

3. UNIONES ATORNILLADAS

3.1. COMPROBACIÓN DE LA UNIÓN

El estudio de una unión metálica cabe interpretarlo como el de una cadena en la que hay que verificar cada uno de sus eslabones o componentes (básicas). Por ejemplo, en la unión entre una viga y un pilar, estas componentes básicas son: Resistencia a cortante de alma del pilar, resistencia a compresión del alma del pilar, resistencia a tracción del alma del pilar, resistencia a flexión de las alas de un pilar, resistencia a flexión de la chapa frontal, resistencia a compresión del ala y alma de la viga, etc.

Es obvio que la ausencia o el fallo de un eslabón o componente básica de la cadena, invalida todo el sistema.

3.1.1. Modos de fallo

Se tiene que comprobar que ninguno de los elementos que conforman la unión, agota bajo las tensiones a las que se puede ver sometida la unión.

Según la forma en que trabaje la unión, puede fallar por diferentes modos:

- a) La unión podría fallar por agotamiento del material de las chapas a unir en las paredes del taladro efectuado para alojar el tornillo. La resistencia frente al aplastamiento se expresa en función de la tensión de rotura del acero de las chapas a unir y no de la tensión del límite elástico, debido a la existencia inevitable de valores altos en las deformaciones locales que hacen trabajar el material a tensiones más allá del límite elástico.
- b) También se tiene que comprobar frente a cortadura, que este esfuerzo se produce cuando, en el vástago, las chapas unidas tratan de deslizar una con respecto a la otra.
- c) En una unión atornillada con los tornillos trabajando normalmente a su eje (por cortadura y aplastamiento) es preciso comprobar las piezas a unir cuando están sometidas a tracción, ya que los taladros son un debilitamiento que, si es excesivo, puede llevar a la rotura de la pieza por desgarramiento.
- d) En las uniones donde existen esfuerzos de tracción en la dirección del eje del tornillo, se tiene que comprobar la resistencia del tornillo, que depende, como es lógico, de la resistencia de cálculo del tornillo y de su área.

- e) Si la unión trabaja a tracción y a cortante, es necesario comprobar que no falle bajo esta sollicitación combinada.
- f) En los tornillos de alta resistencia pretensados. Frente a cargas perpendiculares al eje de los tornillos la unión resiste mediante el rozamiento entre chapas favorecido por el esfuerzo de pretensado. Cuando la carga perpendicular alcanza el valor de la resistencia por rozamiento, la unión desliza hasta que el vástago del tornillo entra en contacto con las paredes del taladro. A partir de este momento, la parte de las fuerzas exteriores no absorbidas por el rozamiento deberán serlo por el tornillo de alta resistencia trabajando a cortadura y aplastamiento

3.1.2. Categorías de uniones atornilladas

En la EAE y el EC3 las uniones atornilladas se clasifican, en función de la manera de trabajar de los tornillos, en cinco categorías (en el CTE no se explicita esta clasificación). Cada una de estas categorías precisa de unas comprobaciones determinadas.

Si los tornillos están solicitados en dirección normal a su eje (cortante) tenemos:

- Categoría A: Trabajan a cortadura y aplastamiento. Para uniones de esta categoría se permiten tornillos de cualquier calidad, incluso de alta resistencia sin pretensar o pretensados pero sin controlar su par de apriete.
- Categoría B: Resistentes al deslizamiento en E.L.S. En esta categoría se utilizarán tornillos de alta resistencia pretensados con apretado controlado.
- Categoría C: resistentes al deslizamiento en E.L.U.

En el caso de tornillos solicitados según la dirección de su eje (tracción), tenemos:

- Categoría D: Uniones con tornillos sin pretensar. Para esta categoría se utilizarán tornillos ordinarios o de alta resistencia, aunque no se requiere pretensado.
- Categoría E: Uniones con tornillos pretensados de alta resistencia. Se utilizarán sólo tornillos de alta resistencia con apretado controlado.

| | Categoría | Comprobaciones |
|-------------------------------|--|--|
| Cortante | Categoría A (tornillos sin pretensar) | Resistencia a cortante $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ Res. al aplastamiento $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ |
| | Categoría B (pretensados ELS) | Res. a cortante $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ Res. al aplastamiento $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ Res. al deslizamiento $F_{v,Ed.ser} \leq F_{s,Rd.ser}$ |
| | Categoría C (pretensados ELU) | Res. a cortante $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ Res. al aplastamiento $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ Res. axial de la chapa de unión $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$ |
| Tracción | Categoría D (tornillos sin pretensar) | Res. a tracción $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ Res. a punzonamiento $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$ |
| | Categoría E (tornillos pretensados) | Res. a tracción $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ Res. a punzonamiento $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$ |
| En la EAE el sufijo Ed es Sd. | | |

Tabla 1 - Categorías de uniones atornilladas

3.1.3. Expresiones para el cálculo de resistencias

Tabla resumen de las expresiones para obtener las resistencias de cálculo.

| Resistencia a cortante |
|---|
| $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s \cdot n}{\gamma_{M2}}$ <p>donde: $\alpha_v = 0.5$ excepto para tornillos 4.6, 5.6 y 8.8; en la EAE $\alpha_v = \alpha$ y en el CTE siempre toma el valor 0.5 sin excepciones</p> <p>f_{ub} = resistencia a tracción del tornillo</p> <p>A_s = es el área resistente del vástago del tornillo, en el caso que ningún plano de corte pase por la zona roscada del tornillo se considera A (área del vástago del tornillo)</p> <p>n = número de planos de corte</p> <p>$\gamma_{M2} = 1.25$ (coeficiente parcial de seguridad)</p> |

| Resistencia a aplastamiento de la chapa |
|--|
| $F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$ <p>donde: $\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u} \text{ ó } 1.0\right)$; en la EAE y el CTE $\alpha_b = \alpha$</p> <p>$k_1 = \min\left(2.8 \frac{e_2}{3d_0} - 1.7; 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 \text{ ó } 2.5\right)$; en la EAE $k_1 = \beta$ y en el CTE siempre toma el valor de 2.5</p> <p>f_u = resistencia última del acero de la chapa d = diámetro del vástago del tornillo t = menor espesor de las chapas que se unen</p> |
| Resistencia al deslizamiento |
| $F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot F_{p,Cd}}{\gamma_{M3}}$ <p>donde: k_s = factor que depende del tipo de agujeros que se utilicen, si son estándar se toma igual a 1.0 n = número de posibles planos de desplazamiento μ = coeficiente de rozamiento, su valor oscila entre 0.5 y 0.2, en función del estado de las superficies de contacto $F_{p,Cd} = 0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M7}$ = fuerza de pretensado; en la EAE varía la notación, $F_{p,Cd} = \sum N_0$, y en el CTE se sustituye f_{ub} por $f_{yb} = f_{ub} / \gamma_{M7}$. γ_{M3} = coeficiente parcial de seguridad que toma el valor de 1.1 en general o 1.25 en uniones híbridas o en uniones sometidas a fatiga</p> |
| Resistencia a tracción |
| $F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ <p>donde: $k_2 = 0.9$ para tornillos sin cabeza avellanada</p> |
| Resistencia a punzonamiento |
| $B_{p,Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ <p>donde: d_m = el menor diámetro medio entre los círculos circunscrito e inscrito a la tuerca o a la cabeza t_p = espesor de la chapa</p> |

Tabla 2 - Expresiones para el cálculo de resistencias en uniones atornilladas

3.2. DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

| | EAE | DB SE-A | EC3 |
|---|--|---|--|
| DIST. MÍNIMA | | | |
| En la dirección de la fuerza | $e_1 \geq 1,2d_0$ se recomienda $e_2 \geq 2,0d_0$ | $e_1 \geq 1,2d_0$ | $e_1 \geq 1,2d_0$ |
| | $p_1 \geq 2,2d_0$ se recomienda $p_1 \geq 3,0d_0$ | $p_1 \geq 2,2d_0$ | $p_1 \geq 2,2d_0$ |
| En la dirección perpendicular a la fuerza | $e_2 \geq 1,2d_0$ se recomienda $e_2 \geq 1,5d_0$ | $e_2 \geq 1,5d_0$ | $e_2 \geq 1,2d_0$ |
| | $p_2 \geq 2,4d_0$ se recomienda $p_2 \geq 3,0d_0$ | $p_2 \geq 3,0d_0$ | $p_2 \geq 2,4d_0$ |
| DIST. MÁXIMA | | | |
| Al borde de la pieza e_1 y e_2 | $\begin{cases} 12t \text{ ó } 150mm \\ \leq 40mm + 4t \\ \text{intemperie} \end{cases}$ | $\begin{cases} \leq 40mm + 4t \\ 12t \text{ ó } 150mm \end{cases}$ | $\begin{cases} \leq 40mm + 4t \\ \text{(intemperie)} \\ 8t \text{ ó } 125mm (*) \end{cases}$ |
| Entre tornillos: en elementos a compresión (p_1 y p_2) | $\begin{cases} \leq 14t \\ \leq 200mm \end{cases}$ | | $\begin{cases} \leq 14t \\ \leq 200mm \text{ ó} \\ (*) \begin{cases} \leq 14t_{\min} \\ \leq 175mm \end{cases} \end{cases}$ |
| Entre tornillos: en elementos a tracción | p_{1e} y p_{2e} $\begin{cases} \leq 14t \\ \leq 200mm \end{cases}$ → filas exteriores p_{1i} y p_{2i} $\begin{cases} \leq 28t \\ \leq 400mm \end{cases}$ → filas interiores | | |
| Agujeros RASGADOS | Las distancias e_1 , e_2 , p_1 y p_2 se medirán desde los centros de los semicírculos extremos. | a) La distancia entre el eje de rasgado y cualquier borde no será inferior a $1,5d_0$ b) La distancia entre el centro del radio extremo al borde adyacente no será inferior a $1,5d_0$ | $e_3 \geq 1,5d_0$ $e_4 \geq 1,5d_0$ |
| Agujeros al TRESBOLILLO | En filas contiguas, los agujeros pueden estar dispuestos al tresbolillo. | | En el caso de agujeros al tresbolillo en uniones en tracción podrá reducirse p_2 hasta no menos de $1,2d_0$ siempre que la distancia entre agujeros L sea mayor a $2,4d_0$. |

(*) EN 10025-6:2004 Hot rolled products of structural steels. Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in quenched and tempered condition

