Refuerzo de un soporte de hormigón con angulares empresillados:

Ejemplo de aplicación

Apellidos, nombre	Guardiola Víllora, Arianna (aguardio@mes.upv.es)
Departamento	Mecánica del Medio continuo y Teoría de Estructuras
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen

En este documento se explica, mediante un ejemplo práctico cómo reforzar un soporte de hormigón armado por medio de unos angulares de acero colocados en las esquinas, unidos entre sí mediante presillas siguiendo los criterios de la Euronorma Eurocódigo 3: Estructuras de acero.

2 Introducción

El refuerzo de los soportes de hormigón armado es necesario en multitud de ocasiones, bien sea por un cambio de uso de la estructura, o por una merma de las condiciones resistentes del soporte existente consecuencia de patologías o acciones accidentales como impacto de un vehículo o un sismo.

Existiendo distintas técnicas de refuerzo, en este documento se propone el refuerzo por medio de angulares metálicos (cordones) colocados en las esquinas y unidos mediante cartelas.

El proceso consta de las siguientes fases:

1. Predimensionado y diseño. Incluye el predimensionado de los cordones, el diseño del soporte y posición de las presillas
2. Los cordones. Incluye el cálculo de las solicitaciones en los cordones y la comprobación de los mismos
3. Las presillas. Comprende el cálculo de las solicitaciones en las presillas y su comprobación.
4. Las uniones. Comprende el predimensionado y cálculo de los cordones de soldadura entre los cordones y las presillas

3 Objetivos

Al final de este documento, el estudiante será capaz de reforzar un soporte de hormigón armado siguiendo el ejemplo de aplicación práctica que tiene en cuenta los criterios del Eurocódigo 3.

4 Aplicación práctica

Se pretende reforzar un soporte de hormigón cuadrado de 35x35 cm y 3 metros de altura libre con angulares de acero colocados en las esquinas y presillas.

Se considera que las solicitaciones a transmitir son:

axi de compresión N_{Ed} = 1000 kN,

momento flector M_{Ed} = 5.6 kN·m

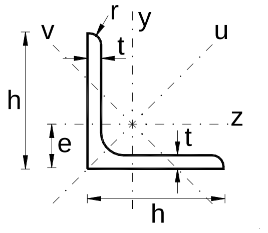
esfuerzo cortante V_{Ed}= 7.5 kN

4.1 Predimensionado, diseño del soporte y posición de las presillas.

Teniendo en cuenta que el axil en los cordones se incrementa debido a la existencia del momento flector, a la imperfección inicial que marca la norma ($L_k/500$) y al acoplamiento de flector con el axil, se elige un angular con un área capaz de transmitir la mitad de axil solicitación:

$$\frac{1000 \cdot 10^3}{2} \leq A_{ch} \cdot f_{yd} \rightarrow A_{ch} \geq 1910\, mm^2$$

Se eligen 2 L 100·12, cuyas características se recogen en la tabla 1.



A = 2270 mm²

$I_y = 2.07 \times 10^3$

$i_y = 30.2$ mm

t = 12 mm

e = 29 mm

Tabla 1. Propiedades geométricas de la L 100.12

En cuanto al diseño del soporte y la posición de las presillas, Se deben tener en cuenta las siguientes disposiciones constructivas:

1. Se colocarán presillas en los extremos y puntos de aplicación de las cargas
2. Las presillas intermedias deben dividir la pieza en al menos tres tramos
3. En los planos paralelos, las presillas se colocan enfrentadas
4. La anchura de las presillas extremas será ≥ h_0 siendo h_0 la distancia entre los ejes de los cordones
5. La anchura de las presillas intermedias será ≥ 0.5 h_0

Teniendo en cuenta las disposiciones anteriores y las dimensiones del soporte, se propone el diseño de la figura 1.

La separación entre los ejes de los cordones se calcula a partir de las dimensiones del soporte de hormigón y la posición del centro de gravedad de los angulares.

El canto de las presillas extremas se diseña de 320 mm mientras que el de las presillas intermedias se dispone de 200 mm. En ambos casos se elige chapa de 12 mm (igual al espesor del ala de los angulares.

