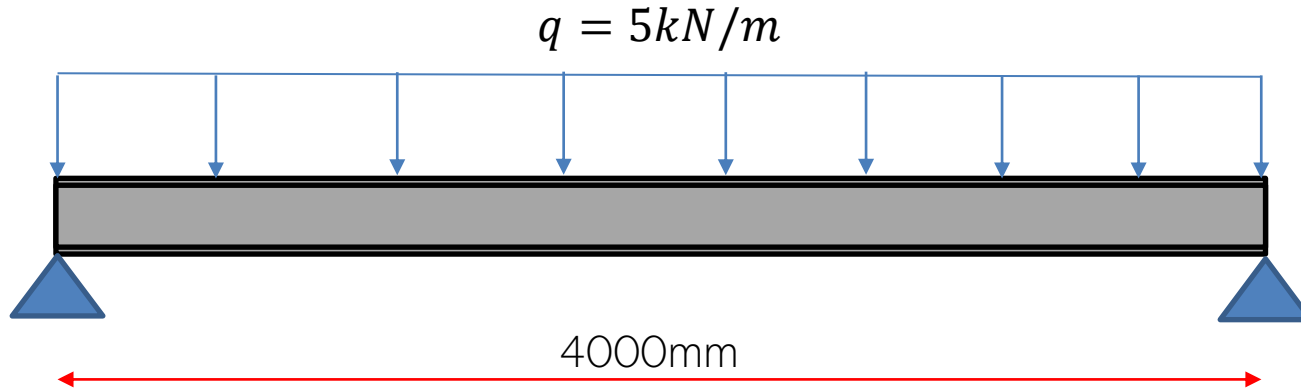
Perfil Efetivo na Flexão

2-Flambagem lateral com Torção

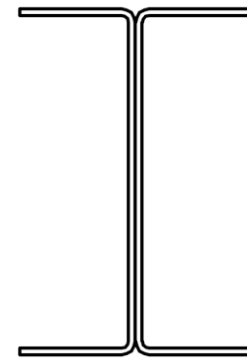
$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} \cdot F_y}{1,1}$$

Exercício 4

Determinar o Momento resistente de cálculo para o início do escoamento da seção efetiva para a viga a seguir (Cargas já devidamente majoradas e contenção lateral completa)



Perfil][150X50X3,00 SAE 1020



$$M_{sd} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{0,05 \cdot 400^2}{8} = 1000 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Exercício 4

$$\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$$

Mesa: Elemento A.L $k = 0,43$

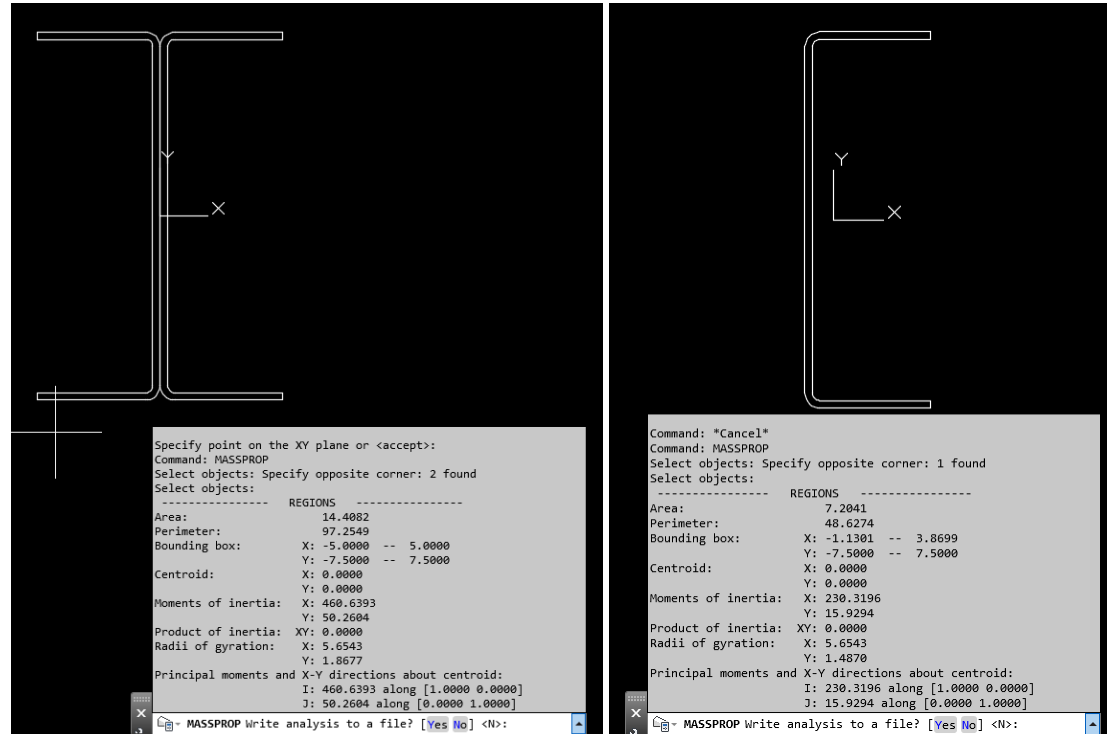
$$\frac{b}{t} = \frac{5 - 2,0,3}{0,3} = 14,67$$

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{14,67}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,43 \cdot 20000}{24}}} = 0,816$$

$$b_{ef} = b \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \quad b_{ef} = 4,4 \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,22}{0,816}\right)}{0,816} = 3,94 \text{ cm}$$

$$A_{retirar} = 0,46 \cdot 0,3 = 0,138 \text{ cm}^2$$

$$A_{ef} = 7,20 - 0,138 = 7,062 \text{ cm}^2$$



Exercício 4

Rebaixamento do Eixo baricêntrico:

