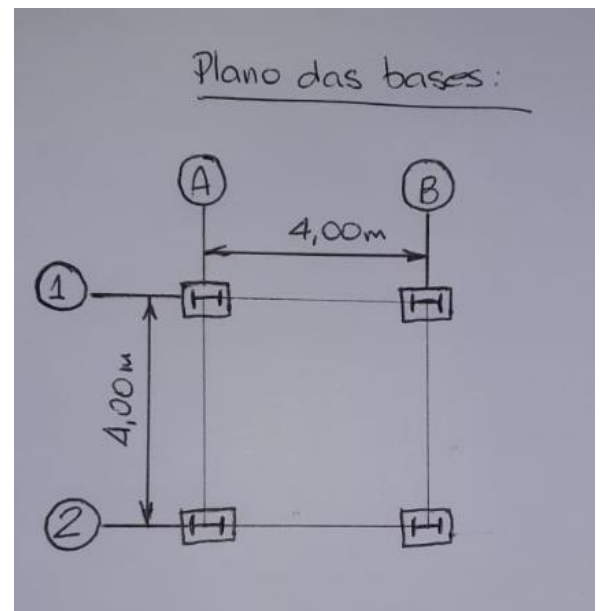
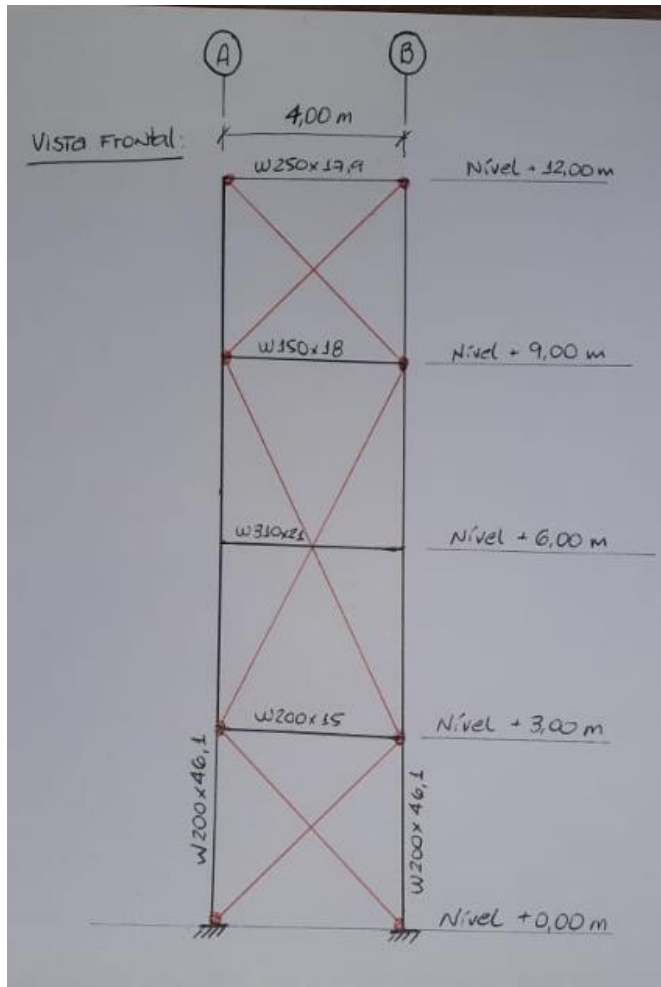


Módulos 3 e 4– Barras Tractionadas e Barras Comprimidas

1.1– Considere a estrutura principal de uma torre retangular a seguir:

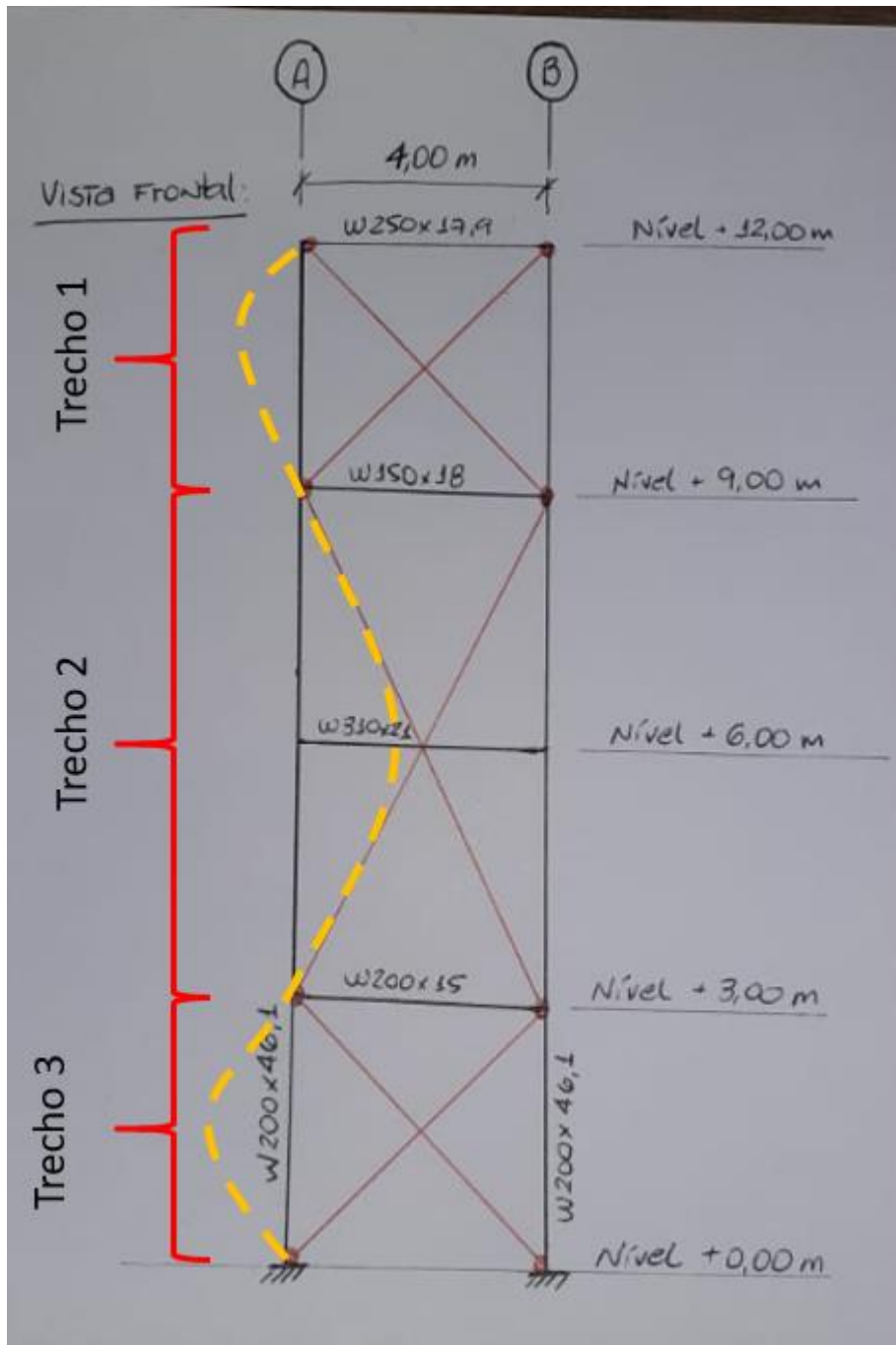
As bases formam um quadrado de 4000mm cada lado, considerando as distâncias entre eixos. As linhas vermelhas representam as barras de contraventamento, que são compostas por barras redondas independentes entre si, conectadas apenas em suas extremidades.



Pede-se:

- Calcule o coeficiente de esbeltez à compressão $K_x.L_x/r_x$ e $K_y.L_y/r_y$ para cada trecho de pilar, da base até o topo. (Lembre-se que os contraventamentos influenciam no comprimento L). Para determinar k utilize o ábaco de cálculo para estruturas contraventadas (figura abaixo) – identifique o trecho calculado com nível inicial e nível Final, e se possível represente cada trecho com uma cor diferente para facilitar a visualização.

Resolução: A primeira coisa a fazer é determinar os comprimentos de flambagem de cada trecho. Lembremos que o comprimento de flambagem é determinado pelos nós de contraventamentos, portanto:



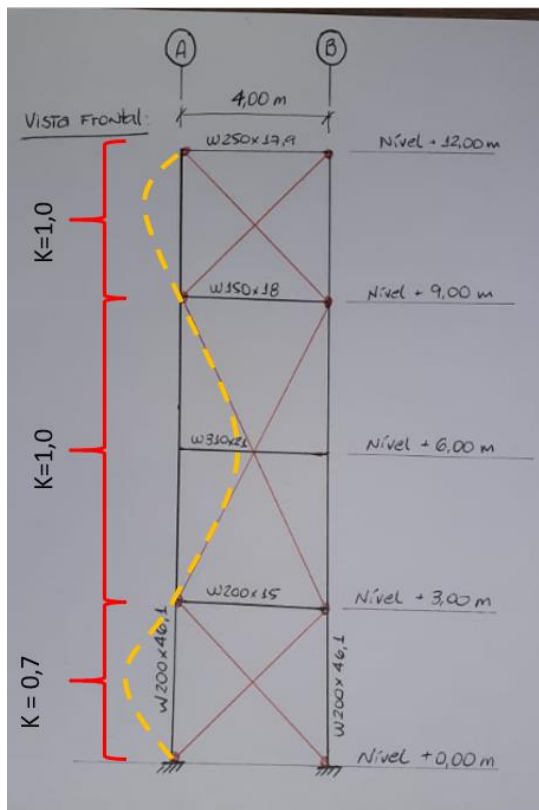
Lista de Exercícios Módulos 3 e 4 - Resolução

