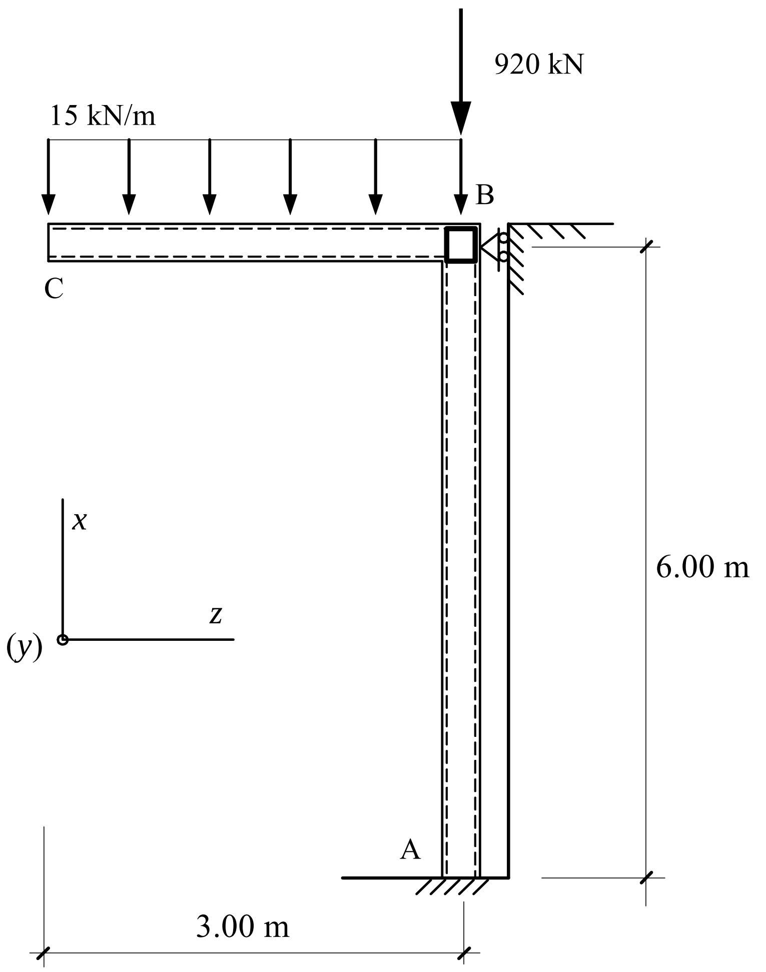
VIGA-COLUNA

Exemplo 1: Considere a viga-coluna A-B de suporte de um balanço B-C, representado na Figura abaixo. A coluna é engastada na seção da base, sendo a seção do topo (seção B) livre de rodar, mas impedida de se deslocar horizontalmente, em qualquer direção. O pilar é constituído por uma seção retangular tubular SHS 200x150x8mm, S355 (E=210GPa e G=81GPa). Admitindo que o carregamento indicado já está majorado para o estado limite último, verifique a segurança da coluna segundo o EC3-1-1.



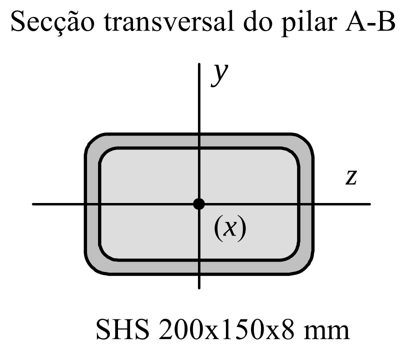


Figura – Estrutura com elementos de seção retangular tubular

i) Diagramas de esforços no pilar A-B

A estrutura é hiperestática, desprezando as deformabilidades axial e devid ao esforço cortante obtém-se os diagramas de esforços ilustrados na Figura 3.86.

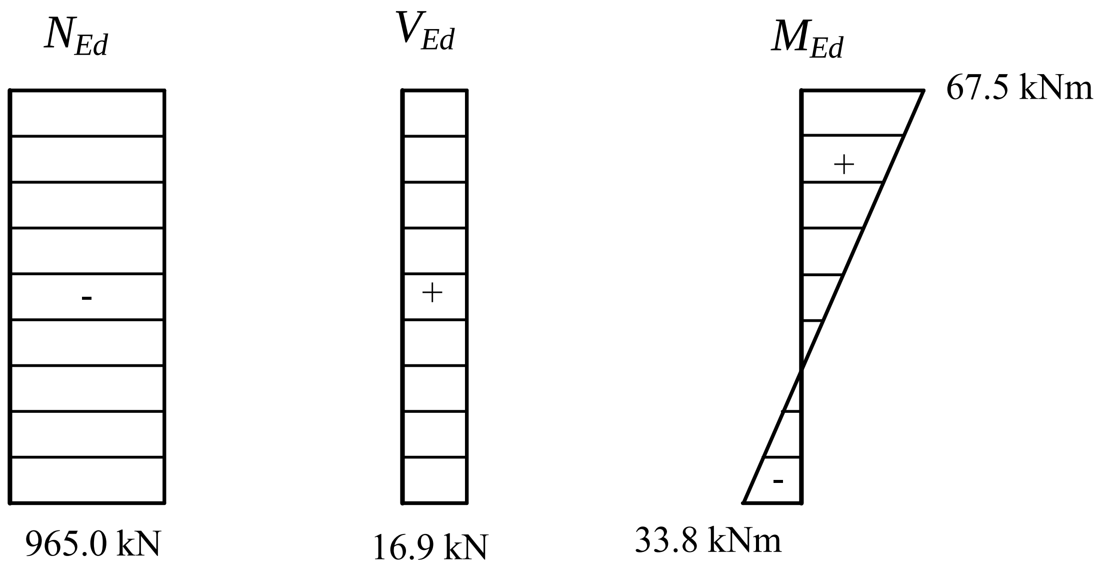


Figura 3.86 – Diagramas de esforços

ii) Verificação da resistência das seções transversais

Propriedades do SHS200x150x8mm: $A=52.75cm^2$, $W_{pl,y}=358.8cm^3$, $W_{el,y}=297.1cm^3$, $I_y=2971cm^4$, $i_y=7.505cm$, $W_{pl,z}=293.7cm^3$, $W_{el,z}=252.6cm^3$, $I_z=1894cm^4$, $i_z=5.992cm$ e $I_T=3643cm^4$.

Procede-se inicialmente à verificação da classe com o EC3-1-1, 5.5. Num elemento submetido a flexão composta onde as sucessivas seções são submetidas a esforços diferentes, a classe da seção pode variar ao longo do elemento.

Apesar disto não introduzir dificuldade na verificação da resistência das seções (cada seção é verificada para sua classe), pode dificultar a definição da classe da seção para a verificação da estabilidade do elemento, já que se trata de uma verificação global do elemento.

Neste exemplo procede-se de uma forma simplificada, verificando a classe da seção para a situação mais desfavorável, onde a seção é submetida apenas a esforço axial.

Para a aba maior do perfil em compressão, EC3-1-1, Quadro 5.2:

$$c/t \approx (b-3t)/t = (200-3\times 8)/8 = 22.0 < 33\,\varepsilon = 33\times 0.81 = 26.7 \text{ (Classe 1)}$$

Como se para a hipótese considerada é de classe 1, esta pode ser tratada como classe 1 para qualquer outra combinação de tensões.

A resistência à flexão em torno do eixo y, combinada com o esforço axial, é obtida com o EC3-1-1, 6.2.9.1 (5):

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \frac{1-n}{1-0.5a_w} \leq M_{pl,y,Rd}$$.

Para a seção mais esforçada (seção do topo da colunar), sob esforços N_{Ed}=965kN e $M_{y,Ed}$=67.5kNm, obtém-se:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{965}{52.75\times10^{-4}\times355\times10^{3}/1.0} = 0.52$$;

$$a_w = \frac{A-2bt}{A} = \frac{52.75-2\times15\times0.8}{52.75} = 0.55 > 0.5 \Rightarrow a_w = 0.5$$;

$$M_{pl,y,Rd} = 358.8\times10^{-6}\times\frac{355\times10^{3}}{1.0} = 127.4\,\text{kNm}$$.

