

Ejercicio complementario 4

Se desea dimensionar una columna de 12 metros de altura para soportar una carga de compresión centrada y, concretamente, se van a estudiar dos alternativas: perfil tubular hueco metálico, o bien perfil tubular hueco relleno de hormigón. Sabiendo que la columna se comporta como empotrada-libre (traslacional), se pide obtener la máxima carga de compresión en los siguientes casos:

- Perfil tubular circular hueco de 900 mm de diámetro exterior y espesor 16 mm, en acero estructural S-355, fabricado por conformado en frío y posterior soldadura.
- El mismo perfil que en el apartado a), relleno de hormigón HA-30 con 8 redondos $\varnothing 16$ de acero corrugado soldable B500S.

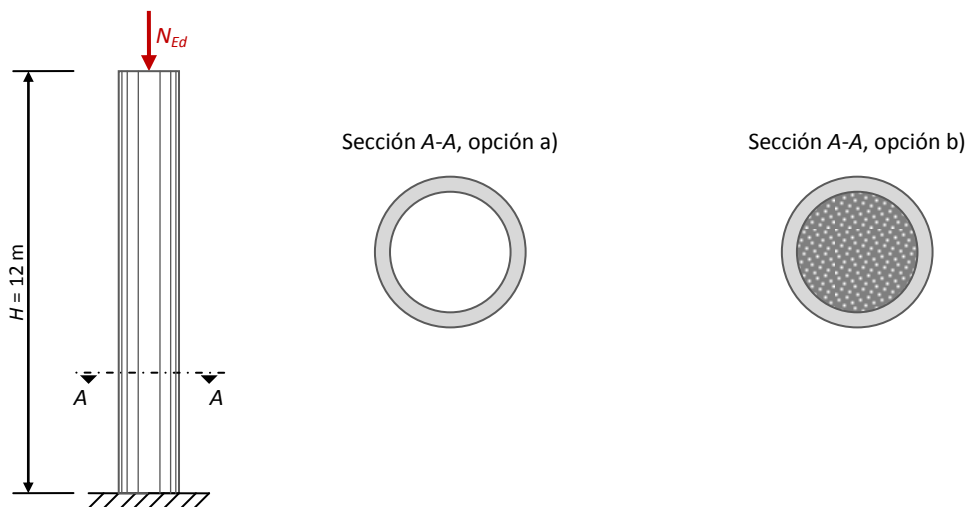
Observaciones:

Acero estructural de $E_a = 210$ GPa y $\gamma_{M0} = \gamma_a = 1,05$

Acero corrugado soldable de $E_s = 200$ GPa y $\gamma_s = 1,15$

Se estima que la carga de servicio cuasi-permanente que soportará la columna estará en torno al 60% de la máxima carga de cálculo.

Se estima un coeficiente de fluencia del hormigón de valor 1,5.



RESOLUCIÓN**Apartado a)**

De acuerdo con el artículo 20.3 de la EAE, la esbeltez geométrica corresponde al cociente d/t , siendo d el diámetro exterior y t el espesor. En este caso $d/t = 56,25$. La clasificación del perfil tubular circular hueco se hace conforme a la tabla 20.3c; como $\varepsilon = 0,81$, el valor de esbeltez no cumple la condición de Clase 2 ($70 \cdot \varepsilon^2$) pero sí cumple la de Clase 3 ($90 \cdot \varepsilon^2$). No es necesario reducir la sección por abolladura local.

Así pues la resistencia de la sección tubular a compresión pura es:

$$N_{Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = \pi/4 \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot f_y / \gamma_{M0} = 15023 \text{ kN}$$

Puesto que se trata de un elemento estructural esbelto comprimido debe determinarse también su resistencia a pandeo por compresión, de acuerdo con el apartado 35.1.1 de la EAE:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}$$

El valor del factor χ depende de la esbeltez relativa de la columna $\bar{\lambda}$:

$$A = \pi/4 \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) = 44435 \text{ mm}^2 \quad I = \pi/64 \cdot (D_{ext}^4 - D_{int}^4) = 4,342 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 312,6 \text{ mm} \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_{\varepsilon}} = \frac{\ell_0/i}{93,91 \cdot \varepsilon} = 1,01$$

En las expresiones anteriores, ℓ_0 es la longitud equivalente de pandeo de la columna, que es igual a dos veces su altura dadas las condiciones de comportamiento que se indican en el enunciado. De acuerdo con la tabla 35.1.2.b de la EAE, en este diseño debe aplicarse la curva europea de pandeo "c", al tratarse de un perfil tubular hueco fabricado por conformado en frío. Y aplicando las tablas del Anejo 4 de la EAE, para la esbeltez relativa $\bar{\lambda} = 1,01$ se obtiene un valor de $\chi = 0,5315$. Finalmente, la resistencia a pandeo de la columna es 7622 kN.