Agora vamos coletar os dados importantes sobre as peças envolvidas

BITOLA mm x kg/m	Masso Linear kg/m	d mm	ESPESURA						EIXO X - X						EIXO Y - Y						ESBELTEZ				u m	BITOLA mm x kg/m
			b ₁ mm	b ₂ mm	t ₁ mm	t ₂ mm	h mm	d' mm	Área cm ²	I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	Z _x cm ³	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	Z _y cm ³	r _x cm	I _x cm ⁴	ABA - λ _x b ₁ /2t ₁	ALMA - λ _y d'/t ₂	C _x cm ²				
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	98,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49	4,181	0,67	W 150 x 13,0			
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	6,693	0,69	W 150 x 18,0			
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1.229	161,7	6,51	179,8	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48	20,417	0,88	W 150 x 22,5 (H)			
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1.384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48	10,206	0,69	W 150 x 24,0			
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1.739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94	30,277	0,90	W 150 x 29,8 (H)			
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2.244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67	39,930	0,91	W 150 x 37,1 (H)			
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1.305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44	8,222	0,77	W 200 x 15,0			
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1.686	166,1	8,19	190,8	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31	11,098	0,79	W 200 x 19,3			
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2.029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,9	2,63	6,18	6,38	27,42	13,868	0,79	W 200 x 22,5			
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2.611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,10	76,3	3,54	7,65	7,92	29,34	32,477	0,92	W 200 x 26,6			
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3.168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,0	3,60	12,59	6,57	26,50	40,822	0,93	W 200 x 31,3			
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3.437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,0	4,50	14,51	8,09	25,90	69,502	1,03	W 200 x 35,9 (H)			
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4.114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,7	4,53	23,19	7,03	21,86	83,948	1,04	W 200 x 41,7 (H)			
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4.543	447,6	8,81	495,3	1.535	151,2	5,12	229,5	5,58	22,01	9,23	22,38	141,342	1,19	W 200 x 46,1 (H)			
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5.298	514,4	8,90	572,5	1.784	174,9	5,16	265,8	5,81	33,34	8,10	19,85	166,710	1,19	W 200 x 52,0 (H)			
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4.977	488,0	8,55	551,3	1.673	161,7	4,96	248,6	5,57	31,93	9,16	14,28	155,075	1,20	HP 200 x 53,0 (H)			
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6.140	584,8	8,99	655,9	2.041	199,1	5,18	303,0	5,64	47,69	7,22	17,32	195,418	1,20	W 200 x 59,0 (H)			
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7.660	709,2	9,17	803,2	2.537	246,3	5,28	374,5	5,70	81,66	5,92	15,80	249,976	1,22	W 200 x 71,0 (H)			
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9.498	855,7	9,26	984,2	3.139	300,4	5,32	458,7	5,77	142,19	5,07	12,06	317,844	1,23	W 200 x 86,0 (H)			
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2.291	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,8	2,48	2,54	9,53	45,92	13,735	0,88	W 250 x 17,9			
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2.939	231,4	10,09	267,7	123	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,39	37,97	18,629	0,89	W 250 x 22,3			
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3.473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,4	2,58	7,06	6,07	36,10	22,955	0,89	W 250 x 25,3			
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4.046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,9	2,62	10,34	5,10	34,38	27,636	0,90	W 250 x 28,4			
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4.937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	99,7	3,86	10,44	8,02	36,03	73,104	1,07	W 250 x 32,7			
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6.057	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	6,56	33,27	93,242	1,08	W 250 x 38,5			
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13,0	240	220	57,6	7.158	538,2	11,15	606,3	704	95,1	3,50	146,4	3,96	27,14	5,69	28,95	112,398	1,09	W 250 x 44,8			
HP 250 x 62,0 (H)	62,0	246	256	10,5	10,7	225	201	79,6	8.728	709,6	11,07	790,5	2.995	234,0	6,13	357,8	6,89	33,46	11,96	19,10	417,130	1,47	HP 250 x 62,0 (H)			
W 250 x 73,0 (H)	73,0	253	254	8,6	14,2	225	201	92,7	11.257	889,9	11,42	983,3	3.880	305,5	6,47	463,1	7,01	56,94	8,94	23,33	552,900	1,48	W 250 x 73,0 (H)			
W 250 x 80,0 (H)	80,0	256	255	9,4	15,6	225	201	101,9	12.550	980,5	11,10	1.088,7	4.313	338,3	6,51	513,1	7,04	75,02	8,17	21,36	622,878	1,49	W 250 x 80,0 (H)			
HP 250 x 85,0 (H)	85,0	254	260	14,4	14,4	225	201	108,5	12.280	966,9	10,64	1.093,2	4.225	325,0	6,24	499,6	7,00	82,07	9,03	13,97	605,403	1,50	HP 250 x 85,0 (H)			
W 250 x 89,0 (H)	89,0	260	256	10,7	17,3	225	201	113,9	14.237	1.095,1	11,18	1.224,4	4.841	378,2	6,52	574,3	7,06	102,81	7,40	18,82	712,351	1,50	W 250 x 89,0 (H)			
W 250 x 101,0 (H)	101,0	264	257	11,9	19,6	225	201	128,7	16.352	1.238,8	11,27	1.395,0	5.549	431,8	6,57	656,3	7,10	147,70	6,56	16,87	828,031	1,51	W 250 x 101,0 (H)			
W 250 x 115,0 (H)	115,0	269	259	13,5	22,1	225	201	146,1	18.920	1.406,7	11,38	1.597,4	6.405	494,6	6,62	752,7	7,16	212,00	5,86	14,87	975,265	1,53	W 250 x 115,0 (H)			
W 310 x 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	292	272	27,2	3.776	249,2	11,77	291,9	98	19,5	1,90	31,4	2,42	3,27	8,86	53,25	21,628	0,98	W 310 x 21,0			

Forma prática

De uma maneira prática (Cálculo do dia-a-dia) poderíamos atribuir os K de forma direta da seguinte forma



Dessa forma teríamos os seguintes fatores de esbeltez para os pilares:

Trecho 1 Calculado pela forma direta:

$$\lambda_x = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1 \cdot 300}{8,81} = 34$$

$$\lambda_y = \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1 \cdot 300}{5,12} = 58,6$$

Mas também podemos calcular a rigidez rotacional (k) à partir do ábaco de planos contraventados. Para isso, vamos atribuir a letra A ao nó superior do trecho 1 e a letra B ao nó inferior do trecho 1:

A rigidez GA para rotação em torno de X-X calcula-se como:

$$G_{Ax} = \frac{\sum \left(\frac{E \cdot I_x}{L_x} \right)_{\text{pilar}}}{\sum \left(\frac{E \cdot I_x}{L_x} \right)_{\text{viga}}}$$

Observe que no nó A, no plano em relação ao eixo X-X, só temos uma viga (W250X17,9) e um pilar saindo desse nó (um trecho de W200X46,1 saindo para baixo do nó A)

Portanto:

$$G_{Ax} = \frac{\frac{20000 \cdot 4543}{300}}{\frac{20000 \cdot 2291}{400}} = 2,64$$

Já o Nó B possui uma viga (W150X18) mas dois trechos de pilares saindo dele, um trecho de 300cm para cima e um trecho de 600cm para baixo, portanto a equação fica:

$$G_{Bx} = \frac{\frac{20000 \cdot 4543}{300} + \frac{20000 \cdot 4543}{600}}{\frac{20000 \cdot 939}{400}} = 3,87$$

Portanto já temos a rigidez em cada nó, podemos aplicar a análise no gráfico de alinhamento:

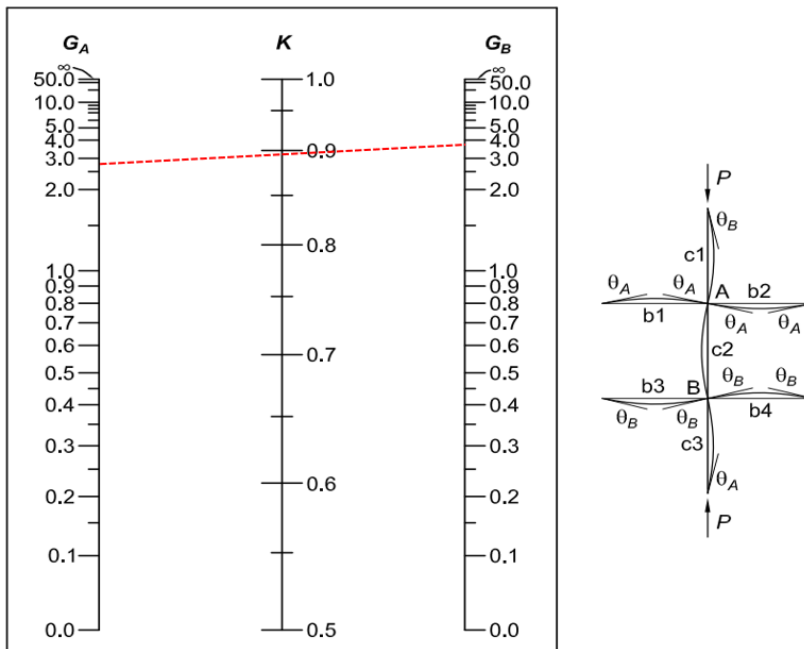


Fig. C-A-7.1. Alignment chart—sidesway inhibited (braced frame).

Obtemos então $K_x = 0,89$ para essa barra. Podemos agora calcular a esbeltez para o trecho 1:

$$\lambda_x = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{0,89 \cdot 300}{8,81} = 30,30 < 34 (\text{Valor calculado com } k = 1)$$

Agora podemos fazer o mesmo procedimento para o eixo Y. Preste atenção pois nesse caso usaremos a inércia I_y do pilar, mas as vigas continuam com o I_x , pois no plano de rotação, se o pilar flambar em torno de Y, a viga obrigatoriamente flamba em torno de X.

$$G_{Ay} = \frac{\frac{20000 \cdot 1535}{300}}{\frac{20000 \cdot 2291}{400}} = 0,89$$

$$G_{By} = \frac{\frac{20000 \cdot 1535}{300} + \frac{20000 \cdot 1535}{600}}{\frac{20000 \cdot 939}{400}} = 3,27$$

Usando novamente o gráfico temos:

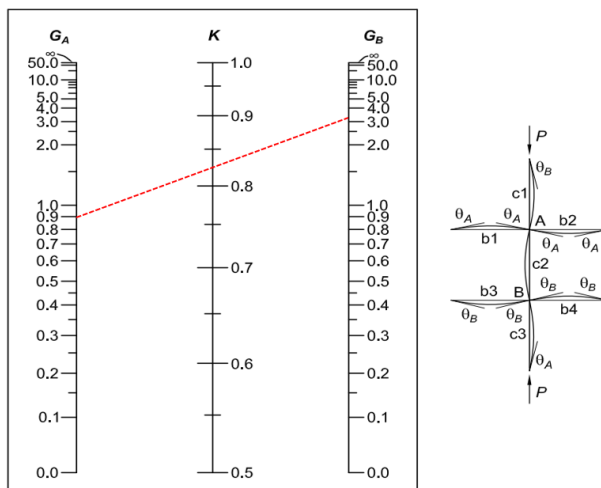


Fig. C-A-7.1. Alignment chart—sidesway inhibited (braced frame).