La separación entre presillas se calcula teniendo en cuenta que la longitud del soporte son 3000 mm y dividiendo el mismo en 5 tramos.

Por tanto: a = 536 mm

h_0 = 316

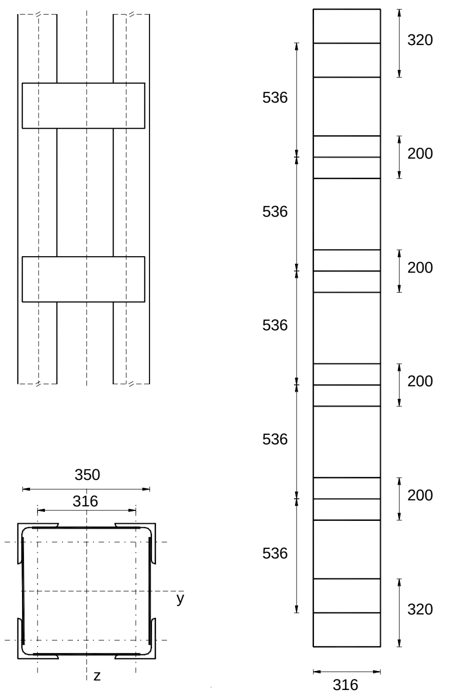


Figura 1. Diseño del soporte

4.2 Comprobación de los cordones

Para calcular las solicitaciones en los cordones, el EC3 indica que sobre cada uno de los tramos entre presillas se considera que actúa además del axil $N_{ch,Ed}$ momento producido por el cortante sobre el soporte, tal y como se muestra en la figura 2.

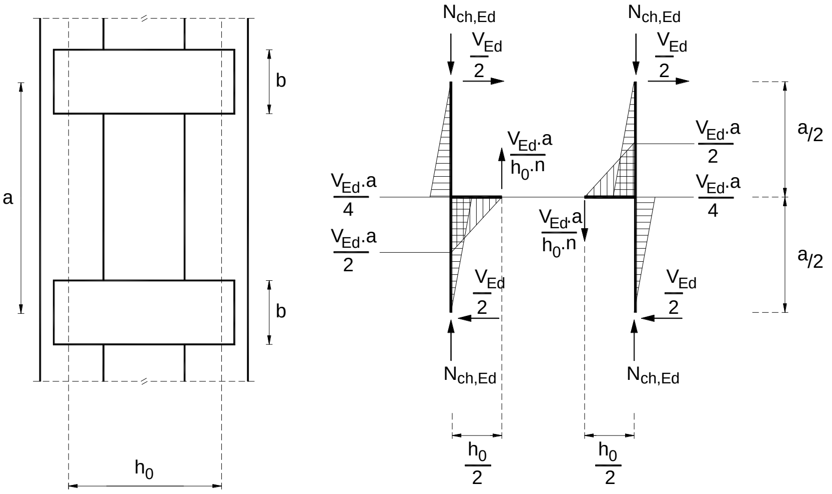


Figura 2. Esfuerzos en los cordones y presillas

La verificación consiste en comprobar un tramo entre presillas a flexocompresión con el axil y el momento indicados en la figura 2.

El axil en el cordón se obtiene a partir de la ecuación 1

$$N_{ch,Ed} = 0,5 \cdot \left[N_{Ed} + \frac{M_{Ed} \cdot h_0 \cdot A_{ch}}{I_{eff}} \right] \quad \text{(ecuación 1)}$$

Donde M_{Ed} es el momento sobre el soporte incrementado con la excentricidad inicial $L_k/500$ y el factor de amplificación que tiene en cuenta el acoplamiento axil-flector, tal y como se indica en la ecuación 2

$$M_{Ed} = N_{Ed} \cdot \left[\frac{M^*_{Ed}}{N_{Ed}} + \frac{L_k}{500} \right] \cdot \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}} \quad \text{(ecuación 2)}$$

Siendo N_{Ed} y M^*_{Ed} el axil y el momento solicitación que actúan sobre el soporte.