Tabla 3 - Reglas generales de disposición de tornillos

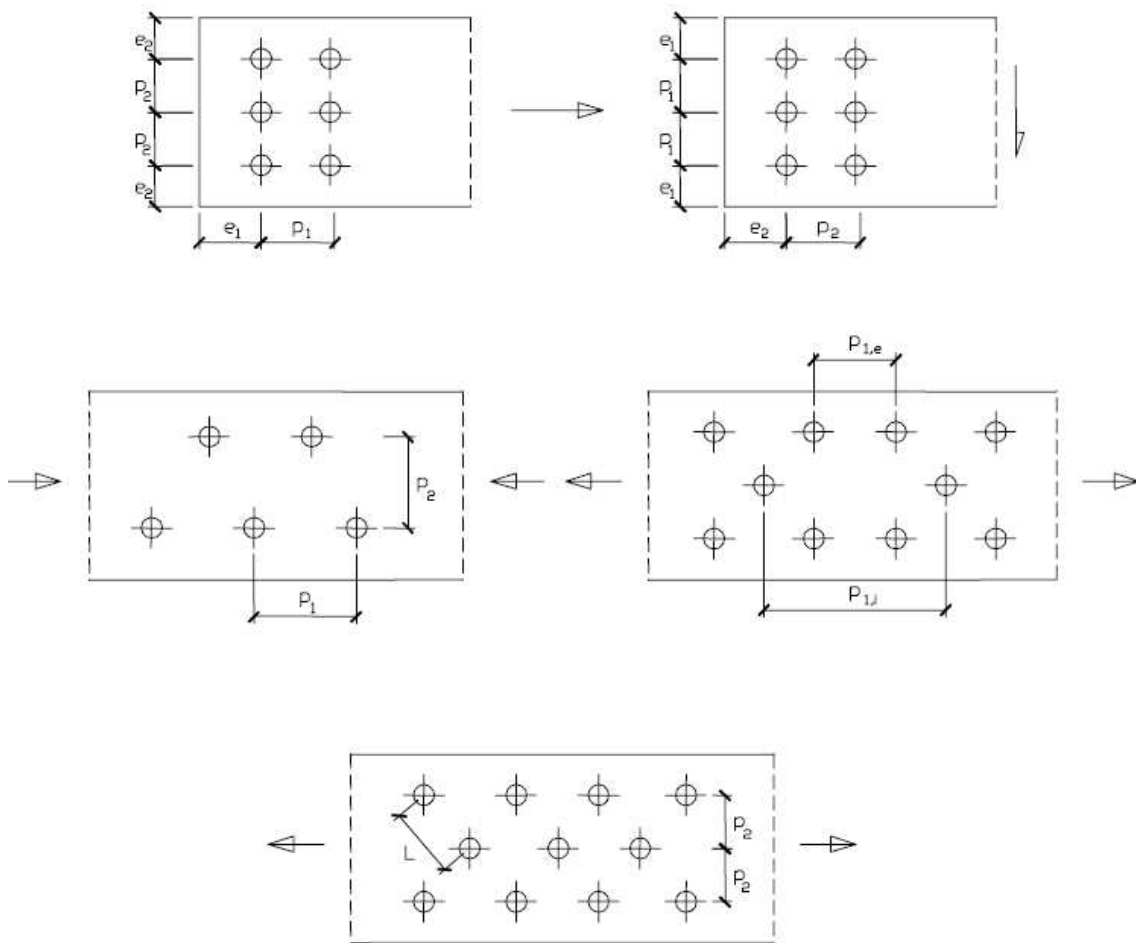


Fig. 5 -Nomenclatura de cada disposición de tornillos

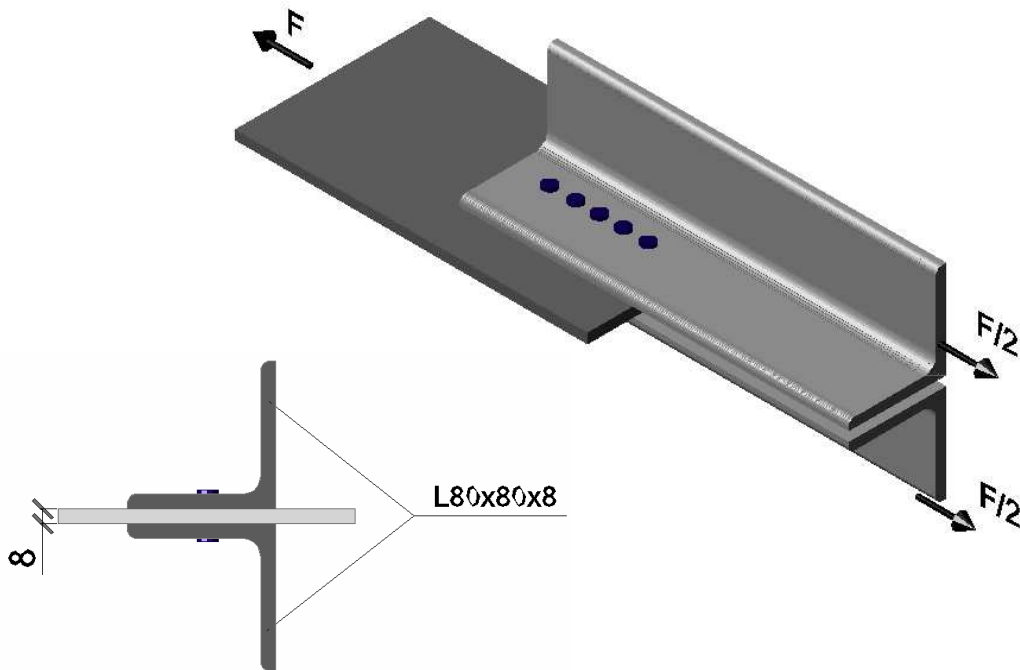
3.3. RESOLUCIÓN DE UNIONES TÍPICAS

A modo de ejemplo y para hacer evidentes las similitudes y diferencias de cada una de las normativas se han resuelto cuatro problemas de uniones. Se ha intentado que las uniones calculadas fueran representativas de las uniones normalmente utilizadas en estructura metálica.

En estos ejemplos se resuelven, por las tres normativas tratadas, la unión de dos angulares a una cartela, unión de viga a soporte con placa dorsal rigidizada, un empalme mediante cubrejuntas en las alas y el alma y por último una unión con doble casquillo de angular. Por tanto, como se puede observar se tratan diferentes tipos desde uniones articuladas a rígidas, con cubrejuntas, con casquillos, con tornillos pretensados, etc.

3.3.1. Unión a tracción de dos angulares a una cartela

Determinar el número de tornillos necesarios ($\Phi 16$, clase 8.8) para realizar la unión planteada en la figura. La fuerza F vale 440 kN, el espesor de la chapa es de 8 mm y se trata de acero S-235.



SOLUCIÓN EC3

El EC3 clasifica las uniones atornilladas según la manera de trabajar de los tornillos. En este ejemplo, los tornillos están solicitados en la dirección normal a su eje, no están pretensados y las superficies en contacto no están preparadas de manera especial, por lo tanto, se trata de una unión de Categoría A.

Las comprobaciones necesarias para uniones de esta categoría són:

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad \text{y} \quad F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$$

donde: $F_{v,Rd}$ es la resistencia a cortadura del tornillo

$F_{b,Rd}$ es la resistencia a aplastamiento en la zona de chapa contigua al tornillo

$F_{v,Ed}$ es el valor de cálculo del esfuerzo cortante en el tornillo

Para realizar el dimensionamiento procederemos a verificar la resistencia al corte o esfuerzo de cizalladura en la unión, esfuerzo que deberán resistir los tornillos.

Sec. 3

Sec. 3.4.1.

Tabla 3.2.

| | |
|--|---|
| <p>La resistencia al corte viene definida por:</p> $F_{v,Rd} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2}$ para cada plano de desplazamiento posible <p>donde: $\alpha_v = 0.6$ para tornillos de la clase 8.8 A_s es el área resistente del tornillo, para tornillos de $\Phi 16$ vale 157mm^2 f_{ub} tensión de rotura, para los de clase 8.8 vale 800 N/mm^2 $\gamma_{M2} = 1.25$</p> | <p>Tabla 3.4.</p> <p>Tabla 3.1.</p> <p>Tabla 2.1.</p> |
| <p>Por lo tanto para el caso que nos ocupa, y considerando que tenemos dos planos de cizalladura, el valor de la resistencia al corte viene dada por:</p> $F_{v,Rd} = 2 \cdot 0.6 \cdot 800 \cdot 10^{-3} \cdot 157 / 1.25 = 121\text{KN}$ <p>Así, el número de tornillos necesarios se obtiene como:</p> $n = \frac{F}{F_{v,Rd}} = \frac{440}{121} = 3,64 \Rightarrow n = 4$ <p>Por lo tanto, para ser capaces de resistir la resistencia al corte vamos a necesitar 4 tornillos de la clase 8.8.</p> | |
| <p>La segunda condición que debemos verificar es la resistencia a aplastamiento.</p> $F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$ <p>donde α_b es un coeficiente igual al menor de los valores:</p> $\frac{e_1}{3d_0}; \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} \quad \text{ó} \quad 1.0$ <p>en este caso toma el valor de 1.</p> <p>k_1 es otro coeficiente igual al menor de los valores:</p> $2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \quad \text{ó} \quad 2.5$ <p>para tornillos de borde y</p> $1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 \quad \text{ó} \quad 2.5$ <p>para los interiores, en nuestro caso, como aún no hemos decidido la distribución tomaremos el valor de 2.5</p> <p>(posteriormente se comprobará la distribución de tornillos de tal manera que se verifiquen los condicionantes planteados).</p> | <p>Tabla 3.4.</p> |

Aplicando los valores obtenemos:

$$F_{b,Rd} = 2.5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 8 / 1.25 = 92 \text{ KN}$$

Comprobamos esto sobre un único tornillo, y tenemos:

$$F_1 = \frac{F}{4} = \frac{440}{4} = 110 \text{ KN} > F_{b,Rd} = 92 \text{ KN}$$

Por lo tanto nos encontramos con una presión diametral excesiva, por lo que debemos modificar el número de tornillos. Podemos:

- Reducir el diámetro de tornillo, manteniendo la clase de acero.
- Reducir la clase de acero, manteniendo el diámetro constante.

Nosotros optaremos por la segunda opción tomando $\Phi 16$, clase 6.8

$$F_{v,Rd} = 2 \cdot 0.5 \cdot 600 \cdot 10^{-3} \cdot 157 / 1.25 = 75.36 \text{ KN}$$

Al reducir la clase de acero del tornillo, el coeficiente α_v pasa a valer 0.5

$$n = \frac{F}{F_{v,Rd}} = \frac{440}{75.4} = 5.8 \Rightarrow n = 6$$

$$F_1 = \frac{F}{6} = \frac{440}{6} = 73 \text{ KN} < F_B = 92 \text{ KN}$$

Por lo tanto, con 6 tornillos $\Phi 16$ clase 6.8 la presión diametral ya resulta aceptable.