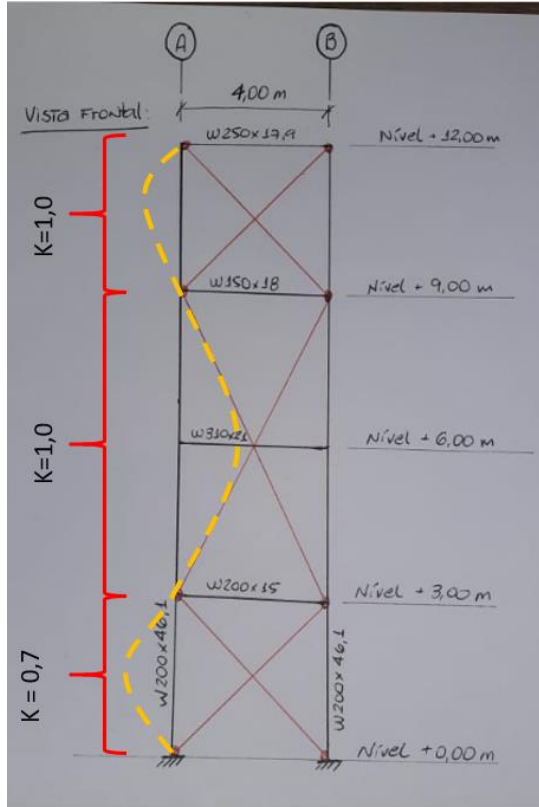
$K_y = 0,83$. Resolvendo a esbeltez para o eixo Y, finalizamos o trecho 1:

$$\lambda_y = \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{0,83 \cdot 300}{5,12} = 48,63 < 58,6 (\text{Valor calculado com } k = 1)$$

Assim concluímos o cálculo da esbeltez do primeiro trecho da torre.

Análise da esbeltez do trecho 2 (600mm)

Novamente faremos o cálculo com o K padrão = 1 para trechos entre barras:



Trecho 2 Calculado pela forma direta:

$$\lambda_x = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1 \cdot 600}{8,81} = 68,10$$

$$\lambda_y = \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1 \cdot 600}{5,12} = 117,18$$

A rigidez do ponto A do trecho 2 é a mesma rigidez do ponto B do trecho 1 (afinal é o mesmo nó), portanto:

$$G_{Ax} = \frac{\frac{20000 \cdot 4543}{300} + \frac{20000 \cdot 4543}{600}}{\frac{20000 \cdot 939}{400}} = 3,87$$

$$G_{Ay} = \frac{\frac{20000 \cdot 1535}{300} + \frac{20000 \cdot 1535}{600}}{\frac{20000 \cdot 939}{400}} = 3,27$$

Agora vamos calcular a rigidez do ponto inferior, com a viga W200X15. Observe que a

Viga W310X21 não alterará em nada os cálculos pois ela não está posicionada em um nó teoricamente contido por nós de contraventamento.

$$G_{Bx} = \frac{\frac{20000 \cdot 4543}{600} + \frac{20000 \cdot 4543}{300}}{\frac{20000 \cdot 1305}{400}} = 6,96$$

$$G_{By} = \frac{\frac{20000 \cdot 1535}{600} + \frac{20000 \cdot 1535}{300}}{\frac{20000 \cdot 1305}{400}} = 2,35$$

Lista de Exercícios Módulos 3 e 4 - Resolução

Assim podemos calcular o fator k em torno do eixo X-X cruzando $G_{ax} = 3,87$ com $G_{bx} = 6,96$ no ábaco:

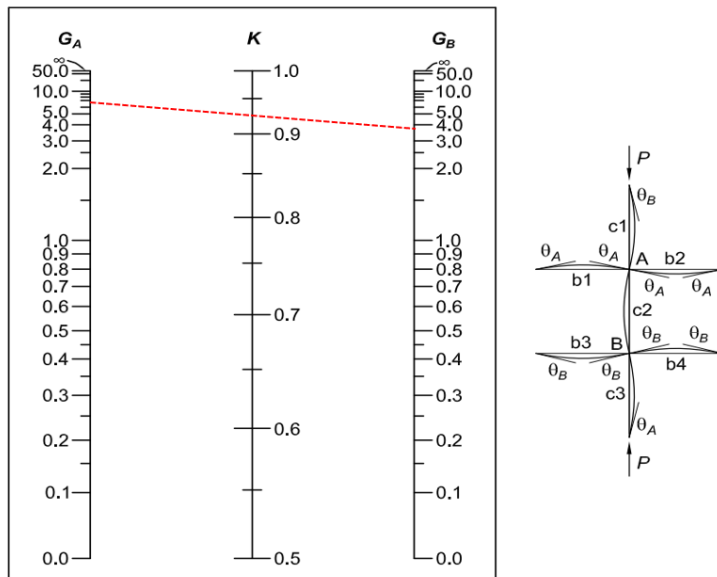


Fig. C-A-7.1. Alignment chart—sidesway inhibited (braced frame).

O valor de k_x será 0,93

Fazemos o mesmo processo cruzando $G_{ay} = 3,27$ e $G_{by} = 2,35$ no gráfico:

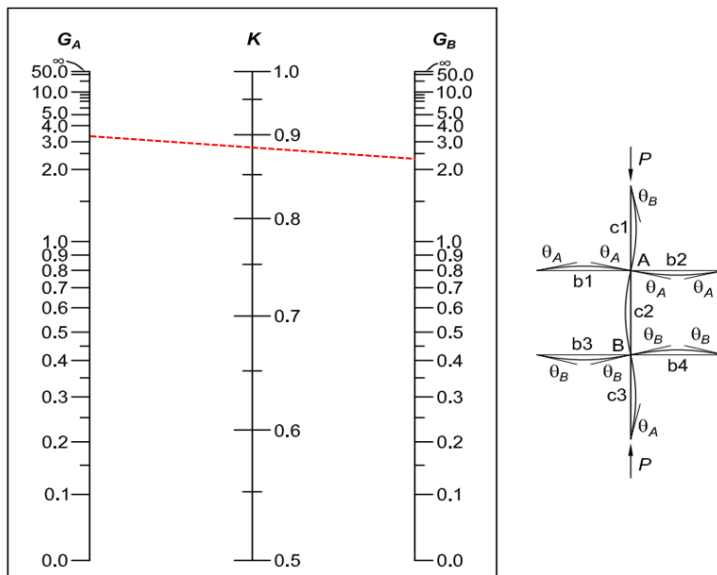


Fig. C-A-7.1. Alignment chart—sidesway inhibited (braced frame).

O valor de k_y será 0,88

Trecho 2 Calculado pelo Ábaco:

$$\lambda_x = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{0,93 \cdot 600}{8,81} = 63,33 < 68,10 (\text{calculado com } k = 1)$$

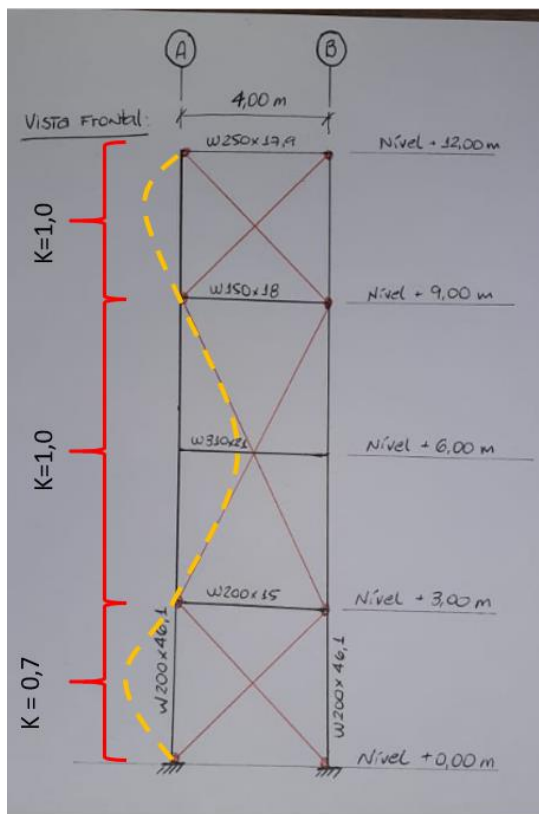
$$\lambda_y = \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{0,88 \cdot 600}{5,12} = 103,25 < 117,18 (k = 1)$$

Determinação da esbeltez no trecho 3

Finalmente chegamos até o trecho 3, que vai da base do pilar engastado até a primeira viga (W250X17,9)

Novamente tomamos os pontos A e B, considerando a rigidez em X e Y do ponto A igual à rigidez do ponto B da barra de 6m (Lembre-se, é o mesmo nó).

Como as bases estão engastadas, na forma direta do cálculo podemos adotar o coeficiente $k = 0,7$ para ambos eixos



Trecho 3 Calculado pela forma direta:

$$\lambda_x = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{0,7 \cdot 300}{8,81} = 23,83$$

$$\lambda_y = \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{0,7 \cdot 300}{5,12} = 41,01$$

A rigidez do ponto A do trecho 3 é a mesma rigidez do ponto B do trecho 2 (afinal é o mesmo nó), portanto:

$$G_{Ax} = \frac{\frac{20000 \cdot 4543}{600} + \frac{20000 \cdot 4543}{300}}{\frac{20000 \cdot 1305}{400}} = 6,96$$

$$G_{Ay} = \frac{\frac{20000 \cdot 1535}{600} + \frac{20000 \cdot 1535}{300}}{\frac{20000 \cdot 1305}{400}} = 2,35$$

O rigidez na base é máxima para ambos os eixos devido ao engastamento considerado ($G_{bx} = G_{by} = 0$), portanto o cálculo dos k fica assim:

Lista de Exercícios Módulos 3 e 4 - Resolução

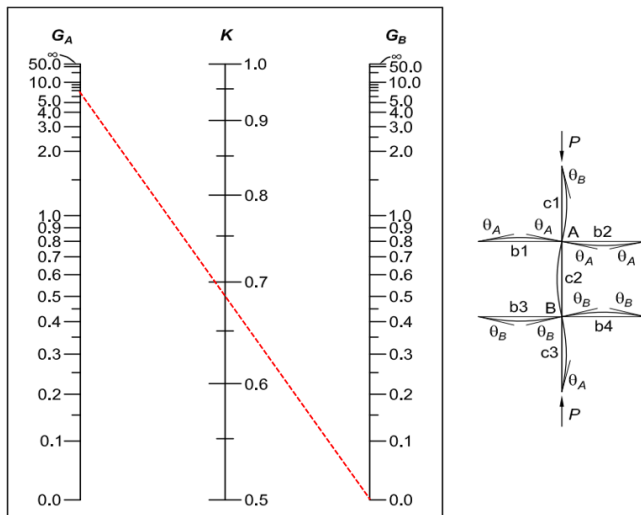


Fig. C-A-7.1. Alignment chart—sidesway inhibited (braced frame).

