

EJEMPLO N° 18

Viga-columna. Sección Doble Te de doble simetría sometida a carga axial y momento flexor en una dirección.

Aplicación Capítulos A, B,C,E,F y H, y Comentarios Capítulo C.

Enunciado

Proyectar la columna C_1 del pórtico del Ejemplo N°9 utilizando un perfil laminado Doble Te. La columna está sometida a una fuerza de compresión y a momentos flexores aplicados en sus extremos, además de una carga transversal uniforme de viento .

El Acero tiene $F_y = 235$ MPa.

1) Solicitaciones Requeridas

Para considerar los efectos de Segundo Orden (Sección C.1.4) se utiliza el método aproximado de amplificación de momentos de primer orden.

Las resistencias requeridas a flexión se discriminan en

M_{nt} = resistencia a flexión requerida obtenida por análisis de primer orden considerando el pórtico indesplazable.

M_{lt} = resistencia a flexión requerida resultante del desplazamiento lateral del pórtico.

- Del análisis estructural resultan los siguientes diagramas de momentos flexores de servicio para la columna C1 y para las acciones indicadas.

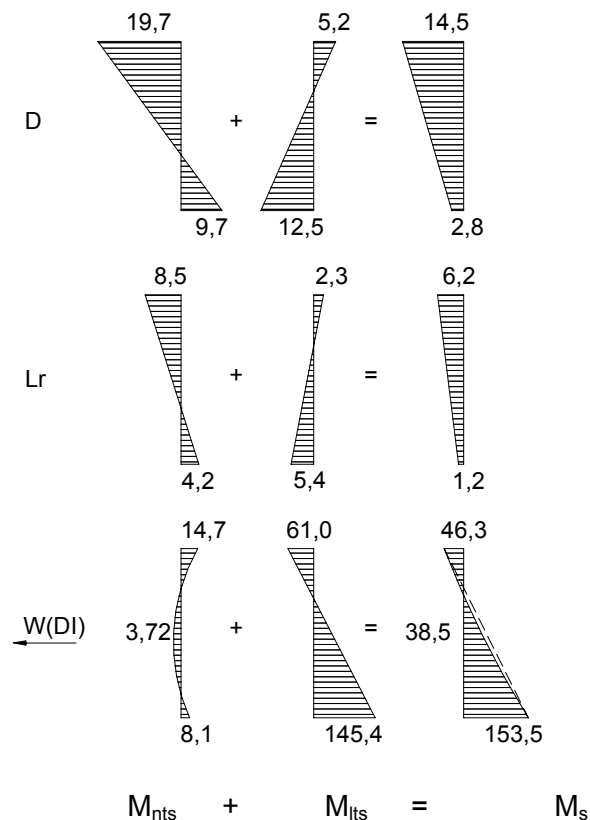


Figura Ej.18-1

- La combinación más desfavorable de axil y momento para la columna C1 según el Ejemplo N°9 es la (A.4-4) con el viento de derecha a izquierda (ver página Ej.9-3 → M_{3DI} y N_{3DI}). La combinación es $1,2D + 1,3W + 0,5L$. Resultan los siguientes diagramas de momentos requeridos.

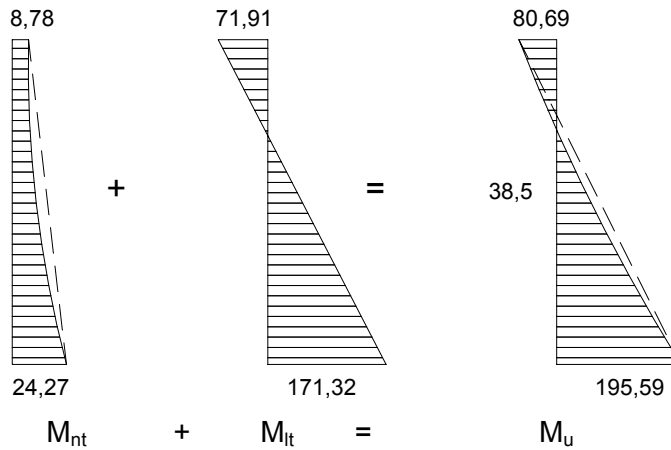


Figura Ej.18-2

Las fuerzas axiales (todas de compresión), obtenidas del Ejemplo N°9, para la combinación A.4-4 y para las tres columnas del pórtico son:

$P_{uc1} = -22,19 \text{ kN}$ $P_{uc2} = -8,09 \text{ kN}$ $P_{uc3} = -7,87 \text{ kN}$

La columna no está sometida a momentos flexores alrededor del eje "y".

Los diagramas de carga y los condiciones de vínculo en ambas direcciones se indican en la Figura Ej.18-3.