Debería comprobarse ahora la distribución de los tornillos en la pieza y comprobar que cumple todas las disposiciones geométricas

Sec. 3.5.

SOLUCIÓN EAE

Según EAE, esta unión con tornillos también es de categoría A, por lo tanto se tiene que comprobar frente a cortadura y aplastamiento.

Artículo 58

Ap. 58.9.

El esfuerzo que lo solicita al tornillo, $F_{V,Sd}$, no será mayor que el menor de los dos valores siguientes:

Ap. 58.5.

- La resistencia a cortadura del tornillo, $F_{V,Rd}$
- La resistencia a aplastamiento de la pieza en la zona contigua al tornillo, $F_{b,Rd}$

La expresión para el cálculo de la resistencia a cortadura es :

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot f_{ub} \cdot A \cdot n}{\gamma_{M2}}$$

A es el área del vástago del tornillo, aunque si alguno de los planos de corte pasan por la zona roscada del vástago del tornillo se utiliza A_s , que es el área resistente, (en esta ocasión se supone que ningún plano de corte pasa por la zona roscada).

f_{ub} , toma el valor de 800N/mm² para los tornillos de grado 8.8

γ_{M2} , al igual que para el EC3 vale 1,25

A , vale 201 mm²

Tabla 58.1

Una vez conocidos todos los valores

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot 800 \cdot 10^{-3} \cdot 201 \cdot 2}{1.25} = 154.4 \text{ KN}$$

De la misma forma que para el EC3 el número de tornillos necesarios respecto la resistencia a cortadura se obtiene como:

$$n = \frac{F}{F_{v,Rd}} = \frac{440}{154.4} = 2.8 \Rightarrow n = 3$$

La resistencia a aplastamiento de una pieza de espesor t contra el vástago de un tornillo de diámetro d colocado en un agujero estándar viene dada por la expresión:

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = 92 \text{ KN}$$

donde α adopta el mismo valor de α_b del EC3, para este caso 1.

β es el mismo coeficiente que k_1 del EC3, se toma 2.5

Partiendo de los 3 tornillos que son necesarios para la resistencia a cortadura, cada tornillo tendrá una sollicitación de 147 KN, mayor que los 92 KN que se pueden resistir por aplastamiento, consecuentemente tendremos que modificar el número de tornillos.

En este caso reduciremos el diámetro del tornillo a 12 mm manteniendo la misma clase 8.8.

La nueva resistencia a la cortadura será:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot 800 \cdot 10^{-3} \cdot 113 \cdot 2}{1.25} = 86.8 \text{ KN} \Rightarrow n = \frac{F}{F_{v,Rd}} = \frac{440}{86.8} = 5.07 \Rightarrow n = 6$$

La resistencia a aplastamiento:

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 10^{-3} \cdot 13 \cdot 8}{1.25} = 75 \text{ KN} \Rightarrow F_1 = \frac{F}{6} = \frac{440}{6} = 73 \text{ KN} < F_{b,Rd} = 75 \text{ KN}$$

En conclusión, con 6 tornillos de $\Phi 12$ mm (clase 8.8) la unión resiste.

SOLUCIÓN CTE

Según el Documento Básico SE-A, la resistencia de cálculo a cortante por tornillo tendrá como valor el menor de la resistencia a cortante de las secciones del tornillo o de la resistencia a aplastamiento de la chapa de la unión, sin que la resistencia total de la unión supere la resistencia a desgarro del alma.

La resistencia a cortante en la sección transversal del tornillo es:

$$F_{v,Rd} = n \frac{0.5 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$$

siendo

n = número de planos de corte $\rightarrow 2$

f_{ub} = resistencia última del acero del tornillo $\rightarrow 800\text{N/mm}^2$

A = área de la caña del tornillo A_d o el área resistente del tornillo A_s , según se encuentren los planos de cortadura en el vástago o la parte roscada del tornillo respectivamente $\rightarrow A_d = 201\text{ mm}^2$

$$F_{v,Rd} = 2 \frac{0.5 \cdot 800 \cdot 10^{-3} \cdot 201}{1.25} = 129\text{KN} \Rightarrow n = \frac{F}{F_{v,Rd}} = \frac{440}{129} = 3.4 \Rightarrow n = 4$$

La resistencia a aplastamiento de la chapa que se une es:

$$F_{t,Rd} = \frac{2.5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

siendo:

d = diámetro del vástago del tornillo $\rightarrow 16\text{ mm}$

t = menor espesor de las chapas que se unen $\rightarrow 8\text{ mm}$

f_u = resistencia última del acero de las chapas que se unen $\rightarrow 360\text{ N/mm}^2$

α = es el menor de $\frac{e_1}{3d_0}$; $\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$; $\frac{f_{ub}}{f_u}$; $1.0 \rightarrow 1.0$ (posteriormente se tendrá que comprobar)

donde:

e_1 = distancia del eje del agujero al borde de la chapa en la dirección de la fuerza que se transmite

p_1 = separación entre ejes de agujeros en la dirección de la fuerza que se transmite

d_0 = diámetro del agujero

$$F_{t,Rd} = \frac{2.5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 8}{1.25} = 92\text{KN}$$

Ap. 8.5.

Ap. 8.5.2.

Ec. 8.7.

Ec. 8.8.

$$F_1 = \frac{F}{4} = \frac{440}{4} = 110 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 92 \text{ kN}$$

No cumple, por consiguiente tendríamos que repetir el proceso reduciendo el diámetro del tornillo o la clase del acero.

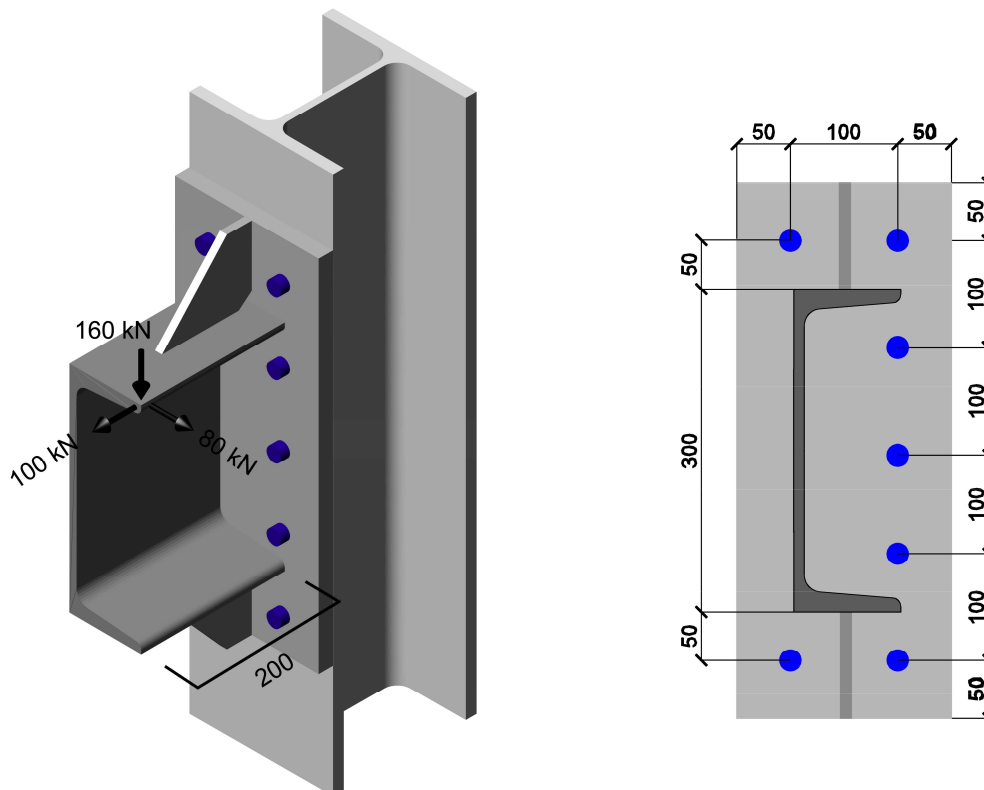
NOTA

Como se puede observar, las distintas normativas utilizan básicamente las mismas fórmulas con diferente nomenclatura.

Los resultados distintos obtenidos se deben a que para realizar el ejercicio más didáctico se han realizado diferentes supuestos en cada una de las resoluciones. Por ejemplo, en un caso se ha supuesto que los planos de corte pasan por la zona roscada del tornillo y en otros no; para disminuir la presión perimetral en un caso se ha reducido el diámetro de los tornillos y en otro se ha reducido la clase de acero, es decir, el grado del tornillo.

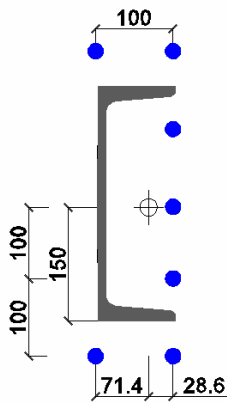
3.3.2. Unión de viga a soporte con placa dorsal rigidizada

El perfil UPN 300 de la figura está soldado a tope todo alrededor en una placa dorsal rigidizada.
Comprobar los esfuerzos en los tornillos 10.9 y de diámetro 20 mm.



SOLUCIÓN

En primer lugar debe obtenerse el c.d.g.



$$y = \frac{5 \cdot 100}{7} = 71.4 \text{ mm}$$

con relación al borde del perfil, coincidente con la fila izquierda

Con relación a ese c.d.g. se debe calcular $\sum r_i^2$

$$\sum y^2 = 2 \cdot 71.4^2 + 5 \cdot 28.6^2 = 14285 \text{ mm}^2$$

$$\sum z^2 = 4 \cdot 200^2 + 2 \cdot 100^2 = 180000 \text{ mm}^2$$

$$\sum r^2 = \sum y^2 + \sum z^2 = 194285 \text{ mm}^2$$

Con relación al mismo punto los esfuerzos son:

Cortantes: $Q_y = 80 \text{ kN}$

$$Q_z = 160 \text{ kN}$$

Torsor: $M_t = 160 \cdot (100 - 71.4) \cdot 10^{-3} + 80 \cdot 150 \cdot 10^{-3} = 16.576 \text{ kNm}$

Axil: $N = 100 \text{ kN}$

Flectores: $M_y = 160 \cdot 200 \cdot 10^{-3} + 100 \cdot 150 \cdot 10^{-3} = 47 \text{ kNm}$

$$M_z = 80 \cdot 200 \cdot 10^{-3} - 100 \cdot (100 - 71.4) \cdot 10^{-3} = 13.14 \text{ kNm}$$

Calculamos en primer lugar los esfuerzos cortantes en cada tornillo.