Momento plástico resistente da seção, reduzido pelo esforço axial é:

$$M_{N,y,Rd} = 127.4\times\frac{1-0.52}{1-0.5\times0.5} = 81.5\,\text{kNm} < M_{pl,y,Rd}$$

$$\Rightarrow M_{N,y,Rd} = 81.5\,\text{kNm}$$.

Como $M_{Ed} = 67.5\,\text{kNm} < M_{N,y,Rd} = 81.5\,\text{kNm}$,

As seções da viga coluna passam em relação à flexão composta.

O esforço cortante deve ser verificado numa seção qualquer, uma vez que se trata de um elemento com esforço cortante constante.

Sendo $A_v = \frac{Ah}{b+h} = \frac{52.75\times20}{15+20} = 30.14\,\text{cm}^2$, obtém-se:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{M0}\sqrt{3}} = \frac{30.14\times10^{-4}\times355\times10^{3}}{1.0\times\sqrt{3}} = 617.7\,\text{kN}$$

Como $V_{Ed} = 16.9\,\text{kN} < V_{pl,Rd} = 617.7\,\text{kN}$

As seções da viga coluna passam em relaçãoao esforço cortante.

Para averificação da flambagem da alma por esforço cisalhamento, segundoEC3-1-1, 6.2.6 (6), considera-se conservativamente $\eta = 1$.

Para a alma não enrijecida:

$$h_w / t_w \approx (h - 3t)/t = (200 - 3 \times 8)/8 = 22.0 < 72\,\varepsilon/\eta = 58.3$$

logo é dispensada a verificação.

A verificação da interação da flexão com o esforço cortante (segundo o EC3-1-1, 6.2.8) deve ser efetuada na seção B.

Como $V_{Ed} = 16.9\,\text{kN} < 0.50 \times V_{pl,Rd} = 0.50 \times 617.7 = 308.9\,\text{kN}$

não hás redução na resistência da seção à interação flexão/esforço axial, com o esforço cortante.

iii) Verificação da estabilidade do elemento

Para o elemento sob flexão uniaxial (em torno de y) e compressão, classe 1, a estabilidade é assegurada através de:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1.0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z\, N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1.0 .$$

Nas expressões anteriores os fatores de interação k_{yy} e k_{zy} podem ser obtidos por um dos métodos do EC3-1-1, 6.3.3, o Método 1 ou o Método 2; para comparação de resultados aplicam-se os dois.

iii-1) Método 1

Como o elemento tem uma seção retangular tubular com I_T=3643cm^4 > I_y=2971cm^4, seção não sujeita a sofrer deformações de torção e logo a flambagem por flexão constitui o modo de instabilidade relevante. Logo, não é preciso verificar a flambagem lateral, para isto considera-se nas expressões anteriores

$$\chi_{LT} = 1.0 .$$

As resistências caraterísticas da seção são dadas por:

$$N_{Rk} = A\, f_y = 52.75 \times 10^{-4} \times 355 \times 10^3 = 1872.6\,\text{kN}$$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y}\, f_y = 358.8 \times 10^{-6} \times 355 \times 10^3 = 127.4\,\text{kNm}$$
.

Os coeficientes de redução devidos à flambagem por flexão:

$$\chi_y \; e \; \chi_z$$
, são.

Plano xz (flambagem em torno de y):

$$L_{E,y} = 0.7 \times 6.0 = 4.2\,\text{m}$$
;

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{E,y}}{i_y}\frac{1}{\lambda_1} = \frac{4.2}{7.505 \times 10^{-2}} \times \frac{1}{93.9 \times 0.81} = 0.74$$
;

$\alpha = 0.21$ Curva a (Quadro 6.2 do EC3-1-1);

$$\phi = 0.83 \qquad \Rightarrow \chi_y = 0.83$$
.

Plano xy (flambagem em torno de z):

$$L_{E,z} = 0.7 \times 6.0 = 4.2\,\text{m}$$
;

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{E,z}}{i_z}\frac{1}{\lambda_1} = \frac{4.2}{5.992 \times 10^{-2}} \times \frac{1}{93.9 \times 0.81} = 0.92$$
;

$\alpha = 0.21$ Curva a (Quadro 6.2 do EC3-1-1);

$$\phi = 1.00 \qquad \Rightarrow \chi_z = 0.72$$
.

A seguir calculam-se os termos auxiliares, incluindo os fatores C_{yy} e C_{zy}, (dependentes do grau de plasticidade da seção no colapso), definidos no Quadro A.1 do EC3-1-1.

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E\, I_y}{L_{E,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 2971 \times 10^{-8}}{4.2^2} = 3490.8\,\text{kN}$$
;

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{E,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 1894 \times 10^{-8}}{4.2^2} = 2225.4\,\text{kN}$$
;

$$\mu_y = \frac{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \dfrac{965}{3490.8}}{1 - 0.83 \times \dfrac{965}{3490.8}} = 0.94$$
;

$$\mu_z = \frac{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \dfrac{965}{2225.4}}{1 - 0.72 \times \dfrac{965}{2225.4}} = 0.82$$
;

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{358.8}{297.1} = 1.21 \quad (< 1.5)$$
;

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{293.7}{252.6} = 1.16 \quad (< 1.5)$$
;

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{965}{1872.6/1.0} = 0.52$$
;

$$\overline{\lambda}_{\max} = \max\left(\overline{\lambda}_y, \overline{\lambda}_z\right) = \max\left(0.74, 0.92\right) = 0.92$$
.

Como se trata de um elemento não sujeito a deformações de torção, de acordo com o Quadro A.1 do Anexo A do EC3-1-1 os fatores equivalentes de momento uniforme são definidos por $C_{my}=C_{my,0}$ e $C_{mLT}=1$, onde $C_{my,0}$ é obtido como Quadro A.2, Anexo A, EC3-1-1.

Para um diagrama de momentos fletores linear, com:

$M_{y,Ed,base}$=-33.8kNm e $M_{y,Ed,topo}$=67.5kNm, obtém-se:

$$\Psi_y = M_{y,Ed,base} / M_{y,Ed,topo} = -33.8/67.5 = -0.50$$
;

$$C_{my,0} = 0.79 + 0.21\Psi_y + 0.36\left(\Psi_y - 0.33\right)\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} =$$

$$= 0.79 + 0.21 \times \left(-0.5\right) + 0.36 \times \left(-0.50 - 0.33\right) \times \frac{965}{3490.8} = 0.60;$$

$$C_{my} = C_{my,0} = 0.60$$

Como $I_T > I_y \;\Rightarrow\; a_{LT} = 0 \;\Rightarrow\; b_{LT} = d_{LT} = 0$, C_{yy} ,C_{zy} são obtidos:

$$C_{yy} = 1 + \left(w_y - 1\right)\left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y}C_{my}^2\,\overline{\lambda}_{\max} - \frac{1.6}{w_y}C_{my}^2\,\overline{\lambda}_{\max}^2\right)n_{pl}\right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} \;\Leftrightarrow$$

$$C_{yy} = 1 + \left(1.21 - 1\right) \times \left[\left(2 - \frac{1.6}{1.21} \times 0.60^2 \times 0.92 - \frac{1.6}{1.21} \times 0.60^2 \times 0.92^2\right) \times 0.52\right] =$$

$$= 1.13 \qquad \left(> W_{el,y}/W_{pl,y} = 297.1/358.8 = 0.83\right);$$

$$C_{zy} = 1 + \left(w_y - 1\right)\left[\left(2 - 14\frac{C_{my}^2\,\overline{\lambda}_{\max}^2}{w_y^5}\right)n_{pl}\right] \geq 0.6\sqrt{\frac{w_y}{w_z}}\,\frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} \;\Leftrightarrow$$

$$C_{zy} = 1 + \left(1.21 - 1\right) \times \left[\left(2 - 14 \times \frac{0.60^2 \times 0.92^2}{1.21^5}\right) \times 0.52\right] = 1.04$$

$$\left(> 0.6\sqrt{\frac{w_y}{w_z}}\,\frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = 0.6 \times \sqrt{\frac{1.21}{1.16}} \times \frac{297.1}{358.8} = 0.51\right).$$