El axil crítico se obtiene a partir de la ecuación 3

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{eff}}{L_k^2} \quad \text{(ecuación 3)}$$

Siendo la inercia eficaz equivalente la obtenida de la ecuación 4

$$I_{eff} = 0,5 \cdot h_0^2 \cdot A_{ch} + 2 \cdot \mu \cdot I_{ch} \quad \text{(ecuación 4)}$$

Donde $\mu \begin{cases} \lambda \leq 75 \rightarrow \mu = 1 \\ 75 < \lambda \leq 150 \rightarrow \mu = 2 - \dfrac{\lambda}{75} \\ \lambda > 150 \rightarrow \mu = 0 \end{cases}$

Siendo $\lambda = \dfrac{L_k}{i_0}$ donde L_k es la longitud de pandeo del soporte completo e $i_0 = \sqrt{\dfrac{0.5 \cdot I_1}{A_{ch}}}$
siendo I_1 el valor de I_{eff} cuando $\mu = 1$

Por otro lado, la rigidez a cortante se calcula a partir de la ecuación 5

$$S_v = \frac{24 \cdot E \cdot I_{ch}}{a^2 \cdot \left[1 + \dfrac{2 \cdot I_{ch}}{n \cdot I_b} \cdot \dfrac{h_0}{a}\right]} \leq \frac{2\pi \cdot E \cdot I_{ch}}{a^2} \quad \text{(ecuación 5)}$$

Se va a comprobar el cordón formado por los dos angulares de la figura 3, respecto al eje local z.

Siendo el área del cordón igual a dos veces el área de un angular, y la inercia respecto el eje z igual al doble de la inercia de uno de los angulares

$A_{ch}=2 \cdot 2270 = 4540\ mm^2$

$I_{ch} = 2 \cdot 2.07 \cdot 10^6 = 4.14 \cdot 10^6\ mm^4$

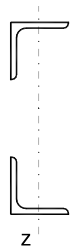


Figura 3.

Sustituyendo en la ecuación 4, considerando $\mu = 1$, se obtiene la inercia I_1

$$I_1 = 0{,}5 \cdot 316^2 \cdot 4540 + 2 \cdot 1 \cdot 4.14 \cdot 10^6 = 234.953.120\ mm^4$$

$$i_0 = \sqrt{\frac{0.5 \cdot 234.953.120}{4540}} = 160\ mm$$

$$\lambda = \frac{3000}{160} = 18.7 < 75 \rightarrow I_{eff} = I_1 = 234.953.120\ mm^4$$

Una vez calculada la inercia eficaz equivalente se puede obtener el axil crítico sustituyendo en la ecuación 3.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 210.000 \cdot 234.953.120}{3000^2} = 54.107.534\ N$$

Y la rigidez a cortante sustituyendo en la ecuación 5 sabiendo que el momento de inercia de la presilla, respecto de su propio plano es igual a

$$I_b = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{12 \cdot 200^3}{12} = 8 \cdot 10^6\ mm^4$$

$$s_v = \frac{24 \cdot 210.000 \cdot 4.14 \cdot 10^6}{536^2 \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot 4.14 \cdot 10^6}{2 \cdot 8 \cdot 10^6} \cdot \frac{316}{536}\right]} = 55.649.316\ N$$

$$pero\, s_v \leq \frac{2\pi \cdot 210.000 \cdot 4.14 \cdot 10^6}{536^2} = 19.013.843\ N$$

Por tanto, Sv =19.013.843 N.

Sustituyendo en la ecuación 2 todos los valores calculados:

$$M_{Ed} = 1000 \cdot 10^3 \cdot \left[\frac{5.6 \cdot 10^6}{1000 \cdot 10^3} + \frac{3000}{500}\right] \cdot \frac{1}{1 - \frac{1000 \cdot 10^3}{54.107.534} - \frac{1000 \cdot 10^3}{19.013.843}} =$$

$$= 12.481.600\ N \cdot mm$$

Por otro lado, el axil que hay que considerar en el cordón, se obtiene al sustituir en la ecuación 1 el valor de M_{Ed} y la I_{eff}:

$$N_{ch,Ed} = 0,5 \cdot \left[1000 \cdot 10^3 + \frac{12.481.600 \cdot 316 \cdot 4540}{234.953.120}\right] = 538.106\ N$$