Todos tendrán por efecto de Q_x y Q_y :

$$H = \frac{80}{7} = 11.43 \text{ kN}; \quad V = \frac{160}{7} = 22.86 \text{ kN}$$

Además por efecto del torsor $M_t = 16.576 \text{ kNm}$

$$\bar{Q}_i = \frac{M_t}{\sum r^2} \bar{r}_i$$

descomponiendo vectorialmente

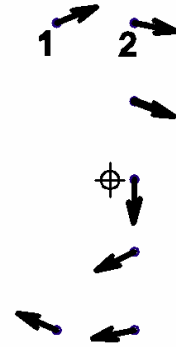
$$H_i = \frac{M_t}{\sum r^2} z_i; \quad V_i = \frac{M_t}{\sum r^2} y_i$$

Para los dos tornillos extremos superiores:

$$\overline{H}_1 = \frac{16.576}{194285 \cdot 10^{-6}} 200 \cdot 10^{-3} = 17.06 \text{ kN} = \overline{H}_2$$

$$\uparrow V_1 = \frac{16.576}{194285 \cdot 10^{-6}} 71.4 \cdot 10^{-3} = 6.09 \text{ kN}$$

$$\downarrow V_2 = \frac{16.576}{194285 \cdot 10^{-6}} 28.6 \cdot 10^{-3} = 2.44 \text{ kN}$$



Superponiendo valores para esos dos tornillos:

$$V_1 = \sqrt{(11.43 + 17.06)^2 + (22.86 - 6.09)^2} = 33.06 \text{ kN}$$

$$V_2 = \sqrt{(11.43 + 17.06)^2 + (22.86 + 2.44)^2} = 38.10 \text{ kN}$$

Ahora se calculan los esfuerzos de tracción:

$$N_i = \frac{N}{n} + \frac{M_y}{\sum z^2} z_i + \frac{M_z}{\sum y^2} y_i$$

Para los tornillos más solicitados (los anteriores):

$$N_1 = \frac{100}{7} + \frac{47}{180000 \cdot 10^{-6}} 200 \cdot 10^{-3} + \frac{13.14}{14285 \cdot 10^{-6}} 71.4 \cdot 10^{-3} = 132.11 \text{ kN}$$

$$N_2 = \frac{100}{7} + \frac{47}{180000 \cdot 10^{-6}} 200 \cdot 10^{-3} - \frac{13.14}{14285 \cdot 10^{-6}} 28.6 \cdot 10^{-3} = 40.22 \text{ kN}$$

SOLUCIÓN EC3

Sec. 3

Se comparan los valores obtenidos con los de resistencia del tornillo 10.9 y diámetro 20 mm.

Resistencia a cortante (plano de cortadura por rosca)

$$F_{v,Rd} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2}$$

donde: $\alpha_v = 0.5$ para tornillos 10.9

A_s es el área resistente del tornillo, para tornillos de $\Phi 16$ vale 245 mm^2

f_{ub} tensión de rotura = 1000 N/mm^2

$\gamma_{M2} = 1.25$

Tabla 3.4.

Tabla 3.1.

Tabla 2.1.

$$F_{v,Rd} = 0.5 \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \cdot 245 / 1.25 = 98 \text{ kN}$$

Supera a todos los cortantes existentes.

Resistencia a tracción

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \cdot 245}{1.25} = 176.4 \text{ kN}$$

donde: $k_2 = 0.9$ al no tratarse de un tornillo de cabeza avellanada.

El valor de 176.4 kN también supera a los valores más altos.

Tabla 3.4.

Interacción cortante - tracción

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} \leq 1$$

Esta ecuación con la notación de problema resulta:

$$\frac{V_i}{F_{v,Rd}} + \frac{N_i}{1.4F_{t,Rd}} \leq 1$$

Para el tornillo 1

$$\frac{33.06}{98.00} + \frac{132.11}{1.4 \cdot 176.4} = 0.872 \leq 1 \rightarrow \text{OK}$$

Para el tornillo 2

$$\frac{38.10}{98.00} + \frac{40.22}{1.4 \cdot 176.4} = 0.552 \leq 1 \rightarrow \text{OK}$$

Tabla 3.4.

SOLUCIÓN EAE

La expresión para el cálculo de la resistencia a cortante si alguno de los planos de corte pasa por la zona roscada y los tornillos son 10.9 es:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 \cdot f_{ub} \cdot A_s \cdot n}{\gamma_{M2}} \quad (\text{es la misma expresión que en EC3})$$

donde:

γ_{M2} , toma el mismo valor que en EC3, 1.25

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 254 \cdot 1}{1.25} = 98 \text{ kN} \rightarrow \text{Supera a todos los cortantes existentes.}$$

Artículo 58

Art. 58.5.

La resistencia a tracción de un tornillo viene dada por la expresión:

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (\text{expresión que también coincide en este caso con el EC3})$$

sustituyendo tenemos que $F_{t,Rd} = 176.4 \text{ kN}$, por tanto, los tornillos soportan también a tracción.

Art. 58.6.

Interacción cortadura-tracción

Art. 58.6.1.

En este caso la expresión es distinta al EC3:

$$\left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 \leq 1$$

Para el tornillo 1

$$\left(\frac{33.06}{98.00}\right)^2 + \left(\frac{132.11}{176.4}\right)^2 = 0.599 \leq 1 \rightarrow \text{OK}$$

Para el tornillo 2

$$\left(\frac{38.10}{98.00}\right)^2 + \left(\frac{40.22}{176.4}\right)^2 = 0.111 \leq 1 \rightarrow \text{OK}$$

Los tornillos más solicitados cumplen también esta condición.

SOLUCIÓN CTE

Ap. 8.5.

La resistencia a cortante en la sección transversal del tornillo es:

Ap. 8.5.2.2.

$$F_{v,Rd} = n \frac{0.5 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$$

Ec. 8.7.

siendo

 n = número de planos de corte $\rightarrow 1$ f_{ub} = resistencia última del acero del tornillo $\rightarrow 1000\text{N/mm}^2$ A = área de la caña del tornillo A_d o el área resistente del tornillo A_s , según se encuentren los planos de cortadura en el vástago o la parte roscada del tornillo respectivamente $\rightarrow A_s = 254\text{ mm}^2$

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \cdot 254}{1.25} = 98\text{kN} \rightarrow \text{Ídem EC3 y EAE}$$

La resistencia a tracción del tornillo:

Ap. 8.5.2.3.

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 176.4\text{kN} \rightarrow \text{Ídem EC3 y EAE}$$

Ec. 8.12.

Solicitación combinada:

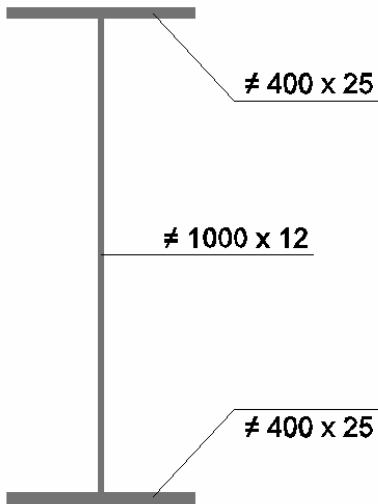
Ap. 8.5.2.4.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} \leq 1$$

Ec. 8.14.

Se trata de la misma expresión que en el EC3, por tanto, los tornillos también cumplirán esta comprobación.

3.3.3. Empalme de viga armada mediante cubrejuntas (alas y alma)



Se pide proyectar el empalme de la viga armada cuya sección se adjunta empleando tornillos T20 de calidad 8.8.

La viga es de acero S275 y la sección de empalme está sometida a un flector $M_{Sd} = 0,8 \cdot M_e$ y a un cortante $V_{Sd} = 0,2 \cdot V_p$

SOLUCIÓN EAE

Se trata de una unión con tornillos ordinarios que trabajan a cortadura y aplastamiento. Por tanto, se trata de una unión de categoría A.

Las comprobaciones necesarias para esta categoría son:

$$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$$

$$F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd}$$

Las características estáticas de la viga son:

$$I_y = 625417 \text{ cm}^4; W_y = 11913 \text{ cm}^3; A_w = 120 \text{ cm}^2$$

$$I_w = 1,2 \times 10^3 / 12 = 100000 \text{ cm}^4; I_f = I_y - I_w = 525417 \text{ cm}^4$$

Los esfuerzos en la unión serán:

$$M_e = W_y \cdot \sigma_e = 11913 \cdot 10^{-6} \times 275 \cdot 10^3 = 3276,075 \text{ kNm}; M_{Sd} = 0,8 \cdot M_e = 2620,86 \text{ kNm}$$

$$M_f = \frac{M_{Sd} \cdot I_f}{I_y} = \frac{2620,86 \text{ kNm} \cdot 525417 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4}{6,25417 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4} = 2201,8 \text{ kNm} \quad (\text{momento flector que debe ser absorbido por los cubrejuntas de alas}).$$

$$M_w = M_{Sd} - M_f = 419,06 \text{ kNm} \quad (\text{momento flector que debe ser absorbido por los cubrejuntas de almas}).$$

Art. 61.1.

Art. 58.5.

| | |
|---|--|
| <p> $V_p = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \cdot A_w = \frac{275 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2}{\sqrt{3}} \cdot 120 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 1905,26 \text{ kN}; \quad V_{sd} = 0,2V_p = 381 \text{ kN}$ </p> <p>(esfuerzo cortante absorbido por los cubrejuntas de alas).</p> <p><u>UNIÓN EN LAS ALAS</u></p> <p>Se emplearan cubrejuntas interiores y exteriores; entonces: $h = 1025 \text{ mm}$ $F_{v, Sd} = M_f / h = 2148 \text{ kN}$</p> <p>La distancia de un tornillo a un borde paralelo al esfuerzo ha de ser mayor que 1,2 veces el diámetro del taladro, aunque se recomienda $e_2 \geq 1,5d_0$ (en nuestro caso $d_0 = d + 1 = 21 \text{ mm}$) y no puede ser mayor que $40 \text{ mm} + 4t$ (si la unión puede estar sometida a corrosión) $12t$ ó 150 mm.</p> <p>Por tanto, la distancia ha de estar comprendida entre 31,5 y 100 mm.</p> <p>Las cubrejuntas interiores tendrán un ancho de $200 - 12/2 - 7\sqrt{2} = 184 \text{ mm} \approx 175 \text{ mm}$ (se considera un espesor de garganta de 7 mm). Además, se dispondrán 2 filas de tornillos a cada lado del alma.</p> <p><u>Resistencia a cortadura</u></p> <p>La resistencia a cortadura de un tornillo viene definida por: $F_{v, Rd} = 0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s \cdot n / \gamma_{M2}$ para cada plano de desplazamiento posible donde: A_s es el área resistente, para tornillos $\Phi 20$ es 275 mm^2 f_{ub} tensión de rotura, para tornillos 8.8 su valor es 800 N/mm^2 $\gamma_{M2} = 1,25$ $n = 2$ número de planos de cortadura</p> <p>Sustituyendo: $F_{v, Rd} = 0,6 \cdot 800 \cdot 275 \cdot 2 / 1,25 = 211 \text{ kN}$</p> <p>Para determinar el espesor de los cubrejuntas se comprueba que $\sum A_{cubr.} = A_{ala}$, por tanto, es necesario utilizar cubrejuntas de 15 mm.</p> <p><u>Resistencia a aplastamiento</u></p> <p>La segunda condición que debemos verificar es la resistencia a aplastamiento.</p> | <p>Art. 58.3.</p> <p>Art. 58.5.</p> <p>Tabla 58.1</p> <p>Tabla 15.3.</p> <p>Art. 58.5.</p> |
|---|--|

