

2.7 Dimensionamento dos Elementos do pórtico

2.7.1 Considerações gerais

Os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de perfis formam uma etapa trabalhosa e que pode consumir um tempo considerável do engenheiro estrutural.

Atualmente, com o uso comum de softwares de dimensionamento esta etapa pode ser automatizada, permitindo que o engenheiro dedique mais tempo às análises e otimização das estruturas.

Ao final desta publicação é apresentado um fluxograma que ilustra, com as devidas referências à norma, todas as etapas para o dimensionamento de peças de aço submetidas à flexo-compressão.

2.7.2 Solicitações de cálculo

Após uma criteriosa análise sobre as tensões atuantes na estrutura, destacam-se as barras submetidas aos maiores esforços, para que sejam dimensionadas de acordo com as prescrições normativas.

Para a coluna D-E os maiores esforços são:

Combinação Fd1 (Hipótese 1):
(Elemento à compressão)

$$\begin{aligned}M_{Sd} &= 82,01 \text{ kN}\cdot\text{m} \\N_{Sd} &= -42,97 \text{ kN} \\V_{Sd} &= -13,67 \text{ kN}\end{aligned}$$

Combinação Fd2 (Hipótese 2):
(Elemento à tração)

$$\begin{aligned}M_{Sd} &= -35,85 \text{ kN}\cdot\text{m} \\N_{Sd} &= 20,60 \text{ kN} \\V_{Sd} &= 21,74 \text{ kN}\end{aligned}$$

Combinação Fd3 (Hipótese 3):
(Elemento à tração)

$$M_{Sd} = 43,00 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\begin{aligned}N_{Sd} &= 13,68 \text{ kN} \\V_{Sd} &= 18,20 \text{ kN}\end{aligned}$$

Da mesma maneira se segue para todos os outros elementos, para que assim se possa proceder às verificações dos perfis.

2.7.3 Pré-dimensionamento da coluna

Bellei(2006), em seu livro sobre edifícios industriais em aço, recomenda para colunas de galpões sem ponte rolante com a seção constante um valor de altura do perfil de $H/20$ a $H/30$, sendo H a altura da coluna até o beiral. Para vigas de cobertura o autor recomenda alturas de perfis de $L/50$ até $L/70$. No projeto calculado teríamos para a altura h coluna:

$$h_c = \frac{6000\text{mm}}{20} = 300\text{mm}$$

E para altura da viga

$$h_v = \frac{15000\text{mm}}{500} = 300\text{mm}$$

Adota-se, portanto, o perfil W 310x38,7 para as colunas e vigas, isto é, um único perfil.

2.7.4 Dimensionamento e verificações para a coluna

Como as duas colunas (A-B e D-E) terão perfis iguais, somente serão apresentados os cálculos detalhados para uma delas (D-E). Porém, as verificações devem ser feitas para todas as combinações de ambas as colunas, conforme será lembrado ao final dos procedimentos de cálculo.

As propriedades geométricas do perfil podem ser obtidas em normas ou em tabelas de fabricantes siderúrgicos.

Foi escolhido um perfil que não necessariamente é o de melhor desempenho em

capacidade e custo, relação custo/benefício. Para obter a melhor solução devem-se avaliar: disponibilidade dos fornecedores, custos, compatibilidade dimensional entre elementos da estrutura, entre outros fatores. O responsável pelo projeto deve procurar a melhor solução que envolva custo do material, custo de fabricação e de transporte e montagem. Não necessariamente a escolha com melhor desempenho é a de menor peso. As fases de fabricação, transporte e montagem devem ser consideradas para uma escolha ótima.

[1] Verificação da esbeltez:

Conforme o item 5.3.4 da ABNT NBR8800:2008, a limitação do índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado do perfil L e o raio de giração correspondente r , não deve ser superior a 200.

$$\frac{L_x}{r_x} = \frac{6.000}{131,4} = 45,66 < 200 \Rightarrow \text{Ok!}$$

$$\frac{L_y}{r_y} = \frac{6.000}{38,2} = 157,07 < 200 \Rightarrow \text{Ok!}$$

[2] Verificação da capacidade à compressão:

Procedimentos determinados para seções com dupla simetria ou simétricas em relação a um ponto.