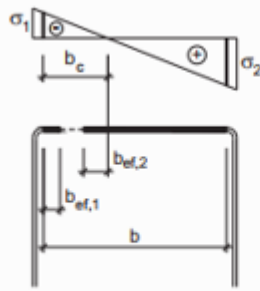
$$\frac{A_{ef}}{A_{retirar}} = \frac{d_{xx}}{y} \quad \frac{7,062}{0,138} = \frac{\left(7,5 - \frac{0,3}{2}\right)}{y} \rightarrow y = 0,1436 \text{ cm}$$

$$\frac{\sigma_1}{2,4} = \frac{7,64 - 0,6}{7,64} \rightarrow \sigma_1 = 22,1 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_2}{2,31} = \frac{(7,5 - 0,1436) - 0,6}{7,36} \rightarrow \sigma_1 = 21,2 \text{ kN/cm}^2$$

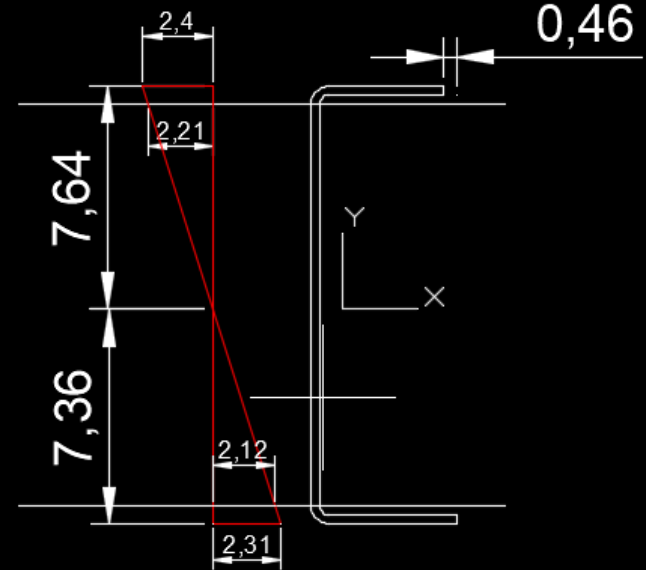
$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-21,2}{22,1} = -0,9592$$

Caso d



A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.

$$\begin{aligned} \psi &= \sigma_2 / \sigma_1 \leq -0,236 \\ b_{ef,1} &= b_{ef} / (3 - \psi) \\ b_{ef,2} &= 0,5 b_{ef} \\ \text{sendo } b_{ef,1} + b_{ef,2} &\leq b_c \\ k &= 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3 \end{aligned}$$



```
Command: .erase 2 found
Command: MASSPROP
Select objects: 1 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area: 7.0661
Perimeter: 47.7074
Bounding box: X: -1.0590 -- 3.9410
               Y: -7.3565 -- 7.6435
Centroid: X: 0.0000
           Y: 0.0000
Moments of inertia: X: 222.7179
                   Y: 14.0629
Product of inertia: XY: 3.7640
Radii of gyration: X: 5.6142
                  Y: 1.4107
Principal moments and X-Y directions about centroid:
I: 222.7858 along [0.9998 0.0180]
J: 13.9951 along [-0.0180 0.9998]
```

MASSPROP Write analysis to a file? [Yes No] <N>:

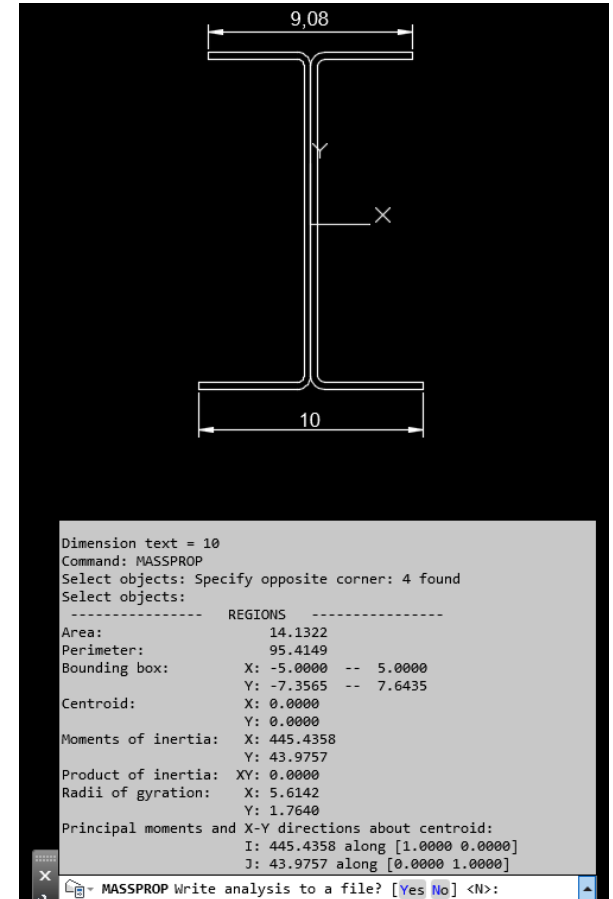
Exercício 4

$$k = 4 + 2 \cdot (1 - \psi) + 2 \cdot (1 - \psi)^3 \rightarrow k = 4 + 2 \cdot (1 - (-0,9592)) + 2 \cdot (1 - (-0,9592))^3 = 22,95$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{15 - 4,0,3}{0,3}}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{22,95 \cdot 20000}{24}}} = 0,350 < 0,673 \text{ -- Toda a alma é efetiva, portanto } b_{ef} = b$$

$$W_{ef} = \frac{445,43}{7,64} = 58,30 \text{ cm}^3$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} \cdot F_y}{1,1} = \frac{58,30 \cdot 24}{1,1} = 1272 \text{ kN.cm} > 1000 \text{ kN.cm (Aprovado)}$$



Flambagem Lateral com Torção

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

- para $\lambda_0 \leq 0,6$:

$$\chi_{FLT} = 1,0$$

- para $0,6 < \lambda_0 < 1,336$:

$$\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2)$$

- para $\lambda_0 \geq 1,336$:

$$\chi_{FLT} = 1/\lambda_0^2$$

- barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria (eixo x):

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

Em barras com seção monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, M_e pode ser calculado com base no Anexo E da norma.