$$K_x = 0,68$$

E para o eixo Y temos:

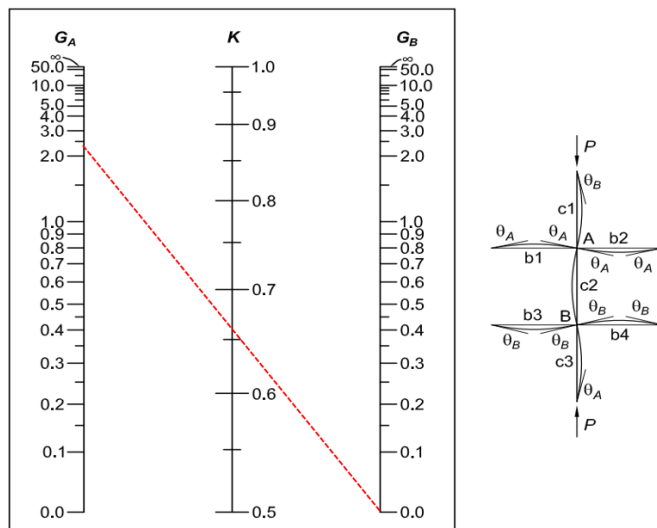


Fig. C-A-7.1. Alignment chart—sidesway inhibited (braced frame).

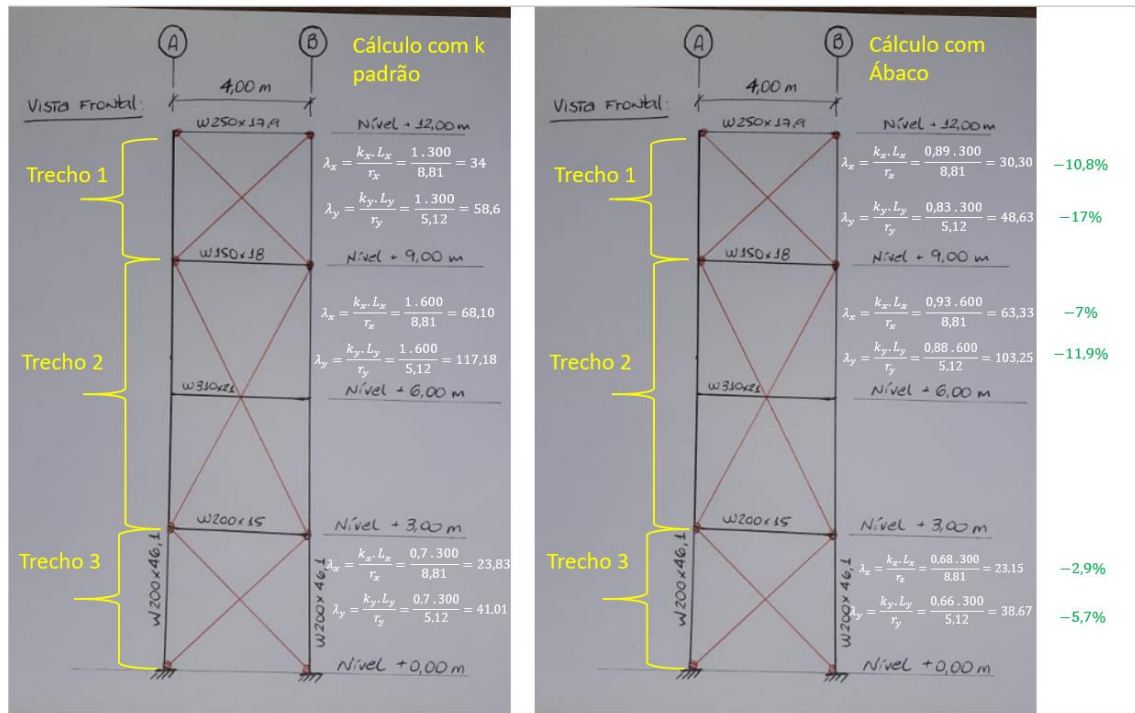
$$K_y = 0,66$$

Portanto a esbeltez do trecho 3 em cada eixo é dada por:

$$\lambda_x = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{0,68 \cdot 300}{8,81} = 23,15 < 23,83 (\text{calculado com } k = 0,7)$$

$$\lambda_y = \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{0,66 \cdot 300}{5,12} = 38,67 < 41,01 (\text{calculado com } k = 0,7)$$

Para ter uma noção do efeito prático desse ábaco vamos fazer uma comparação da esbeltez obtida em cada método:



Observe que os ganhos variam de trecho para trecho, e geralmente podemos afirmar que os ganhos mais expressivos se dão nos trechos de pilares que não estão apoiados sobre fundações engastadas. Por isso, na prática, o método do uso do ábaco será justificável quando alguma peça estiver falhando à compressão ou flexo-compressão, em algum desses trechos. Vale lembrar que os trechos ligados às placas de base serão, geralmente os mais solicitados à compressão. Ou seja, a regra prática deve ser usada no cotidiano, e o ábaco somente como alternativa pontual.

b) Calcule resistência à compressão do pilar, no trecho de maior esbeltez.

O trecho de maior esbeltez é o trecho 2 onde temos

$$\lambda_y = \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1 \cdot 600}{5,12} = 117,18 (\text{com } K = 1)$$

Ou

$$\lambda_y = \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{0,88 \cdot 600}{5,12} = 103,25 (\text{Com } K = 0,88 \text{ pelo Ábaco})$$

Vamos calcular as duas resistências para efeito de comparação.

Lista de Exercícios Módulos 3 e 4 - Resolução

Perfil W200X46,1 ASTM A572-GR50

Cálculo com K = 1,0

Passo 1: Cálculo do fator Q para flambagem Local

Esbeltez da mesa (Elemento A.L)

$$\frac{b}{t} = \frac{\left(\frac{203}{2}\right)}{11} = 9,23$$

Esbeltez Limite:

$$\frac{b}{t_{lim}} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 0,56 \cdot \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 13,48$$

Como a esbeltez da mesa (9,23) é menor que a esbeltez limite (13,48) então Qs = 1,00

Esbeltez da Alma

$$\frac{d'}{t_w} = \frac{157}{7,2} = 21,86$$

Esbeltez Limite:

$$\frac{b}{t_{lim}} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 1,49 \cdot \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 35,87$$

Como a esbeltez da alma (21,86) é menor que a esbeltez limite (35,87) então Qa = 1,00

Portanto Q = Qs. Qa = 1,00

Passo 2: Cálculo do fator X para flambagem Global (Com K Padrão)

Sempre iniciamos com o Cálculo da carga crítica de flambagem

$$Ne_x = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 4543}{(1.600)^2} = 2490 \text{ kN}$$

$$Ne_y = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1535}{(1.600)^2} = 841 \text{ kN}$$

$$r_0^2 = rx^2 + ry^2 = 8,81^2 + 5,12^2 = 103,83 \text{ cm}$$

$$Ne_z = \frac{1}{r_0^2} \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_z \cdot L_z)^2} + G \cdot I_t \right) \rightarrow \frac{1}{103,83} \left(\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 141342}{(1.300)^2} + 7700 \cdot 22,01 \right) \rightarrow 4617 \text{ kN}$$

Observe que o Lz é tratado como sendo fora do sistema contraventado, assumindo que as ligações entre viga e pilar são todas rígidas.

Portanto Ne = 841 kN (menor dos valores encontrados)

Continuando com o cálculo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot F_y}{N_e}} \rightarrow \sqrt{\frac{1.58,6.34,5}{841}} = 1,55 > 1,5$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \rightarrow \frac{0,877}{1,55^2} = 0,365$$

Finalmente

$$N_{c,Rd} = \frac{Q \cdot \chi \cdot A_g \cdot F_y}{1,1} \rightarrow \frac{1,0.365.58,6.34,5}{1,1} \rightarrow 670,83 \text{ kN}$$

Alternativa: Cálculo com K Obtido pelo ábaco:

O k não tem influência alguma no cálculo de flambagem local, portanto assumimos o cálculo anterior (Q = 1) e pulamos logo para o passo 2:

Passo 2: Cálculo do fator X para flambagem Global (Com K Obtido pelo ábaco)

Sempre iniciamos com o Cálculo da carga crítica de flambagem

$$N_{e_x} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 4543}{(0,93.600)^2} = 2880 \text{ kN}$$

$$N_{e_y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1535}{(0,88.600)^2} = 1086,85 \text{ kN}$$

$$r_0^2 = rx^2 + ry^2 = 8,81^2 + 5,12^2 = 103,83 \text{ cm}$$

$$N_{e_z} = \frac{1}{r_0^2} \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_z \cdot L_z)^2} + G \cdot I_t \right) \rightarrow \frac{1}{103,83} \left(\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 141342}{(1.300)^2} + 7700 \cdot 22,01 \right) \rightarrow 4617 \text{ kN}$$

O Ábaco não trata de flambagem à torção, portanto Kz = 1,00

Portanto Ne = 1086,85 kN (menor dos valores encontrados)

Continuando com o cálculo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot F_y}{N_e}} \rightarrow \sqrt{\frac{1.58,6.34,5}{1086,85}} = 1,36 < 1,5$$

$$\chi = 0,658 \lambda_0^2 \rightarrow 0,658 \cdot 1,36^2 = 0,46$$

Finalmente

$$N_{c,Rd} = \frac{Q \cdot \chi \cdot A_g \cdot F_y}{1,1} \rightarrow \frac{1,0.46.58,6.34,5}{1,1} \rightarrow 845,44 \text{ kN}$$

Observamos então, que nesse caso, para o trecho 2, com o K = 1 a resistência à compressão do perfil é 670,83 kN, enquanto que com o K Obtido através do ábaco, a resistência passa a ser 845,44 kN, o que significa um aumento de 26% na resistência nominal de projeto.

c) Calcule resistência à compressão do pilar, no trecho que vai da base (nível zero) até o primeiro nível (nível 3m)

Não há necessidade de repetir o cálculo do Q, pois trata-se do mesmo pilar, portanto vamos seguir com a Flambagem Global

Passo 2: Cálculo do fator X para flambagem Global (Com K Padrão)