Conforme indicação da Tabela F.1 da ABNT NBR8800:2008, verifica-se para o perfil em questão a esbeltez da alma. Tratando-se de um perfil I, verifica-se para o Grupo 2, elemento AA:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Assim,

$$\frac{271}{5,8} = 46,72 > 1,49 \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 35,87$$

Como (h_w/t_w) supera $(b/t)_{\text{lim}}$, deve-se calcular o fator de redução Q_a , dado por:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}$$

onde A_g é a área bruta e A_{ef} a área efetiva da seção transversal, dada por:

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t$$

com o somatório estendendo-se a todos os elementos AA.

Nessa expressão:

b e t são, respectivamente, a largura e a espessura de um elemento comprimido AA, e b_{ef} é a largura efetiva de um elemento comprimido AA.

A largura efetiva dos elementos AA é igual a:

$$b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b$$

onde C_a é um coeficiente igual a 0,38 para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e 0,34 para todos os outros elementos e σ é a tensão que pode atuar no elemento analisado, tomada igual a:

$$\sigma = \chi f_y$$

com χ obtido conforme 5.3.3, adotando Q igual a 1,0. Opcionalmente, de forma conservadora, pode-se tomar:

$$\sigma = f_y$$

Desta maneira:

$$b_{ef} = 1,92 \cdot 5,8 \cdot 24,077 \left[1 - \frac{0,34}{271/5,8} \cdot 24,077 \right]$$

$$b_{ef} = 221,15 \text{ mm} < 271 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = 4.970 - (271 - 221,15) \cdot 5,8$$

$$A_{ef} = 4.680,85 \text{ mm}^2$$

$$Q_a = \frac{4.680,85}{4.970,00} = 0,94$$

O próximo passo é a verificação da esbelteza da mesa.

Conforme indicação da Tabela F.1 da ABNT NBR8800:2008, tratando-se de um perfil I, verifica-se para o Grupo 4, elemento AL:

$$\frac{b_f}{t_f} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Como (h_w/t_w) não supera $(b/t)_{lim}$, adota-se $Q_s = 1,00$.

$$\frac{165/2}{9,7} = 8,51 \leq 0,56 \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 13,48$$

Assim, conforme item F.1.3 do Anexo F da ABNT NBR8800:2008, o fator de redução total Q é dado por:

$$Q = Q_a \cdot Q_s \Rightarrow Q = 0,94 \cdot 1 = 0,94$$

Para o cálculo da carga de flambagem elástica, segundo o Anexo E da ABNT NBR8800:2008, determina-se para uma barra com seção transversal duplamente simétrica ou simétrica em relação a um ponto:

a) para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal:

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

b) para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal:

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

c) para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z:

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

Onde:

$K_x L_x$ é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x;

I_x é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x;

$K_y L_y$ é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y;

I_y é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y;

$K_z L_z$ é o comprimento de flambagem por torção;

E é o módulo de elasticidade do aço;

C_w é a constante de empenamento da seção transversal;

G é o módulo de elasticidade transversal do aço;

I_t é o momento de inércia à torção uniforme; r_o é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado por:

$$r_o = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2)}$$

Projeto de galpões

x_0 e y_0 são as coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y , respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção.

Assim, como foi utilizada análise de segunda ordem, pode ser usado $k=1,0$

a)

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot 200.000 \cdot 8,581 \times 10^7}{(6.000)^2} = \underline{4.705,06 \text{ kN}}$$

b)

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot 200.000 \cdot 7,27 \times 10^6}{(6.000)^2} = \underline{398,62 \text{ kN}}$$

c)

$$r_o = \sqrt{(131,4^2 + 38,20^2)} = 136,84 \text{ mm}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{136,84^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot 200.000 \cdot 1,63728 \times 10^{11}}{(6000)^2} + 77.000 \cdot 132.000 \right] =$$

$$N_{ez} = \underline{1.022,23 \text{ kN}}$$

Portanto, a carga resistente do perfil será a menor entre N_{ex} , N_{ey} e N_{ez} .

$$N_e = \min(N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}) = 398,62 \text{ kN}$$

Com a força axial de flambagem elástica do perfil pode-se calcular o fator de redução associado à resistência à compressão, que é dado por:

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

ou

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \text{ se } \lambda_0 > 1,5$$

onde

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido, dado no item 5.3.3.2 da ABNT NBR8800:2008 pela fórmula:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}}$$

Assim sendo,

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{0,94 \cdot 4.970 \cdot 345}{398.620}} = 2,011$$

Como $\lambda_0 > 1,5$:

$$\chi = \frac{0,877}{2,011^2} = 0,2169$$

E, finalmente, a força axial resistente de cálculo, de acordo com o item 5.3.2 da ABNT NBR8800:2008:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{al}} \Rightarrow \frac{0,2169 \cdot 0,94 \cdot 4.970 \cdot 345}{1,1}$$

$$N_{c,Rd} = 317,8 \text{ kN}$$

[3] Verificação da capacidade à flexão:

Para a verificação da carga do momento fletor resistente de cálculo do perfil são apresentados os procedimentos no Anexo G da ABNT NBR8800:2008, que são detalhados a seguir.

