

## Estructuras de acero: Problemas Basas

Se pretende calcular la placa de anclaje de un pilar HEB 200 con las siguientes solicitaciones en su base:  $N_{Ed}=124,14$  kN,  $V_{Ed}=44,85$  kN y  $M_{Ed,y}=92,60$  kN·m. El acero empleado es S275, mientras que el hormigón presenta una resistencia característica  $f_{ck}$  de 30 MPa. Los pernos de anclaje serán de acero B500S, con  $f_{yk}=500$  N/mm<sup>2</sup>, y las dimensiones de la zapata:  $B=1000$  mm,  $L=1500$  mm,  $h=1000$  mm.

### Predimensionado

Si se recurre al ábaco de Cudós<sup>1</sup>, se elige una placa de dimensiones de 700 mm x 450 mm.

Como espesor de placa se cogerá el máximo que asegure la soldabilidad<sup>2</sup>, que vendrá limitada fundamentalmente por el espesor del alma del perfil.

	Máximo	Mínimo
Alma: 9,0 mm	6,0	3,5
Ala: 15,0 mm	10,0	5,0
Placa: 18 mm	12,0	5,5
Placa: 20 mm	14,0	6,0

Para asegurar la soldabilidad entre el perfil del pilar y la placa, el intervalo de soldabilidad resultante deberá estar comprendido entre un valor máximo de garganta de 6,0 y un valor mínimo de 5,0 mm. Si se elige una placa de espesor 18 mm el intervalo de soldabilidad es 6,0-5,5 mm. Si se adopta una placa de espesor 20 mm, este intervalo se reduce a 6,0-6,0 mm.

En principio se escoge la placa con el mayor espesor posible para aumentar su rigidez. En este caso  $e=20$  mm.

### Resistencia del hormigón<sup>3</sup>

$$a_r = \frac{L - a}{2} = \frac{1500 - 700}{2} = 400 \text{ mm}$$

<sup>1</sup> Anejo 21 del Formulario de Estructura Metálica.

<sup>2</sup> Apartado 4 del Anejo 19 del Formulario de Estructura Metálica.

<sup>3</sup> Apartado 2 del Anejo 19 del Formulario de Estructura Metálica.

$$b_r = \frac{B-b}{2} = \frac{1000-450}{2} = 275 \text{ mm}$$

Para el cálculo del área portante equivalente, se tiene que  $a_1$  y  $b_1$  son los valores mínimos de:

$a_1 = a + 2 \cdot a_r = 700 + 2 \cdot 400 = 1500 \text{ mm}$ $a_1 = 5 \cdot a = 5 \cdot 700 = 3500 \text{ mm}$ $a_1 = a + h = 700 + 1000 = 1700 \text{ mm}$ $a_1 = 5 \cdot b_1 = 5 \cdot 1000 = 5000 \text{ mm}$	$a_1 = 1500 \text{ mm}$
$b_1 = b + 2 \cdot b_r = 450 + 2 \cdot 275 = 1000 \text{ mm}$ $b_1 = 5 \cdot b = 5 \cdot 450 = 2250 \text{ mm}$ $b_1 = b + h = 450 + 1000 = 1450 \text{ mm}$ $b_1 = 5 \cdot a_1 = 5 \cdot 1500 = 7500 \text{ mm}$	$b_1 = 1000 \text{ mm}$

Ya se puede calcular el valor de  $k_j$ :

$$k_j = \sqrt{\frac{a_1 \cdot b_1}{a \cdot b}} = \sqrt{\frac{1500 \cdot 1000}{700 \cdot 450}} = 2,18$$

La resistencia portante de la superficie de asiento vale:

$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{ck} = \frac{2}{3} \cdot 2,18 \cdot 30 = 43,6 \text{ N/mm}^2$$

Se ha de cumplir que:

$$f_{jd} \leq 3,3 \cdot f_{cd} = 3,3 \cdot \frac{30}{1,5} = 66 \text{ N/mm}^2, \text{ por lo que } f_{jd} = 43,6 \text{ N/mm}^2$$

#### Análisis de las sollicitaciones<sup>4</sup>

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{92,60}{124,14} = 0,75 \text{ m} = 750 \text{ mm}$$

$$\frac{a}{6} = \frac{700}{6} = 116,7 \text{ mm}$$

<sup>4</sup> Apartado 3 del Anejo 19 del Formulario de Estructura Metálica.