Já que a seção é classe 1, e usandoas expressões do Quadro A.1, Anexo A, EC3-1-1 determinam-se os fatores de interação k_{yy} e k_{zy}:

$$k_{yy} = C_{my}\,C_{mLT}\,\frac{\mu_y}{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}\,\frac{1}{C_{yy}} = 0.60 \times 1.0 \times \frac{0.94}{1 - \dfrac{965.0}{3490.8}} \times \frac{1}{1.13} = 0.69$$

;

$$k_{zy} = C_{my}\, C_{mLT}\, \frac{\mu_z}{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0.6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} =$$

$$= 0.60 \times 1.0 \times \frac{0.82}{1 - \dfrac{965.0}{3490.8}} \times \frac{1}{1.04} \times 0.6 \times \sqrt{\frac{1.21}{1.16}} = 0.40.$$

Com base nos parâmetros determinados, verificam-se as condições:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{965.0}{0.83 \times 1872.6/1.0} + 0.69 \times \frac{67.5}{1.0 \times 127.4/1.0} = 0.99 < 1.0;$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z\, N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{965.0}{0.72 \times 1872.6/1.0} + 0.40 \times \frac{67.5}{1.0 \times 127.4/1.0} = 0.93 < 1.0.$$

Como ambas as condições anteriores são passam, segundo o Método 1 do EC3-1-1, seção retangular tubular 200x150x8mm, S355, passa.

iii-2) Método 2

Como o elemento em análise é constituído por uma seção retangular tubular, devido à sua elevada rigidez de flexão lateral e de torção, pode ser dispensada a verificação da flambagem lateral, logo nas condições regulamentares deve-se considerar $\chi_{LT} = 1.0$.

Como o Método 2 difere do Método 1 apenas no cálculo dos fatores de interação, procede-se diretamente ao cálculo destes fatores. Como não existe momento atuante em torno de z, basta calcular os fatores de interação k_{yy} e k_{zy}. Como o elemento não é sujeito a torção, os fatores de interação obtidos com o Quadro B.1, Anexo B, EC3-1-1

Para um diagrama de momentos linear, com $M_{y,Ed,base}$=-33.8 kNm e $M_{y,Ed,topo}$=67.5kNm, obtém-se:

$$\Psi_y = M_{y,Ed,base} / M_{y,Ed,topo} = -33.8/67.5 = -0.50 \ .$$

Através do Quadro B.3 do Anexo B do EC3-1-1 obtém-se:

$$C_{my} = 0.6 + 0.4 \times (-0.50) = 0.40 \quad (\geq 0.40) \ .$$

Com base no fator anterior, nos parâmetros obtidos na aplicação do Método 1 e na classe da seção, os coeficientes k_{yy} e k_{zy} são:

$$k_{yy} = C_{my}\left[1 + \left(\overline{\lambda}_y - 0.2\right)\frac{N_{Ed}}{\chi_y \, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] =$$

$$= 0.40 \times \left[1 + (0.74 - 0.2) \times \frac{965.0}{0.83 \times 1872.6/1.0}\right] = 0.53;$$

como $$k_{yy} = 0.53 < C_{my}\left[1 + 0.8\frac{N_{Ed}}{\chi_y \, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0.60 \ ,$$

deve considerar-se $k_{yy} = 0.53$.

No Método 2, para uma seção retangular tubular com compressão e flexão uniaxial em y, deve-se considerar: $k_{zy} = 0$. Que gera:

$$\frac{965.0}{0.83 \times 1872.6/1.0} + 0.53 \times \frac{67.5}{1.0 \times 127.4/1.0} = 0.90 < 1.0 \ ;$$

$$\frac{965}{0.72 \times 1872.6/1.0} = 0.72 < 1.0 \ .$$

Como ambas as condições são verificadas, no Método 2, EC3-1-1, seção retangular tubular 200x150x8mm, S355 passa.

Exemplo 2: Verifique a viga-coluna A-B, de um galpão industrial sujeito a flexão composta plana. A viga-coluna é uma seção IPE360 (E=210GPa e G=81GPa) em aço S355. O carregamento de cálculo, para uma dada combinação de ações, introduz no pilar os diagramas de esforços ilustrados na figura; o esforço cortante é suficientemente reduzido para ser desprezado na verificação.

Considere que o comprimento de flambagem no plano do pórtico (plano xz) é dado por $L_{E,y}$=6m, igual ao comprimento real, admitindo que os esforços vem de uma análise de 2^a ordem, processo ii); no plano xy, o comprimento de flambagem considera o contraventamento na direção y, assegurado pelas vigas secundárias localizadas na base, a meia altura e na seção do topo da coluna.

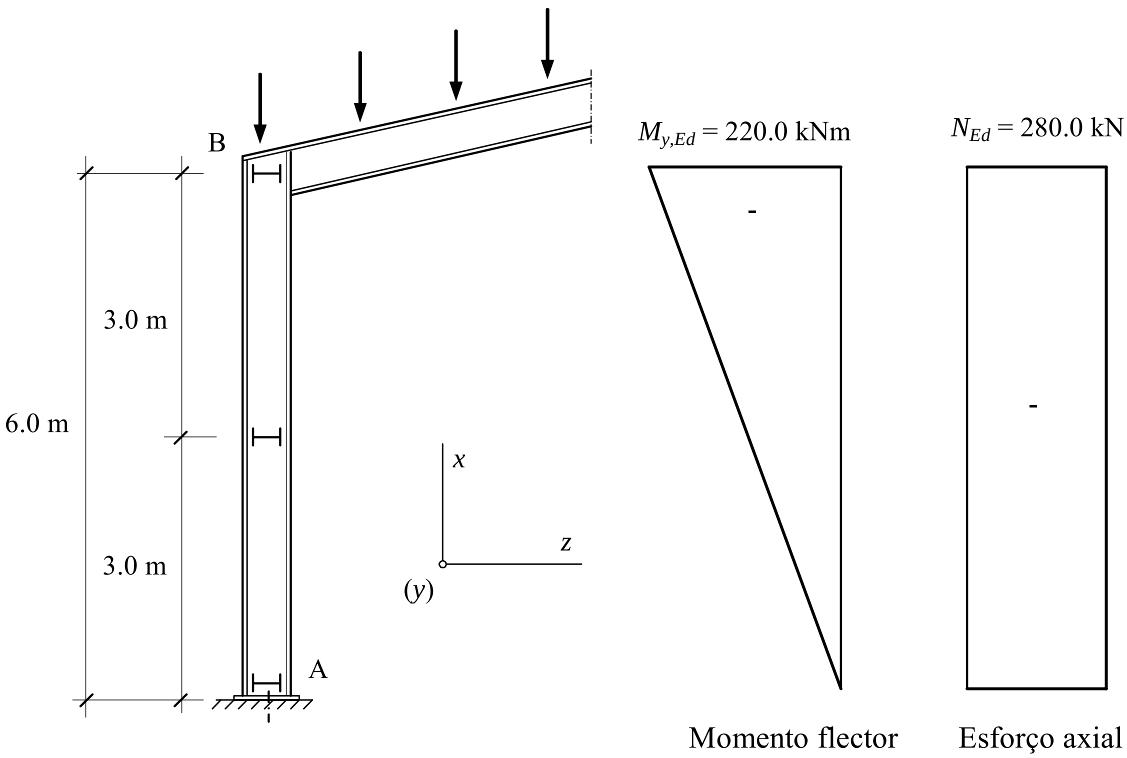


Figura 3.87 – Pilar submetido a flexão composta plana

Caraterísticas do IPE 360: A=72.73cm^2, h=360mm, b=170mm, $W_{el,y}$=903.6cm^3, $W_{pl,y}$=1019cm^3, I_y=16270cm^4, i_y=14.95cm, $W_{el,z}$=122.8cm^3, $W_{pl,z}$=191.1cm^3, I_z=1043cm^4, i_z=3.79cm, I_T=37.32cm^4 e I_W=313.6x10^{3}cm^6.

i) Classificação da seção

O EC3-1-1 não fornece critérios para a definição da classe a considerar na estabilidade global do elemento, quando esta varia ao longo deste elemento, em consequência da variação dos esforços.

Considerando que a flexão controla, opta-se por classificar a seção mais esforçada, a do topo. A linha neutra para a situação de plastificação completa da seção, necessária para a classificação da alma, depende da relação entre o momento fletor e o esforço axial e a sua posição podem ser considerados diversos procedimentos.