Conforme a Tabela G.1 da ABNT NBR8800:2008, para Seções I com dois eixos de simetria, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia, tem-se:

Verificando o estado limite para flambagem lateral com torção (FLT):

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_{FLT} = \frac{L_b}{r_y} = \frac{6.000}{38,20} = 157,07$$

b) Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 42,38$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{E.J} = \frac{(345 - 103,5)553.600}{200.000 \cdot 132.000}$$

$$\beta_1 = 0,005064$$

$$C_w = \frac{I_y(d - t_f)^2}{4} = \frac{7,27 \times 10^6 (310 - 9,7)^2}{4}$$

$$C_w = 1,639023 \times 10^{11} \text{ mm}^6$$

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

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{7,27 \times 10^6 \cdot 132.000}}{38,2 \cdot 132.000 \cdot 0,005064}$$

$$\sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 1,639023 \times 10^{11} \cdot 0,005064^2}{7,27 \times 10^6}}} =$$

$$\lambda_r = 119,27$$

Segundo indicado no item G.2.1.c) da ABNT NBR8800:2008, para quando

$$\lambda_{FLT} > \lambda_r$$

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

C_b (Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme), conforme itens 5.4.2.3 e 5.4.2.4 na ABNT NBR8800:2008, pode ser tomado como:

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \cdot R_m \leq 3,0$$

onde,

M_{\max} é o valor do momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado;

M_A é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

M_B é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado;

M_C é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

R_m é um parâmetro de monossimetria da seção transversal, igual a $0,5 + 2 \cdot (I_{yc} / I_y)^2$ para seções com um eixo de simetria, fletidas em relação ao eixo que não é de simetria, sujeitas à curvatura reversa, e igual a 1,00 em todos os demais casos;

I_{yc} é o momento de inércia da mesa comprimida em relação ao eixo de simetria (como a curvatura é reversa, esse momento de inércia refere-se à mesa de menor momento de inércia);

I_y é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo de simetria.

Com isso, têm-se os valores dos momentos solicitados conforme ilustrado abaixo:

Projeto de galpões

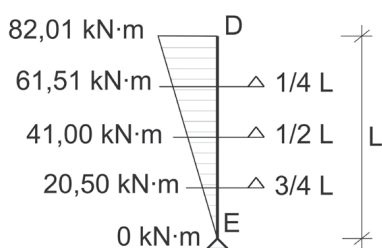


Figura 63 – Momentos atuantes na coluna D-E

$$C_b = \frac{12,5 \cdot 82,01}{2,5 \cdot 82,01 + 3 \cdot 61,51 + 4 \cdot 41,00 + 3 \cdot 20,50} \cdot 1$$

$$C_b = 1,667 < 3,0$$

$$M_{cr} = \frac{1,667 \cdot \pi^2 \cdot 200.000 \cdot 7,27 \times 10^6}{6.000^2}$$

$$\sqrt{\frac{1,639023 \times 10^{11}}{7,27 \times 10^6} \left(1 + 0,039 \frac{132.000 \cdot 6.000^2}{1,639023 \times 10^{11}} \right)}$$

$$M_{cr} = 145,64 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_Y$$

$$M_{pl} = 615.400 \cdot 345 = 212,313 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{FLT,n} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{FLT,n} = \frac{145,64}{1,1} \leq \frac{212,313}{1,1}$$

$$M_{FLT,n} = 132,40 \text{ kN} \cdot \text{m} \leq 193,01 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{FLT,n} = \underline{132,40 \text{ kN} \cdot \text{m}}$$

- Verificando o estado limite para flambagem local da mesa (FLM):

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_{FLM} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{165}{2 \cdot 9,7} = 8,50$$

b) Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_Y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 9,15$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

Tratando-se de um perfil laminado.

$$\lambda_r = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{E}{(F_Y - \sigma_r)}} = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{200.000}{(345 - 103,5)}}$$

$$\lambda_r = 23,88$$

Segundo indicado no item G.2.2.a) da ABNT NBR8800:2008, para quando

$$\lambda_{FLT} < \lambda_p$$

$$M_{FLM,n} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{212,31}{1,1} = \underline{193,00 \text{ kN} \cdot \text{m}}$$