Por tanto,  $e > \frac{a}{6}$ , lo que se corresponde con un modelo triangular de tensiones. Además, al ser  $e > 0,75 \cdot a$  se puede emplear el modelo simplificado para gran excentricidad.

### Modelo simplificado para gran excentricidad<sup>5</sup>

Como práctica constructiva se emplea una distancia  $d$  del perno al borde de la placa igual al 10-15 % de la dimensión longitudinal de la basa. En este caso se adopta una distancia  $d=75$  mm.

$$\sigma_b = \frac{4 \cdot [M^* + N^* \cdot (0,5 \cdot a - d)]}{a \cdot b \cdot (0,875 \cdot a - d)} = \frac{4 \cdot [92,60 \cdot 10^6 + 124140 \cdot (0,5 \cdot 700 - 75)]}{700 \cdot 450 \cdot (0,875 \cdot 700 - 75)} = 2,99 \text{ N/mm}^2$$

$$T^* = -N^* + \frac{M^* + N^* \cdot (0,5 \cdot a - d)}{0,875 \cdot a - d}$$

$$T^* = -124140 + \frac{92,60 \cdot 10^6 + 124140 \cdot (0,5 \cdot 700 - 75)}{0,875 \cdot 700 - 75} = 111653 \text{ N}$$

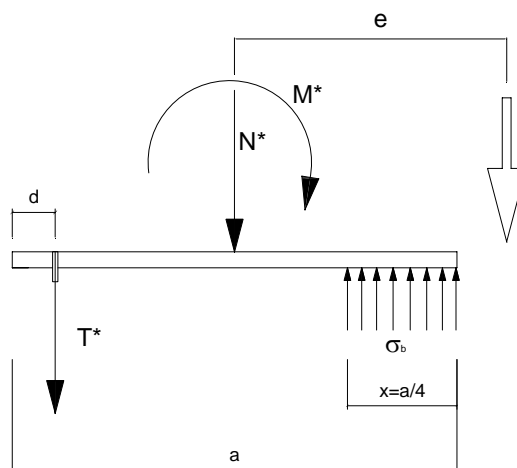


Figura 1. Modelo simplificado de distribución de tensiones con gran excentricidad

### Comprobación del espesor de la placa

El momento flector de la placa máximo por unidad de longitud  $M_{Ed}$  es:

$$M_{Ed} = \frac{\sigma_b \cdot a}{4} \cdot \left( \frac{3 \cdot a}{8} - \frac{h}{2} \right) = \frac{2,99 \cdot 700}{4} \cdot \left( \frac{3 \cdot 700}{8} - \frac{200}{2} \right) = 85028 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

<sup>5</sup> Apartado 3.3 del Anejo 19 del Formulario de Estructura Metálica.

siendo  $h$  la dimensión del pilar en la dirección de la longitud  $a$  de la placa. El momento resistente por unidad de longitud en la línea de empotramiento de la basa vale:

$$M_{p,Rd} = \frac{e^2 \cdot f_{yd}}{4} = \frac{20^2 \cdot 265}{4 \cdot 1,05} = 25238 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

Como no se cumple la desigualdad  $M_{p,Rd} > M_{Ed}$ , se opta por colocar cartelas de rigidez.

### Cálculo de los pernos de anclaje<sup>6</sup>

En principio se intenta colocar únicamente dos pernos de anclaje en cada lado de la placa. Por ello, se predimensiona con el valor de la tracción obtenido y con la cuantía geométrica mínima, considerando las dimensiones de la placa como las de una viga, y los pernos como la armadura de ésta.