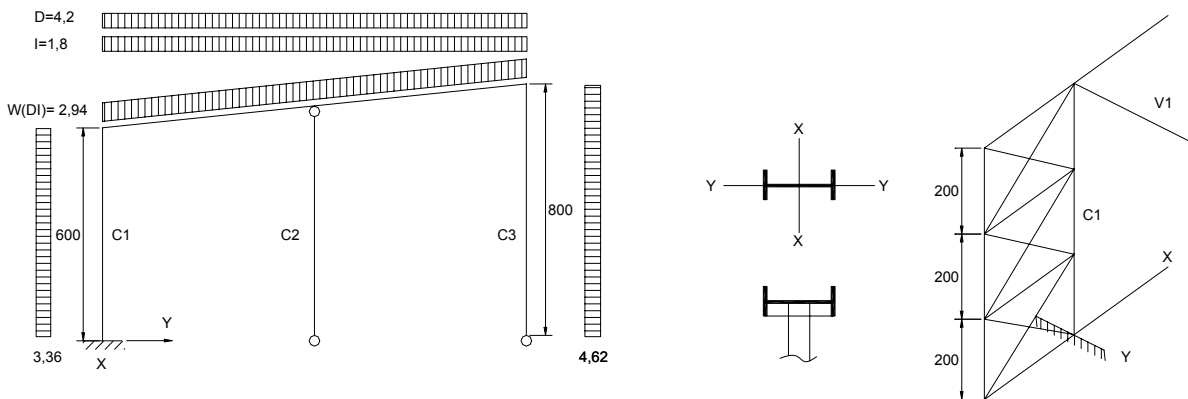
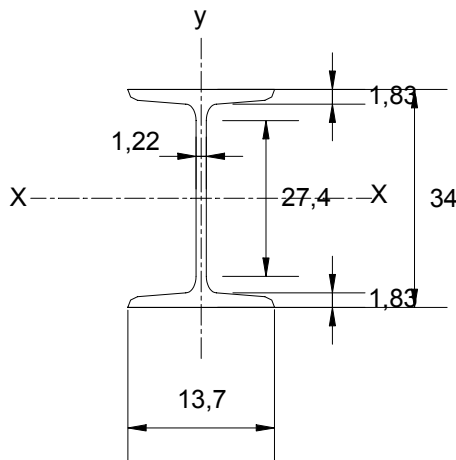


Figura Ej. 18-3

Los arriostramientos a pandeo flexional alrededor del eje "y" por su diseño también arriostran a pandeo lateral.

2) Predimensionado

Proponemos un perfil Doble Te IPN340



Características de la sección:

$$\begin{aligned}
 A &= 86,7 \text{ cm}^2 \\
 I_x &= 15\,700 \text{ cm}^4 \\
 I_y &= 674 \text{ cm}^4 \\
 S_x &= 923 \text{ cm}^3 \\
 S_y &= 98,4 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_x &= 1\,080 \text{ cm}^3 \\
 r_x &= 13,5 \text{ cm} \\
 r_y &= 2,80 \text{ cm} \\
 J &= 74,3 \text{ cm}^4 \\
 C_w &= 176\,300 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

Figura Ej.18-2

Se deberá verificar la ecuación de interacción (H.1-1a) o (H.1-1b) para flexocompresión (Sección H.1.2).

Se determinarán las resistencias nominales a compresión axial (Capítulo E) y a flexión alrededor del eje "x" (Capítulo F).

3) Resistencia nominal a Flexión

Aplicamos Capítulo F y Tabla A-F.1-1

- Pandeo local de Ala

Tabla B.5-1 (*) - Caso 1

$$\lambda_f = \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{13,7}{2 \cdot 1,83} = 3,74$$

$$\lambda_p = \frac{170}{\sqrt{F_{yf}}} = \frac{170}{\sqrt{235}} = 11,08$$

$$\lambda_f < \lambda_p \Rightarrow M_{nx} = M_{px}$$

(F.1-1) y (A.F.1-1)

- Pandeo local de Alma

Aplicamos Tabla B.5-1 (*) - Caso 13.

$$\lambda_w = \frac{h_w}{t_w} = \frac{27,4}{1,22} = 22,4$$

$$\frac{P_u}{\phi_b \cdot P_y} = \frac{22,19}{0,9 \cdot 235 \cdot 86,7 \cdot 10^{-1}} = 0,012 < 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{F_y}} \left(1 - 2,75 \frac{P_u}{\phi \cdot P_y} \right) = \frac{1680}{\sqrt{235}} (1 - 2,75 \cdot 0,012) = 105,9$$

$$\boxed{\lambda_w < \lambda_p \Rightarrow M_{nx} = M_{px}}$$

(A.F.1-1) y (A.F.1-1)

- Pandeo lateral torsional

Aplicamos Tabla A-F.1-1

Cargas aplicadas en alma.