- Verificando o estado limite para flambagem local da alma (FLA):

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_{FLA} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{271}{5,8} = 46,72$$

b) Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_Y}} = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 90,53$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_r = 5,70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_Y}} = 5,70 \cdot \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 137,24$$

Segundo indicado no item G.2.2.a) da ABNT NBR8800:2008, para quando

$$\lambda_{FLT} < \lambda_p$$

$$M_{FLA,n} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{212,31}{1,1} = \underline{193,00 \text{ kN} \cdot \text{m}}$$

E, finalmente, o momento fletor resistente de cálculo, de acordo com o item 5.4.2.1 da ABNT NBR8800:2008:

$$M_{Rd} = \text{Mín}(M_{FLT}, M_{FLM}, M_{FLA})$$

$$\boxed{M_{Rd} = 132,40 \text{ kN} \cdot \text{m}}$$

[4] Verificação da capacidade ao cisalhamento:

Para a verificação da capacidade ao cisalhamento de cálculo do perfil são utilizados os procedimentos descritos no item 5.4.3 da ABNT NBR8800:2008.

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_v = \frac{h}{t_w} = \frac{271}{5,8} = 46,72$$

b) Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{K_v E}{f_Y}} = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 200.000}{345}} = 59,22$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_r = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{K_v E}{f_Y}} = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 200.000}{345}} = 73,76$$

Para uma seção I fletida em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma (eixo de maior momento inércia), a força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , segundo indicado no item 5.4.3.1.1 da ABNT NBR8800:2008, para quando $\lambda_v < \lambda_p$, é dada por:

$$V_{pl} = 0,60 \cdot A_w \cdot f_y = 0,60 \cdot (310 \cdot 5,8) \cdot 345$$

$$V_{pl} = 372,186 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{372,186}{1,1}$$

$$\boxed{V_{Rd} = 338,35 \text{ kN}}$$

[5] Verificação para a combinação de esforços solicitantes:

Conforme descrito no item 5.5.1.2 da ABNT NBR8800:2008, para a atuação simultânea da força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores, deve ser obedecida a limitação fornecida pelas seguintes expressões de interação:

Para:

$$\frac{N_{S,d}}{N_{R,d}} \geq 0,2 \Rightarrow \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{8}{9} \frac{M_{xSd}}{M_{xRd}} \leq 1,00$$

$$\frac{N_{S,d}}{N_{R,d}} < 0,2 \Rightarrow \frac{N_{c,Sd}}{2 \cdot N_{c,Rd}} + \frac{M_{xSd}}{M_{xRd}} \leq 1,00$$

$$\text{Assim, como } \frac{42,97}{317,8} = 0,135 < 0,2 :$$

$$\frac{42,97}{2 \cdot 317,8} + \frac{82,01}{132,40} \leq 1,00$$

$$\boxed{0,69 \leq 1,00 \Rightarrow \text{Ok!}}$$

Verifica-se com isso a estabilidade do perfil proposto para suportar os esforços previstos.

Portanto, pode-se dizer que o perfil W310x38,7 é adequado para o elemento da coluna D-E no caso da condição de carregamento Fd1.

Projeto de galpões

Para as verificações da coluna A-B o procedimento é o mesmo, devendo-se considerar somente a verificação para os esforços de cisalhamento atuantes e esforços combinados.

Como o esforço de cisalhamento atuante é muito inferior ao resistente, somente a verificação de esforços combinados é necessária:

$$\text{Verificando que } \frac{42,77}{325,76} = 0,13 < 0,2:$$

$$\frac{42,77}{2 \cdot 325,76} + \frac{80,51}{135,14} \leq 1,00$$

$$0,66 \leq 1,00 \Rightarrow \text{Ok!}$$

Por fim, conforme as verificações feitas para ambas as colunas, mostra-se que o perfil W310x38,7 é adequado para suportar os esforços solicitantes de cálculo.

2.7.5 Dimensionamento e verificações para as vigas

Usando-se o mesmo procedimento adotado para as colunas, obtêm-se, inicialmente, os esforços atuantes nas vigas B-C e C-D para, então, proceder às verificações.

São resumidos aqui alguns processos que já foram detalhados no cálculo da coluna, assim como o perfil utilizado para as vigas será o mesmo. Algumas verificações não serão necessárias.