El diámetro de los pernos será:

$$\phi \geq \sqrt{\frac{4 \cdot T^*}{n_1 \cdot \pi \cdot f_{yd}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 111653}{2 \cdot \pi \cdot 500}} \cdot 1,15 = 12,8 \text{ mm}$$

Por cuantía geométrica mínima, el área de los pernos debe ser el 2,8‰ de la sección total de hormigón (acero B500S), por tanto:

$$A_s \geq \frac{2,8}{1000} \cdot a \cdot b = \frac{2,8}{1000} \cdot 700 \cdot 450 = 882 \text{ mm}^2$$

Atendiendo a ambos valores, se adoptan  $3\phi 20$ , cuya área es  $942 \text{ mm}^2$ . Además, como la separación entre pernos no puede superar los 300 mm, se opta por disponer dos pernos en la sección central.

### Comprobación a tracción y cortante

Suponiendo que se emplea mortero de nivelación,  $C_{f,d}=0,30$ .

La resistencia de cálculo por rozamiento entre la placa base y el mortero de nivelación es:

$$F_{f,Rd} = C_{f,d} \cdot N_{c,Sd} = 0,3 \cdot 124140 = 37242 \text{ N}$$

La resistencia a cortante de un perno de anclaje será el menor de los siguientes valores:

<sup>6</sup> Apartado 3.3 del Anejo 19 del Formulario de Estructura Metálica.

- La resistencia a cortante del perno:

$$A_s = \frac{\pi \cdot 20^2}{4} = 314,16 \text{ mm}^2$$

$$F_{vb,Rd} = n \cdot \frac{0,5 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 2 \cdot \frac{0,5 \cdot 550 \cdot 314,16}{1,25} = 138230 \text{ N}$$

- El valor:

$$F_{vb,Rd} = \frac{\alpha \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$\alpha_b = 0,44 - 0,0003 \cdot f_{yb} = 0,44 - 0,0003 \cdot 500 = 0,29$$

$$F_{vb,Rd} = \frac{\alpha \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,29 \cdot 550 \cdot 314,16}{1,25} = 40087 \text{ N}$$

Por tanto, este último valor es la resistencia a cortante.

La resistencia de cálculo a cortante de los pernos es:

$$F_{v,Rd} = F_{f,Rd} + n \cdot F_{vb,Rd}$$

$$F_{v,Rd} = 37242 + 8 \cdot 40087 = 357938 \text{ N}$$

Se calcula la resistencia a tracción de los tres pernos de anclaje:

$$F_{t,Rd} = \frac{3 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{3 \cdot 314,16 \cdot 550}{1,25} = 414691 \text{ N}$$

La comprobación a tracción y cortante combinados es:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$F_{v,Ed} = V_{Ed} = 44,85 \text{ kN}$$

$$F_{t,Ed} = T^* = 111653 \text{ N}$$

Por tanto,

$$\frac{44850}{357938} + \frac{111653}{1,4 \cdot 414691} = 0,32 < 1$$

### Cálculo de la longitud de anclaje

$$l_{bl} = m \cdot \phi^2 \leq \frac{f_{yk}}{20} \cdot \phi$$

$$1,3 \cdot 20^2 = 520 \text{ mm}$$

$$\frac{500}{20} \cdot 20 = 500 \text{ mm}$$

$$l_{bl, \phi 20} = 520 \text{ mm}$$

$$l_{b \text{ neta}} = l_b \cdot \beta \cdot \frac{A_{s, \text{nec}}}{A_{s, \text{real}}}$$

$$A_{s, \text{nec}} = \frac{T^*}{f_{yd}} = \frac{111653}{\frac{500}{1,15}} = 256,8 \text{ mm}^2$$

$$A_{s, \text{real}} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot 20^2}{4} = 942,5 \text{ mm}^2$$

$$l_{b \text{ neta}} = l_b \cdot \beta \cdot \frac{A_s}{A_{s, \text{real}}} = 52,0 \cdot 1 \cdot \frac{256,8}{942,5} = 14,2 \text{ cm}$$

Se proyectan los pernos con terminación en patilla, por lo que aún podría reducirse este valor aún más ( $0,7 \cdot l_{b \text{ neta}}$ ). Sin embargo, se adopta emplear una longitud de anclaje de 20 cm.