Para definir a posição do eixo neutro com base nos esforços reais atuantes, deve proceder-se ao cálculo das tensões normais ao longo da seção através de uma análise elástica de tensões, caso as tensões máximas não ultrapassem a tensão de cedência do material.

Caso contrário, procede-se a uma análise elasto-plástica de tensões. Para a seção em estudo obtém-se o diagrama elástico de tensões normais ilustrado na Figura 3.88, com base nas tensões nas fibras extremas obtidas através das seguintes expressões:

$$\sigma_{comp} = -\frac{280.0}{72.73\times10^{-4}} + \frac{220.0}{16270\times10^{-8}} \times \left(-360/2\times10^{-3}\right) =$$
$$= -281891\,\text{kPa} = -281.9\,\text{MPa}.$$

$$\sigma_{tracção} = -\frac{280.0}{72.73\times10^{-4}} + \frac{220.0}{16270\times10^{-8}} \times \left(+360/2\times10^{-3}\right) =$$
$$= 204894\ \text{kPa} = 204.9\,\text{MPa}.$$

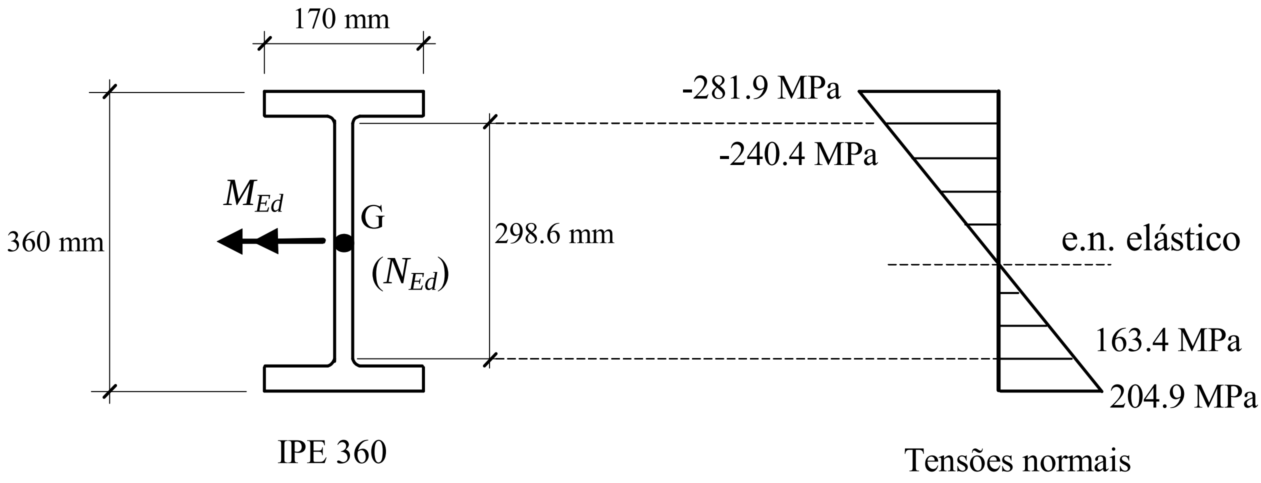


Figura 3.88 – Tensões normais na seção mais esforçada

Com base no diagrama de tensões normais ilustrado na Figura 3.88, o parâmetro α (correspondente à percentagem da alma submetida a tensões de compressão) definido no Quadro 5.2 do EC3-1-1é:

$$\alpha = \frac{240.4}{240.4 + 163.4} = 0.60$$
.

Pode-se também estimar a posição do eixo neutro com base em:

$$\alpha = \frac{1}{2986\times10^{-3}}\left(\frac{360\times10^{-3}}{2} + \frac{1}{2}\frac{280}{8\times10^{-3}\times355\times10^{3}} - \left(12.7\times10^{-3} + 18\times10^{-3}\right)\right)$$

$$\alpha = 0.58$$
.

Para a alma do perfil em flexão composta (usando α obtido no segundo processo), tem-se:

$$c/t = 298.6/8 = 37.3 < \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396\times0.81}{13\times0.58 - 1} = 49.0$$
.(Classe 1)

Mesa comprimido do perfil,

$$c/t = \left(170/2 - 8/2 - 18\right)/12.7 = 5.0 < 9\varepsilon = 9\times0.81 = 7.3$$
. (Classe 1)

Logo a seção é de classe 1.

ii) Verificação da resistência da seção transversal

Com base nos diagramas de esforços, a seção do topo da viga-cluna é a mais esforçada, sendo: $M_{y,Ed}$=220kNm e N_{Ed}=280kN.

Sendo $N_{pl,Rd} = f_y A/\gamma_{M0} = 2581.9\,\text{kN}$ e como:

$$N_{Ed} = 280.0\,\text{kN} \le 0.25\,N_{pl,Rd} = 645.5\,\text{kN}$$
e

$$N_{Ed} = 280.0\,\text{kN} \le 0.5\,h_w\,t_w\,f_y/\gamma_{M0} = 475.1\,\text{kN}$$
,

segundo o EC3-1-1, 6.2.9.1 (4) não se reduz a resistência à flexão:

$$M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y}\frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 361.7\,\text{kNm} > M_{y,Ed} = 220.0\,\text{kNm}$$
.

O esforço cortante é baixo e poder ser desprezado e com a condição anterior a resistência da seção transversal passa

iii) Verificação da estabilidade do elemento

Neste exemplo opta-se pelo Método 2, EC3-1-1. Como o elemento em análise é constituído por uma seção sujeita a deformações de torção (seção aberta de paredes finas), admite-se que a flambagem lateral é o modo de instabilidade que controla o dimensionamento.

Sendo $M_{z,Ed}$=0, a verificação da flambagem lateral para uma seção de classe 1 consiste na verificação das seguintes condições:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy}\,\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1.0 \;;$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z\, N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy}\,\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1.0 \,.$$

As resistências caraterísticas da seção são dadas por:

$$N_{Rk} = A\, f_y = 72.73\times10^{-4}\times355\times10^{3} = 2581.9\,\text{kN} \;;$$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y}\; f_y = 1019\times10^{-6}\times355\times10^{3} = 361.7\,\text{kNm} \,.$$

coeficientes de redução devido à flambagem por flexão, χ_y e χ_z ,:

No plano xz - $L_{E,y}$=6m.

$$\overline{\lambda}_y = \frac{L_{E,y}}{i_y}\frac{1}{\lambda_1} = \frac{6}{14.95\times10^{-2}}\times\frac{1}{93.9\times0.81} = 0.53 \;;$$

$\alpha = 0.21$ Curva a (Quadro 6.2 do EC3-1-1);

$$\phi = 0.68 \qquad \Rightarrow \chi_y = 0.90 \,.$$

No plano xy - $L_{E,z}$=3m, admitindo que as vigas secundárias impedem o movimento segundo y, das seções onde estão apoiadas.

$$\overline{\lambda}_z = \frac{L_{E,z}}{i_z}\frac{1}{\lambda_1} = \frac{3.0}{3.79\times10^{-2}}\times\frac{1}{93.9\times0.81} = 1.04 \;;$$

$\alpha = 0.34$ Curva b (Quadro 6.2 do EC3-1-1);

$$\phi = 1.18 \qquad \Rightarrow \chi_z = 0.58 \,.$$

O Cálculo do coeficiente χ_{LT} será feito pela alternativa aplicável a seções laminadas ou soldadas equivalentes, EC3-1-1, 6.3.2.3:

O comprimento entre seções contraventadas é dado por L=3m. Usando a expressão 3.118 e o Quadro 3.7, tratando-se de um elemento submetido a momentos de extremidade, obtém-se:

$$\beta = -0.50 \;\Rightarrow \alpha_m = 1.30 \;\Rightarrow M_{cr} = 644.9 \text{ kNm} \;\Rightarrow \bar{\lambda}_{LT} = 0.75.$$

Sendo $\alpha_{LT} = 0.34$ (seções laminadas em I ou H com $h/b > 2 \Rightarrow$ curva b e considerando $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.2$ e $\beta = 1.00$, obtém-se:

$$\phi_{LT} = 0.87 \;\Rightarrow\; \chi_{LT} = 0.76.$$

Para o diagrama de momentos atuante, o fator de correção k_c, segundo o Quadro 6.6 do EC3-1-1, é dado por:

$k_c = 0.86$. Sendo f, obtido pela expressão:

$$f = 1 - 0.5 \times (1 - 0.86) \times \left[1 - 2.0 \times (0.75 - 0.8)^2\right] = 0.93,$$

obtém-se: $\chi_{LT,\text{mod}} = 0.79/0.93 = 0.85$.