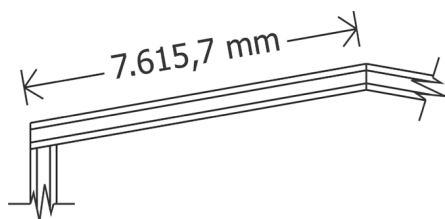


Figura 64 – Dimensão da viga

Deve-se estar atento para os comprimentos de flambagem para o perfil em questão. No caso da viga, existirão dois comprimentos diferentes. O comprimento de flambagem em torno do eixo 'x' de 7.615,7 mm, ou seja, o comprimento total do perfil (Figura 64), e, como o perfil está perfeitamente travado (não somente com terças), como se pode ver na Figura 65, o comprimento de flambagem em torno do eixo 'y' e também o comprimento entre duas seções contidas à torção de 2.538 mm.

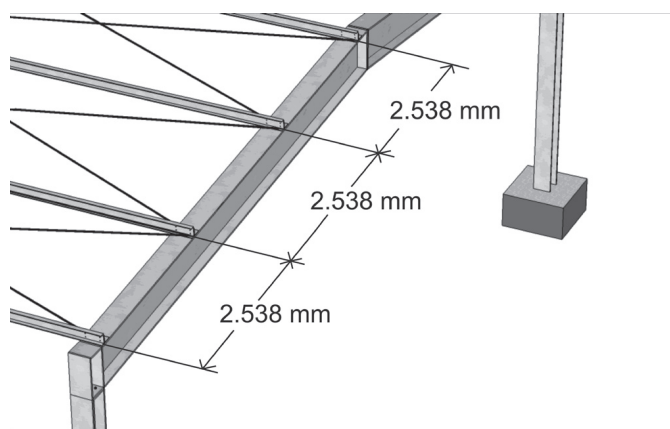


Figura 65 – Espaçamento entre seções travadas no perfil da viga