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot \beta \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

donde : α es un coeficiente igual al menor de los valores:

$$\frac{e_1}{3d_0}; \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} \quad \text{ó} \quad 1.0 \quad \text{en este caso toma el}$$

valor de 0,8 si consideramos $e_1 = 50mm$

β es otro coeficiente igual al menor de los valores:

$$2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7; \quad 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 \quad \text{ó} \quad 2.5 \quad \text{en nuestro caso, se ha considerado}$$

$e_2 = 50mm$ y $p_2 = 75mm$, por tanto, se tomará $\beta = 2,5$

Sustituyendo tenemos:

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot \beta \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2} = 0,8 \cdot 2,5 \cdot 275 \cdot 20 \cdot 25 / 1,25 = 220kN$$

La carga última por tornillo será la menor de las dos, o sea, $F_{v,Rd} = 211kN$

El número de tornillos a utilizar será

$$n^\circ = \frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} = \frac{2148}{211} = 10,2 \rightarrow \text{Se adoptan 4 filas de 3 tornillos}$$

La disposición de la unión será la indicada seguidamente:

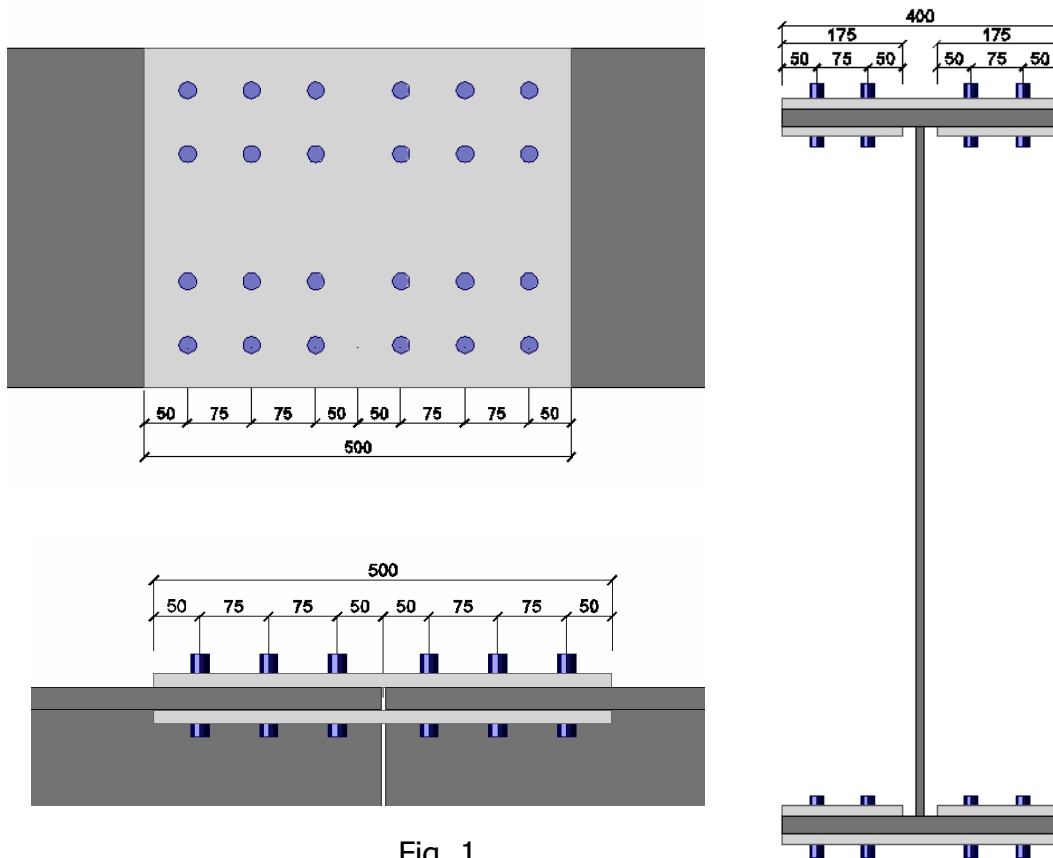


Fig. 1.

Para realizar la unión de ambas alas se necesitan:
 2 pletinas de 500x400x15 (cubrejuntas exteriores)
 4 pletinas de 500x175x15 (cubrejuntas interiores)
 48 tornillos de diámetro 20 mm y clase 8.8

UNIÓN DEL ALMA

Se empleará doble cubrejunta de 8mm de espesor ($8+8>12$), de $1000 - 2 \cdot 15 = 970 \approx 950 \text{ mm}$ de altura.

Se tantea en principio con 1 columna de 13 tornillos a cada lado del empalme, separados 74 mm entre sí.

La carga de agotamiento por aplastamiento será ahora:

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot \beta \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2} = 0,7 \cdot 2,5 \cdot 275 \cdot 20 \cdot 12 / 1,25 = 92,4 \text{ kN}$$

donde: $\alpha = 0,7$

$$\beta = 2,5$$

Se puede observar esta disposición propuesta en la figura siguiente:

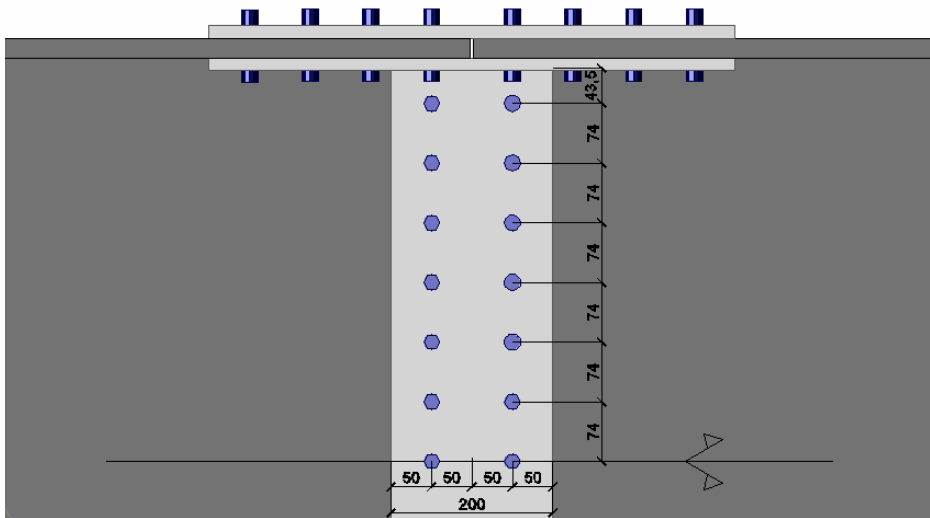


Fig.2.

Con las dimensiones indicadas en la figura tenemos:

$$I_{y'} = 2 \cdot 7,4^2 (1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 + 5^2 + 6^2) = 9,966 \cdot 10^7 \text{ mm}^2$$

$d = 50 \text{ mm} \rightarrow$ distancia entre la sección del empalme y el centro de gravedad del área de los tornillos de la unión de los cubrejuntas a una de las piezas.

$$M_T = M_w + V_{sd} \cdot d = 419,06 \text{ kNm} + 381 \text{ kN} \cdot 0,05 \text{ m} = 438 \text{ kNm}$$

$n = 13 \text{ tornillos}$

Los tornillos más solicitados serán los más alejados del centro de gravedad del grupo de tornillos, es decir, los más próximos a las alas:

$$\text{Debido al cortante: } F_{z,v,Sd} = \frac{V_{Sd}}{n} = \frac{381}{13} = 29,3kN$$

$$\text{Debido al torsor: } F_{z,v,Sd} = 0kN$$

$$F_{y,v,Sd} = \frac{M_T \cdot r}{I_{z'}} = \frac{438 \cdot 10^3 \cdot 444}{9966} = 195,36kN > F_{b,Rd} = 92,4kN$$

luego esta disposición es inadecuada; probamos con 2 columnas a cada lado y reduciendo la distancia entre tornillos.

La nueva disposición será:

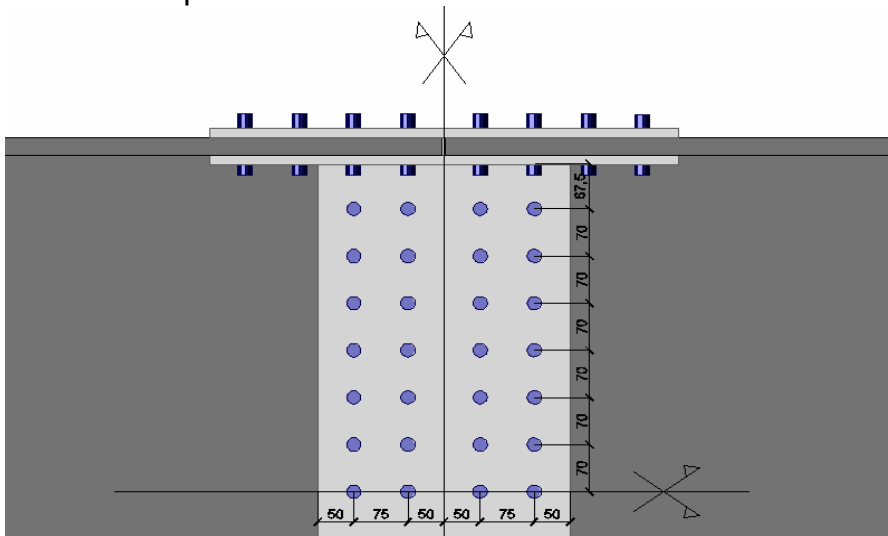


Fig. 3.