Como não existe momento atuante segundo z, calcula-se k_{yy} e k_{zy}. Como a seção é sujeita a deformações de torção, estes fatores devem ser obtidos a partir do Quadro B.2 do Anexo B do EC3-1-1.

Os fatores equivalentes de momento uniforme C_{my} e C_{mLT} são obtidos com os momentos em torno de y, entre seções contraventadas na direção z para C_{my} e lateralmente para C_{mLT}.

Admitindo um elemento deslocável no plano do pórtico, com o Quadro B.3, Anexo B, EC3-1-1 deve considerar C_{my} igual a 0.9.

C_{mLT} deve ser calculado com os momentos na metade superior do pilar (mais desfavorável); o diagrama de momentos é linear, $M_{y,Ed,base}$=0, $M_{1/2altura}$=-110kNm e $M_{y,Ed,topo}$=-220kNm, Quadro B.3, Anexo B, EC3-1-1:

$$\Psi = M_{1/2altura}/M_{y,Ed,topo} = (-110)/(-220) = 0.5;$$

$$C_{mLT} = 0.60 + 0.4 \times (0.5) = 0.80 \quad (> 0.40).$$

Com os valores anteriores, os coeficientes k_{yy} e k_{zy} são dados por:

$$k_{yy} = C_{my}\left[1+\left(\overline{\lambda}_y - 0.2\right)\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] =$$

$$= 0.90\times\left[1+\left(1.06-0.2\right)\times\frac{280.0}{0.63\times 2581.9/1.0}\right] = 1.03;$$

$$k_{yy} = 1.03 > C_{my}\left[1+0.8\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 1.02$$
, $k_{yy} = 1.02$

$$k_{zy} = \left[1-\frac{0.1\overline{\lambda}_y}{\left(C_{mLT}-0.25\right)}\frac{N_{Ed}}{\chi_z\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] =$$

$$= \left[1-\frac{0.1\times 1.04}{\left(0.80-0.25\right)}\frac{280.0}{0.58\times 2581.9/1.0}\right] = 0.97;$$

como $k_{zy} = 0.97 = \left[1-\frac{0.1}{\left(C_{mLT}-0.25\right)}\frac{N_{Ed}}{\chi_z\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0.97$,

deve considerar-se $k_{zy} = 0.97$. Deve verificar:

$$\frac{280.0}{0.63\times 2581.9/1.0} + 1.02\times\frac{220.0}{0.85\times 361.7/1.0} = 0.90 < 1.0$$
;

$$\frac{280.0}{0.58\times 2581.9/1.0} + 0.97\times\frac{220.0}{0.85\times 361.7/1.0} = 0.88 < 1.0$$
.

Com as 2 condições anteriores, conclui-se que o IPE360 passa.

Exemplo 3: Considere um IPE500, S275 e admita que as seções extremas estão impedidas de rodar no eixo do elemento. O carregamento é uma carga concentrada P_{Ed}=320kN, reações de apoio de 160kN, por um esforço axial de compressão N_{Ed}= 520kN e por momentos de extremidade $M_{y,Ed,e}$=160kNm, $M_{y,Ed,d}$=160 kNm, $M_{z,Ed,e}$=20kNm e $M_{z,Ed,d}$=20kNm. Verifique o perfil com o EC3-1-1.

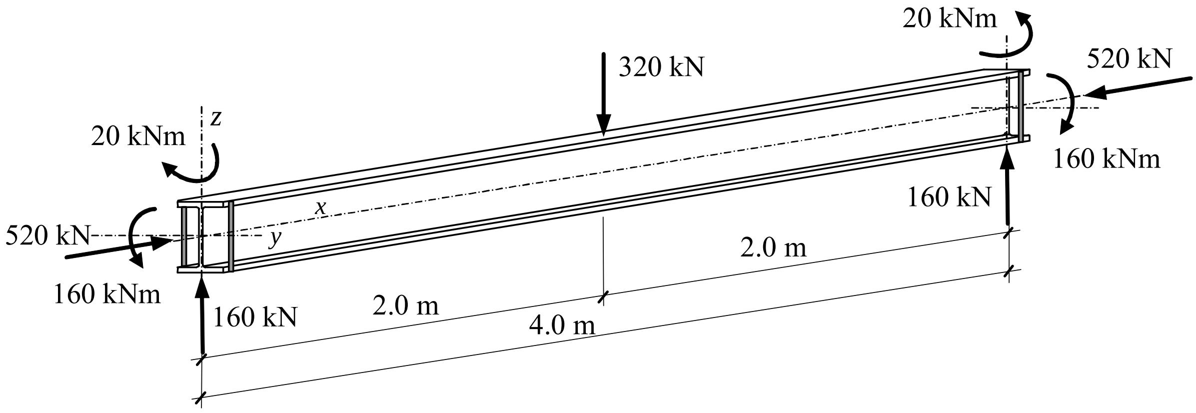


Figura – Elemento submetido a flexão composta desviada

As propriedades IPE500: A=115.5cm^2, A_{vz}=59.87cm^2, h=500mm, b=200mm, $W_{el,y}$=1928cm^3, $W_{pl,y}$=2194cm^3, I_y=48200cm^4, i_y=20.43cm, $W_{el,z}$=214.2cm^3, $W_{pl,z}$=335.9cm^3, I_z= 142cm^4, i_z=4.31cm, I_T=89.29cm^4 e I_W=1249x103cm^6.

i) Diagramas de esforços

Com o carregamento de cálculo obtém-se os diagramas de esforços:

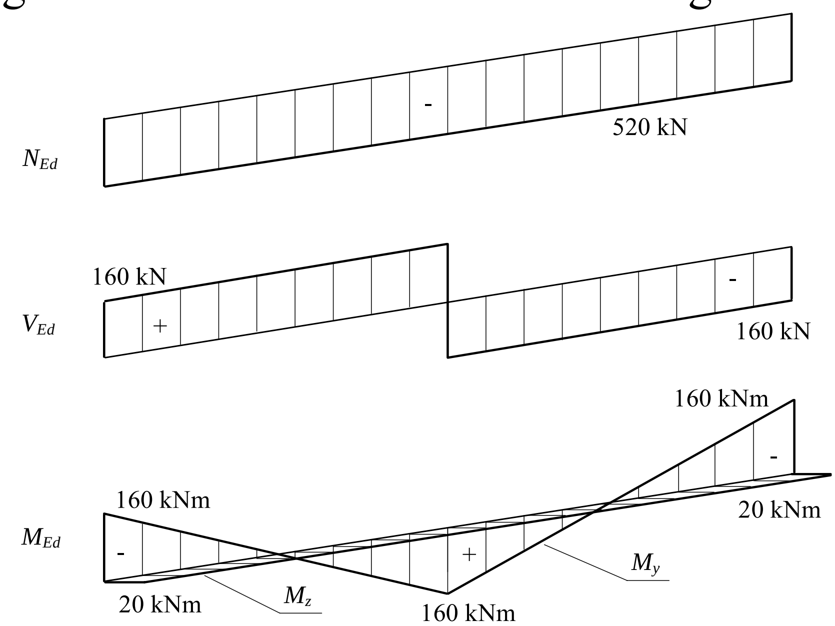


Figura 3.90 – Diagramas de esforços

ii) Classificação da seção

A aplicação dos procedimentos previstos no EC3-1-1,5.5, permite concluir que o IPE500, S275, para os esforços aplicados, é classe 1.
iii) Verificação da resistência da seção transversal
De acordo com os diagramas de esforços ilustrados na figura anterior, as seções mais esforçadas são as seções de extremidade e de meio vão, submetidas aos esforços N_{Ed}=520kN (compressão), V_{Ed}=160kN, $M_{y,Ed}$=160kNm e $M_{z,Ed}$=20kNm.