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

$$\lambda_b = \frac{L_b}{r_y} = \frac{200}{2,80} = 71,43$$

$$\lambda_p = \frac{788}{\sqrt{F_{yf}}} = \frac{788}{\sqrt{235}} = 51,4 \quad (\text{F.1-4})^*$$

$$\lambda_r = \frac{X_1}{F_L} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 \cdot F_L^2}}$$

$$F_L = F_y - F_r = 235 - 69 = 166 \text{ MPa}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot G \cdot J \cdot A}{2}} = \frac{\pi}{1260} \cdot \sqrt{\frac{202.000 \cdot 78.000 \cdot 74,3 \cdot 86,7}{2}} = 24.247 \text{ MPa} \quad (\text{F.1-8})$$

$$X_2 = 4 \cdot \frac{C_w}{I_y} \cdot \left(\frac{S_x}{G \cdot J} \right)^2 = 4 \cdot \frac{176.300}{674} \cdot \left(\frac{923}{78.000 \cdot 74,3} \right)^2 = 2,65 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-2} \quad (\text{F.1-9})$$

$$\lambda_r = \frac{24.247}{166} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + 2,65 \cdot 10^{-5} \cdot 166^2}} = 222,2$$

$$\boxed{\lambda_p < \lambda < \lambda_r} \Rightarrow M_n = C_b \cdot \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \quad (\text{A.F.1-2})$$

Conservadoramente $C_b = 1$

$$M_r = F_L \cdot S_x \cdot (10^{-3}) = 166 \cdot 923 \cdot (10^{-3}) = 153,22 \text{ kN.m}$$

$$M_p = F_y \cdot Z_x \cdot (10^{-3}) = 235 \cdot 1080 \cdot (10^{-3}) = 253,8 \text{ kN.m} < 1,5 M_y = 1,5 S_x \cdot F_y = 325,3 \text{ kN.m}$$

$$M_n = 1 \cdot \left[253,8 - (253,8 - 153,22) \left(\frac{71,43 - 51,4}{222,2 - 51,4} \right) \right] = 242 \text{ kN.m} < M_p$$

La menor resistencia es la que corresponde a pandeo Lateral Torsional, por lo tanto la resistencia nominal a flexión de la columna es:

$$\boxed{M_n = 242 \text{ kN.m}}$$

4) Resistencia nominal a Compresión

Aplicación Capítulo E – Sección E.2.

Se verifica compacidad de ala y alma aplicando Tabla B.5-1.

- Ala

Tabla B.5-1 (*) - caso 4.

$$\lambda_f = \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{13,7}{2 \cdot 1,83} = 3,74$$

$$\lambda_r = \frac{250}{\sqrt{F_{yf}}} = \frac{250}{\sqrt{235}} = 16,3$$

$$\lambda_{f1} < \lambda_r \Rightarrow \text{ala no esbelta}$$

- Alma

Aplicamos Tabla B.5-1 (*) - Caso 12.

$$\lambda_w = \frac{h_w}{t_w} = \frac{27,4}{1,22} = 22,4$$

$$\lambda_r = \frac{665}{\sqrt{F_{yf}}} = \frac{665}{\sqrt{235}} = 43,4$$

$$\lambda_w < \lambda_r \Rightarrow \text{alma no esbelta}$$

$$\text{SECCIÓN NO COMPACTA} \Rightarrow Q = 1$$

- Cálculo de la resistencia nominal a compresión axil

Los factores “ k_x ” de las columnas han sido determinados en el Ejemplo N°9 con las correcciones correspondientes.

Para la columna C1 y para la combinación de acciones analizada.

$$k_x = 1,93$$

Para la dirección “y” según los vínculos indicados en la Figura Ej.18-3 resulta el factor de longitud efectiva $k_y=1$.

Las longitudes de pandeo de la columna son:

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

$$L_y = 600/3 = 200 \text{ cm}$$

Esbelteces :

$$\lambda_x = \frac{k_x L_x}{r_x} = \frac{1,93 \cdot 600}{13,5} = 85,8$$

$$\lambda_y = \frac{k_y L_y}{r_y} = \frac{1 \cdot 200}{2,80} = 71,4$$

$\lambda_x > \lambda_y \Rightarrow$ Manda pandeo alrededor de "x" $Q=1$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \cdot 85,8 \cdot \sqrt{\frac{235}{200\,000}} = 0,936 < 1,5 \quad (\text{E.2-4})$$

$$F_{cr} = \left(0,658^{\lambda_c^2}\right) \cdot F_y = \left(0,658^{0,936^2}\right) \cdot 235 = 162,86 \text{ MPa} \quad (\text{E.2-2})$$

Resistencia nominal a compresión:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \cdot (10^{-1}) = 162,86 \cdot 86,7 \cdot (10^{-1}) = 1412 \text{ kN} \quad (\text{E.2-1})$$

5) Cálculo de los factores de amplificación de Momentos de Primer orden (Sección C.1.4)

• Cálculo de B_1

$$B_1 = \frac{C_m}{\left[1 - \frac{P_u}{P_{e1}}\right]} \geq 1 \quad (\text{C.1-2})$$

La columna se halla sometida a momentos en los extremos producidos por los empotramientos y también a una carga uniformemente distribuida (Presión del viento).