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

- barras com seção Z ponto-simétrica, com carregamento no plano da alma:

$$M_e = 0,5 C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

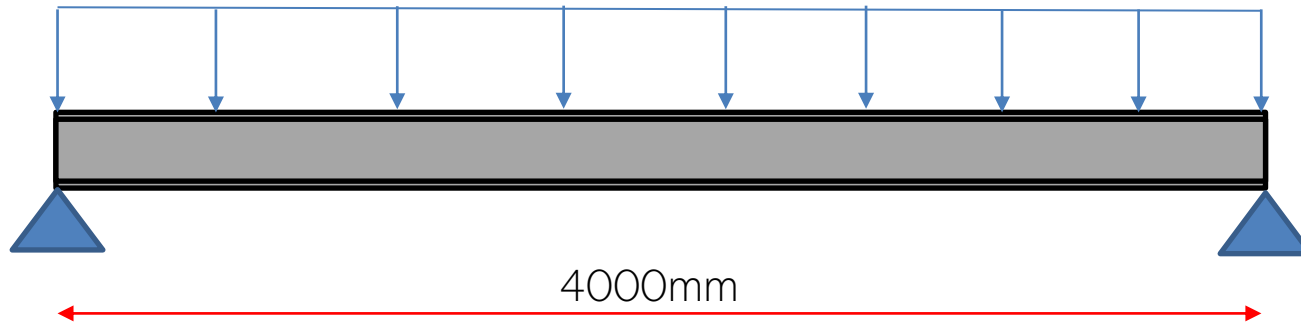
- barras com seção fechada (caixão), sujeitas à flexão em torno do eixo x:

$$M_e = C_b (N_{ey} GJ)^{0,5}$$

Exercício 5

Determinar o Momento resistente de cálculo para o início do escoamento da seção efetiva para a viga a seguir (Cargas já devidamente majoradas e sem contenção lateral contínua – $L_b = 400\text{cm}$)

$$q = 5\text{kN/m}$$



Perfil U.E 165X75X35X2,65 SAE 1020

$$M_{sd} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{0,05 \cdot 400^2}{8} = 1000 \text{ kN.cm}$$

Exercício 5

Développée théorique = 36.7576 cm

$A = 9.741 \text{ cm}^2$

$p = 7.646 \text{ Kg/m}$

$J = 0.228 \text{ cm}^4$

Caractéristiques par rapport aux axes de référence

Coordonnées du centre de gravité :

$Y_g = 2.815 \text{ cm}$

$Z_g = 8.25 \text{ cm}$

Coordonnées du centre de cisailment :

$Y_c = -3.933 \text{ cm}$

$Z_c = 8.25 \text{ cm}$

$I_y = 410.749 \text{ cm}^4$

$i_y = 6.4937 \text{ cm}$

$v_y = 8.25 \text{ cm}$

$W_{el,y} = 49.788 \text{ cm}^3$

$I_z = 85.497 \text{ cm}^4$

$i_z = 2.9626 \text{ cm}$

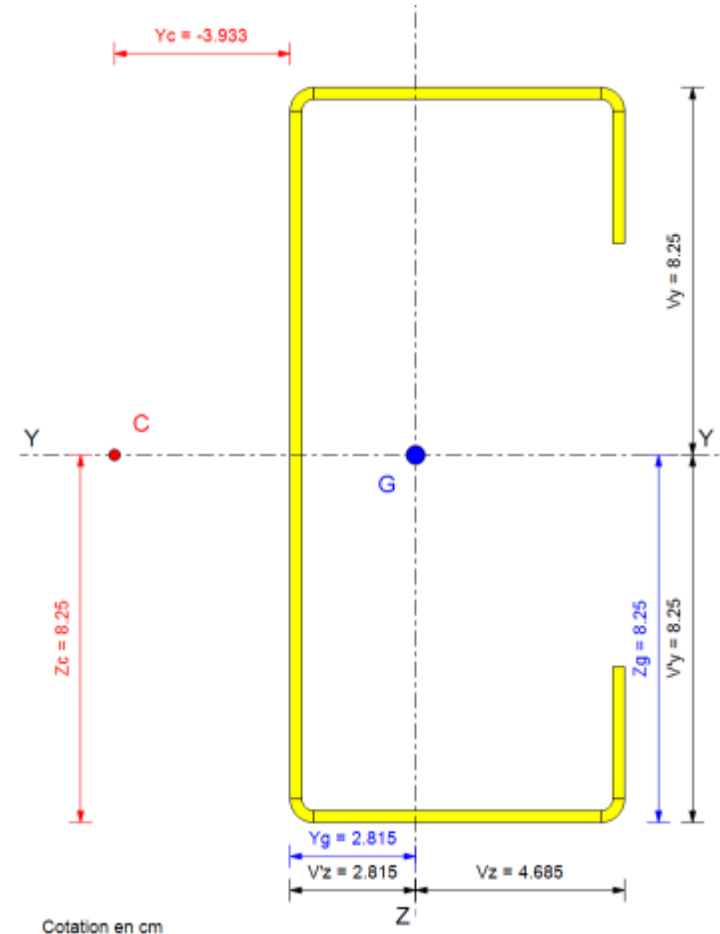
$v_{z,max} = 4.685 \text{ cm}$

$W_{el,z,min} = 18.249 \text{ cm}^3$

$v_{z,min} = 2.815 \text{ cm}$

$W_{el,z,max} = 30.371 \text{ cm}^3$

Moment d'inertie sectoriel = 6320.8661 cm⁶



Exercício 5

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 85,49}{(1.400)^2} = 105,46 \text{ kN}$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x^2 + y^2} \rightarrow \sqrt{6,49^2 + 2,96^2 + (2,81 + 3,93)^2 + 0^2} = 9,81 \text{ cm}$$