Sendo $A_{vz} = 59.87\,\mathrm{cm}^2$, o esforço cortante resistente é dado por:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{vz}\, f_y}{\gamma_{M0}\sqrt{3}} = \frac{59.87\times10^{-4}\times275\times10^3}{1.0\times\sqrt{3}} = 950.6\,\mathrm{kN}$$
.

Como $V_{Ed} = 160\,\mathrm{kN} < V_{pl,Rd} = 950.6\,\mathrm{kN}$, é verificada a resistência ao esforço cortante.

Para a verificação da flambagem da alma por cisalhamento, segundo o EC3-1-1, 6.2.6(6), considera-se conservativamente $\eta = 1$.

Para a alma não enrijecida, tem-se:

$$h_w/t_w = 468/10.2 = 45.9 < 72\,\varepsilon/\eta = 72\times0.92/1.0 = 66.2$$
,

logo é dispensada a verificação.

A interação da flexão composta com o esforço cortante deve ser verificada nas seções de extremidade ou de meio vão. Nestas seções

$$V_{Ed} = 160\ \mathrm{kN} < 0.50\times V_{pl,Rd} = 0.50\times950.6 = 475.3\,\mathrm{kN}$$
,

O que faz que não seja necessário reduzir a resistência da seção, relativamente à combinação da flexão com o esforço axial. Para a verificação da flexão composta, o esforço axial plástico é dado por:

$$N_{pl,Rd} = A\, f_y/\gamma_{M0} = 115.5\times10^{-4}\times275\times10^3 = 3176.3\,\mathrm{kN}$$
,

Com base nas dimensões da alma: $h_w = 468\,\mathrm{mm}$ e $t_w = 10.2\,\mathrm{mm}$ e na verificação das seguintes condições:

$$N_{Ed} = 520 \text{ kN} \leq 0.25\, N_{pl,Rd} = 794.1\,\text{kN}$$ e

$$N_{Ed} = 520 \text{ kN} \leq 0.5\, h_w\, t_w\, f_y / \gamma_{M0} = 656.4 \text{ kN}$$,

Conclui-se segundo o EC3-1-1, 6.2.9.1 (4), que não é preciso reduzir o momento plástico resistente em y pelo esforço axial, ou:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = 2194 \times 10^{-6} \times \frac{275 \times 10^3}{1.0} = 603.4\,\text{kNm}$$.

Como $N_{Ed} = 520\text{kN} \leq h_w\, t_w\, f_y / \gamma_{M0} = 1312.7\,\text{kN}$, também não é necessário reduzir o momento plástico resistente segundo z, ou seja:

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} = 335.9 \times 10^{-6} \times \frac{275 \times 10^3}{1.0} = 92.4\,\text{kNm}$$.

A flexão composta biaxial é verificada através da seguinte condição:

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}}\right]^{\beta} \leq 1.0$$.

Sendo $n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{520}{3176.3} = 0.16$ e um IPE:

$$\alpha = 2, \quad \beta = 5\,n = 5 \times 0.16 = 0.80$$.

Como o parâmetro β verifica-se a condição $\beta \geq 1$, toma-se: $\beta = 1$.

Para a seção da extremidade esquerda da viga, obtém-se:

$$\left[\frac{160}{603.4}\right]^{2} + \left[\frac{20}{92.4}\right]^{1} = 0.29 < 1.0$$,

concluindo-se assim que a seção IPE500, S275, possui capacidade suficiente para resistir aos esforços aplicados.

iv) Verificação da estabilidade do elemento

Para o elemento em análise, submetido à combinação de flexão biaxial com compressão, constituído por uma seção de classe 1, a estabilidade é verificada através das seguintes condições:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1.0$$;

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy}\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz}\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1.0$$

Os fatores de interação k_{yy} k_{yz}, k_{zy} e k_{zz} podem ser obtidos por um dos métodos previstos no EC3-1-1: o Método 1 ou o Método 2; para comparação de resultados, também aqui são usados os dois métodos.

iv-1) Método 1

Como o elemento em análise é constituído por uma seção aberta de paredes finas com I_T=89.29cm^4<I_y=48200cm^4 e não existe qualquer contraventamento lateral ao longo do elemento, deve considerar-se que a seção é sujeita a deformações de torção. Logo, considera-se a flambagem lateral como o modo de instabilidade relevante.

As resistências caraterísticas da seção são dadas por:

$$N_{Rk} = A\, f_y = 115.5\times10^{-4}\times275\times10^{3} = 3176.3\,\text{kN};$$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y}\, f_y = 2194\times10^{-6}\times275\times10^{3} = 603.4\,\text{kNm};$$

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z}\, f_y = 335.9\times10^{-6}\times275\times10^{3} = 92.4\,\text{kNm}.$$

Os coeficientes da flambagem por flexão, χ_y e χ_z, são.

Plano xz (flambagem em torno de y): $L_{E,y} = 4.00\text{ m}$;

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{E,y}}{i_y}\frac{1}{\lambda_1} = \frac{4.00}{20.43\times10^{-2}}\times\frac{1}{93.9\times0.92} = 0.23;$$

$\alpha = 0.21$ Curva a (Quadro 6.2 do EC3-1-1);

$$\phi = 0.53 \qquad \Rightarrow \chi_y = 0.99.$$

Plano xy (flambagem em torno de z): $L_{E,z} = 4.00\,\text{m}$;

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{E,z}}{i_z}\frac{1}{\lambda_1} = \frac{4.00}{4.31\times10^{-2}}\times\frac{1}{93.9\times0.92} = 1.07;$$

$$\alpha = 0.34 \quad \text{Curva b (Quadro 6.2 do EC3-1-1);}$$
$$\phi = 1.22 \qquad \Rightarrow \chi_z = 0.55 \text{ .}$$

Cálculo dos termos auxiliares, incluindo os fatores C_{yy} e C_{zy}, definidos no Quadro A.1 do EC3-1-1:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_{E,y}^2} = \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 48200 \times 10^{-8}}{4.00^2} = 62437.6\,\text{kN} \text{ ;}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{E,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 2142 \times 10^{-8}}{4.00^2} = 2774.7\,\text{kN} \text{ ;}$$

$$\mu_y = \frac{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \dfrac{520}{62437.6}}{1 - 0.99 \times \dfrac{520}{62437.6}} = 1.00 \text{ ;}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \dfrac{520}{2774.7}}{1 - 0.55 \times \dfrac{520}{2774.7}} = 0.91 \text{ ;}$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{2194}{1928} = 1.14 \quad (< 1.5) \text{ ;}$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{335.9}{214.2} = 1.57 \quad (< 1.5) \text{ ;}$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}/\gamma_{M1}} = \frac{520}{3176.3/1.0} = 0.16 \text{ ;}$$

$$\bar{\lambda}_{\max} = \max\left(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z\right) = \max\left(0.23, 1.07\right) = 1.07 \text{ .}$$

O momento crítico para momento uniforme (“caso padrão”) é:

$$M_{cr}^{E} = \frac{\pi}{L}\sqrt{G\,I_T\,E\,I_z\left(1+\frac{\pi^2\,E\,I_W}{L^2 G\,I_T}\right)} \quad \Leftrightarrow$$

$$M_{cr}^{E} = \frac{\pi}{4.00}\sqrt{81\times10^{6}\times89.29\times10^{-8}\times210\times10^{6}\times2142\times10^{-8}}$$

$$\times\sqrt{\left(1+\frac{\pi^2\times210\times10^{6}\times1249\times10^{-8}}{4.00^2\times81\times10^{6}\times89.29\times10^{-8}}\right)} = 806.0\,\text{kNm}$$

obtém-se o coeficiente de esbeltez adimensional para flambagem lateral com momento uniforme (“caso padrão”), através de:

$$\overline{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{pl,y}\ f_y}{M_{cr}^{E}}} = \sqrt{\frac{2194\times10^{-6}\times275\times10^{3}}{806.0}} = 0.87$$

.