Una vez obtenido el axil en el cordón, se calcula el momento flector a partir del esfuerzo cortante considerando la expresión de la figura 2

$$M_{ch,Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot a}{4} = \frac{7500 \cdot 536}{4} = 1.005.000\ N \cdot mm$$

Obtenidas las solicitaciones sobre cada uno de los cordones, se puede proceder a la comprobación del mismo:

El cordón se calcula en régimen elástico, teniendo en cuenta que está solicitado a flexocompresion con un $M_{z,Ed.}$ La condición de resistencia es la de la ecuación 6

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{el,z,Rd}} \leq 1 \quad \text{(ecuación 6)}$$

Sustituyendo y operando $\frac{538.106}{4540 \cdot \frac{275}{1.05}} + \frac{1.005.000}{\frac{4.14 \cdot 10^6}{83} \cdot \frac{275}{1.05}} = 0.45 + 0.07 = 0.52 < 1$

Por tanto, el cordón formado por los dos angulares de la figura 2 cumple a resistencia.

La condición de pandeo perpendicular al eje local z se expresa con la ecuación 7

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{pl,Rd}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Ed}}{M_{el,z,Rd}} \leq 1 \quad \text{(ecuación 7)}$$

Siendo $k_z = 1 - \dfrac{\mu_z \cdot N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}}$ *donde* $\mu_z = \bar{\lambda}_z \cdot (2 \cdot \beta_{Mz} - 4) \leq 0.9$

El valor del coeficiente β_{Mz} se adopta igual a 1.3, tanto para el caso de los cordones de soportes unidos con presillas como en el caso de cordones con enlaces en celosía.

Se calcula $k_z = 1 - \dfrac{\mu_z \cdot N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}}$ *donde* $\mu_z = \bar{\lambda}_z \cdot (2 \cdot \beta_{Mz} - 4) \leq 0.9$

En cuanto a la esbeltez y la esbeltez reducida

$$\lambda_z = \frac{L_{kz}}{i_z} = \frac{536}{30.2} = 17.74 \quad siendo\ \bar{\lambda}_z = \frac{\lambda}{\lambda_R} = \frac{17.74}{86.8} = 0.2 \xrightarrow{curva\ c} \chi_z = 1$$

Por tanto $\mu_z = 0.2 \cdot (2 \cdot 1.3 - 4) = -0.28 \leq 0.9$

Sustituyendo en el coeficiente amplificador, kz

$$k_z = 1 + \frac{0.28 \cdot 538.106}{1 \cdot 1.189.047} = 1.12$$

Por lo que la condición de pandeo queda

$$\frac{538.106}{1 \cdot 1.189.047} + \frac{1.12 \cdot 1.005.000}{13.063.683} = 0.45 + 0.086 = 0.536 < 1$$

Por lo que se verifica que el cordón también cumple a pandeo.

4.3 Comprobación de las presillas

La presilla se encuentra solicitada a cortante y flexión, tal y como se muestra en la figura 2, siendo las solicitaciones sobre la misma las siguientes:

$$V_p = \frac{V_{Ed} \cdot a}{h_0} = \frac{7500 \cdot 536}{316} = 12.721 N$$

$$M_p = \frac{V_{Ed} \cdot a}{2} = \frac{7500 \cdot 536}{2} = 2.010.000 N \cdot m$$

La condición de cortante es la de la ecuación 8

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} = A_p \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \quad \text{(ecuación 8)}$$

Sustituyendo el valor del área de la presilla $V_{pl,Rd} = 12 \cdot 200 \cdot \frac{275/1.05}{\sqrt{3}} = 362.905\, N$

como $V_{Ed} = 12.721 N \leq V_{pl,Rd}$ cumple a cortante

La condición a flexión es la de la ecuación 9

$$M_{Ed} \leq M_{el,Rd} = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot f_{yd} \quad \text{(ecuación 9)}$$

Sustituyendo las dimensiones de la presilla

$$M_{el,Rd} = \frac{12 \cdot 200^2}{6} \cdot \frac{275}{1.05} = 20.952.380\, N \cdot mm$$

Como $M_{Ed} = 2.010.000 N \cdot mm \leq M_{el,Rd}$ cumple sobradamente a flexión.

