

## Ejemplo práctico de dimensionado de una unión con tornillos pretensados

<b>Apellidos, nombre</b>	Guardiola Villora, Arianna <sup>1</sup> (aguardio@mes.upv.es) Ros Bonanad, Davinia <sup>2</sup> (darobo@mes.upv.es)
<b>Departamento</b>	<sup>1</sup> Departamento de Mecánica de Medios continuos y Teoría de Estructuras
<b>Centro</b>	Universitat Politècnica de València

## Resumen de las ideas clave

En este artículo se presenta un ejemplo práctico de diseño y cálculo de una unión entre una viga pasante y un soporte por medio de tornillos pretensados, tal y como se muestra en el esquema de la figura 1.

Para ello, se tienen en cuenta los criterios del Documento Básico Seguridad Estructural, Acero del Código Técnico de la Edificación. (CTE DB-SE-A), y se considera que los perfiles de la estructura son de acero S 275.

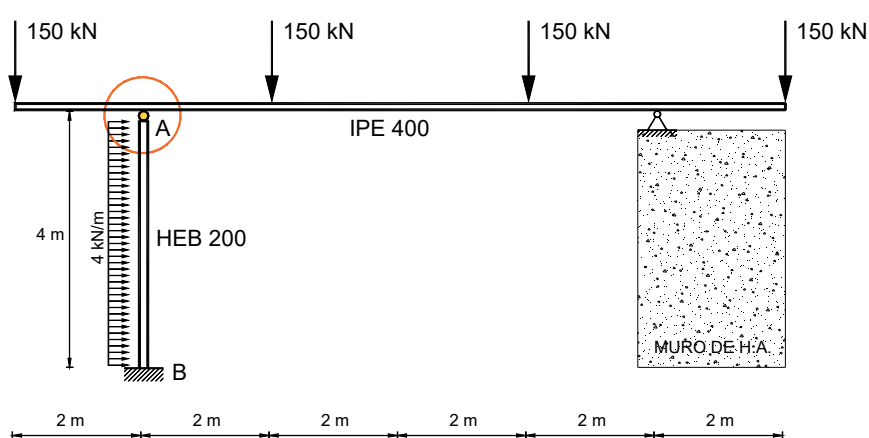


Imagen 1. Esquema del pórtico

## Objetivos

Una vez que el estudiantado lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Determinar solicitaciones que actúan en el nudo A causadas por la combinación de Hipótesis de Carga de la imagen 1.
- Analizar los valores de las solicitaciones calculadas, reconociendo aquellas que se deben considerar en el cálculo y las que se pueden despreciar.
- Calcular los valores mínimos que establece la normativa de referencia (DB-SE-A del CTE)
- Realizar un prediseño de la unión, estimando el número de tornillos pretensados a disponer considerando distintos diámetros y las dos posibles calidades de acero.
- Realizar las comprobaciones indicadas en el DB-SE-A del CTE
- Dibujar el detalle final de la unión calculada.

## Introducción

El DB-SE-A del CTE indica las condiciones de cumplimiento que deben verificar, tanto los tornillos pretensados como las chapas implicadas en la unión.

Estas condiciones dependen del diseño previsto para la unión a comprobar, y del mecanismo resistente de los tornillos dispuestos.

La norma proporciona las fórmulas y expresiones matemáticas a verificar, una vez calculados los esfuerzos que solicitan a la unión.

En este artículo docente se consideran las condiciones del capítulo 8 dedicado a las uniones del DB-SE-A.

## Desarrollo

### 1.1. Prediseño de la unión atornillada

Teniendo en cuenta las dimensiones de los perfiles a unir (IPE 400 y HEB 200) indicadas en la imagen 1, y considerando que la viga es pasante sobre el soporte, el único diseño posible es el de la imagen 2, donde se indica que es necesario disponer una chapa soldada en el extremo del soporte (chapa soldada en taller) para poder atornillar el ala de la viga con el soporte.

Tal y como se puede ver en el prediseño de la unión, la chapa se adopta del mismo tamaño que el soporte (200 x 200), y se elige de 12 mm de espesor<sup>1</sup>.