La nueva carga de agotamiento por aplastamiento:

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot \beta \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2} = 0,86 \cdot 2,5 \cdot 275 \cdot 20 \cdot 12 / 1,25 = 113,65kN$$

$$\text{donde: } \alpha = 0,86$$

$$\beta = 2,5$$

$$d = 50 + \frac{75}{2} = 87,5mm \text{ (excentricidad)}$$

$$M_T = 419,06 + 381 \cdot 0,0875 = 452,4kNm$$

$$I_y' = 2 \cdot 70^2 (1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 + 5^2 + 6^2) = 1783600mm^2;$$

$$I_z' = 2 \cdot 13 \cdot (75/2)^2 = 36562,5mm^2; I_p' = I_y' + I_z' = 1820162,5mm^2;$$

$$\text{Debido al cortante: } F_{z,v,Sd} = \frac{V_{Sd}}{n} = \frac{381}{26} = 14,65kN$$

$$\text{Debido al torsor: } F_{z,v,Sd} = \frac{452 \cdot 10^3 \cdot 37,5}{1820162,5} = 9,31kN$$

$$F_{y,v,Sd} = \frac{M_T \cdot r}{I_{z'}} = \frac{452 \cdot 10^3 \cdot 420}{1820162,5} = 104,3kN$$

$$F_{v,Sd} = \sqrt{(F_{z,v,Sd})^2 + (F_{y,v,Sd})^2} = \sqrt{(14,65 + 9,31)^2 + (104,3)^2} = 107kN$$

$$F_{v,Sd} = 107kN < 113,65 = F_{v,Rd} \quad \text{OK}$$

Para el empalme del alma se necesitan:
2 pletinas de 975x350x8 (cubrejuntas)
64 tornillos de diámetro 20 mm y clase 8.8

Vista final de la unión según EAE:

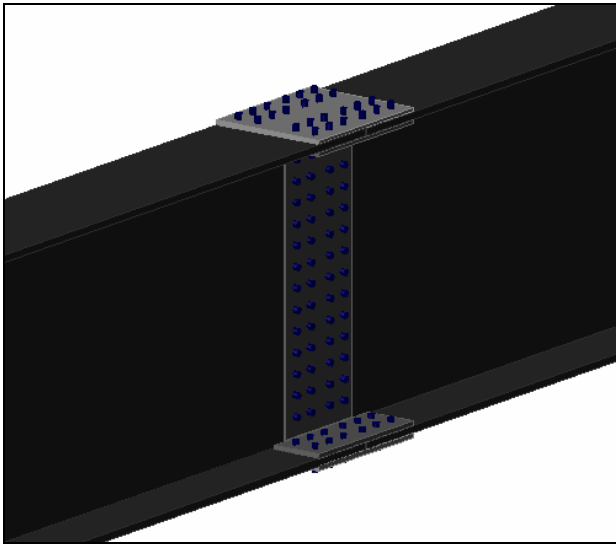


Fig. 4.

SOLUCIÓN EC3

El Eurocódigo no incluye este caso como unión típica, a diferencia de la instrucción EAE que tiene un artículo dedicado a este tipo de empalmes. Al tratarse de una unión que trabaje a cortadura y aplastamiento, el Eurocódigo 3 también clasifica la unión como de categoría A.

Por tanto se tienen que realizar las siguientes comprobaciones:

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$$

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$$

UNIÓN EN LAS ALAS

Ahora simplemente comprobaremos que la unión proyectada según EAE, sigue siendo válida según el EC3.

$$F_{v,Ed} = M_f/h = 2148kN$$

Sec. 3

Tabla 3.2.

La disposición de los tornillos debe cumplir:

| Dist. Mínimas | Dist. Máximas |
|----------------------------|--|
| $e_1 \geq 1,2d_0 = 25,2mm$ | $e_1 \quad y \quad e_2 \leq 40mm + 4t = 140mm$ |
| $p_1 \geq 2,2d_0 = 46,2mm$ | $p_1 \quad y \quad p_2 \leq 14t = 350mm$ |
| $e_2 \geq 1,2d_0 = 25,2mm$ | $p_1 \quad y \quad p_2 \leq 200mm$ |
| $p_2 \geq 2,4d_0 = 50,4mm$ | |

Tabla 3.3.

Por tanto, las distancias entre tornillos y de los tornillos a los bordes tienen que estar comprendidas entre $25,2mm < e_1$ y $e_2 < 140mm$ y $50,4mm < p_1$ y $p_2 < 200mm$, que cumple con la distribución propuesta (ver Fig.1).

Resistencia a cortadura

Tabla 3.4.

La resistencia al corte de un tornillo viene definida por:

$$F_{v,Rd} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A / \gamma_{M2} \quad \text{para cada plano de desplazamiento posible}$$

donde:

$A = A_s$ si alguno de los planos de corte pasa por la zona roscada del vástago del tornillo = 275 mm^2

f_{ub} tensión de rotura, para tornillos 8.8 su valor es 800 N/mm^2

$$\gamma_{M2} = 1.25$$

$$\alpha_v = 0,6 \quad \text{para tornillos 8.8}$$

Tabla 3.1.

Tabla 2.1.

Por lo tanto para el caso que nos ocupa, y considerando que tenemos 2 planos de cortadura, el valor de la resistencia a cortadura viene dada por

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 800 \cdot 275 \cdot 2 / 1,25 = 211,2kN$$

Resistencia a aplastamiento

Tabla 3.4.

$$F_{b,Rd} = \alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

donde :

α_b es un coeficiente igual al menor de los valores: $\frac{f_{ub}}{f_u}$ o $1,0$; en la

dirección de la carga para tornillos de borde $\alpha_b = \frac{e_1}{3d_0}$ y $\alpha_b = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$

para tornillos interiores. En el peor de los casos $\alpha_b = 0,794$.

k_1 es el menor de $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ o $2,5$ para tornillos de borde o $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$

o 25 para tornillos interiores; en el peor de los casos, $k_1 = 2,5$

Sustituyendo tenemos:

$$F_{b,Rd} = 2,5 \cdot 0,794 \cdot 275 \cdot 20 \cdot 25 / 1,25 = 218,3 \text{ kN}$$

Los tornillos resisten menos a cortadura, por tanto, la carga última por tornillo será: $F_{v,Rd} = 211 \text{ kN}$

El número de tornillos a utilizar será

$$n^\circ = \frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} = \frac{2148}{211,12} = 10,2 \rightarrow \text{Se adoptan 4 filas de 3 tornillos}$$

La disposición de la unión será la misma que para la instrucción EAE.

Para realizar la unión de ambas alas se necesitan:
 2 pletinas de 500x400x15 (cubrejuntas exteriores)
 4 pletinas de 500x175x15 (cubrejuntas interiores)
 48 tornillos de diámetro 20 mm y clase 8.8

UNIÓN DEL ALMA

Al igual que en las alas, se comprobará si la distribución obtenida con la EAE es válida para el Eurocódigo 3.

La carga de agotamiento por aplastamiento será ahora:

$$F_{b,Rd} = \alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2} = 0,861 \cdot 2,5 \cdot 275 \cdot 20 \cdot 12 / 1,25 = 113,65 \text{ kN}$$

donde: $\alpha_b = 0,861$

$$k_1 = 2,5$$

Los esfuerzos en la unión serán:

$$\text{Debido al cortante: } F_{z,v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{381}{26} = 14,65 \text{ kN}$$

$$\text{Debido al torsor: } F_{z,v,Ed} = \frac{452 \cdot 10^3 \cdot 37,5}{1820162,5} = 9,31 \text{ kN}$$

$$F_{y,v,Ed} = \frac{M_T \cdot r}{I_z} = \frac{452 \cdot 10^3 \cdot 420}{1820162,5} = 104,3 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = \sqrt{(F_{z,v,Ed})^2 + (F_{y,v,Ed})^2} = \sqrt{(14,65 + 9,31)^2 + (104,3)^2} = 107 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = 107 \text{ kN} < 113,65 = F_{v,Rd} \quad \text{OK}$$

Las comprobaciones necesarias son prácticamente idénticas y lógicamente, se obtienen los mismos resultados, por tanto, podemos afirmar que la unión también es válida para el EC3.

SOLUCIÓN CTE

Se considera que es una unión rígida. Puede admitirse un reparto de axil proporcional al área de la sección de cada cubrejuntas, que el cortante se resiste por las cubrejuntas del alma, y el momento flector se reparte entre las cubrejuntas de las alas, y del alma, de forma proporcional a sus inercias respecto del eje de flexión.

UNIÓN EN LAS ALAS

Respecto las disposiciones constructivas el CTE es ligeramente más conservador que las otras normativas.

| Dist. Mínimas | Dist. Máximas |
|----------------------------|--|
| $e_1 \geq 1,2d_0 = 25,2mm$ | $e_1 \quad y \quad e_2 \leq 40mm + 4t = 140mm$ |
| $p_1 \geq 2,2d_0 = 46,2mm$ | $p_1 \quad y \quad p_2 \leq 14t = 350mm$ |
| $e_2 \geq 1,5d_0 = 31,5mm$ | $p_1 \quad y \quad p_2 \leq 200mm$ |
| $p_2 \geq 3d_0 = 63mm$ | |

Resistencia a cortadura

La resistencia al corte de un tornillo viene definida por:

$$F_{v,Rd} = n \cdot 0,5 \cdot f_{ub} \cdot A / \gamma_{M2} \quad \text{para cada plano de desplazamiento posible}$$

donde:

$$A = A_s = 275 \text{ mm}^2$$

$$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{M2} = 1.25$$

Sustituyendo tenemos:

$$F_{v,Rd} = 0,5 \cdot 800 \cdot 275 \cdot 2 / 1,25 = 176kN$$

Resistencia a aplastamiento

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot 2,5 \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

donde :

$$\alpha = 0,794 \rightarrow \text{es el menor de } \frac{e_1}{3d_0}; \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} \quad \text{ó} \quad 1.0$$

$d = 20mm \rightarrow$ diámetro del vástago del tornillo

$t = 25mm \rightarrow$ menor espesor de las chapas que se unen

Sec. 8.8.4.

Sec.
8.8.4.1.b

Sec. 8.5.1

Sec.
8.5.2.2.aTabla 7.3.
Tabla 3.1.

Tabla 2.1.

Sec.
8.5.2.2.b.