### **Cálculo de las cartelas de rigidez<sup>7</sup>**

$$\ell = \frac{b - c_2}{2} = \frac{450 - 200}{2} = 125 \text{ mm}$$

$$M = \frac{\sigma_p \cdot \ell^2}{2} = \frac{2,99 \cdot 125^2}{2} = 23359,4 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$M' = \frac{\sigma_p \cdot b}{8} \cdot (b - 4 \cdot \ell) = \frac{2,99 \cdot 450}{8} \cdot (450 - 4 \cdot 125) = -8409,4 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

<sup>7</sup> Apartado 3.3.5 del Anejo 19 del Formulario de Estructura Metálica.

Sea  $e$  el espesor de la placa. El nuevo espesor de la placa base se obtiene a partir de:

$$e = \sqrt{\frac{6 \cdot M^*}{f_{yd}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 23359,4}{\frac{265}{1,05}}} = 23,6 \text{ mm}$$

Este valor supera el máximo espesor de chapa soldable con el ala y alma del HEB 200. Como solución se emplearán dos chapas de 12 mm, teniendo la de debajo unas dimensiones de 720 x 470 mm, para facilitar la soldadura entre la placa superior e inferior.

Como  $\frac{a}{4} = \frac{700}{4} = 175 \text{ mm}$  es menor que  $\frac{a - c_1}{2} = \frac{700 - 200}{2} = 250$ , el valor de  $R$  viene dado por:

$$R = \frac{\sigma_p \cdot b \cdot a}{8} = \frac{2,99 \cdot 450 \cdot 700}{8} = 117731,3 \text{ N}$$

El espesor de las cartelas  $e_1$  será:

$$e_1 = \frac{2 \cdot R}{f_{ud} \cdot (a - c_1)} = \frac{2 \cdot 117731,3}{410 / 1,25 \cdot (700 - 200)} = 1,21 \text{ mm}$$

Se adoptan unas cartelas de 8 mm de espesor.

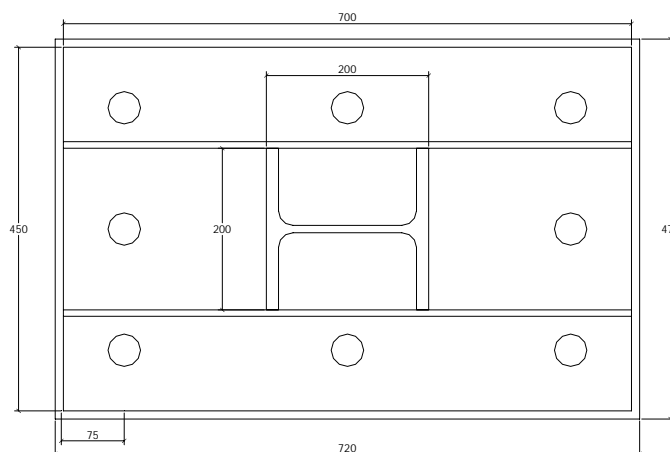


Figura 2. Disposición final adoptada.

## Soldabilidad

	Máximo	Mínimo
Alma: 9,0 mm	6,0	3,5
Ala: 15,0 mm	10,0	5,0
Cartela: 8 mm	5,5	3,0
Placa superior: 12 mm	8,0	4,0
Placa inferior: 12 mm	8,0	4,0

Intervalos de soldabilidad:

- Alma + Ala + Cartela + Placa superior: 5,5 – 5,0
- Placa superior + Placa inferior: 8,0 – 4,0

Por tanto, la solución propuesta es soldable.