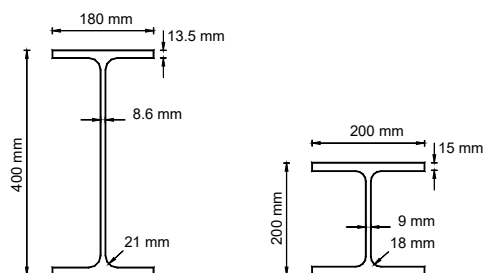


Imagen 2. Dimensiones de los perfiles

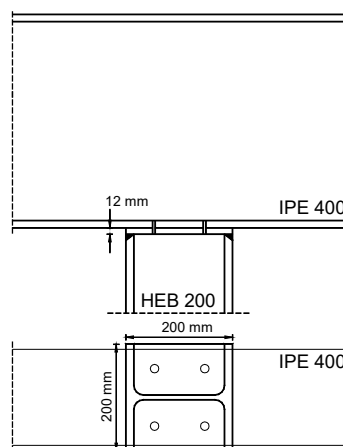


Imagen 3. Prediseño de la unión

### 1.2. Cálculo de esfuerzos en la unión

Teniendo en cuenta el esquema de la estructura, con la viga pasante sobre el soporte, las cargas verticales se transmiten directamente entre las chapas de los perfiles unidos

<sup>1</sup> En principio es recomendable disponer una chapa de espesor igual o superior al ala de la viga que se va a unir, en este caso, de 13.5mm, no obstante, este ejercicio se va a resolver con una chapa de 12mm de espesor.

y no influyen en el cálculo. Respecto a las acciones horizontales, el soporte AB se modeliza como empotrado-apoyado, siendo las reacciones en los apoyos las calculadas en la imagen 4.

$$R_{HA} = \frac{3}{8} \cdot q \cdot L = \frac{3}{8} \cdot 4 \cdot 4 = 6 \text{ kN}$$

$$R_{HB} = \frac{5}{8} \cdot q \cdot L = \frac{5}{8} \cdot 4 \cdot 4 = 10 \text{ kN}$$

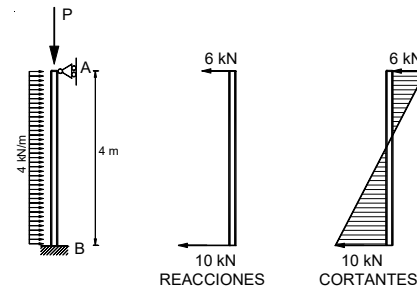


Imagen 4. Reacciones en el soporte

Por tanto, las acciones que actúan en la unión son las indicadas en el esquema de la imagen 5.

Por otro lado, según establece el DB-SE-A, la unión debe diseñarse para la sollicitación real o al menos el 33% del cortante resistente plástico de la barra unida.

En este caso, la barra unida es el HEB200, por tanto, la unión deberá dimensionarse para transmitir al menos:

$$0.33 \cdot V_{pl,Rd,HEB200} = 0.33 \cdot 376.514 = 124.250 \text{ N}$$

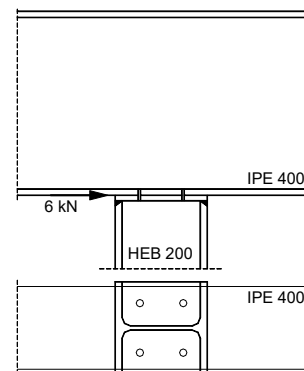


Imagen 5. Acciones en la unión

### 1.3. Condiciones de resistencia

Se trata de una unión resistente por rozamiento (tornillos pretensados). Para estados límite últimos se deben cumplir dos condiciones:

Condición a deslizamiento:  $F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$

Condición a aplastamiento:  $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$

#### a) Resistencia a deslizamiento

La resistencia a deslizamiento por cada tornillo  $F_{s,Rd}$ , se calcula con la ecuación 1:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,Cd}$$

Ecuación 1. Resistencia a deslizamiento de los tornillos pretensados

Donde:

$F_{s,Rd}$  es el esfuerzo de pretensado, que depende del diámetro y calidad del tornillo.

$k_s$  es un coeficiente de valor 1 para taladros con holguras nominales

$n$  es el número de chapas en contacto

$\mu$  es el coeficiente de rozamiento que depende del tratamiento entre las chapas unidas

para taladros normales

$\gamma_{M3} = 1,25$  es el coeficiente parcial de seguridad

Para calcular la resistencia es necesario, por tanto, determinar el diámetro y calidad de acero de los tornillos.