$$N_{Ez} = \frac{1}{9,81^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 6320,87}{400^2} + 7700 \cdot 0,228 \right] = 99,27 \text{ kN}$$

$$M_e = C_b \cdot r_0 \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{ez}} \rightarrow M_e = 1,14 \cdot 9,81 \cdot \sqrt{105,46 \cdot 99,27} = 1144,26 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c \cdot F_y}{M_e}} \quad \lambda_0 = \sqrt{\frac{49,78 \cdot 24}{1144,26}} = 1,02$$

$$\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278 \cdot \lambda_0^2) \rightarrow \chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278 \cdot 1,02^2) = 0,79$$

As larguras efetivas deverão ser calculadas com a tensão $\chi_{FLT} \cdot F_y = 0,79 \cdot 24 = 18,96 \text{ kN/cm}^2$

Exercício 5

Enrijecedor, D = 35mm Elemento A.L

$$\frac{b}{t} = \frac{3,5 - 2,0,265}{0,265} = \frac{2,97}{0,265} = 11,20$$

$$\frac{\sigma_1}{18,96} = \frac{\frac{16,5}{2} - 2,0,265}{\frac{16,5}{2}} \rightarrow \sigma_1 = 17,74 \text{ kN/cm}^2$$

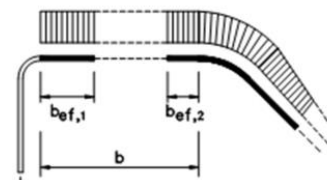
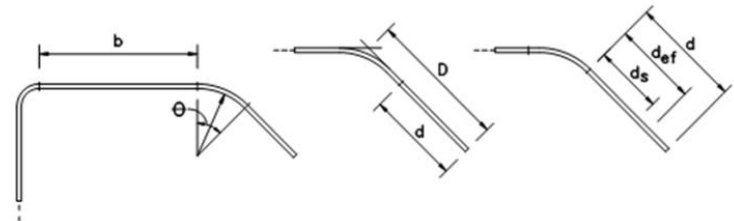
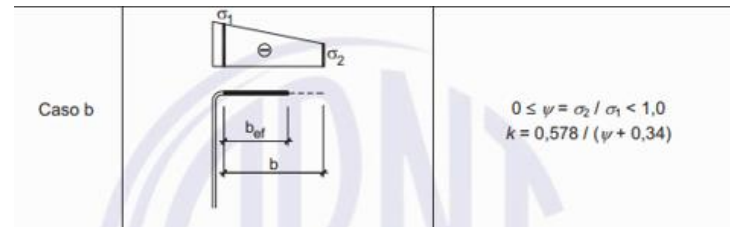
$$\frac{\sigma_2}{18,96} = \frac{\frac{16,5}{2} - 3,5}{\frac{16,5}{2}} \rightarrow \sigma_2 = 11,26 \text{ kN/cm}^2$$

$$\psi = \frac{11,26}{17,74} = 0,6347$$

$$k = \frac{0,578}{(0,6347 + 0,34)} = 0,593$$

$$\lambda_p = \frac{11,20}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,593 \cdot 20000}{18,96}}} = 0,4713 < 0,673 \quad \text{Portanto } d_{ef} = d$$

$$I_s = \frac{0,265 \cdot 2,97^3}{12} = 0,05785 \text{ cm}^4$$



Exercício 5

Mesa Comprimida – Elemento AA – Verificar efetividade do enrijecedor

$$\frac{b}{t} = \frac{7,5 - 4.0265}{0,265} = \frac{6,44}{0,265} = 24,30$$

$$\lambda_{p_0} = \frac{24,30}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{20000}{18,96}}} = 1,20 > 0,673$$

$$I_A = 399t^4(0,487 \cdot \lambda_{p_0} - 0,328)^3 \leq t^4(56\lambda_{p_0} + 5)$$

$$I_A = 399 \cdot 0,265^4(0,487 \cdot 1,20 - 0,328)^3 = \mathbf{0,03}$$

$$I_A = 0,265^4(56 \cdot 1,20 + 5) = 0,356$$

$$d_s = \frac{I_s}{I_A} \cdot d_{ef} = \frac{0,05785}{0,03} \cdot 2,97 = 2,97 \text{ cm}$$

$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p_0}) \geq 0,333 \quad n = (0,582 - 0,122 \cdot 1,20) = 0,4356$$

$$k = \left(4,82 - \frac{5D}{b}\right) \left(\frac{I_s}{I_A}\right)^n + 0,43 \leq 4 \quad k = \left(4,82 - \frac{5 \cdot 3,5}{7,5}\right) (1,0)^{0,455} + 0,43 = 2,91 < 4$$

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{24,30}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{2,91 \cdot 20000}{18,96}}} = 0,5382 < 0,673 \quad B_{ef} = b$$