Debido a los momentos extremos:

$$C_m = 0,6 - 0,4 \cdot \left(\frac{M_{nt1}}{M_{nt2}}\right) = 0,6 - 0,4 \cdot \left(\frac{-8,78}{24,27}\right) = 0,75$$

Debido a la carga distribuida, aplicando Tabla C-C.1-1 de los Comentarios para apoyo (caso 5)

$$C_m = 1 - 0,4 P_u / P_{e1}$$

P_{e1} debe ser determinada para el plano de flexión y con el factor de longitud efectiva para pórtico indesplazable. Se toma conservadoramente $k_x=1$ $\lambda_x = \frac{1 \cdot 600}{13,5} = 44,4 \longrightarrow \lambda_c = 0,48$

$$P_{e1} = \frac{A_g \cdot F_y \cdot 10^{-1}}{\lambda_c^2} = \frac{86,7 \cdot 235 \cdot 10^{-1}}{0,48^2} = 8843,1 \text{ kN} \longrightarrow C_m = 1 - 0,4 \left(\frac{22,19}{8843,1}\right) = 0,999$$

se adopta $C_m=0,999$

$$B_1 = \frac{0,999}{\left[1 - \frac{22,19}{8843,1}\right]} = 1$$

No existe amplificación de los momentos $M_{nt} \Rightarrow M_{ntu} = B_1 \cdot M_{nt} = 1 \cdot 24,27 = 24,27 \text{ kN m}$

• **Cálculo de B_2**

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{\sum P_{ei}}} \geq 1 \quad (\text{C.1-5})$$

$$\sum P_u = 22,19 + 8,09 + 7,87 = 38,15 \text{ kN}$$

$$\sum P_{ei} = P_{e1} + P_{e3}$$

Se deberán calcular P_{e1} y P_{e3} con los coeficientes k correspondientes al plano de flexión para el pórtico desplazable pero sin la corrección por diferencia de rigidez y pandeo no simultáneo pues este efecto está incluido en la ecuación (C.1-5).

del Ejemplo N°9

$$k_1 = 1,64$$

$$k_3 = 2,04$$

$$\lambda_{c1} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1,64 \cdot 600}{13,5} \cdot \sqrt{\frac{235}{200\,000}} = 0,795$$

$$P_{e1} = \frac{A_g \cdot F_y \cdot 10^{-1}}{\lambda_c^2} = \frac{86,7 \cdot 235 \cdot 10^{-1}}{0,795^2} \cong 3224 \text{ kN}$$

Para la columna C_3 se supone $I_{xc3} = I_{xc1}/1,5$ $A_{g3} = \frac{A_{g1}}{1,10} = \frac{86,7}{1,10} = 78,82$

Siendo $\sqrt{\frac{1,5}{1,1}} = 1,168$

Resulta $r_{xc3} = \frac{r_{xc1}}{1,168} = \frac{13,5}{1,168} = 11,56 \text{ cm}$

$$\lambda_{c3} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k_3 \cdot L_3}{r} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2,04 \cdot 800}{11,56} \cdot \sqrt{\frac{235}{200\,000}} = 1,54$$

$$P_{e3} = \frac{A_g \cdot F_y \cdot 10^{-1}}{\lambda_c^2} = \frac{78,82 \cdot 235 \cdot 10^{-1}}{1,54^2} = 781 \text{ kN}$$

$$\sum P_{ei} = 3224 + 781 = 4005 \text{ kN}$$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{38,15}{4005}} = 1,01 \cong 1$$

Puede considerarse que no existe amplificación de los momentos

$$M_{lt} \Rightarrow \underline{M_{ltu} = B_2 \cdot M_{lt} = 1 \cdot 171,32 = 171,32 \text{ kN.m}}$$

Solicitaciones requeridas

$$M_u = M_{ntu} + M_{ltu} = 24,27 + 171,32 = \boxed{195,59 \text{ kN.m}}$$

6) Verificación de la ecuación de Interacción

Aplicación Capítulo H.

$$\frac{P_u}{\phi \cdot P_n} = \frac{22,19}{0,85 \cdot 1412} \cong 0,02 < 0,2$$

La ecuación de interacción es (Ecuación H.1-1b)

$$\frac{P_u}{2 \cdot \phi \cdot P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} = \frac{22,19}{2 \cdot 0,85 \cdot 1412} + \frac{195,59}{0,9 \cdot 242} \cong 0,91 < 1$$

VERIFICA