Para facilitar esta operación, y permitir el cálculo de las distintas opciones que se pueden utilizar, se dispone de las tablas del anexo.

De este modo, se puede predimensionar el número, diámetro y calidad de los tornillos a utilizar.

Teniendo en cuenta que el esfuerzo a transmitir es de  $124.250 N$ , se hace la siguiente aproximación:

1. Si se utilizan sólo dos tornillos, cada uno de ellos debe la mitad del esfuerzo, igual a  $62.125 N$
2. Si se disponen 4 tornillos, cada uno de ellos debe transmitir al menos  $31.063 N$

Recurriendo a las tablas de resistencia incluidas en el anexo, y teniendo en cuenta que sólo hay una superficie de contacto, la unión se puede resolver con las siguientes opciones:

- 2 tornillos M 24 de acero 8.8 y clase de superficie B
- 4 tornillos M 16 de acero 8.8 y clase de superficie A
- 4 tornillos M 20 de acero 8.8 y clase de superficie C
- 2 tornillos M 20 de acero 10.9 y clase de superficie A
- 4 tornillos M 16 de acero 10.9 y clase de superficie B

Se opta por la segunda opción (4 M 16 8.8 superficie A) siendo la resistencia de uno de los tornillos igual a  $35.300 N$  (ver tablas del anexo)

Por tanto,  $F_{s,Rd} = 4 \cdot 35.200 = 140.800 N$  para 4 M 16 8.8 superficie A

Siendo  $F_{v,Ed} = 124.250 < F_{s,Rd} = 4 \cdot 35.200 = 140.800 N$  se cumple la condición de resistencia a deslizamiento.

## b) Resistencia a aplastamiento

La resistencia a aplastamiento se calcula con la ecuación 2

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad \text{Ecuación 2. Condición resistencia a aplastamiento}$$

Donde

$f_u$  es el límite plástico del acero de las chapas. Para S 275,  $f_u = 410 \text{ N/mm}^2$

$d$  es el diámetro de los tornillos. En este caso  $16 \text{ mm}$

$t$  es el espesor mínimo a aplastamiento, que, en el caso de la unión entre dos chapas, es el menor espesor de las chapas unidas.

$\alpha$  es un coeficiente cuyo valor depende de la disposición de los taladros en las chapas (ecuación 3). Por tanto, es necesario profundizar en el diseño de la unión posicionando el eje de los taladros siguiendo las condiciones que establece la norma de referencia.

$$\alpha \leq \left\{ \frac{e_1}{3 \cdot d_0}; \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right\} \quad \text{Ecuación 3. Valor del coeficiente } \alpha$$

### Disposiciones geométricas:

Las distancias se calculan teniendo en cuenta los espesores de las chapas a unir y el diámetro del taladro.

Teniendo en cuenta que la holgura nominal es igual a 2 mm en el caso de los M16, el diámetro del taladro será igual a:  $d_0 = 16 + 2 = 18 \text{ mm}$ ,

Por otro lado, los espesores de las chapas unidas son  $e_p = 12 \text{ mm}$  y  $t_b = 13.5 \text{ mm}$ . Para las disposiciones geométricas se debe considerar el menor espesor de las dos chapas unidas.

- Distancia a los bordes de las chapas:

- A borde frontal: No tiene sentido calcular  $e_1$ , dado que de la chapa está rigidizada por el ala del soporte, y la viga es continua.

- A borde lateral:  $1,5 \cdot d_0 = 1,5 \cdot 18 = \underline{27} \text{ mm} \leq e_2 \leq \begin{cases} 40 + 4 \cdot t = \underline{88} \text{ mm} \\ 12 \cdot t = 144 \text{ mm} \\ 150 \text{ mm} \end{cases}$

- Distancia entre ejes de taladros:

- Dirección paralela al esfuerzo

$$2,2 \cdot d_0 = 2,2 \cdot 18 = \underline{39,6} \text{ mm} \leq p_1 \leq \begin{cases} 14 \cdot t = 14 \cdot 12 = \underline{168} \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

Además debe cumplir la limitación de articulación:  $p_1 \leq \frac{2}{3} \cdot 200 = 133 \text{ mm}$

- Direcció perpendicular al esforço. No se tiene en cuenta porque el alma del soporte rigidiza la chapa, y el alma de la viga su propia ala.