Sempre iniciamos com o Cálculo da carga crítica de flambagem

$$Ne_x = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 4543}{(0,7 \cdot 300)^2} = 14234 \text{ kN}$$

$$Ne_y = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1535}{(0,7 \cdot 300)^2} = 6870 \text{ kN}$$

$$r_0^2 = rx^2 + ry^2 = 8,81^2 + 5,12^2 = 103,83 \text{ cm}$$

$$Ne_z = \frac{1}{r_0^2} \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_z \cdot L_z)^2} + G \cdot I_t \right) \rightarrow \frac{1}{103,83} \left(\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 141342}{(1,300)^2} + 7700 \cdot 22,01 \right) \rightarrow 4617 \text{ kN}$$

Portanto $Ne = 4617 \text{ kN}$ (menor dos valores encontrados)

Continuando com o cálculo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot F_y}{Ne}} \rightarrow \sqrt{\frac{1,58 \cdot 6,34,5}{4617}} = 0,66 < 1,5$$

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \rightarrow 0,658^{0,66^2} = 0,83$$

Finalmente

$$N_c, Rd = \frac{Q \cdot \chi \cdot A_g \cdot F_y}{1,1} \rightarrow \frac{1 \cdot 0,83 \cdot 58,6 \cdot 34,5}{1,1} \rightarrow 1525 \text{ kN}$$

Alternativa: Cálculo com K Obtido pelo ábaco:

Passo 2: Cálculo do fator X para flambagem Global (Com K Obtido pelo ábaco)

Sempre iniciamos com o Cálculo da carga crítica de flambagem

$$Ne_x = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 4543}{(0,68 \cdot 300)^2} = 21548 \text{ kN}$$

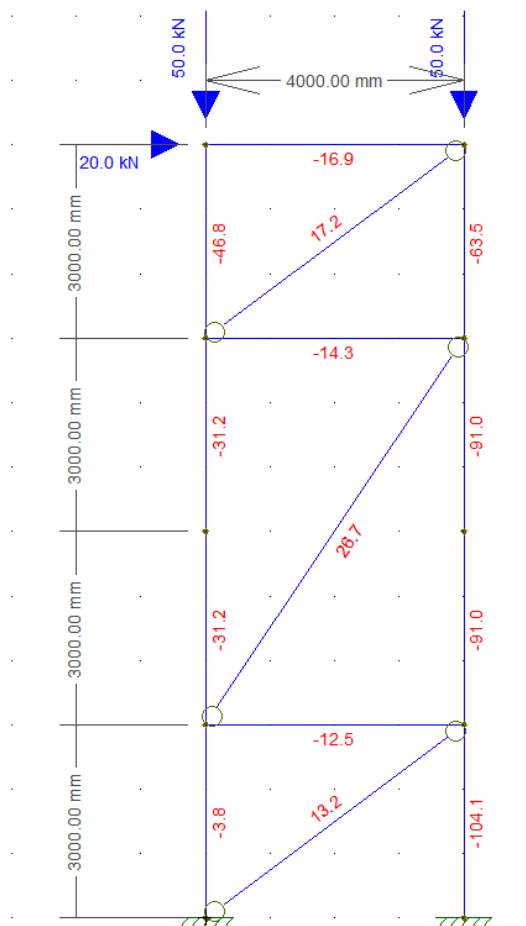
$$Ne_y = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1535}{(0,66 \cdot 300)^2} = 7728 \text{ kN}$$

$$r_0^2 = rx^2 + ry^2 = 8,81^2 + 5,12^2 = 103,83 \text{ cm}$$

$$N_{e_z} = \frac{1}{r_0^2} \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_z \cdot L_z)^2} + G \cdot I_t \right) \rightarrow \frac{1}{103,83} \left(\frac{\pi^2 \cdot 200000 \cdot 141342}{(1300)^2} + 7700 \cdot 22,01 \right) \rightarrow 4617 \text{ kN}$$

Nesse caso o Nez continua comandando o cálculo, portanto não há necessidade de seguir.
Temos $N_{c,Rd} = 1525 \text{ kN}$ para o trecho 3

1.2– Ainda considerando a estrutura do item 1.1, considere os seguintes carregamentos e esforços axiais (positivo = Tração, Negativo = Compressão). No modelo do ftool foram modelados apenas as barras de contraventamento que tracionam



a) Determine um perfil de cantoneira simples, de abas iguais ASTM A36 que seria aprovado nessas condições de esforços (considerar o maior esforço de tração), considerando ligação soldada.

Resolução. No caso temos uma tração máxima de 26,7 kN

Selecionamos a cantoneira de abas iguais pela verificação de escoamento da seção bruta

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

$$26,7 = \frac{A_g \cdot 25}{1,1}$$

$$A_g = 1,18 \text{ cm}^2$$

Qualquer cantoneira de abas iguais com área igual ou superior a 1,18cm² atende às nossas

necessidades.

270

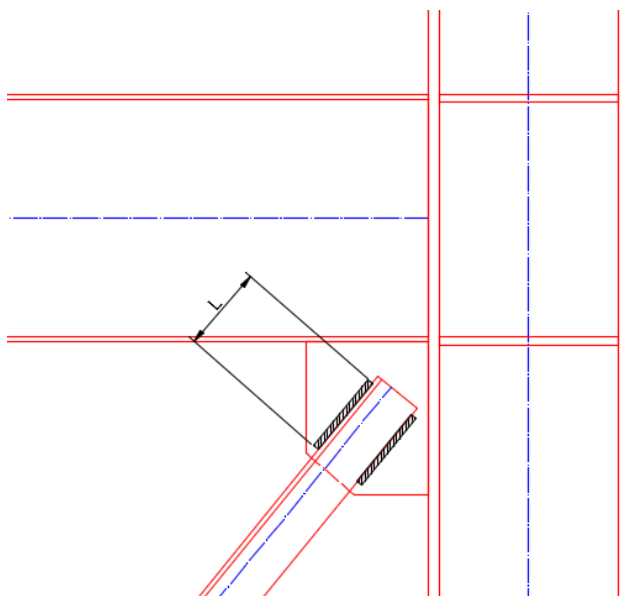
Estruturas metálicas

Tabela E.1 — Cantoneiras de abas iguais

Propriedades para dimensionamento

b_f		P	A	t_f		$I_x = I_y$	$W_x = W_y$	$r_x = r_y$	$r_{x \min}$	x
pol	cm	kg/m	cm ²	pol	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm
1/2"	1,270	0,55	0,70	1/8"	0,317	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
5/8"	1,588	0,71	0,90	1/8"	0,317	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
3/4"	1,905	0,87	1,11	1/8"	0,317	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
7/8"	2,220	1,04	1,32	1/8"	0,317	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66
		1,49	1,90	3/16"	0,476	0,79	0,54	0,66	0,48	0,74
1"	2,540	1,19	1,48	1/8"	0,317	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76
		1,73	2,19	3/16"	0,476	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
		2,22	2,84	1/4"	0,635	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86
1 1/4"	3,175	1,50	1,93	1/8"	0,317	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89
		2,20	2,77	3/16"	0,476	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
		2,86	3,62	1/4"	0,635	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02
1 1/2"	3,810	1,83	2,32	1/8"	0,317	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07
		2,68	3,42	3/16"	0,476	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12
		3,48	4,45	1/4"	0,635	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19
1 3/4"	4,445	2,14	2,71	1/8"	0,317	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22
		3,15	4,00	3/16"	0,476	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30
		4,12	5,22	1/4"	0,635	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35

Adotaremos L7/8" X1/8

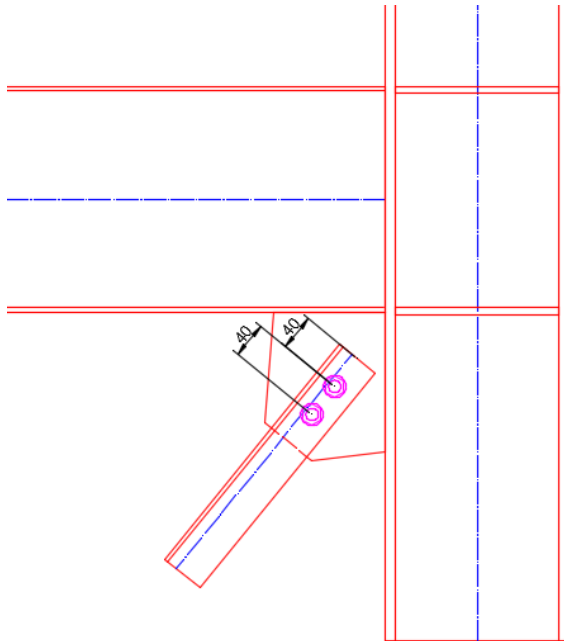


b) Determine o comprimento de solda ideal para a ligação dessa cantoneira em uma chapa Gousset, conforme desenho ao lado.

$$L_c = 4,23 \cdot E_c$$

A excentricidade da cantoneira é a cota x da tabela acima ($x = 0,66\text{cm}$) Portanto

$L_c = 4,23 \cdot 0,66 = 2,79\text{cm}$ – Adotaremos 40mm devido ao tamanho mínimo do filete exigido pelo item 6.2.6.2.3 da NBR8800



c) Considerando a configuração ao lado, e considerando a maior tração atuante na diagonal do exercício 1.2, qual o diâmetro mínimo de parafuso deve ser usado na ligação, sabendo que a resistência ao esforço cortante de um parafuso é dado por:

$$V_{Rd} = \frac{0,4 \cdot A_p \cdot F_u}{1,35}$$

Sendo A_p = área da seção transversal do parafuso.

Considere Parafuso ASTM A307, $F_u = 41,5 \text{ kN/cm}^2$.

De acordo com o item 6.1.5.2 da NBR8800/08, Ligações devem ser

dimensionadas para uma força mínima de 45 kN na direção da força atuante. Portanto como a tração máxima na barra é 26 kN, devemos adotar o valor de $45/2 = 22,5 \text{ kN}$ para cada parafuso

Dessa forma:

$$F_{Rd} = \frac{0,4 \cdot (\pi \cdot \frac{D^2}{4}) \cdot F_u}{1,35}$$

$$22,5 = \frac{0,4 \cdot (\pi \cdot \frac{D^2}{4}) \cdot 41,5}{1,35}$$

$$D = 1,52 \text{ mm} - \text{Adotar } 16 \text{ mm}$$

d) Para a configuração dada no item c, qual deve ser a bitola de cantoneira simples a ser utilizada, considerando aço ASTM A36 e sujeita ao maior esforço de tração obtido no modelo do item 1.2.