Exercício 5

Alma

$$\frac{\sigma_1}{18,96} = \frac{\frac{16,5}{2} - 2.0,265}{\frac{16,5}{2}} \rightarrow \sigma_1 = 18,30 \text{ kN/cm}^2 \quad \psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-18,30}{18,30} = -1$$

$$\frac{\sigma_2}{18,96} = \frac{\frac{16,5}{2} - 2.0,265}{\frac{16,5}{2}} \rightarrow \sigma_2 = -18,30 \text{ kN/cm}^2$$

$$k = 4 + 2 \cdot (1 - \psi) + 2 \cdot (1 - \psi)^3 \rightarrow k = 4 + 2 \cdot (1 - (-1)) + 2 \cdot (1 - (-1))^3 = 10$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{16,5 - 4.0,265}{0,265}}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 20000}{18,96}}} = 0,597 < 0,673 \text{ - Toda a alma é efetiva, portanto } b_{ef} = b$$

$$W_{c,ef} = W_c = 49,788 \text{ cm}^3$$

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{ef} \cdot F_y}{1,1} = \frac{0,79 \cdot 49,788 \cdot 24}{1,1} = 858,16 \text{ kN.cm} < 1000 \text{ kN.cm (Reprovado)}$$

Força cortante

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} deve ser calculada por (adotando $\gamma = 1,1$):

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma}$$

$$\text{- Para } 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} < \frac{h}{t} < 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,65 t^2 \sqrt{k_v f_y E}}{\gamma}$$

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \geq 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,905 E k_v t^3 / h}{\gamma}$$

onde:

t é a espessura da alma; h é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

- para alma sem enrijecedores transversais ou para $a/h > 3$:

$$k_v = 5,00$$

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2}$$

Barras Tracionadas

Escoamento da Seção Bruta

$$N_{tRd} = \frac{A \cdot F_y}{1,1}$$

Ruptura da Seção Líquida Fora da Região da Ligação

$$N_{tRd} = \frac{A_{n0} \cdot F_u}{1,35}$$

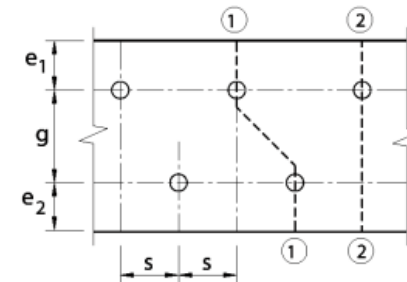
Ruptura da Seção Líquida na Região da Ligação

$$N_{tRd} = \frac{C_t \cdot A_n \cdot F_u}{1,65}$$

Barras Tracionadas

Área Líquida A_n

$$A_n = 0,9 \cdot \left(A - n \cdot d_f \cdot t + \sum \frac{t \cdot s^2}{4 \cdot g} \right)$$



a) Prováveis linhas de ruptura

1-1: linha de ruptura com segmento inclinado

2-2: linha de ruptura perpendicular à solicitação

Tabela 15 — Dimensões máximas de furos (mm)

Diâmetro nominal do parafuso (d)	Diâmetro do furo-padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
< 12,5	d+0,8	d +1,5	(d+0,8) x (d+6)	(d+0,8) x (2,5d)
≥ 12,5	d+1,5	d +5	(d+1,5) x (d+6)	(d+1,5) x (2,5d)

Barras Tracionadas

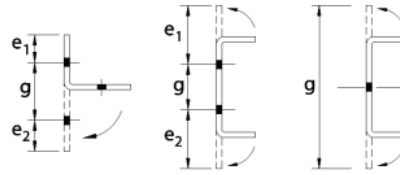
Ct – Perfis Com ligações Parafusadas

Todos os elementos conectados com dois ou mais parafusos na direção da solicitação

$$C_t = 1,0$$

Todos os parafusos em uma única seção transversal (Perfil deve ser tratado como chapa equivalente)

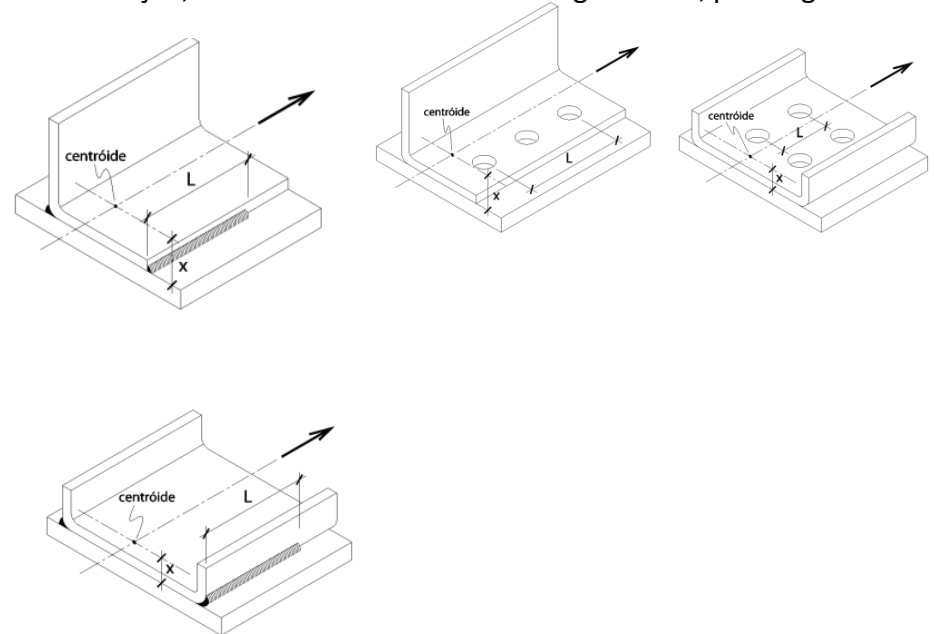
$$C_t = 2,5 \cdot \frac{d}{g} \leq 1,00$$



b) Perfis tratados como chapa (todos os parafusos contidos em uma única seção)