A carga crítica de flambagem por torção $N_{cr,T}$ é obtida através de:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_C^{\ 2}}\left(G\,I_T + \frac{\pi^2\,E\,I_W}{L_{ET}^{\ 2}}\right)$$, com $$i_C^{\ 2} = y_C^{\ 2} + \left(I_y + I_z\right)/A$$

Sendo y_C=0, pois o centro de gravidade coincide com o centro de corte da seção e L_{ET}=4m, obtém-se:

$$i_C^{\ 2} = 0.0 + \left(48200 + 2142\right)/115.5 = 435.86\,\text{cm}^2$$;

$$N_{cr,T} = \frac{1}{435.86\times10^{-4}}\times$$

$$\times\left(81\times10^{6}\times89.29\times10^{-8} + \frac{\pi^2\times210\times10^{6}\times1249\times10^{-9}}{4.00^2}\right) = 5371.4\,\text{kN}.$$

Para o diagrama de momentos fletores atuante, o coeficiente de momentos (tomado como o coeficiente α_m definido no Quadro 3.7 deste manual), toma o valor C_1=1.71. A verificação da condição:

$$\bar{\lambda}_0 = 0.87 > 0.2\sqrt{C_1}\sqrt[4]{\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}$$

$$= 0.2\times\sqrt{1.71}\times\sqrt[4]{\left(1-\frac{520}{2774.7}\right)\times\left(1-\frac{520}{5371.4}\right)} = 0.24,$$

comprova ser um elemento constituído por uma seção sujeita a deformações de torção e determina a forma de quantificar os fatores equivalentes de momento uniforme (fatores C_{mi}).

Para os diagramas de momentos fletores atuantes, os fatores $C_{my,0}$ e $C_{mz,0}$ são obtidos a partir do Quadro A.2 do Anexo A do EC3-1-1:

$$\left|\delta_x\right| = \delta_z = 1.05\,\mathrm{mm};$$

$$\left|M_{i,Ed}(x)\right| = \left|M_{y,Ed}\right| = 160\,\mathrm{kNm};$$

$$\Psi_z = 20/20 = 1.00;$$

$$C_{my,0} = 1+\left(\frac{\pi^2\,E\,I_y\left|\delta_x\right|}{L^2\left|M_{i,Ed}(x)\right|}-1\right)\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} =$$

$$= 1+\left(\frac{\pi^2\times210\times10^6\times48200\times10^{-8}\times1.05\times10^{-3}}{4.00^2\times160}-1\right)\times\frac{520}{62437.6} = 1.00;$$

$$C_{mz,0} = 0.79+0.21\psi_z+0.36(\psi_z-0.33)\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} =$$

$$= 0.79+0.21\times1.00+0.36\times(1.00-0.33)\times\frac{520}{2774.7} = 1.05.$$

A seguir calculam-se os fatores equivalentes de momento uniforme C_{my}, C_{mz} e C_{mLT}, de acordo com o Quadro A.1, Anexo A, EC3-1-1 considerando ser um elemento sujeito a deformações de torção.

Sendo $M_{y,Ed} = 160\,\mathrm{kNm}$ (valor máximo em módulo do momento fletor ao longo do elemento) e considerando-se uma seção classe 1:

$$a_{LT}=1-\frac{I_T}{I_y}=1-\frac{89.29\times10^{-8}}{48200\times10^{-8}}=1.00 \quad (>0)$$
.

$$\varepsilon_y=\frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}}\frac{A}{W_{el,y}}=\frac{160}{520}\times\frac{115.5\times10^{-4}}{1928\times10^{-6}}=1.84$$
;

$$C_{my}=C_{my,0}+\left(1-C_{my,0}\right)\frac{\sqrt{\varepsilon_y}\,a_{LT}}{1+\sqrt{\varepsilon_y}\,a_{LT}}$$

$$=1.00+\left(1-1.00\right)\times\frac{\sqrt{1.84}\times1.00}{1+\sqrt{1.84}\times1.00}=1.00;$$

$$C_{mz}=C_{mz,0}=1.05$$
;

$$C_{mLT}=C_{my}^2\frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}}$$

$$=1.00^2\times\frac{1.00}{\sqrt{\left(1-\frac{520}{2774.7}\right)\times\left(1-\frac{520}{5371.4}\right)}}=1.17 \quad (>1).$$

O momento crítico e o coeficiente de esbelteza $\overline{\lambda}_{LT}$, obtidos com base na expressão 3.119 deste manual, admitindo que a carga distribuída é aplicada no banzo superior, são dados por:

$$M_{cr}=788.0\,\text{kNm},$$

$$\overline{\lambda}_{LT}=\sqrt{\frac{W_{pl,y}\,f_y}{M_{cr}}}=\sqrt{\frac{2194\times10^{-6}\times275\times10^3}{788.0}}=0.88$$
.

Tratando-se de uma seção laminada em I, com $h/b>2$, o coeficiente de imperfeição é dado por α_{LT} = 0.34 (curva b); por aplicação do método geral previsto no 6.3.2.2, EC3-1-1, obtém-se:

$$\phi_{LT} = 0.5\left[1+\alpha_{LT}\left(\overline{\lambda}_{LT}-0.2\right)+\overline{\lambda}_{LT}^{2}\right]$$
$$= 0.5\times\left[1+0.34\times\left(0.88-0.2\right)+0.8^{2}\right]=1.00;$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT}+\left(\phi_{LT}^{2}-\overline{\lambda}_{LT}^{2}\right)^{0.5}} = \frac{1}{1.00+\left(1.00^{2}-0.88^{2}\right)^{0.5}} = 0.68 \;.$$

O cálculo dos termos auxiliares b_{LT}, c_{LT}, d_{LT} e e_{LT}, de acordo com o Quadro A.1 do Anexo A do EC3-1-1.

$$M_{y,Ed} = 160\,\text{kNm} \quad M_{z,Ed} = 20\,\text{kNm}$$

(momentos fletores máximos, em módulo, em torno de y e z),

$$M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y}\,\frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2194\times10^{-6}\times\frac{275\times10^{3}}{1.0} = 603.4\,\text{kNm} \;;$$

$$M_{pl,z,Rd} = W_{pl,z}\,\frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 335.9\times10^{-6}\times\frac{275\times10^{3}}{1.0} = 92.4\,\text{kNm} \;;$$

$$b_{LT} = 0.5\,a_{LT}\,\overline{\lambda}_{0}^{2}\,\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\,M_{pl,y,Rd}}\,\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} =$$
$$= 0.5\times1.00\times0.87^{2}\times\frac{160}{0.68\times603.4}\times\frac{20}{92.4} = 0.03;$$

$$c_{LT} = 10\,a_{LT}\,\frac{\overline{\lambda}_{0}^{2}}{5+\overline{\lambda}_{z}^{4}}\,\frac{M_{y,Ed}}{C_{my}\,\chi_{LT}\,M_{pl,y,Rd}} =$$
$$= 10\times1.00\times\frac{0.87^{2}}{5+1.07^{4}}\times\frac{160}{1.00^{2}\times0.68\times603.4} = 0.47;$$

$$d_{LT} = 2\,a_{LT}\,\frac{\overline{\lambda}_{0}}{0.1+\overline{\lambda}_{z}^{4}}\,\frac{M_{y,Ed}}{C_{my}\,\chi_{LT}\,M_{pl,y,Rd}}\,\frac{M_{z,Ed}}{C_{mz}\,M_{pl,z,Rd}} =$$
$$= 2\times1.00\times\frac{0.87}{0.1+1.07^{4}}\times\frac{160}{1.00\times0.68\times603.4}\times\frac{20}{1.05\times92.4} = 0.10;$$

$$e_{LT} = 1.7\, a_{LT} \frac{\overline{\lambda}_0}{0.1 + \overline{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my}\, \chi_{LT}\, M_{pl,y,Rd}} =$$

$$= 1.7 \times 1.00 \times \frac{0.87}{0.1 + 1.07^4} \times \frac{160}{1.00 \times 0.68 \times 603.4} = 0.41.$$