4.4 Comprobación de las soldaduras

El espesor de garganta de la soldadura se calcula teniendo en cuenta que las dos chapas a unir tienen un espesor de 12 mm

$a \leq 0.7 \cdot e_{\min} = 0.7 \cdot 12 = 8.4$ se adopta un espesor de garganta de 8 mm

La soldadura está solicitada a flexión y cortante.

La flexión genera tensiones normales y el cortante produce tensiones tangenciales según las ecuaciones 10 y 11

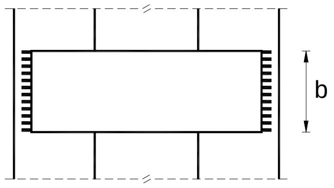


Figura 4.

$$\sigma = \frac{M_p}{W_w} = \frac{M_p}{\frac{a \cdot L_w^2}{6}} \quad \text{(ecuación 10)}$$

$$\tau = \frac{V_p}{A_w} = \frac{M_p}{a \cdot L_w} \quad \text{(ecuación 11)}$$

Sustituyendo y operando:

$$\sigma = \frac{2.010.000}{\frac{8 \cdot 200^2}{6}} = 37.68 \frac{N}{mm^2} \qquad \text{y} \qquad \tau = \frac{12.721}{8 \cdot 200} = 7.95 \frac{N}{mm^2}$$

Siendo la tensión de comparación

$$\sigma_{comp} = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} = \sqrt{37.68^2 + 7.95^2} = 38.50 \leq f_{w,Rd} = 222.7 \quad \text{para S 275}$$

Por tanto, la soldadura también cumple.

5 Conclusión

En este documento se ha comprobado el refuerzo de un soporte de hormigón armado mediante unos angulares de acero unidos con presillas formado un soporte empresillado siguiendo las recomendaciones del Eurocódigo 3.

Las comprobaciones a realizar no son difíciles, aunque sí que resulta un poco engorroso la obtención de las solicitaciones en los cordones y la posterior comprobación.

Lamentablemente, no es habitual que los programas de cálculo de estructuras incorporen entre sus funcionalidades este cálculo, de modo que se debe realizar un cálculo a mano o con ayuda de una hoja de cálculo que simplifique la parte de los cálculos.

6 Ejercicio propuesto

Se pide comprobar si el soporte diseñado resistiría un axil N_{Ed} de 2000 kN en lugar de los 1000kN para los que se ha sido diseñado.

REFERENCIAS

UNE EU 1993- 1-1 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios. Publicado por AENOR

Monfort Lleonart. Estructuras Metálicas para edificación según los criterios del Eurocódigo 3. Editorial Universitat Politècnica de València

Respuesta al ejercicio propuesto:

Teniendo en cuenta que tanto el valor del axil crítico N_{cr} como el de la rigidez a cortante S_v dependen del diseño del soporte, y por tanto sus valores se mantienen igual, es suficiente con calcular los valores de M_{Ed} y $N_{ch,Ed}$ sustituyendo el nuevo valor del axil en las ecuaciones 2 y 1 respectivamente, siendo:

$$M_{Ed} = 2000 \cdot 10^3 \cdot \left[\frac{5.6 \cdot 10^6}{2000 \cdot 10^3} + \frac{3000}{500} \right] \cdot \frac{1}{1 - \frac{2000 \cdot 10^3}{54.107.534} - \frac{2000 \cdot 10^3}{19.013.843}} =$$

$$= 39.167.689\ N \cdot mm$$

Por tanto $$N_{ch,Ed} = 0,5 \cdot \left[2000 \cdot 10^3 + \frac{39.167.689 \cdot 316 \cdot 4540}{234.953.120} \right] = 1.119.580\ N$$

Sustituyendo en la condición de resistencia, en la que sólo cambia el valor de $N_{ch,Ed}$, se observa que el cordón no la cumple, al superar el valor de 1.

$$\frac{1.119.580}{4540 \cdot \frac{275}{1.05}} + \frac{1.005.000}{\frac{4.14 \cdot 10^6}{83} \cdot \frac{275}{1.05}} = 0.94 + 0.07 = 1.01 > 1$$