Cantoneiras e perfis U com dois ou mais parafusos na direção da solicitação, e cantoneiras com soldas longitudinais, para alguns elementos (não todos) da seção transversal

$$C_t = 1 - 1,2 \left(\frac{x}{l} \right) < 0,9 - \text{Não se admite } C_t < 0,4$$



Perfis U com soldas Longitudinais

$$C_t = 1 - 0,36 \left(\frac{x}{l} \right) < 0,9 - \text{Não se admite } C_t < 0,5$$

Esforços combinados

Momento Fletor e Esforço Cortante combinados (Sem enrijecedores)

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 \leq 1,00$$

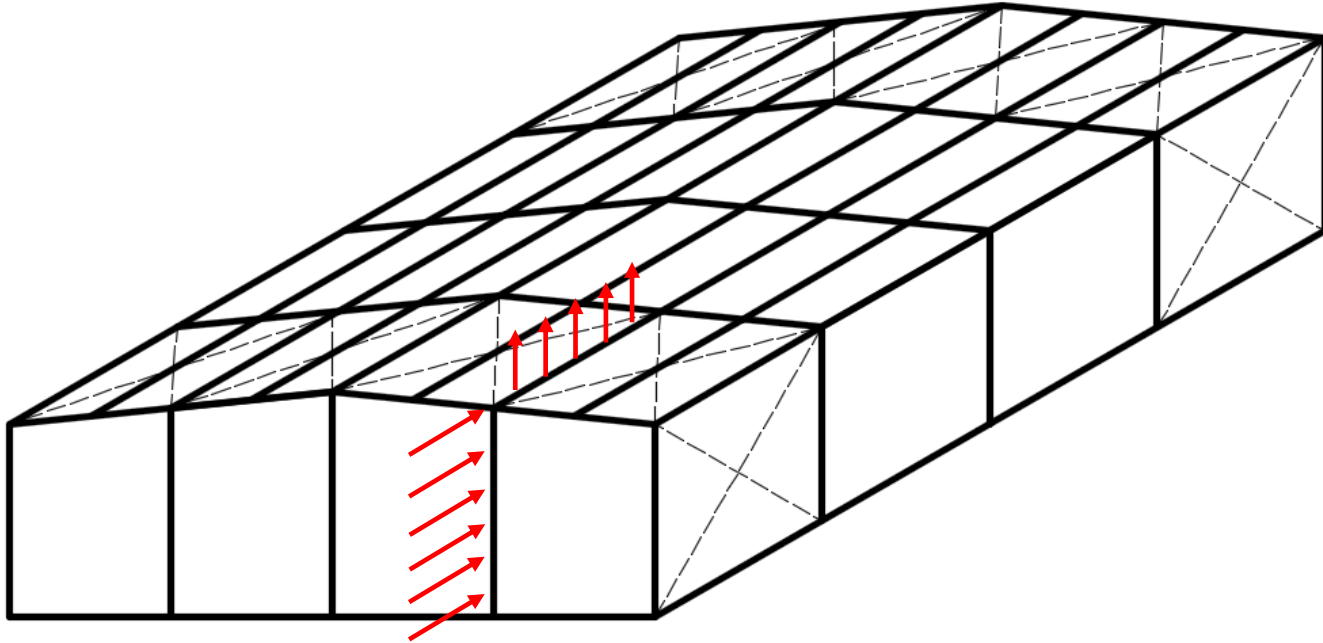
Momento Fletor e Cortante Combinados (Com enrijecedores e $M_{sd}/M_{rd} > 0,5$ e $V_{sd}/V_{rd} > 0,7$)

$$0,6 \cdot \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1,30$$

Momento Fletor e esforços axiais combinados

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{xSd}}{M_{xRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} \leq 1,00$$

Exercício 6



Uma trecha de galpão com vão livre de 6m está submetida à uma carga vertical uniformemente distribuída de 1,22 kN/m para cima e uma carga de compressão oriunda dos pilares do oitão de 11,55 kN (já devidamente majoradas). Há contenções laterais a cada 2m (correntes e tirantes). Verificar se o perfil U.e 150X60X20X2,65 SAE 1020 pode ser aprovado nessas condições.

Exercício 6

Esforços solicitantes:

$$M_{sd} = \frac{0,0122 \cdot 600^2}{8} = 549 \text{ kN.cm}$$

$$N_{sd} = 11,55 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = \frac{0,0122 \cdot 600}{2} = 3,66 \text{ kN}$$

Comprimentos de Flambagem

$$L_x = 600 \text{ cm}$$

$$L_y = 200 \text{ cm}$$

$$L_t = 200 \text{ cm}$$

Développée théorique = 29.2576 cm

A = 7.753 cm²

p = 6.086 Kg/m

J = 0.1814 cm⁴

Caractéristiques par rapport aux axes de référence

Coordonnées du centre de gravité :

Y_g = 1.922 cm

Z_g = 7.5 cm

Coordonnées du centre de cisailment :