Com os parâmetros calculados anteriormente, os fatores C_{yy}, C_{yz} C_{zy} e C_{zz} são obtidos a partir do Quadro A.1 do EC3-1-1 através de:

$$C_{yy} = 1 + \left(w_y - 1\right)\left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} C_{my}^2\, \overline{\lambda}_{\max} - \frac{1.6}{w_y} C_{my}^2\, \overline{\lambda}_{\max}^2\right) n_{pl} - b_{LT}\right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} \quad \Leftrightarrow$$

$$C_{yy} = 1 + \left(1.14 - 1\right) \times$$

$$\times \left[\left(2 - \frac{1.6}{1.14} \times 1.00^2 \times 1.07 - \frac{1.6}{1.14} \times 1.00^2 \times 1.07^2\right) \times 0.16 - 0.03\right] =$$

$$= 0.97 \quad \left(> W_{el,y} / W_{pl,y} = 1928/2194 = 0.88\right);$$

$$C_{yz} = 1 + \left(w_z - 1\right)\left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2\, \overline{\lambda}_{\max}^2}{w_z^5}\right) n_{pl} - c_{LT}\right] \geq 0.6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} \quad \Leftrightarrow$$

$$C_{yz} = 1 + \left(1.57 - 1\right)\left[\left(2 - 14 \times \frac{1.05^2 \times 1.07^2}{1.57^5}\right) \times 0.16 - 0.47\right] =$$

$$= 0.75 \qquad \left(> 0.6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} = 0.6 \times \sqrt{\frac{1.57}{1.14}} \times \frac{214.2}{335.9} = 0.45\right);$$

$$C_{zy} = 1 + \left(w_y - 1\right)\left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2\, \overline{\lambda}_{\max}^2}{w_y^5}\right) n_{pl} - d_{LT}\right] \geq 0.6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} \quad \Leftrightarrow$$

$$C_{zy} = 1 + \left(1.14 - 1\right) \times \left[\left(2 - 14 \times \frac{1.00^2 \times 1.07^2}{1.14^5}\right) \times 0.16 - 0.10\right] =$$

$$= 0.84 \quad \left(> 0.6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = 0.6 \times \sqrt{\frac{1.14}{1.57}} \times \frac{1928}{2194} = 0.45\right);$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1)\left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} C_{mz}^2 \,\bar{\lambda}_{\max} - \frac{1.6}{w_z} C_{mz}^2 \,\bar{\lambda}_{\max}^2\right) - e_{LT}\right] n_{pl} \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} = 1 + (1.57 - 1) \times$$

$$\times\left[\left(2 - \frac{1.6}{1.57} \times 1.05^2 \times 1.07 - \frac{1.6}{1.57} \times 1.05^2 \times 1.07^2\right) - 0.41\right] \times 0.16 =$$

$$= 0.92 \qquad (> \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} = \frac{214.2}{335.9} = 0.64).$$

Com base nos termos auxiliares calculados, considerando que a seção é de classe 1, através das expressões do Quadro A.1, Anexo A do EC3-1-1, determinam-se os fatores de interação k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} e k_{zz}:

$$k_{yy} = C_{my}\, C_{mLT}\, \frac{\mu_y}{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}} = 1.00 \times 1.17 \frac{1.00}{1 - \dfrac{520}{62437.6}} \frac{1}{0.97} = 1.22$$

;

$$k_{yz} = C_{mz}\, \frac{\mu_y}{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0.6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} =$$

$$= 1.05 \times \frac{1.00}{1 - \dfrac{520}{2774.7}} \times \frac{1}{0.75} \times 0.6 \times \sqrt{\frac{1.57}{1.14}} = 1.21;$$

$$k_{zy} = C_{my}\, C_{mLT}\, \frac{\mu_z}{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0.6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} =$$

$$= 1.00 \times 1.17 \times \frac{0.91}{1 - \dfrac{520}{62437.6}} \times \frac{1}{0.84} \times 0.6 \times \sqrt{\frac{1.14}{1.57}} = 0.65;$$

$$k_{zz} = C_{mz}\, \frac{\mu_z}{1 - \dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}} = 1.05 \times \frac{0.91}{1 - \dfrac{520}{2774.7}} \times \frac{1}{0.92} = 1.28.$$

Verificam-se entãoas condições regulamentares, ou seja:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1.0 \quad \Leftrightarrow$$

$$\frac{520}{0.99\times 3176.3/1.0}+1.22\times\frac{160}{0.68\times 603.4/1.0}+1.21\times\frac{20}{92.4/1.0}=0.90<1.0\;;$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z\,N_{Rk}/\gamma_{M1}}+k_{zy}\,\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\,M_{y,Rk}/\gamma_{M1}}+k_{zz}\,\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}}\leq 1.0\quad\Leftrightarrow$$

$$\frac{520}{0.55\times 3176.3/1.0}+0.65\times\frac{160}{0.68\times 603.4/1.0}+1.28\times\frac{20}{92.4/1.0}=0.83<1.0,$$

Como ambas as condições são verificadas, o IPE500, S275 passa.

iv-2) Método 2

Como o elemento é constituído por uma seção sujeito a deformações de torção (seção aberta de paredes finas, não restringida lateralmente), considera-se que a estabilidade do elemento depende exclusivamente da sua resistência à flambagem lateral.

Como o Método 2 difere do Método 1 apenas no que se refere ao cálculo dos fatores de interação, procede-se o cálculo destes fatores.

Inicialmente calculam-se os coeficientes equivalentes de momento uniforme a partir do Quadro B.3, Anexo B, EC3-1-1. Para o diagrama de momentos fletores em torno de y, obtém-se:

$$\Psi_y=\frac{-160}{-160}=1.00\;;\qquad \alpha_s=\frac{M_s}{M_h}=\frac{160}{-160}=-1.0\;;$$

$$\Rightarrow\quad C_{my}=-0.8\,\alpha_s=-0.8\times(-1.0)=0.8\quad(>0.4)\,.$$

Para o diagrama de momentos fletores em torno de z, obtém-se:

$$\Psi_z=\frac{20}{20}=1.00\;;$$

$$\Rightarrow\quad C_{mz}=0.60+0.4\,\Psi_z=0.6+0.4\times 1.00=1.0\quad(>0.40)\,.$$

O coeficiente C_{mLT} é dado por: $C_{mLT}=C_{my}=0.8$

Com base nos parâmetros anteriores, e nos parâmetros obtidos na aplicação do Método 1, calculam-se os fatores de interação k_{yy}, kyz, k_{zy} e k_{zz} a partir do Quadro B.2 do Anexo B do EC3-1-1 através de:

$$k_{yy} = C_{my}\left[1+\left(\bar{\lambda}_y - 0.2\right)\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]=$$

$$= 0.8\times\left[1+\left(0.23-0.2\right)\times\frac{520}{0.99\times 3176.3/1.0}\right] = 0.80;$$

como $k_{yy} = 0.80 < C_{my}\left[1+0.8\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0.91$,

deve considerar-se $k_{yy} = 0.80$.

$$k_{zz} = C_{mz}\left[1+\left(2\,\bar{\lambda}_z - 0.6\right)\frac{N_{Ed}}{\chi_z\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]=$$

$$= 1.00\times\left[1+\left(2\times 1.07-0.6\right)\times\frac{520}{0.55\times 3176.3/1.0}\right] = 1.46.$$

como $k_{zz} = 1.46 > C_{mz}\left[1+1.4\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 1.23$,

deve considerar-se $k_{zz} = 1.23$. $k_{yz} = 0.6\,k_{zz} = 0.6\times 1.23 = 0.74$.

$$k_{zy} = \left[1-\frac{0.1\bar{\lambda}_z}{\left(C_{mLT}-0.25\right)}\frac{N_{Ed}}{\chi_z\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$$

$$= \left[1-\frac{0.1\times 1.07}{\left(0.8-0.25\right)}\times\frac{520}{0.55\times 3176.3/1.0}\right] = 0.94;$$

como $k_{zy} = 0.94 < \left[1-\frac{0.1}{\left(C_{mLT}-0.25\right)}\frac{N_{Ed}}{\chi_z\, N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0.95$, leva: $k_{zy} = 0.95$.

Verificam-se então as condições de segurança:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y\, N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy}\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz}\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \le 1.0 \quad \Leftrightarrow$$

$$\frac{520}{0.99\times 3176.3/1.0} + 0.80\times\frac{160}{0.68\times 603.4/1.0} + 0.74\times\frac{20}{92.4/1.0} = 0.64 < 1.0$$;

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z\, N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy}\,\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\, M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz}\,\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1.0 \;\;\Leftrightarrow$$

$$\frac{520}{0.55\times 3176.3/1.0} + 0.95\times\frac{160}{0.68\times 603.4/1.0} + 1.23\times\frac{20}{92.4/1.0} = 0.93 < 1.0 \,.$$

Como ambas as condições são verificadas, o IPE500, S275 passa segundo a formulação do Método 2.