Aqui não tem muito o que fazer, já que a distância entre parafusos está fixada em 40mm, o que podemos fazer é testar diferentes bitolas de cantoneiras para adequar à geometria dada, fazendo o cálculo da seção líquida efetiva.

Vamos tentar Cantoneira L38,1X3,2

$$A_g = 2,32 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área líquida } N_a = 2,32 - (1,6 + 0,15 + 0,2) \cdot 0,32 = 1,69 \text{ cm}^2$$

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{L_c} \rightarrow 1 - \frac{1,07}{4} = 0,7325 > 0,60$$

Cálculo da resistência na ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t \cdot A_n \cdot F_u}{1,35} \rightarrow \frac{0,7325 \cdot 1,69 \cdot 40}{1,35} = 36,67 \text{ kN} > 26,7 \text{ OK Aprovado}$$

Podemos tentar Cantoneira L31,75X3,2

$$A_g = 1,93 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área líquida } N_a = 1,93 - (1,6 + 0,15 + 0,2) \cdot 0,32 = 1,30 \text{ cm}^2$$

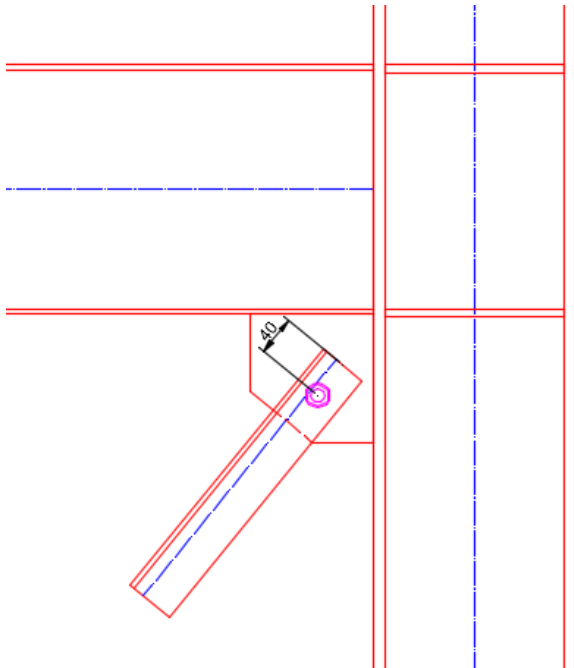
$$C_t = 1 - \frac{e_c}{L_c} \rightarrow 1 - \frac{0,89}{4} = 0,77 > 0,60$$

Cálculo da resistência na ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t \cdot A_n \cdot F_u}{1,35} \rightarrow \frac{0,77 \cdot 1,30 \cdot 40}{1,35} = 29,65 \text{ kN} > 26,7 \text{ OK Aprovado}$$

Como a área bruta dessa cantoneira (1,93cm²) é maior que a cantoneira de 7/8X1/8 (1,32 cm²) adotada anteriormente, podemos considerar que será aprovada na verificação de escoamento da seção bruta

A questão geométrica pode ser avaliada durante o detalhamento.



e) Considerando a configuração ao lado, e considerando a maior tração atuante na diagonal do exercício 1.2, qual o diâmetro mínimo de parafuso deve ser usado na ligação, considerando parafusos ASTM A307 ($F_u = 41,5 \text{ kN/cm}^2$) ou ASTM A325 ($F_u = 82,5 \text{ kN/cm}^2$)

Ainda De acordo com o item 6.1.5.2 da NBR8800/08, Ligações devem ser dimensionadas para uma força mínima de 45 kN na direção da força atuante. Portanto como a tração máxima na barra é 26 kN, devemos adotar o valor de 45kN para cada parafuso

Dessa forma:

$$F_{Rd} = \frac{0,4 \cdot (\pi \cdot \frac{D^2}{4}) \cdot F_u}{1,35}$$

$$45 = \frac{0,4 \cdot (\pi \cdot \frac{D^2}{4}) \cdot 41,5}{1,35}$$

$$D = 2,15\text{cm Adotar } 22,22\text{mm} \left(\frac{7}{8}\right) \text{ ASTM A307}$$

$$45 = \frac{0,4 \cdot (\pi \cdot \frac{D^2}{4}) \cdot 82,5}{1,35} = 1,53\text{cm Adotar } 16\text{mm ASTM A325}$$

- f) Para a configuração dada no item 'e', qual a bitola de cantoneira deve ser utilizada, considerando Aço ASTM A36 sujeita ao maior esforço de tração obtido no modelo do item 1.2

Para a cantoneira adotaremos o menor diâmetro de parafuso: 16mm ASTM A325

Furo padrão = 16mm + 1,5mm + 2mm = 19,5mm

$$N_{t,Rd} = \frac{2(e_2 - 0,5d') \cdot t \cdot F_u}{1,35}$$

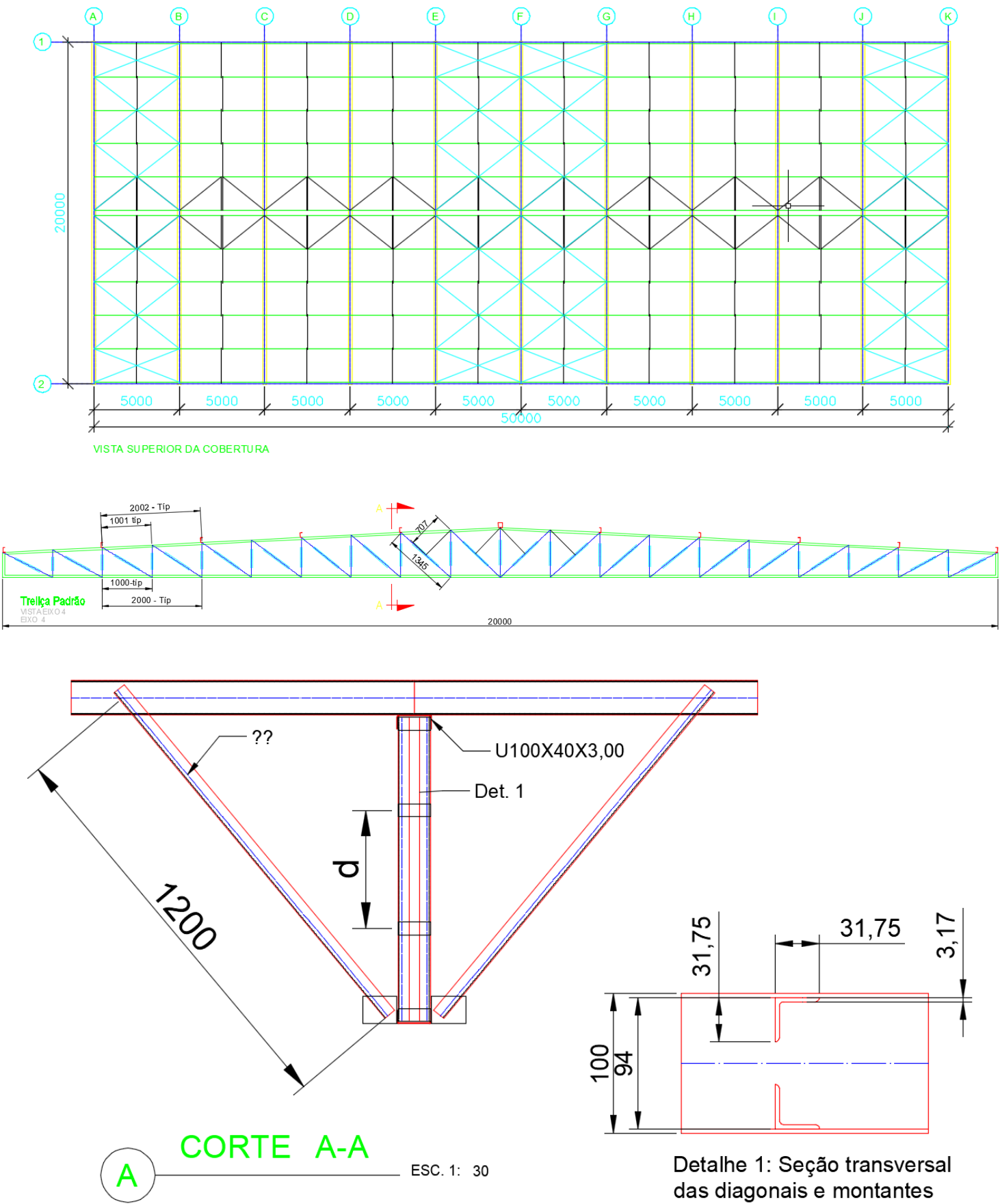
Para iniciar os cálculos vamos estimar uma cantoneira de 44,45mm x 3,2

$$N_{t,Rd} = \frac{2\left(\frac{4,445}{2} - 0,5 \cdot 1,95\right) \cdot 0,32 \cdot 40}{1,35} = 23,65 \text{ kN} < 26,7 \text{ Não aprovado}$$

Como a seção anterior não aprovou, vamos adotar a próxima cantoneira mais leve : L50,8X3,2

$$N_{t,Rd} = \frac{2\left(\frac{5,08}{2} - 0,5 \cdot 1,95\right) \cdot 0,32 \cdot 40}{1,35} = 29,67 \text{ kN} > 26,7 \text{ Aprovado}$$

2– Considere a cobertura metálica a seguir



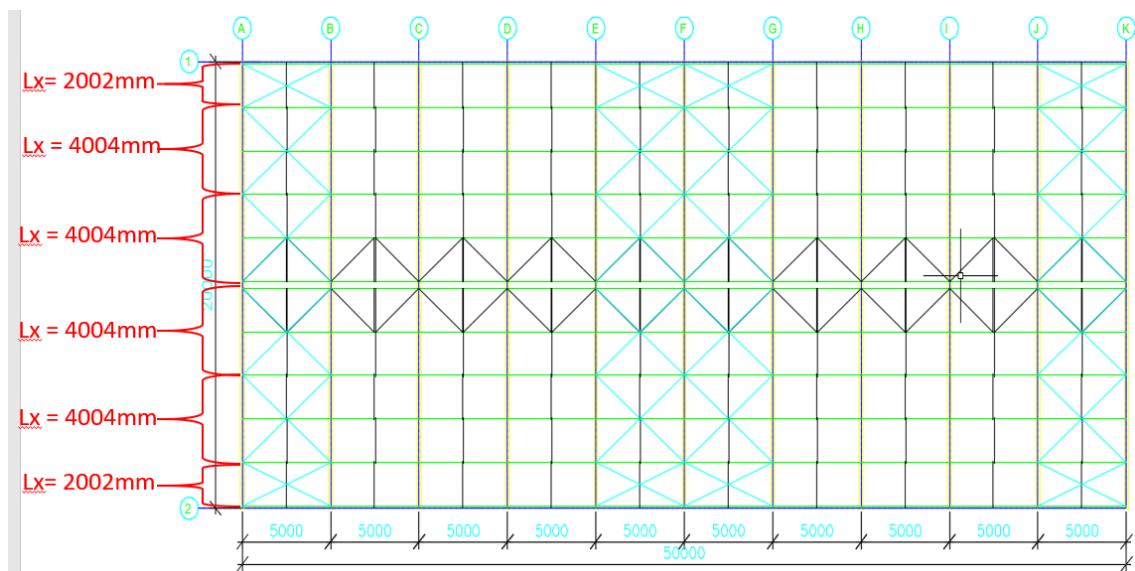
Na vista superior, as linhas azuis representam as barras do contraventamento da cobertura.

Pede-se:

- a) Determine os comprimentos de flambagem L_x e L_y do banzo superior, considerando que o mesmo é um perfil U simples dobrado com a concavidade virada para baixo. Se houver mais de um trecho comprimentos de flambagem distintos, identificar cada comprimento no desenho da treliça. (Opcional: caso deseje calcule a resistência à compressão do banzo superior utilizando o Dimperfil, vendo o tutorial na área do Aluno, Salve em um arquivo à parte e anexe à sua resolução)

Resolução: Lembremos que os comprimentos de flambagem em torno de X-X, nesse caso, flambagem horizontal do perfil U dobrado deitado, são determinados pelos nós de contraventamento, e o comprimento de flambagem em torno do eixo Y-Y é a distância entre os nós no plano da treliça. Podemos então separar os comprimentos de flambagem em trechos como a seguir:

Comprimentos de flambagem do banzo superior em torno de X-X (Flambagem no plano da cobertura)



Comprimentos de flambagem do banzo superior em torno de Y-Y (Flambagem no plano da treliça)

Como, no plano da treliça, a distância entre dois nós é sempre 1001mm então temos $L_y = 1001\text{mm}$ para todos os trechos do banzo superior

Agora podemos calcular a resistência do perfil usando o software gratuito DimPerfil. Caso ainda não saiba operá-lo, por favor, veja o tutorial clicando no link abaixo:

Lista de Exercícios Módulos 3 e 4 - Resolução

<https://calculistadeaco.com.br/tutorial-de-dimperfil-software-gratuito-para-dimensionamento-de-perfis-formados-a-frio/>

Cálculo da resistência à compressão para o trecho com $L_x = 200,2\text{ cm}$ e $L_y = 100,1\text{ cm}$:

DimPerfil 4.0 - Dimensionamento de Perfis de Aço Formados a Frio

File Help

Escolha do Perfil Cálculo dos Esforços

Dimensões (cm)

$D = 0$
 $\alpha = 0$
 $b_w = 10$
 $b_f = 4$
 $t = 0.3$
 $\beta = 90$

Comprimentos (cm)

$L_x = 200,2$
 $L_y = 100,1$
 $L_t = 100,1$

Esforços Solicitantes

N_d : kN
 M_{xd} : kN.cm
 M_{yd} : kN.cm
 V_d : kN

Coefficiente de Momento

Em X $C_b = 1$
Em Y $C_b = 1$

Resultados

Resultado: NBR 14762:2001
Nc_MLE 77,86 kN

Item a ser calculado: Var

Esforço Resistente à Compressão Centrada

NBR 14762:2010

Flexão Composta

Nt

Nc_MLE

Ndist

Larguras efetivas

Mrd

Mxrd

Myrd

Flexão Composta

Mostrar perfil

By Edson Lúbas Silva

Fe = 28,123 kN/cm²
flambagem por flexo-torção
A = 5,104 cm²
 $\lambda_0 = 0,924$
 $\chi = 0,7$
 $\sigma = 18,305\text{ kN/cm}^2$
MÉTODO DAS LARGURAS EFETIVAS (MLE)
Aef_MLE = 5,104 cm²
 $\gamma = 1,2$
Nc = 77,86 kN

Resistência à tração para o mesmo trecho acima

DimPerfil 4.0 - Dimensionamento de Perfis de Aço Formados a Frio

File Help

Escolha do Perfil Cálculo dos Esforços

Dimensões (cm)

$D = 0$
 $\alpha = 0$
 $b_w = 10$
 $b_f = 4$
 $t = 0.3$
 $\beta = 90$

Comprimentos (cm)

$L_x = 200,2$
 $L_y = 100,1$
 $L_t = 100,1$

Esforços Solicitantes

N_d : kN
 M_{xd} : kN.cm
 M_{yd} : kN.cm
 V_d : kN

Coefficiente de Momento

Em X $C_b = 1$
Em Y $C_b = 1$

Resultados

Resultado: NBR 14762:2001
Nt 111,363 kN

Item a ser calculado: Var

Esforço Resistente à Tração Centrada

NBR 14762:2010

Flexão Composta

Nt

Nc_MLE

Ndist

Larguras efetivas

Mrd

Mxrd

Myrd

Flexão Composta

Mostrar perfil

By Edson Lúbas Silva

$\gamma = 1,35$
 $N_{t,Rd} = 151,233\text{ kN}$
Cálculo para ruptura na seção líquida na região da ligação:
 $C_t = 0,9$
An = 5,104 cm²
 $f_u = 40\text{ kN/cm}^2$
 $\gamma = 1,65$
 $N_{t,Rd} = 111,363\text{ kN}$
O esforço resistente à tração é o menor valor calculado acima:
 $N_{t,Rd} = 111,363\text{ kN}$

Cálculo da resistência à compressão para o trecho com $L_x = 400,4\text{cm}$ e $L_y = 100,1\text{cm}$:

DimPerfil 4.0 - Dimensionamento de Perfis de Aço Formados a Frio

File Help

Escolha do Perfil Cálculo dos Esforços

Dimensões (cm)

D = 0
 $\alpha = 0$
 $b_w = 10$
 $b_f = 4$
 $t = 0,3$
 $\beta = 90$

Comprimentos (cm)

Lx: 400,4
 Ly: 100,1
 Lt: 100,1

Esforços Solicitantes

Nd: kN
 Mxd: kN.cm
 Myd: kN.cm
 Vd: kN

Coefficiente de Momento

Em X Cb: 1
 Em Y Cb: 1

Resultados

Resultado: NBR 14762:2001
 Nc_MLE 56,69 kN

Item a ser calculado: Var

Esforço Resistente à Tração Centrada

NBR 14762:2010

- Flexão Composta
 - Nrd
 - Nc_MLE
 - Ndist
 - Larguras efetivas
- Mrd
 - Mxrd
 - Myrd
- Flexão Composta

Mostrar perfil

By Edson Lubas Silva

Fe = 14,893 kN/cm²
 flambagem por flexo-torção
 $A = 5,104\text{ cm}^2$
 $\lambda_0 = 1,269$
 $X = 0,509$
 $\sigma = 13,328\text{ kN/cm}^2$

MÉTODO DAS LARGURAS EFETIVAS (MLE)
 $A_{ef_MLE} = 5,104\text{ cm}^2$
 $\gamma = 1,2$
 $N_c = 56,69\text{ kN}$

Observe que a resistência à compressão caiu de 77,86 kN para 56,69 (-27%).

A resistência à tração não sofre nenhuma alteração devido ao comprimento de flambagem.

- b) Determine os comprimentos de flambagem do banzo inferior, considerando um U simples de 100X40X3,00 com a concavidade voltada para cima em duas hipóteses: 1 – Com mãos francesas em todas as terças e 2 – Sem nenhuma mão francesa. (Opcional, caso queira, calcule a resistência à compressão do banzo inferior usando o Dimperfil e anexe o cálculo à sua resolução, para cada uma das duas hipóteses)**

Com as mãos francesas em todas as terças, os comprimentos de flambagem do banzo inferior serão iguais às do banzo superior, consequentemente as resistências serão as mesmas pois se trata do mesmo perfil

Sem as mãos francesas, o comprimento de flambagem passa a ser 2000cm (20m), e a resistência à compressão passa a ser:

DimPerfil 4.0 - Dimensionamento de Perfis de Aço Formados a Frio

File Help

Escolha do Perfil Cálculo dos Esforços

Dimensões (cm)

D = 0
 $\alpha = 0$
 $b_w = 10$
 $b_f = 4$
 $t = 0,3$
 $\beta = 90$

Comprimentos (cm)

Lx: 2000
 Ly: 100,1
 Lt: 100,1

Esforços Solicitantes

Nd: kN
 Mxd: kN.cm
 Myd: kN.cm
 Vd: kN

Coefficiente de Momento

Em X Cb: 1
 Em Y Cb: 1

Resultados

Resultado: NBR 14762:2001
 Nc_MLE 2,908 kN

Item a ser calculado: Var

Esforço Resistente à Tração Centrada

NBR 14762:2010

- Flexão Composta
 - Nrd
 - Nc_MLE
 - Ndist
 - Larguras efetivas
- Mrd
 - Mxrd
 - Myrd
- Flexão Composta

Mostrar perfil

By Edson Lubas Silva

Fe = 0,715 kN/cm²
 flambagem por flexo-torção
 $A = 5,104\text{ cm}^2$
 $\lambda_0 = 5,793$
 $X = 0,026$
 $\sigma = 0,684\text{ kN/cm}^2$

MÉTODO DAS LARGURAS EFETIVAS (MLE)
 $A_{ef_MLE} = 5,104\text{ cm}^2$
 $\gamma = 1,2$
 $N_c = 2,908\text{ kN}$

Veja que a resistência à compressão caiu muito, temos apenas 2,908 kN. Isso pode se tornar um problema em hipóteses de vento de sucção que comprimem o banzo inferior da treliça.

- c) Considerando que a mão francesa sofre uma compressão axial de 4,9 kN, determine a bitola da mesma, considerando aço A36 e cantoneira simples conectada por uma aba.