Finalmente, se debe comprobar que es posible atornillar la unió. Para ello, cualquier distancia del eje del tornillo a una superficie vertical deberá ser mayor que  $2 \cdot d = 32 \text{ mm}$

Teniendo en cuenta los valores límite calculados, se adaptan los siguientes valores:

$e_2 = 40 \text{ mm}$  para el ala de la viga, que corresponde a  $e_2 = 50 \text{ mm}$  para la chapa frontal soldada en el extremo del soporte.

$$p_1 = 90 \text{ mm}$$

Siendo la distancia del taladro a las chapas perpendiculares igual a 40 mm a las alas del soporte y 45.5 al alma del soporte y 45.9 al alma de la viga, tal y como se puede ver en el detalle de la imagen 6.

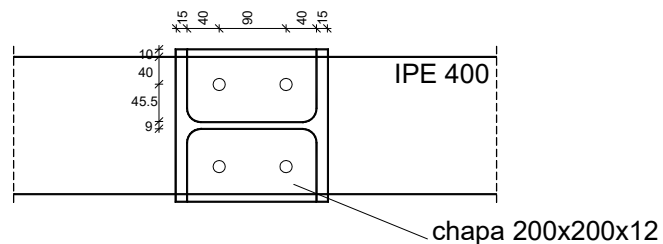


Imagen 6. Disposiciones de los taladros

Dispuestos los taladros, es posible calcular el valor del coeficiente  $\alpha$

$$\alpha \text{ el menor de } \left\{ \frac{e_1}{3 \cdot d_0}; \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right\}$$

$$\text{Sustituyendo: } \left\{ \frac{90}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 1,41; \frac{800}{410} = 1,95; 1 \right\}$$

Y por tanto, la resistencia a aplastamiento de cada uno de los cuatro tornillos es igual a:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 410 \cdot 16 \cdot 12}{1,25} = 157.440 \text{ N}$$

Siendo la resistencia de los 4 tornillos igual a  $F_{b,Rd \text{ UNION}} = 4 \cdot 157.440 \text{ N} = 629.760 \text{ N}$

Como:  $F_{V,Ed} = 124.250 \text{ N} < F_{b,Rd} = 629.760 \text{ N} \Rightarrow$  cumple a aplastamiento.

Por tanto, los tornillos dispuestos, con el tratamiento de chapas previsto (clase A) cumple las dos condiciones.

#### 1.4. Diseño final de la unión

Teniendo en cuenta las disposiciones calculadas en el apartado anterior, el diseño final de la unión es el de la imagen 7.