Sustituyendo tenemos:

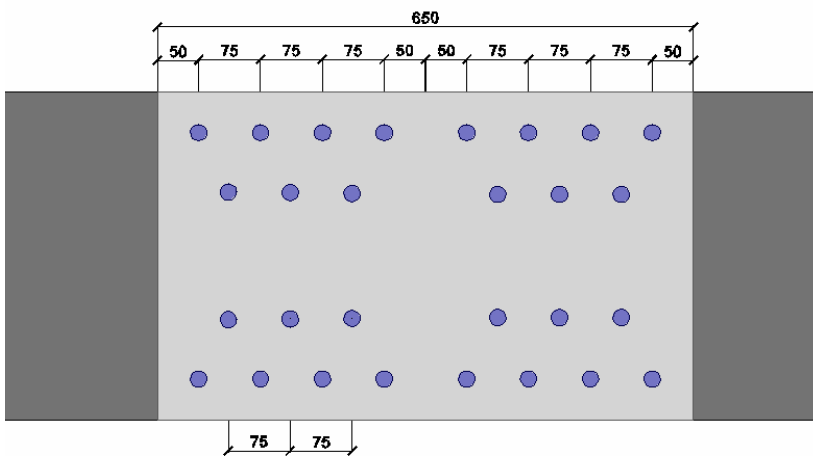
$$F_{b,Rd} = 2,5 \cdot 0,794 \cdot 275 \cdot 20 \cdot 25 / 1,25 = 218,3kN$$

Los tornillos resisten menos a cortadura, por tanto, la carga última por tornillo será: $F_{v,Rd} = 176kN$

El número de tornillos a utilizar será

$$n^{\circ} = \frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} = \frac{2148}{176} = 12,2 \rightarrow \text{Se adoptan 2 filas de 4 tornillos y 2 filas de tres tonillos.}$$

La disposición de la unión en las alas será:



Para realizar la unión de ambas alas se necesitan:
 2 pletinas de 650x400x15 (cubrejuntas exteriores)
 4 pletinas de 650x175x15 (cubrejuntas interiores)
 56 tornillos de diámetro 20 mm y clase 8.8

UNIÓN DEL ALMA

La carga de agotamiento por aplastamiento será ahora:

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot 2,5 \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2} = 0,861 \cdot 2,5 \cdot 275 \cdot 20 \cdot 12 / 1,25 = 113,65kN$$

donde: $\alpha = 0,861$

Los esfuerzos en la unión serán:

$$\text{Debido al cortante: } F_{z,v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{381}{26} = 14,65kN$$

$$\text{Debido al torsor: } F_{z,v,Ed} = \frac{452 \cdot 10^3 \cdot 37,5}{1820162,5} = 9,31kN$$

$$F_{y,v,Ed} = \frac{M_T \cdot r}{I_{z'}} = \frac{452 \cdot 10^3 \cdot 420}{1820162,5} = 104,3kN$$

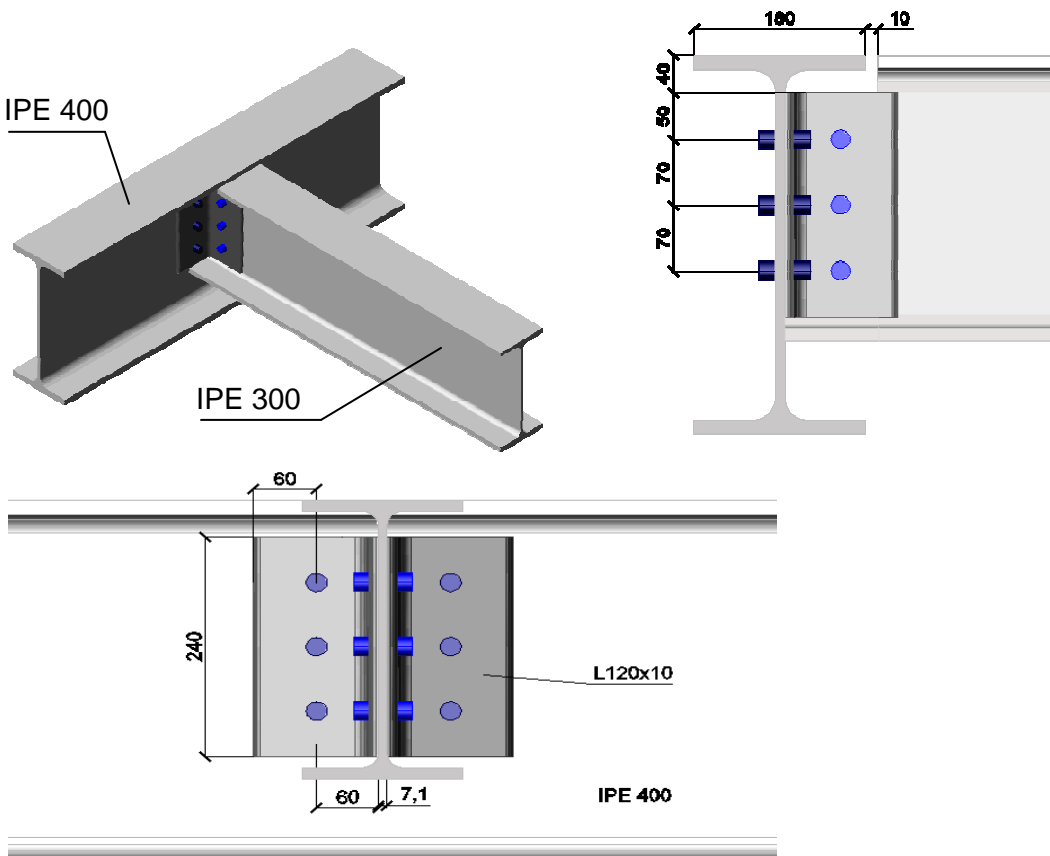
$$F_{v,Ed} = \sqrt{(F_{z,v,Ed})^2 + (F_{y,v,Ed})^2} = \sqrt{(14,65 + 9,31)^2 + (104,3)^2} = 107kN$$

$$F_{v,Ed} = 107kN < 113,65 = F_{v,Rd} \quad \text{OK}$$

La comprobación es la misma que para las otras normativas.

3.3.4. Unión con doble casquillo de angular (articulada)

En un embrochalamiento de una IPE 300 (viga secundaria) con una IPE 400 (viga principal) se transmite una carga ponderada de 180 kN. Comprobar la unión representada en la figura adjunta realizada con tornillos de alta resistencia, de grado 10.9., diámetro 20 y superficies tratadas al chorro de arena (acero S275).



SOLUCIÓN EAE

La unión mediante doble casquillo de angular puede suponerse que es una articulación. El único esfuerzo a considerar es la reacción V_d de apoyo de la viga, que se supondrá actuando en la cara de contacto de los casquillos con la viga principal.

Art. 61.3.

| | |
|---|--|
| <p>Al tratarse de una unión con tornillos de alta resistencia, se considerará en este problema que la unión es de categoría C; es decir, se desea que la unión no deslice en estado límite último.</p> <p>Las comprobaciones necesarias para esta categoría son: Resistencia al deslizamiento $F_{v,Sd} \leq F_{s,Rd}$ Resistencia al aplastamiento $F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd}$ Resistencia al desgarramiento</p> <p>Como en la unión de los casquillos al alma de la viga se disponen 3 tornillos trabajando a doble cortadura y en la unión de los casquillos a la viga principales disponen 2·n tornillos idénticos a los anteriores trabajando a simple cortadura, sólo es preciso comprobar la primera de dichas uniones, ya que la segunda trabaja en condiciones más favorables.</p> | Art. 58.9. |
| <p>En régimen elástico, el esfuerzo F_{Sd} en el tornillo más solicitado viene dado por:</p> $F_{Sd} = \frac{V_d}{n} \sqrt{1 + \left(\frac{6w}{b(n+1)} \right)^2}$ <p>en donde: $w = 60 \text{ mm} \rightarrow$ es el gramil del angular $b = 70 \text{ mm} \rightarrow$ distancia entre tornillos</p> <p>Sustituyendo tenemos:</p> $F_{Sd} = \frac{180}{3} \sqrt{1 + \left(\frac{360}{70(3+1)} \right)^2} = 61,36 \text{ kN}$ | Art. 61.3. |
| <p><u>Resistencia al deslizamiento</u></p> <p>La resistencia de una unión realizada mediante tornillos de alta resistencia pretensados se tomará igual al valor:</p> $F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms}} \sum (N_0)$ <p>donde: $k_s = 1 \rightarrow$ taladros estándar $\mu = 0,5 \rightarrow$ superficies limpiadas mediante chorro de arena $\gamma_{Ms} = 1,25$ $N_0 = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s = 0,7 \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \cdot 245 = 171,5 \text{ kN}$</p> <p>donde: $f_{ub} = 1000 \text{ N} / \text{mm}^2$ $A_s = 245 \text{ mm}^2$</p> | Art. 58.7. Tabla 58.1. Tabla 58.6. |

Sustituyendo tenemos:

$$F_{s,Rd} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 0,5}{1,25} 171,5 = 137,2 \text{ kN} > F_{Sd} \quad \text{OK}$$

Resistencia a aplastamiento

La segunda condición que debemos verificar es la resistencia a aplastamiento.

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot \beta \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

donde : α es un coeficiente igual al menor de los valores:

$$\frac{e_1}{3d_0}; \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} \quad \text{ó} \quad 1.0 \quad \text{en este caso toma el valor de } 0,8 \text{ para } e_1 = 50 \text{ mm}$$

β es otro coeficiente igual al menor de los valores:

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; \quad 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \quad \text{ó} \quad 2,5 \quad \text{en nuestro caso, se ha}$$

considerado $e_2 = 50 \text{ mm}$ y $p_2 = 75 \text{ mm}$, por tanto, se tomará

$$\beta = 2,5$$

$$f_u = 430 \text{ N/mm}^2$$

$$t = 71 \text{ mm}$$

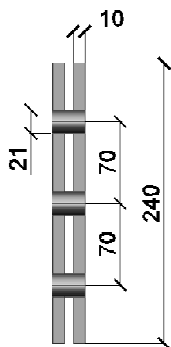
$$d = 20 \text{ mm}$$

Sustituyendo tenemos:

$$F_{b,Rd} = 0,8 \cdot 2,5 \cdot 430 \cdot 20 \cdot 71 / 1,25 = 97,7 \text{ kN} > F_{Sd} \quad \text{OK}$$

Comprobación de los casquillos de angular

Del lado de la seguridad se puede considerar la sección neta del ala del angular en la línea de los taladros solicitada por una flexión igual a:



$$180 \cdot 0,06 = 10,8 \text{ kNm}$$

$$I_y = 1,874 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$W_y = 156,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

a la que corresponde la tensión

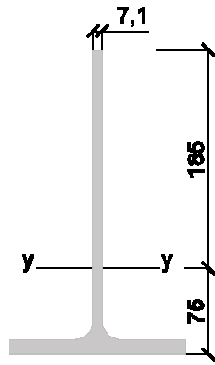
$$\sigma = \frac{10,8 \cdot 10^6}{156,6 \cdot 10^3} = 68,96 \text{ N/mm}^2 < 275 \text{ N/mm}^2 = f_y \quad \text{OK}$$

Comprobación de la sección debilitada del brochal por la pérdida del ala superior

Art. 58.5.