De los dos valores obtenidos, el de la resistencia a pandeo es el más restrictivo, por lo que la carga de compresión de cálculo no deberá ser superior a 7622 kN.

Apartado b)

En primer lugar, se debe comprobar que no haya problemas de abolladura, conforme al apartado 6.3.2.4 de la RPX-95. La esbeltez máxima del tubo metálico para poder evitar reducción por abolladura es $90 \cdot \varepsilon = 72,9$. Como la esbeltez d/t de la parte metálica es inferior a dicho valor, no es necesario reducirla.

Las secciones a considerar son:

$$A_a = \pi/4 \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) = 44435 \text{ mm}^2 \quad A_s = 8 \cdot \pi/4 \cdot 16^2 = 1608,5 \text{ mm}^2 \quad A_c = \pi/4 \cdot D_{int}^2 = 591738 \text{ mm}^2$$

La resistencia de la sección a compresión pura es:

$$N_{Rd} = A_a \cdot f_y / \gamma_a + A_s \cdot f_{y,s} / \gamma_s + A_c \cdot f_{ck} / \gamma_c = 15023 + 699 + 11835 = 27557 \text{ kN}$$

Por otro lado, a la hora de determinar la resistencia de la columna a pandeo por compresión, deben hacerse las siguientes apreciaciones: la contribución del acero estructural a la resistencia a compresión de la sección es un 54,5%, la cuantía geométrica de la armadura longitudinal es un 0,27% y la sección posee al menos un eje de simetría. La resistencia a pandeo se podrá calcular mediante el método simplificado siempre que la esbeltez relativa sea inferior a 2 y sin tener en cuenta las armaduras longitudinales, ya que su cuantía no llega al 0,3% establecido en la RPX-95 y en la "Guía de diseño nº5" del CIDECT.

Si se supone que la esbeltez relativa no será superior a 2, entonces la resistencia a pandeo se obtiene, de forma simplificada, así

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot [A_a \cdot f_y / \gamma_{M1} + A_c \cdot f_{ck} / \gamma_c]$$

Se adopta $\gamma_{M1} = 1,1$ como coeficiente parcial de seguridad de la contribución del acero estructural, de acuerdo con el apartado 6.7.3.5 del Eurocódigo 4.

Al igual que en el apartado anterior, para determinar el factor χ debe calcularse antes la esbeltez relativa de la columna mixta:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr}}}$$

siendo:

$$N_{Rk} = A_a \cdot f_y + A_c \cdot f_{ck} = 33527 \text{ kN}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_e}{(\ell_0)^2}$$

Obsérvese que en el N_{Rk} no se ha considerado la contribución de la armadura porque su cuantía no llega al mínimo indicado más arriba. La longitud de pandeo de la columna es $\ell_0 = 24 \text{ m}$ y el producto $(EI)_e$ se determina con la siguiente expresión:

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,8 \cdot \frac{E_{cm}}{1 + \varphi \frac{N_{Sg}}{N_{Sd}}} \cdot 1,35 \cdot I_c$$

El coeficiente 0,8 tiene en cuenta el agrietamiento del hormigón causado por la acción de momentos de segundo orden y el coeficiente 1,35 es un factor de seguridad recogido en la "Guía de Diseño nº5" del CIDECT. El apartado 6.7.3.3 del Eurocódigo 4 agrupa estos dos coeficientes en uno único de valor 0,60.

Los momentos de inercia del acero y del hormigón son $I_a = 4,342 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$ e $I_c = 2,786 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$. Para un hormigón de $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$, el módulo secante E_{cm} a 28 días de edad es 28577 MPa. La relación entre el axil cuasi-permanente en servicio N_{Sg} y el axil máximo de cálculo N_{Sd} es 0,6 tal y como indica el enunciado, que también define el valor del coeficiente de fluencia $\varphi = 1,5$. Con todo ello, resulta el producto $(EI)_e = 1,160 \cdot 10^{15} \text{ mm}^2 \cdot \text{N}$.

La carga crítica de pandeo es $N_{cr} = 19879 \text{ kN}$ y la esbeltez relativa es $\bar{\lambda} = 1,30$. Este valor es inferior a 2, que es coherente con el empleo del método simplificado. Como se trata de un perfil tubular relleno de hormigón, se escoge la curva europea de pandeo "a", en la que se obtiene $\chi = 0,4798$. Finalmente, la resistencia a pandeo de la columna es:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot [A_a \cdot f_y / \gamma_{M1} + A_c \cdot f_{ck} / \gamma_c] = 0,4798 \cdot 26175 \text{ kN} = 12559 \text{ kN}$$

Se concluye que, de nuevo, el pandeo del elemento limita la posibilidad de agotar la resistencia de los materiales. La carga máxima de cálculo no deberá ser superior a 12559 kN.