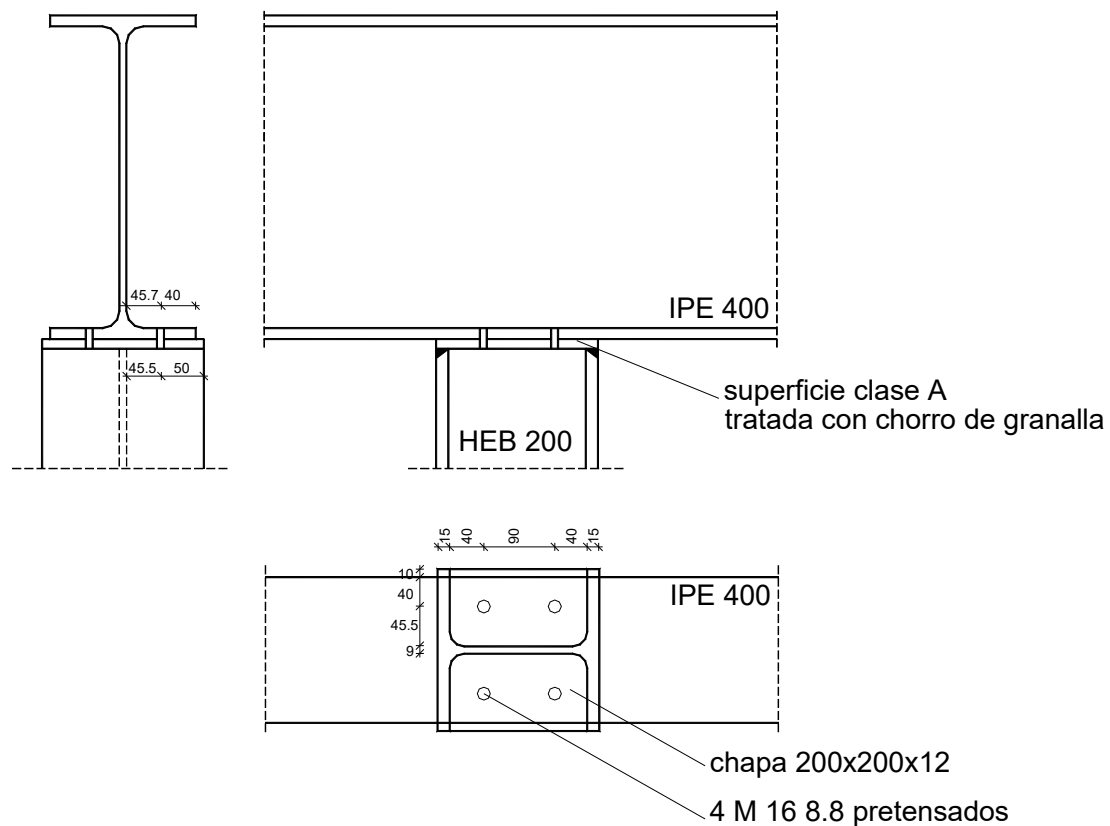


Imagen 7. Detalle final

#### Conclusiones

Calculadas las acciones que debe transmitir la unión A, se propone un diseño y se calculan los tornillos pretensados que pueden transmitir los esfuerzos obtenidos.

Se opta por una de las posibles disposiciones (4 tornillos pretensados M 16 de acero 8.8) y se comprueba que cumple la condición de resistencia a deslizamiento y de resistencia a aplastamiento.

Finalmente se dibuja el detalle de la unión, indicando la disposición de los taladros, así como toda la información necesaria para poder ejecutar el nudo diseñado.

## Cierre

En este documento se ha diseñado una unión entre una viga pasante y un soporte con tornillos pretensados.

Se propone una solución constructiva viable que cumple las condiciones de resistencia incluidas en la norma de referencia. No obstante, es importante señalar que hay otras soluciones posibles que también satisfacen los criterios de la norma, tal y como se ha indicado en el apartado de resistencia a deslizamiento.

Finalmente se dibuja el detalle constructivo calculado en este documento.

## Bibliografía

DB-SE-A. Documento Básico Seguridad Estructural Acero del Código Técnico de la Edificación. Accesible en <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-A.pdf>

## ANEXO

### RESISTENCIA a DESLIZAMIENTO

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,Cd}$$

#### TORNILLOS PRETENSADOS DE ACERO 8.8

UNA SUPERFICIE DE CONTACTO:  $n = 1$

taladros con holguras nominales

TORNILLOS			ACERO 8.8	Clase D	Clase C	Clase B	Clase A
	$d$ mm	$A_s$ mm <sup>2</sup>	$F_{p,Cd}$ N/mm <sup>2</sup>	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,5$
M 10	10	58	32 000 N	5 120 N	7 680 N	10 240 N	12 800 N
M 12	12	84,3	47 000 N	7 520 N	11 280 N	15 040 N	18 800 N
M 16	16	157	88 000 N	14 080 N	21 120 N	28 160 N	35 200 N
M 20	20	245	137 000 N	21 920 N	32 880 N	43 840 N	54 800 N
M 24	24	353	198 000 N	31 680 N	47 520 N	63 360 N	79 200 N

#### TORNILLOS PRETENSADOS ACERO 10.9

UNA SUPERFICIE DE CONTACTO:  $n = 1$

taladros con holguras nominales

TORNILLOS			ACERO 10.9	Clase D	Clase C	Clase B	Clase A
	$d$ mm	$A_s$ mm <sup>2</sup>	$F_{p,Cd}$ N/mm <sup>2</sup>	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,5$
M 10	10	58	40 000 N	6 400 N	9 600 N	12 800 N	16 000 N
M 12	12	84,3	59 000 N	9 440 N	14 160 N	18 880 N	23 600 N
M 16	16	157	110 000 N	17 600 N	26 400 N	35 200 N	44 000 N
M 20	20	245	172 000 N	27 520 N	41 280 N	55 040 N	68 800 N
M 24	24	353	247 000 N	39 520 N	59 280 N	79 040 N	98 800 N