Tabla 27.1d

Tabla 27.1d



$$I_y = 1,822 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$W_{y,\min} = 98,5 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\frac{180 \cdot 10^3 \cdot (0,09 + 0,01) \cdot 10^3}{98,5 \cdot 10^3} = 182,7 \text{ N/mm}^2 < 275 \text{ N/mm}^2 = f_y$$

OK

Comprobación al desgarro del alma de la viga

Como sólo tenemos que considerar el esfuerzo a cortante, comprobaremos:

$$N_{ef,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{nv} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \leq \frac{A_{nv} \cdot f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2}}$$

donde:

$A_{nv} = (240 - 21 \cdot 2,5) \cdot 7,1 = 1257 \text{ mm}^2 \rightarrow$ es el área neta de la zona sometida a cortadura.

Sustituyendo tenemos:

$$N_{ef,Rd} = \frac{0,9 \cdot 1257 \cdot 430}{1,25} = 389 \leq \frac{1257 \cdot 430}{\sqrt{3} \cdot 1,25} = 249,7 \text{ kN} \rightarrow N_{ef,Rd} = 249,7 \text{ kN}$$

$$N_{ef,Rd} = 249,7 \text{ kN} > 180 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

SOLUCIÓN EC3

De la misma forma que la EAE, el Eurocódigo 3 clasifica la unión como unión de categoría C.

Por tanto se tienen que realizar las siguientes comprobaciones:

- Resistencia al deslizamiento
- Resistencia al aplastamiento
- Resistencia al desgarro

Según este apartado de esta normativa, podemos realizar un reparto de esfuerzos elástico, proporcional a la distancia desde el centro de rotación.

Esfuerzos en la dirección z:

$$V = \frac{180}{3} = 60 \text{ kN}$$

Art. 58.4.1.

Sec. 3

Sec. 3.4.1.

Tabla 3.2.

Sec. 3.12.

Esfuerzos en la dirección y:

$$H = \frac{M_i \cdot z_{\max}}{I_{p'}} = \frac{180 \cdot 60 \text{ mm} \cdot 70 \text{ mm}}{9800 \text{ mm}^2} = 77,1 \text{ kN}$$

$$I'_{p'} = \sum y_i^2 = 2 \cdot 70^2 = 9800 \text{ mm}^2$$

$$F_{v,Ed} = \sqrt{60^2 + 77,1^2} = \sqrt{9544} = 97,69 \text{ kN}$$

Resistencia al deslizamiento

La resistencia de una unión realizada mediante tornillos de alta resistencia pretensados se tomará igual al valor: Sec. 3.9.

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

donde:

$k_s = 1 \rightarrow$ taladros estándar

$\mu = 0,5 \rightarrow$ superficies limpiadas mediante cepillado

$\gamma_{M3} = 1,25 \rightarrow$ estamos comprobando el deslizamiento el ELU

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s = 0,7 \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \cdot 245 = 171,5 \text{ kN}$$

donde:

$$f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$$

$$A_s = 245 \text{ mm}^2$$

Sustituyendo tenemos:

$$F_{s,Rd} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 0,5}{1,25} 171,5 = 137,2 \text{ kN} > F_{v,Ed} \quad \text{OK}$$

Resistencia a aplastamiento

$$F_{b,Rd} = \alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

donde :

α_b es un coeficiente igual al menor de los valores: $\frac{f_{ub}}{f_u}$ o 1,0; en la

dirección de la carga para tornillos de borde $\alpha_b = \frac{e_1}{3d_0}$ y $\alpha_b = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$

para tornillos interiores. En el peor de los casos $\alpha_b = 0,8$.

k_1 es el menor de $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ o 2,5 para tornillos de borde o $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$

o 25 para tornillos interiores; en el peor de los casos, $k_1 = 2,5$

Sustituyendo tenemos:

$$F_{b,Rd} = 2,5 \cdot 0,8 \cdot 430 \cdot 20 \cdot 7,1 / 1,25 = 97,7 \text{ kN} > F_{v,Ed} \quad \text{OK}$$

Tabla 3.6.
Tabla 3.7.

Tabla 2.1.

Tabla 3.4.

Tabla 3.4.

| | |
|---|--------------|
| <p><u>Comprobación de los casquillos de ángulo y de la sección debilitada del brochal</u></p> | |
| <p>Ambas comprobaciones se realizan de la misma forma que la instrucción EAE.</p> | |
| <p><u>Comprobación al desgarro del alma de la viga</u></p> | Sec. 3.10.2. |
| <p>Para un grupo de tornillos sometidos a una carga excéntrica la resistencia a desgarramiento $V_{eff,2,Rd}$ se obtiene de la siguiente forma:</p> | |
| $V_{eff,2,Rd} = (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0}$ | |
| <p>donde:</p> | |
| <p>$A_{nv} = (240 - 21 \cdot 2,5) \cdot 7,1 = 1257 \text{ mm}^2$ → es el área neta de la zona sometida a cortadura.</p> | |
| <p>Sustituyendo tenemos:</p> | |
| $V_{eff,2,Rd} = (1/\sqrt{3}) 275 \cdot 1257 / 1,1 = 181,4 \text{ kN} \rightarrow N_{ef,Rd} = 181,4 \text{ kN}$ | |
| $N_{ef,Rd} = 181,4 \text{ kN} > 180 \text{ kN} \quad \text{OK}$ | |
| <p>SOLUCIÓN CTE</p> | Sec. 8.8. |
| <p>El Código Técnico de la Edificación considera la reacción situada entre la cara del casquillo y el soporte.</p> | Sec. 8.8.5. |
| <p>La comprobación de la unión entre viga y casquillo se hará con la menor de las posibles cargas de agotamiento considerando las correspondientes a los tornillos de cortadura y las de aplastamiento del alma de la viga y de los casquillos.</p> | |
| <p>No se precisa comprobación de la unión de los casquillos al soporte si se utilizan los mismos tornillos que en la unión entre el casquillo y la viga.</p> | |
| <p>La distribución de fuerzas interiores entre tornillos, en estado límite último, puede considerarse proporcional a la distancia desde el centro del giro. Por tanto, se considerará válida la distribución de esfuerzos realizada por el EC3.</p> | |
| <p>Resistencia al deslizamiento</p> | |
| <p>La resistencia de cálculo a deslizamiento de un tornillo pretensado, es:</p> | Ap. 8.5.3.2. |
| $F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M2}} \cdot F_{p,Cd}$ | Ec. 8.15. |
| <p>Los valores de los parámetros se pueden obtener en el capítulo 7 de esta normativa, pero tomando como coeficiente parcial de seguridad $\gamma_{M2} = 1.25$</p> | Ap. 7.3.2. |
| $F_{p,Cd} = 0.7 \cdot f_{yb} \cdot A_s = 0.7 \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M3}} \cdot A_s = 0.7 \cdot \frac{1000 \cdot 10^{-3}}{1.1} \cdot 245 = 155.9 \text{ kN}$ | Ec. 7.3. |

Sustituyendo los valores de los parámetros (los mismos que para el EC3) y el valor de la fuerza de pretensado, se obtiene:

$$F_{s,Rd} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 0.5}{1.25} \cdot 155.9 = 124.7 \text{ kN} > F_{v,Ed} \quad \text{OK}$$

Resistencia a aplastamiento

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot 2.5 \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

donde :

$$\alpha = 0.8 \rightarrow \text{es el menor de } \frac{e_1}{3d_0}; \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} \quad \text{ó} \quad 1.0$$

$d = 20 \text{ mm} \rightarrow$ diámetro del vástago del tornillo

$t = 7.1 \text{ mm} \rightarrow$ menor espesor de las chapas que se unen

Sustituyendo tenemos:

$$F_{b,Rd} = 2.5 \cdot 0.8 \cdot 430 \cdot 20 \cdot 7.1 / 1.25 = 97.7 \text{ kN} > F_{v,Ed} \quad \text{OK}$$

Comprobación de los casquillos de ángulo y de la sección debilitada del brochal

Ambas comprobaciones se realizan de la misma forma que las otras normativas.

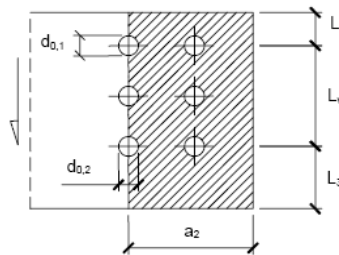
Comprobación al desgarro del alma de la viga

En el caso de extremos de vigas con unión en cortante se adoptará para dicha resistencia el menor valor de:

$$F_{v,Rd} = \frac{f_y A}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{f_u A_{net}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{f_y A_{eff}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$



siendo:

A área bruta de la sección a cortante: $A = t(L_v + L_1 + L_3)$

A_{net} área neta de la sección: $A_{net} = t(L_v + L_1 + L_3 - nd_{0,1})$

A_{eff} área eficaz de la sección: $A_{eff} = t(L_v + L_1 + L_2)$

donde:

$$L_2 = (a_2 - kd_{0,2}) \frac{f_u}{f_y}$$

$t =$ espesor de chapa

$a_2 =$ distancia del borde a la fila de agujeros más alejada

$k = 0.5$ si hay una fila de agujeros

Sec.
8.5.2.2.b.

Sec. 8.5.2.c.

Ec. 8.10.

Sustituyendo tenemos:

$$A = 7.1(50 + 140 + 50) = 1704 \text{ mm}^2$$

$$A_{net} = 7.1(140 + 50 + 50 - 3 \cdot 21) = 1256.7 \text{ mm}^2$$

$$A_{ef} = 7.1(140 + 50 + 77.4) = 1898.5 \text{ mm}^2$$

$$L_2 = (60 - 0.5 \cdot 21) \frac{430}{275} = 77.4$$

$$F_{v,Rd} = \frac{f_y A}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{275 \cdot 1704}{\sqrt{3} \cdot 1.1} = 246 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{f_u A_{net}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2}} = \frac{430 \cdot 1256.7}{\sqrt{3} \cdot 1.25} = 249.6 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{f_y A_{eff}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{275 \cdot 1898.54}{\sqrt{3} \cdot 1.1} = 274 \text{ kN}$$

Por tanto, la resistencia $F_{v,Rd}$ a considerar es $246 \text{ kN} > F_{v,Ed}$ OK

NOTA

Las principales diferencias existentes entre los diferentes planeamientos normativos son que, por una parte la comprobación a desgarro es diferente en los tres documentos, y por otra parte, que la comprobación al deslizamiento del CTE difiere de la EAE y EC3; existen leves cambios, f_{yb} por f_{ub} .