Tabela E.1 — Cantoneiras de abas iguais
Propriedades para dimensionamento

b_f		P	A		t_f	$I_x = I_y$	$W_x = W_y$	$r_x = r_y$	$r_{x \min}$	x
pol	cm	kg/m	cm ²	pol	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm
1/2"	1,270	0,55	0,70	1/8"	0,317	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
5/8"	1,588	0,71	0,90	1/8"	0,317	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
3/4"	1,905	0,87	1,11	1/8"	0,317	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
7/8"	2,220	1,04	1,32	1/8"	0,317	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66
		1,49	1,90	3/16"	0,476	0,79	0,54	0,66	0,48	0,74
1"	2,540	1,19	1,48	1/8"	0,317	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76
		1,73	2,19	3/16"	0,476	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
		2,22	2,84	1/4"	0,635	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86
1 1/4"	3,175	1,50	1,93	1/8"	0,317	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89
		2,20	2,77	3/16"	0,476	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
		2,86	3,62	1/4"	0,635	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02
1 1/2"	3,810	1,83	2,32	1/8"	0,317	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07
		2,68	3,42	3/16"	0,476	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12
		3,48	4,45	1/4"	0,635	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19
1 3/4"	4,445	2,14	2,71	1/8"	0,317	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22
		3,15	4,00	3/16"	0,476	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30
		4,12	5,22	1/4"	0,635	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35
		5,04	6,45	5/16"	0,794	11,20	3,77	1,32	0,86	1,41
2"	5,080	2,46	3,10	1/8"	0,317	7,91	2,13	1,60	1,02	1,40
		3,63	4,58	3/16"	0,476	11,70	3,13	1,58	1,02	1,45
		4,74	6,06	1/4"	0,635	14,60	4,10	1,55	0,99	1,50
		5,83	7,42	5/16"	0,794	17,50	4,91	1,53	0,99	1,55
		6,99	8,76	3/8"	0,952	20,00	5,73	1,50	0,99	1,63
2 1/2"	6,350	4,57	5,80	3/16"	0,476	23,00	4,91	1,98	1,24	1,75
		6,10	7,67	1/4"	0,635	29,00	6,40	1,96	1,24	1,83
		7,44	9,48	5/16"	0,794	35,00	7,87	1,93	1,24	1,88
		8,78	11,16	3/8"	0,952	41,00	9,35	1,91	1,22	1,93
3"	7,620	5,52	7,03	3/16"	0,476	40,00	7,21	2,39	1,50	2,08
		7,29	9,29	1/4"	0,635	50,00	9,50	2,36	1,50	2,13
		9,07	11,48	5/16"	0,794	62,00	11,60	2,34	1,50	2,21
		10,71	13,61	3/8"	0,952	75,00	13,60	2,31	1,47	2,26
		12,34	15,67	7/16"	1,111	83,00	15,60	2,31	1,47	2,31
		14,00	17,74	1/2"	1,270	91,00	18,00	2,29	1,47	2,36
4"	10,160	9,81	12,51	1/4"	0,635	125,00	16,40	3,17	2,00	2,77
		12,19	15,48	5/16"	0,794	154,00	21,30	3,15	2,00	2,84
		14,57	18,45	3/8"	0,952	183,00	24,60	3,12	2,00	2,90
		16,80	21,35	7/16"	1,111	208,00	29,50	3,12	1,98	2,95
		19,03	24,19	1/2"	1,270	233,00	32,80	3,10	1,98	3,00
		21,26	26,96	9/16"	1,429	254,00	36,10	3,07	1,98	3,07
		23,35	29,73	5/8"	1,588	279,00	39,40	3,05	1,96	3,12
5"	12,700	18,30	23,29	3/8"	0,952	362,00	39,50	3,94	2,51	3,53
		24,10	30,64	1/2"	1,270	470,00	52,50	3,91	2,49	3,63
		29,80	37,8	5/8"	1,588	566,00	64,00	3,86	2,46	3,76
		35,10	44,76	3/4"	1,905	653,00	73,80	3,81	2,46	3,86
6"	15,240	22,22	28,12	3/8"	0,952	641,00	57,40	4,78	3,02	4,17
		29,20	37,09	1/2"	1,270	828,00	75,40	4,72	3,00	4,27
		36,00	45,86	5/8"	1,588	1.007,00	93,50	4,67	2,97	4,39
		42,70	54,44	3/4"	1,905	1.173,00	109,90	4,65	2,97	4,52
		49,30	62,76	7/8"	2,222	1.327,00	124,60	4,60	2,97	4,62

Passo 1: precisamos verificar se a esbeltez confere:

$$\frac{k \cdot L}{r_z} = \frac{1 \cdot 120}{0,64} = 187,5 < 200 \text{ Ok aprovada}$$

Passo 2: Verificação da Flambagem Local:

$$\frac{b}{t} = \frac{31,75}{3,17} = 10$$

Esbeltez Limite:

$$\frac{b}{t_{lim}} = 0,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 0,45 \cdot \sqrt{\frac{20000}{25}} = 12,72$$

Como a esbeltez da aba (10) é menor que a esbeltez limite (12,72) então $Q = 1,00$

Passo3: Verificação da Flambagem Global. Para esse cálculo vamos usar o procedimento de cantoneiras simples conectadas por uma aba previsto no item E.1.4 da NBR 8800/08

$$\frac{L_{x1}}{r_{x1}} = \frac{120}{0,97} = 123,71 > 80$$

$$K_{x1}L_{x1} = 32 \cdot r_{x1} + 1,25 \cdot L_{x1}$$

$$K_{x1}L_{x1} = 32 \cdot 0,97 + 1,25 \cdot 120 = 181,04$$

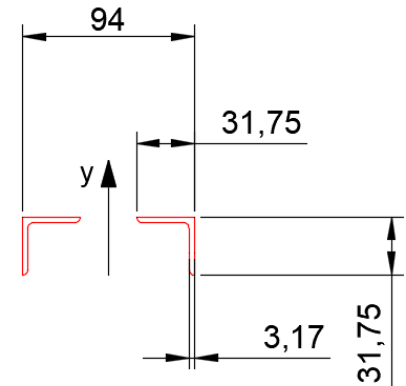
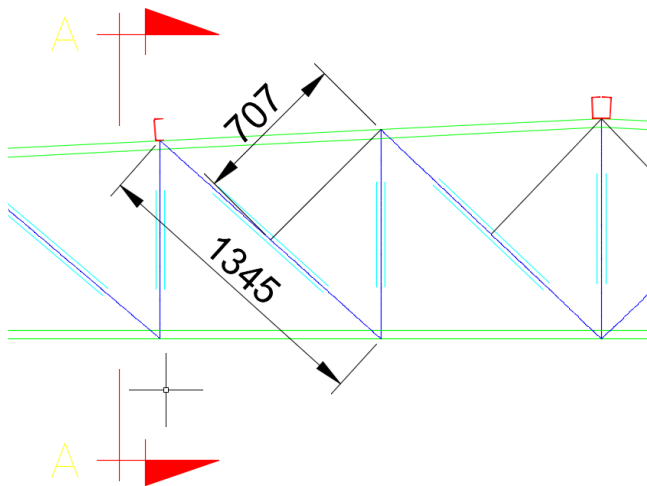
$$Ne_x = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_{x1} \cdot L_{x1})^2} \rightarrow Ne_x = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1,67}{(181,04)^2} = 10 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot F_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1,0 \cdot 1,93 \cdot 25}{10}} = 2,2 > 1,5$$

$$\chi = \frac{0,877}{(\lambda_0)^2} = \frac{0,877}{(2,2)^2} = 0,18$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot F_y}{1,1} = \frac{0,18 \cdot 1 \cdot 1,93 \cdot 25}{1,1} = 7,89 \text{ kN} > 4,9 \text{ kN Aprovado}$$

- d) Calcule a resistência à compressão da diagonal de 1345mm abaixo, extraída do desenho da treliça do exercício 2. Observe o travejamento presente, dividindo o comprimento da diagonal em duas partes iguais. (Dica: para determinar r_x e r_y , primeiro determine I_x e I_y através do teorema de Steiner, considerando a dupla cantoneira como seção composta, simétrica em relação ao eixo Y-Y, ou usando o Massprop)



Detalhe 1: Seção transversal das diagonais e montantes

Passo 1: Obter as propriedades geométricas da seção transversal

Propriedades em torno do eixo X-X

Como as duas barras são simétricas em relação ao eixo Y, para calcular I_x basta dobrar o valor de inércia de uma cantoneira>

$$I_x = 2 \cdot 1,67 = 3,34 \text{ cm}^4$$

Já o raio de giração permanece o mesmo da peça simples, pois dobramos a área e a inércia simultaneamente

$$r_x = 0,97$$

Propriedades em torno do eixo Y-Y

A distância total das abas da cantoneira é 9,4 cm. Se considerarmos apenas uma das cantoneiras, a da direita por exemplo, a distância do eixo Y até a face mais extrema da aba é $9,4/2 = 4,7 \text{ cm}$

Os eixos baricêntricos (linha neutra) se encontram à cota "x" da tabela de perfis, para dentro, à partir da face. Portanto a distância do eixo Y até o eixo baricêntrico de uma das cantoneiras será $4,7 - 0,89 = 3,81 \text{ cm}$

Agora podemos aplicar o teorema de Steiner para obter as propriedades em torno do eixo Y-Y

$$I_y = 2 \cdot (I_{\text{Perfil Simples}} + A \cdot d^2) \rightarrow 2 \cdot (1,67 + 1,93 \cdot 3,81^2) = 59,37 \text{ cm}^4$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{59,37}{2 \cdot 1,93}} = 3,92 \text{ cm}$$

Agora podemos proceder com o cálculo

Passo 1: Verificação da esbeltez

$$\frac{kx \cdot Lx}{r_x} = \frac{1 \cdot \left(\frac{134,5}{2}\right)}{0,97} = 69,32 < 200 \text{ Ok aprovada}$$

$$\frac{ky \cdot Ly}{r_y} = \frac{1 \cdot (134,5)}{3,92} = 34,31 < 200 \text{ Ok aprovada}$$

Passo 2: Verificação da Flambagem Local:

$$\frac{b}{t} = \frac{31,75}{3,17} = 10$$

Esbeltez Limite:

$$\frac{b}{t_{lim}} = 0,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow 0,45 \cdot \sqrt{\frac{20000}{25}} = 12,72$$

Como a esbeltez da aba (10) é menor que a esbeltez limite (12,72) então Q = 1,00

Passo 3: Verificação da flambagem global

Como a esbeltez em torno de X-X foi maior que a esbeltez em torno de Y-Y, então faremos o cálculo para o Eixo X-X apenas

$$Ne_x = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \rightarrow Ne_x = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 3,34}{\left(1 \cdot \frac{134,5}{2}\right)^2} = 145,77 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot F_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1,0 \cdot 3,86 \cdot 25}{145,77}} = 0,81 < 1,5$$

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,81^2} = 0,76$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot F_y}{1,1} = \frac{0,76 \cdot 1 \cdot 3,86 \cdot 25}{1,1} = 66,67 \text{ kN}$$