Y_c = -2.655 cm

Z_c = 7.5 cm

I_y = 267.013 cm⁴

i_y = 5.8685 cm

v_y = 7.5 cm

W_{el,y} = 35.602 cm³

I_z = 38.074 cm⁴

i_z = 2.216 cm

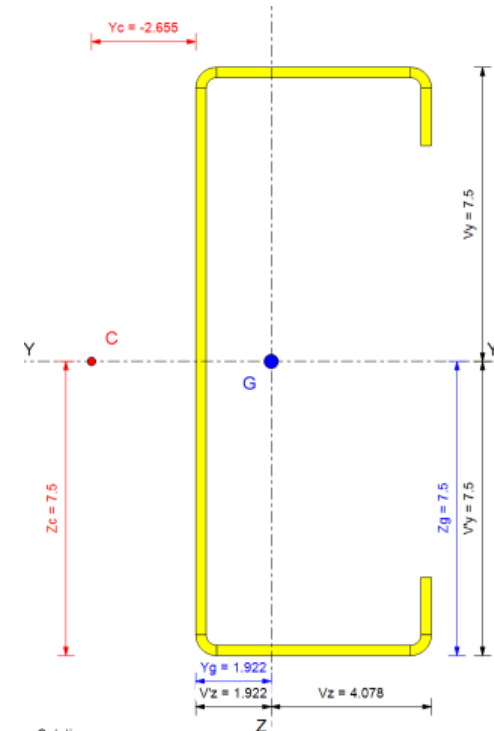
v_{z,max} = 4.078 cm

W_{el,z,min} = 9.336 cm³

v_{z,min} = 1.922 cm

W_{el,z,max} = 19.811 cm³

Moment d'inertie sectoriel = 1802.4395 cm⁶



Exercício 6

Verificação à compressão

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1.600}{5,86} = 102,38 \quad \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1.200}{2,21} = 90,49$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 267}{(1.600)^2} = 146,4 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 38}{(1.200)^2} = 187,52 \text{ kN}$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x^2 + y^2} \rightarrow \sqrt{5,86^2 + 2,21^2 + (2,655 + 1,922)^2 + 0^2}$$
$$= 7,75 \text{ cm} \quad 0,406$$

$$N_{Ez} = \frac{1}{7,75^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1802,44}{200^2} + 7700 \cdot 0,1814 \right] = 171,34 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$N_{Exz} = \frac{146,4 + 171,34}{2 \left[1 - \left(\frac{(2,655 + 1,922)}{7,75} \right)^2 \right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 146,4 \cdot 171,34 \left[1 - \left(\frac{2,655 + 1,922}{7,75} \right)^2 \right]}{(146,4 + 171,34)^2}} \right] = 99,08 \text{ kN}$$

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Exercício 6

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot F_y}{N_e}} \rightarrow \sqrt{\frac{7,75.24}{99,08}} = 1,37 < 1,5$$

$$\chi = 0,658^{1,37^2} = 0,46$$

Cálculo da área efetiva na tensão

$$\sigma = 0,46 \cdot 24 = 11 \text{ kN/cm}^2$$

1 - Enrijecedor: $b = 2 \cdot 0,265 = 1,47\text{cm}$ $k = 0,43$ (Elemento AL)

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{\left(\frac{1,47}{0,265}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,43 \cdot 20000}{11}}} = 0,20 < 0,673 \rightarrow b_{ef} = b = 1,47\text{cm}$$

$$I_s = \frac{0,265 \cdot 1,47^3}{12} = 0,07\text{cm}^4$$

2 – Mesas – Elemento com enrijecedor de borda (verificar eficácia do enrijecedor)

$$b_2 = 6 - 0,265 \cdot 4 = 4,94\text{cm} \quad \frac{b}{t} = \frac{4,94}{0,265} = 18,64 < 60 \text{ OK}$$

$$\lambda_{p0} = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_{p0} = \frac{18,64}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{20000}{11}}} = 0,701 > 0,673$$

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Exercício 6

$$D/b = \frac{2}{6} = 0,333$$

$$I_A = 399.0,265^4(0,487.0,701 - 0,328)^3 = 0,000000472$$

$$I_A = 0,265^4(56.0,701 + 5) = 0,0419$$

$$\frac{I_s}{I_A} > 1 - \text{Adotar } 1$$

$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p0}) \geq 0,333 \quad n = (0,582 - 0,122.0,701) = 0,496$$

$$k = \left(4,82 - \frac{5D}{b}\right) \left(\frac{I_s}{I_A}\right)^n + 0,43 \leq 4 \quad k = \left(4,82 - \frac{5.2}{6}\right) (1)^{0,496} + 0,43 = 3,58 < 4$$

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{4,94}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{3,58.20000}{11}}} = 0,06 < 0,673 \quad b_{ef2} = b$$

$$3 - \text{Alma} - b = 15 - 4.0,265 = 13,94\text{cm} \quad k = 4 \text{ Elemento AA}$$

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{\left(\frac{13,94}{0,265}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{4.20000}{11}}} = 0,649 < 0,673 \quad b_{ef3} = b$$

$$A_{ef} = A = 7,75\text{cm}^{22}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot F_y}{1,20}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{0,46.7,75.24}{1,20} = 71,3 \text{ kN} > 11,55 \text{ OK!}$$

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Exercício 6

Verificação à Flexão

$$M_e = C_b \cdot r_o \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{ez}} \rightarrow M_e = 1,14 \cdot 7,75 \cdot \sqrt{187,52 \cdot 171,34} = 1583,65 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c \cdot F_y}{M_e}} \quad \lambda_0 = \sqrt{\frac{35,6 \cdot 24}{1583,65}} = 0,73$$

$$\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278 \cdot \lambda_0^2) \rightarrow \chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278 \cdot 0,73^2) = 0,94$$

As larguras efetivas deverão ser calculadas com a tensão $\chi_{FLT} \cdot F_y = 0,94 \cdot 24 = 22,56 \text{ kN/cm}^2$

Exercício 6

Verificação à Flexão

$$\frac{b}{t} = \frac{2 - 2.0,265}{0,265} = \frac{1,47}{0,265} = 5,54$$

$$\frac{\sigma_1}{22,56} = \frac{7,5 - 2.0,265}{7,5} \rightarrow \sigma_1 = 20,96 \text{ kN/cm}^2$$