[1] Verificação da esbelteza:

$$\frac{L_x}{r_x} = \frac{7.615,7}{131,4} = 57,96 < 200 \Rightarrow \text{Ok!}$$

$$\frac{L_y}{r_y} = \frac{2.538}{38,2} = 66,44 < 200 \Rightarrow \text{Ok!}$$

[2] Verificação da capacidade à compressão:

Conforme já calculado no elemento da coluna, o valor do fator de redução total Q é dado por:

$$Q = 0,94 \cdot 1 = 0,94$$

a) Flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal:

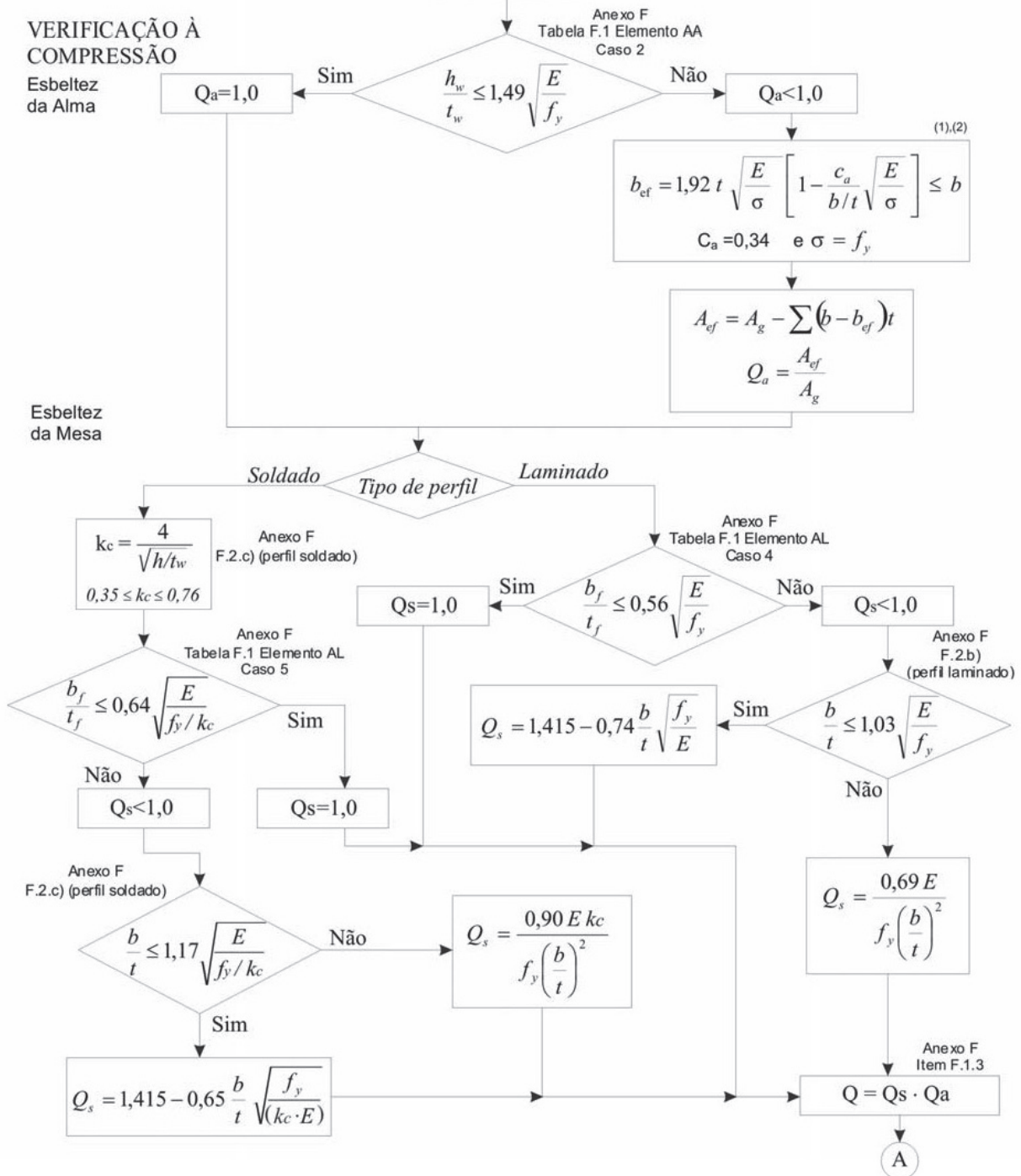
$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot 200.000 \cdot 8,581 \times 10^7}{(7.615,7)^2} = \underline{\underline{2.920,44 \text{ kN}}}$$

Fluxogramas

Fluxogramas

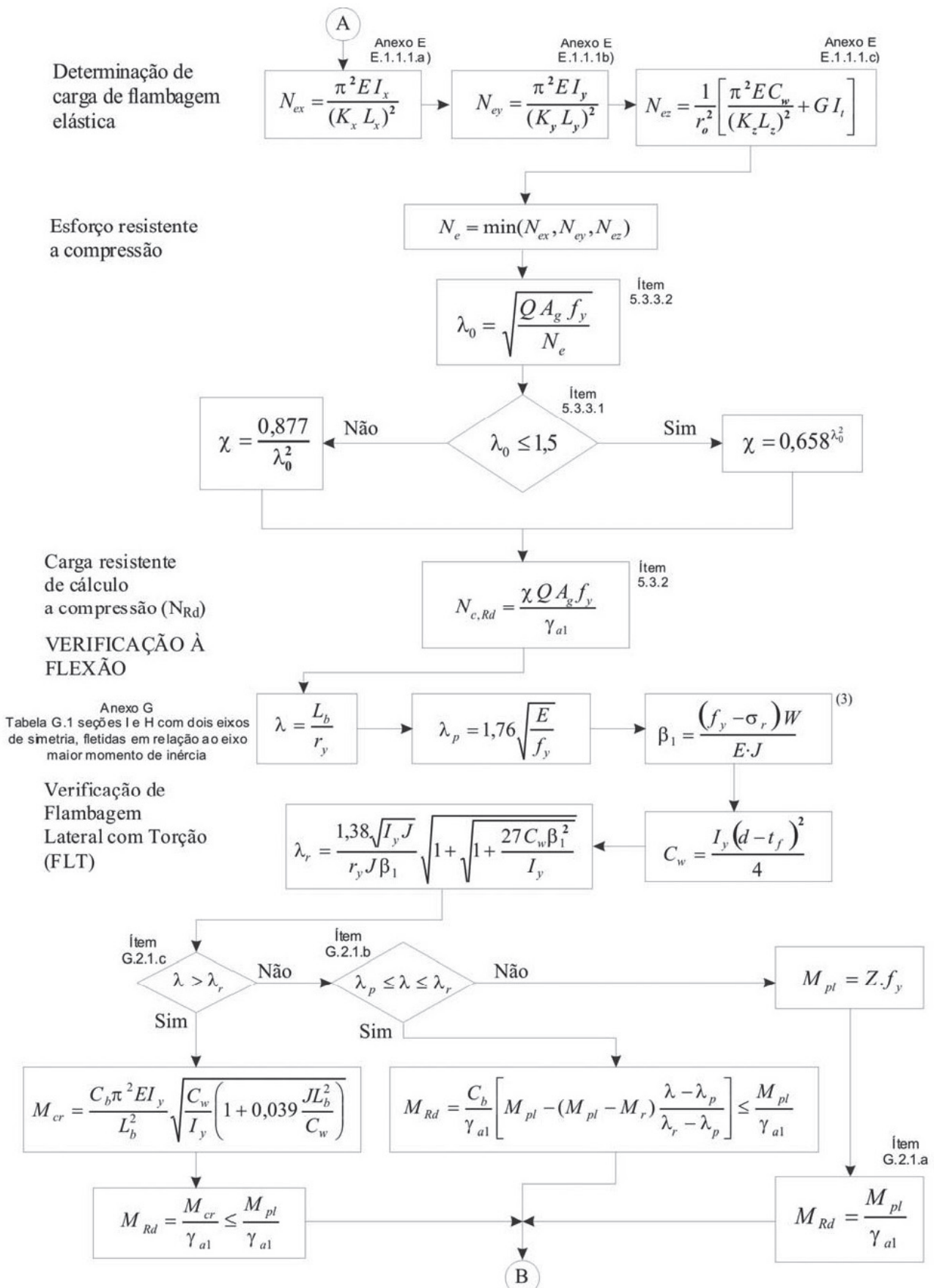
$N_{c,Sd}$	é a força axial de compressão solicitante de cálculo	G	módulo de elasticidade transversal do aço
$N_{c,Rd}$	é a força axial de compressão resistente a cálculo	M_{cr}	momento fletor de flambagem elástica
χ	é o fator de redução associado à resistência à compressão	M_{pl}	momento fletor de plastificação da seção
Q	é o fator de redução total associado à flambagem global, cujo valor deve ser obtido do anexo F	M_r	momento fletor correspondente ao início de escoamento, incluindo a influência das tensões residuais em alguns casos
A_g	é a área bruta da seção transversal da barra	W	módulo de resistência (mínimo) elástico da seção, relativo ao eixo de flexão
λ_0	é o índice de esbeltez reduzido	W_c	módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão
N_e	é a força axial de flambagem elástica conforme anexo E	W_t	módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção, relativo ao eixo de flexão
E	é o módulo de elasticidade do aço	λ	parâmetro de esbeltez
f_y	é a resistência a escoamento do aço	λ_p	parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação
h	é a altura da alma	λ_r	parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento
t_w	é a espessura da alma	σ_r	tensão residual de compressão nas mesas
A_{ef}	é a área efetiva da seção transversal		
FLA	flambagem local da alma		
FLM	flambagem local da mesa		
FLT	flambagem lateral com torção		
C_b	fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme		
I_t	momento de inércia à torção uniforme		
L_b	distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado)		

PERFIS I SIMÉTRICOS - FLEZO-COMPRESSÃO SEGUNDO O EIXO X
(ABNT NBR 8800:2008)