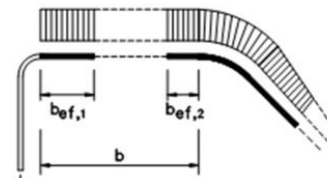
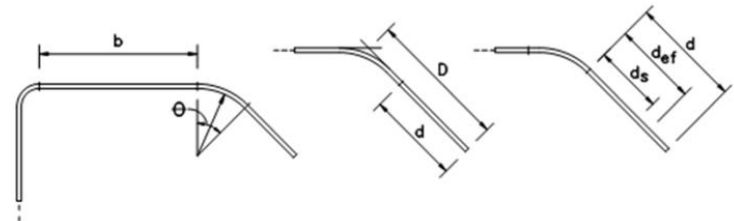
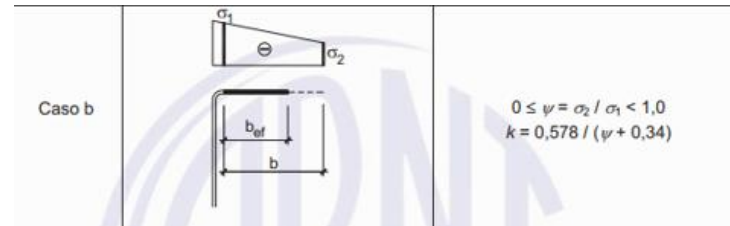
$$\frac{\sigma_2}{22,56} = \frac{7,5 - 3,5}{7,5} \rightarrow \sigma_2 = 12,032 \text{ kN/cm}^2$$

$$\psi = \frac{12,03}{20,96} = 0,57$$

$$k = \frac{0,578}{(0,57 + 0,34)} = 0,635$$

$$\lambda_p = \frac{5,54}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,635 \cdot 20000}{22,56}}} = 0,245 < 0,673 \quad \text{Portanto } d_{ef} = d$$

$$I_s = \frac{0,265 \cdot 1,47^3}{12} = 0,07 \text{ cm}^4$$



Exercício 6

Verificação à Flexão

Mesa Comprimida – Elemento AA – Verificar efetividade do enrijecedor

$$\frac{b}{t} = \frac{6 - 4.0,265}{0,265} = \frac{4,94}{0,265} = 18,64$$

$$\lambda_{p0} = \frac{18,64}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{20000}{22,56}}} = 1,00 > 0,673$$

$$I_A = 399t^4(0,487 \cdot \lambda_{p0} - 0,328)^3 \leq t^4(56\lambda_{p0} + 5)$$

$$I_A = 399 \cdot 0,265^4(0,487 \cdot 1,00 - 0,328)^3 = \mathbf{0,007}$$

$$I_A = 0,265^4(56 \cdot 1,00 + 5) = 1,38$$

$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p0}) \geq 0,333 \quad n = (0,582 - 0,122 \cdot 1,00) = 0,4356$$

$$k = \left(4,82 - \frac{5D}{b}\right) \left(\frac{I_s}{I_A}\right)^n + 0,43 \leq 4 \quad k = \left(4,82 - \frac{5 \cdot 2}{6}\right) (1,0)^{0,455} + 0,43 = 3,58 < 4$$

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{max}}}} \quad \lambda_p = \frac{18,64}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{3,58 \cdot 20000}{22,56}}} = 0,348 < 0,673 \quad B_{ef} = b$$

Curso de Projeto e Cálculo de Estruturas metálicas

Exercício 6

Verificação à Flexão

Alma

$$\frac{\sigma_1}{22,56} = \frac{7,5 - 20,265}{7,5} \rightarrow \sigma_1 = \sigma_2 = 20,96 \text{ kN/cm}^2 \quad \psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-20,96}{20,96} = -1$$

$$k = 4 + 2 \cdot (1 - \psi) + 2 \cdot (1 - \psi)^3 \rightarrow k = 4 + 2 \cdot (1 - (-1)) + 2 \cdot (1 - (-1))^3 = 10$$

$$\lambda_p = \frac{15 - 4 \cdot 0,265}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 20000}{22,56}}} = 0,455 < 0,673 \text{ - Toda a alma é efetiva, portanto } b_{ef} = b$$

$$W_{c,ef} = W_c = 35,6 \text{ cm}^3$$

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{ef} \cdot F_y}{1,1} = \frac{0,94 \cdot 35,6 \cdot 24}{1,1} = 730 \text{ kN.cm} > 549 \text{ kN.cm (Aprovado)}$$

Exercício 6

Verificação ao esforço cortante

$$\frac{h}{t_w} = \frac{15 - 4,0,265}{0,265} = 52,60$$

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} = 1,08 \sqrt{\frac{20000 \cdot 5}{24}} = 69,71 > 52,60$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot 24 \cdot 13,94 \cdot 0,265}{1,1} = 48,35 \text{ kN} > 3,66 \text{ kN OK!}$$

Força cortante

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} deve ser calculada por (adotando $\gamma = 1,1$):

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma}$$

$$\text{- Para } 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} < \frac{h}{t} < 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,65 t^2 \sqrt{k_v f_y E}}{\gamma}$$

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \geq 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,905 E k_v t^3 / h}{\gamma}$$

onde:

t é a espessura da alma; h é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

- para alma sem enrijecedores transversais ou para $a/h > 3$:

$$k_v = 5,00$$

Exercício 6

Verificação quanto à combinação de Esforços

Momento Fletor e Esforço Cortante combinados (Sem enrijecedores)

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 \leq 1,00 \quad \left(\frac{549}{730}\right)^2 + \left(\frac{3,66}{48,35}\right)^2 = 0,57$$

Momento Fletor e esforços axiais combinados

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{xSD}}{M_{xRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} \leq 1,00 \quad \frac{11,55}{71,3} + \frac{549}{730} + 0 = 0,91$$

Perfil aprovado!