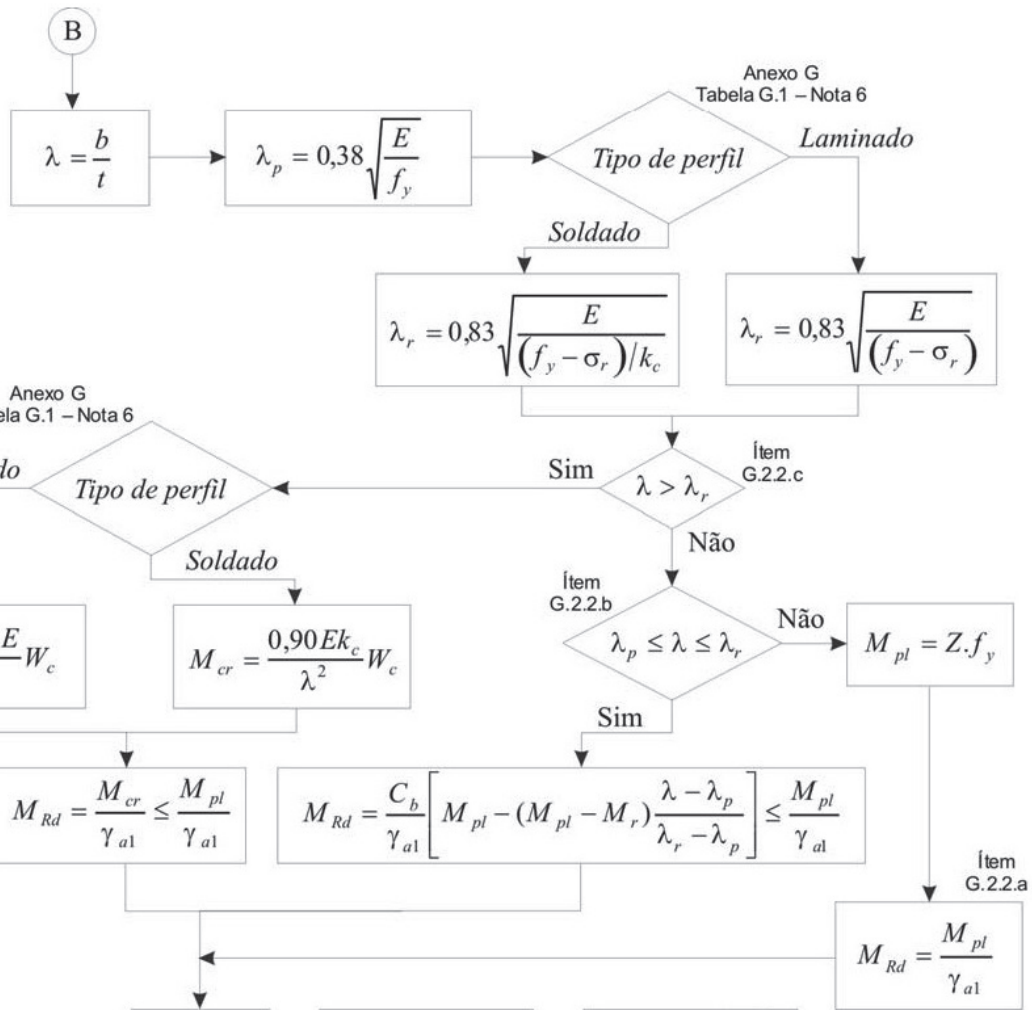
(1) = C_a é um coeficiente, igual a 0,38 para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e 0,34 para todos os outros elementos;

(2) = σ é a tensão que pode atuar no elemento analisado, tomada igual a $\sigma = \chi f_y$, com χ obtido conforme 5.3.3, adotando Q igual a 1,0. Opcionalmente, de forma conservadora, pode-se tomar $\sigma = f_y$.

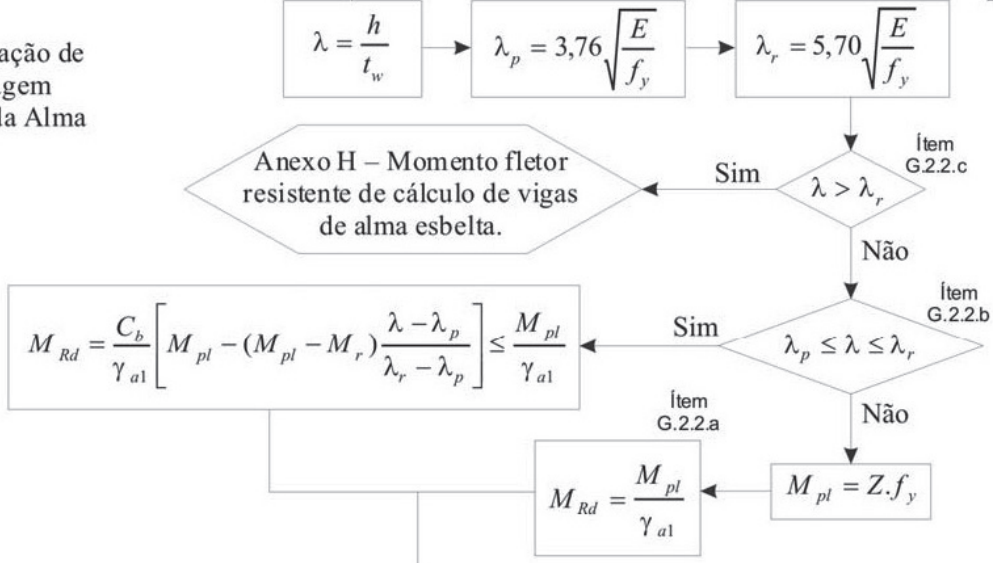


(3) = Segundo a Nota 5 da Tabela G.1 do Anexo G, o valor de σ_r , tensão residual de compressão nas mesas, deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado.

Verificação de Flambagem Local da Mesa Comprimida (FLM)



Verificação de Flambagem Local da Alma (FLA)



Momento Mínimo Resistente de Cálculo (M_{Rd})

$M_{Rd} = \min(FLT, FLM, FLA)$

(C)

VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO

