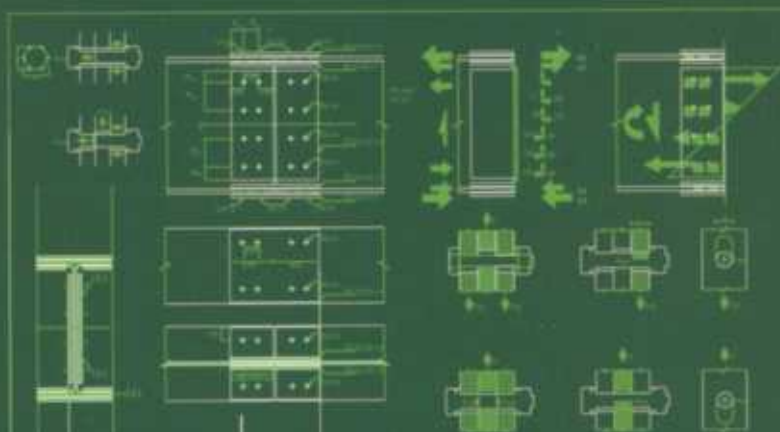


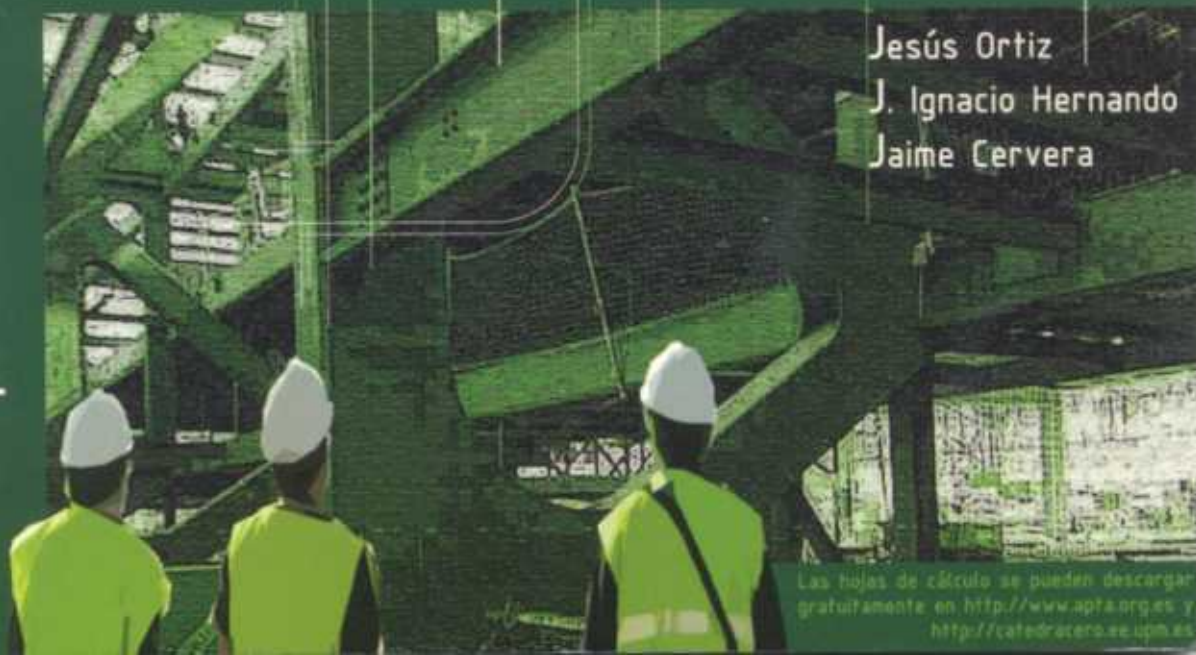
# manual de uniones atornilladas laterales

CatedrAcero



publicaciones APTA

Jesús Ortiz  
J. Ignacio Hernando  
Jaime Cervera



Las hojas de cálculo se pueden descargar  
gratuitamente en <http://www.apta.org.es> y  
<http://catedracero.ee.upm.es>

# Manual de Uniones atornilladas laterales

*Serie:* **PRÁCTICA EN EL PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ACERO EN EDIFICACIÓN**

*Series on:* **DESIGN OF BUILDING STEEL STRUCTURES: DBSS**

*Coordinador:* Prof. Dr. Arch. JAIME CERVERA  
CatedrAcero, **ETSAM, UPM**

*Editor*

*Manual:* **UNIONES ATORNILLADAS LATERALES**

*Handbook:* **LATERAL BOLTED JOINTS: LB**

*Autores:* Prof. Dr. Eng. JESÚS ORTIZ  
**HCA y Dp. Estr. Edif., ETSAM, UPM**

*Authors:* Dr. Arch. JOSÉ I. HERNANDO  
Dp. Estr. Edif., **ETSAM, UPM**  
Prof. Dr. Arch. JAIME CERVERA  
Dp. Estr. Edif., **ETSAM, UPM**

*Colaboradores:* Antonio Aznar López  
Alfredo Lafuente Laguna

*Diseño de portada:* Antonio Aznar López

*Normativa nacional:* CTE DB SE-A M.Vivienda, Spain 2006,  
EAE, Documento 1, M.Fomento, Spain, 2006

*European Codes:* EUROCODE 3, DESIGN OF STEEL STRUCTURES:  
EN 1993-1-1:2005; EN 1993-1-8:2005

# Manual de uniones atornilladas laterales

Jesús Ortiz  
J. Ignacio Hernando  
Jaime Cervera

Software abierto y gratuito en  
Open software



<http://catedracero.ee.upm.es>

Patrocinador:  
Sponsor:



<http://www.apta.org.es>

Desarrollado en:  
Developed in:



<http://www.upm.es>



<http://catedracero.ee.upm.es>

© Jesús Ortiz, J. Ignacio Hernando, Jaime Cervera  
Todos los derechos reservados

ISBN: 978-84-691-8833-0  
Depósito Legal: M. 5.481-2009

Fotocomposición e impresión:  
EFCA, S. A. Parque Industrial "Las Monjas"  
28850 Torrejón de Ardoz (Madrid)

# Índice

<b>1. GENERALIDADES</b> .....	7
1.1 Glosario .....	7
1.2 Clasificación y codificación general de uniones de las estructuras de acero en edificación .....	9
1.3 Acceso al software propiedad de <b>CatedrAcero</b> , de código abierto, con carácter gratuito y educacional, sin asunción de responsabilidad en caso de su uso para prestación de servicios profesionales a terceros o de otra índole ....	11
1.4 Capacidades mecánicas y limitaciones geométricas de los tornillos de alta resistencia pretensados (TR) .....	13
<b>2. UNIONES ATORNILLADAS LATERALES</b> .....	21
2.1 Descripción y utilización de las uniones estudiadas .....	21
2.2 Ejemplos numéricos .....	22
2.3 Explicaciones comunes para todos los libros de cálculo disponibles en <a href="http://catedracero.ee.upm.es">http://catedracero.ee.upm.es</a> .....	28
2.4 Recomendaciones sobre control de calidad .....	34
<b>3. UNIONES ATORNILLADAS LATERALES EN FLEXIÓN SIMPLE, TIPO L00B</b> .....	35
3.1 Descripción y utilización.....	35
3.2 Ejemplo numérico desarrollado .....	37
3.3 Explicación del uso del libro de cálculo disponible en <a href="http://catedracero.ee.upm.es">http://catedracero.ee.upm.es</a> , con referencia al mismo ejemplo anterior.....	48
3.4 Recomendaciones sobre control de calidad .....	63
<b>4. UNIONES ATORNILLADAS LATERALES, TIPO LB00C</b> .....	65
4.1 Descripción y utilización.....	65
4.2 Ejemplo numérico desarrollado .....	67

4.3	Explicación del uso del libro de cálculo disponible en <a href="http://catedracerero.ee.upm.es">http://catedracerero.ee.upm.es</a> , con referencia al mismo ejemplo anterior.....	85
4.4	Recomendaciones sobre control de calidad .....	96
<b>5.</b>	<b>UNIONES ATORNILLADAS ARTICULADAS, TIPO P00B .....</b>	<b>97</b>
5.1	Descripción y utilización.....	97
5.2	Ejemplo numérico desarrollado .....	98
5.3	Explicación del uso del libro de cálculo disponible en <a href="http://catedracerero.ee.upm.es">http://catedracerero.ee.upm.es</a> , con referencia al mismo ejemplo anterior.....	110
5.4	Recomendaciones sobre control de calidad .....	118
<b>6.</b>	<b>UNIONES EXTREMAS EN DILATACIÓN, TIPO E00B.....</b>	<b>119</b>
6.1	Descripción y utilización.....	119
6.2	Ejemplo numérico desarrollado .....	121
6.3	Explicación del uso del libro de cálculo disponible en <a href="http://catedracerero.ee.upm.es">http://catedracerero.ee.upm.es</a> , con referencia al mismo ejemplo anterior.....	130
6.4	Recomendaciones sobre control de calidad .....	136
<b>7.</b>	<b>UNIONES ARTICULADAS DE GRANDES PRESTACIONES, TIPO P00P ..</b>	<b>137</b>
7.1	Descripción y utilización.....	137
7.2	Ejemplo numérico desarrollado .....	142
7.3	Explicación del uso del libro de cálculo disponible en <a href="http://catedracerero.ee.upm.es">http://catedracerero.ee.upm.es</a> , con referencia al mismo ejemplo anterior.....	149
7.4	Recomendaciones sobre control de calidad .....	155
<b>8.</b>	<b>ANEJO: ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL DE APRIETE DE LOS TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA.....</b>	<b>159</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA PARA CONSULTA.....</b>	<b>167</b>

Este manual se complementa con las fichas de cálculo que se facilitan gratuitamente en <http://catedracerero.ee.upm.es> y <http://www.apta.org.es>

# 1. Generalidades

## 1.1 GLOSARIO

$A$	área bruta de la sección transversal del tornillo
$A_{ef}$	área reducida de la sección transversal
$A_f$	área de un ala
$A_s$	área resistente a tracción del tornillo o perno de anclaje
$A_v$	área a cortante
$A_w$	área del alma
$b$	ancho de una sección transversal
$\chi$	coeficiente de reducción por pandeo
$d$	diámetro nominal del tornillo
$d_0$	diámetro del agujero
$\varepsilon$	deformación
$E$	módulo de elasticidad
$e_1$	distancia desde el centro del agujero hasta el extremo adyacente medido en la dirección de transferencia de la carga
$e_2$	distancia desde el centro del agujero del elemento hasta el borde adyacente medido en ángulos rectos respecto a la dirección de transferencia de la carga
ELS	estado límite de servicio
ELU	estado límite último
$F_{b,Rd}$	resistencia a aplastamiento de cálculo por tornillo
$F_{p,C}$	esfuerzo de pretensado
$F_{p,Cd}$	esfuerzo de pretensado de cálculo
$F_{s,Rd}$	resistencia al deslizamiento de cálculo por tornillo en el ELU
$F_{s,Rd,ser}$	resistencia al deslizamiento de cálculo por tornillo en el ELS
$F_{t,Ed}$	solicitación a tracción de cálculo por tornillo para el estado límite último
$F_{t,Rd}$	resistencia a tracción de cálculo por tornillo
$F_{T,Rd}$	resistencia a tracción del casquillo en T equivalente
$f_u$	resistencia última
$F_{v,Ed}$	resistencia a cortante de cálculo por tornillo en ELU
$F_{v,Ed,ser}$	resistencia a cortante de cálculo por tornillo en el ELS
$F_{v,Rd}$	resistencia a cortante de cálculo por tornillo



$f_y$	límite elástico
$G_k$	valor característico de las cargas permanentes
$\gamma_M$	coeficiente parcial
$h$	canto de una sección transversal
$I$	momento de inercia de la sección transversal
$k_1$	coeficiente definido en la tabla 3.4 de EN 1993-1-8: 2005 para cálculo de $F_{b,Rd}$
$\bar{\lambda}$	esbeltez reducida para los efectos de pandeo
$M_{Ed}$	momento flector de cálculo
$M_{Rd}$	valor de cálculo de la resistencia al momento flector
$M_{y,Ed}$	momento flector de cálculo, eje $y$ - $y$
$M_{y,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia al momento flector, eje $y$ - $y$
$\nu$	coeficiente de Poisson en rango elástico
$n$	número de superficies de rozamiento; número de agujeros
$N_{Ed}$	esfuerzo normal de cálculo
$N_{pl,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a tracción de la sección transversal bruta
$N_{Rd}$	valor de cálculo de la resistencia al esfuerzo normal
$N_{u,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia última a tracción de la sección transversal neta, considerando los agujeros para los elementos de unión
$\mu$	coeficiente de rozamiento
$p$	distancia entre centros de los agujeros consecutivos
$p_1$	distancia entre los centros de los agujeros según la dirección de la transmisión de carga
$p_2$	distancia entre filas adyacentes de agujeros medida en dirección perpendicular a la de transmisión de la carga
$Q_k$	valor característico de las cargas variables
$\rho$	coeficiente de reducción para determinar la resistencia de los momentos flectores reducidos por la presencia de esfuerzos cortantes
$R_d$	valor de cálculo de resistencia
$\sigma$	tensión
$t_f$	espesor del ala
$t_p$	espesor de una placa
$t_w$	espesor del alma
$V_{Ed}$	valor de cálculo del esfuerzo cortante
$V_{pl,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a cortante
$V_{wp,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a cortante del alma de un pilar
$W_{pl}$	módulo resistente plástico de la sección
$x$ - $x$	eje longitudinal de un elemento

$y$ - $y$	eje de una sección transversal
$z$	brazo de palanca
$z$ - $z$	eje de una sección transversal
$\alpha$	coeficiente definido en la tabla 3.4 para cálculo de $F_{b,Rd}$
$\chi$	coeficiente reductor para la curva de pandeo considerada

## 1.2 CLASIFICACIÓN Y CODIFICACIÓN GENERAL DE UNIONES DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO EN EDIFICACIÓN

No resulta sencillo establecer una clasificación general de un ámbito tan amplio como es el de las uniones de acero en edificación. Sin embargo dicho objetivo tiene el interés de facilitar la comunicación relativa a éstas, lo que entre otras cosas hará posible la automatización de su análisis y comprobación, al establecer de forma inequívoca las posiciones, geometrías y esfuerzos implicados en la unión.

La clasificación podría hacerse desde diversas perspectivas: caracterizando la posición ocupada en algunos de los elementos estándares de los tipos estructurales habituales en edificación, o caracterizando más bien cualidades genéricas —geométricas y mecánicas— de la unión.

La codificación planteada, aunque parcial, trata de identificar unívocamente la unión seleccionada desde esta última perspectiva.

Las características que han de considerarse en cualquier definición, desde la perspectiva de cada *miembro* de la unión han de responder a las cuestiones siguientes:

<i>Orden</i>	<i>Cualidad</i>	<i>Algunas alternativas</i>
1	Jerarquía	Numeración del orden ocupado en el montaje
2	Geometría general	En continuidad o prolongación, desvío de dirección, acometida (T)
3	Posición (y geometría) de los elementos de fijación	Frontal, lateral, mixto
4	Tipo de enlace	Adosado, atornillado, soldado, híbrido
5	Capacidad resistente relativa a la del perfil	Sobreabundante (120%), completa (100%), parcial (% en ocasiones)
6	Rigidez rotacional relativa (al miembro)	Total, parcial (%), articulación.

Hay que tener en cuenta que las dos últimas cualidades —resistencia y rigidez relativa— lo son en relación a las del perfil (sección) y pieza (sección y longitud), por lo que son de definición problemática.

Por dar un ejemplo sencillo, una prolongación de soporte será en la mayoría de los casos una unión Primaria, en Continuidad, de tipo Frontal Atornillado, de capacidad Completa, y rigidez Total.

La unión completa integrará el conjunto de definiciones correspondientes a todos los *miembros* que la constituyen.

Ahora bien, dado que en general una unión materializa el enlace entre el extremo de una pieza —o *miembro* de la unión— y el resto de la edificación no siempre es necesario/posible precisar todos los aspectos considerados, y la definición puede hacerse considerando sólo parte. Por ejemplo, las uniones de extremo de viga atornilladas que se realizan mediante el recurso a una chapa frontal serán en general uniones secundarias a la de continuidad del soporte, (que tal vez requiera de refuerzo de alma por cortante de nudo, etc.) y las capacidades relativas en resistencia y rigidez (en general parciales) pueden considerarse como una consecuencia del diseño realizado, por lo que basta la caracterización de la geometría empleada.

En esta primera aproximación se emplean nomenclaturas derivadas de las iniciales en inglés de los términos adecuados, de modo que una denominación tiene el formato general

[P|S|T] [C|D|A] (F|L|M) [n] (B|W) [(S|F|R|N) [n] [F|R|N] [n] [C]]

() es una agrupación.

| establece alternativas en ese grupo.

[] establece un elemento opcional que puede especificarse o no.

n es un número, a veces expresa opción, otras porcentaje.

y las iniciales lo son de

Primary, Secondary, Tertiary

Continuity, Deviation, to Attack

Frontal, Lateral, Mixed

Bolted, Welded

Superabundant, Full, Reduced, Null

Composite

CL00BC (en capítulo 4) es por tanto una unión en Continuidad, de enlace Lateral, atornillada mixta

### **1.3 ACCESO AL SOFTWARE PROPIEDAD DE CATEDRACERO, DE CÓDIGO ABIERTO, CON CARÁCTER GRATUITO Y EDUCACIONAL, SIN ASUNCIÓN DE RESPONSABILIDAD EN CASO DE SU USO PARA PRESTACIÓN DE SERVICIOS PROFESIONALES A TERCEROS O DE OTRA ÍNDOLE**

CátedrAcero promueve la divulgación de conocimientos y herramientas apropiadas para el proyecto de estructuras o elementos estructurales de acero en edificación. Dichas herramientas, disponibles en la dirección de Internet <http://catedracero.ee.upm.es>, tienen vocación de extenderse y proliferar, para lo que se distribuyen bajo la Licencia *Reconocimiento-CompartirIgual 2.5 Spain License de Creative Commons*. La licencia es visitable en: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/es/>, su código legal está definido en detalle en <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/es/legalcode.es> y su representación simbólica, empleada en la primera página de este texto así como en la páginas de Internet precisas, es la siguiente:



Reconocimiento (Attribution)



Compartir igual (Share alike)

Dicha licencia reconoce la autoría y la propiedad intelectual sobre el material disponible y establece las naturales limitaciones y exoneraciones de responsabilidad por cualesquiera daños que pudiesen resultar del uso del material distribuido, tanto si se producen por errores en dicho material como si lo son por su empleo incorrecto. La licencia permite al licenciatarario el empleo gratuito del material distribuido, y su incorporación a todo tipo de material derivado, con restricciones. Se establece la obligación al licenciatarario a reconocer la autoría original en cualquier tipo de material derivado, lo que incluye la referencia tanto a los autores como a la página de difusión de CátedrAcero en Internet. La licencia incluye

igualmente la obligación de distribuir cualquier material derivado de éste con una licencia idéntica a la del material original, lo que asegura la futura libre divulgación de dicho material derivado.

La licencia, sin embargo, no restringe el posible uso comercial de ningún tipo de material, sea original o derivado, de los que (o con los que) podrían obtenerse rendimientos económicos en la medida en que se aporte algún tipo de valor o servicio añadido, dado el carácter gratuito del material original.

La filosofía del *copyleft*, frente a la del *copyright*, que está detrás de esta decisión se sitúa en línea con la tradición científica occidental de divulgar y compartir los conocimientos, sin la que el progreso de Occidente no habría sido posible. En la medida en que el conocimiento compartido no reduce el del autor, e incrementa el del receptor, dicha estrategia tiene un mayor potencial de progreso y difusión que la estrategia opuesta y es, por tanto, la adoptada para la divulgación del material de apoyo producido, en aras de su máxima difusión posible. Se trata de asegurar que el empleo del acero en edificación no se vea restringido por razones de dificultad o limitación técnica, ni tampoco por «software cerrado» y de acceso restringido, de la misma manera que los productos siderúrgicos se fabrican en régimen de industrialización «abierta», sin diseños amparados por patentes.

La licencia permite por tanto el empleo educacional del material publicado, y su incorporación en trabajos posteriores, y permite su uso para servicios profesionales a terceros, pero sin asunción de responsabilidad de ningún tipo, que debe ser asumida totalmente por los profesionales que ejecutan dichos servicios.

En este último contexto cabe manifestar la oposición de los redactores de este manual a la mala práctica que supone el empleo de herramientas informáticas avanzadas de análisis o proyecto estructural por profesionales de insuficiente formación en el ámbito de aplicación de dichas herramientas, fiando, irresponsablemente, en la *bondad* de éstas, o en el conocimiento atribuido a sus creadores, y abdicando, al menos parcialmente, en su responsabilidad sobre los proyectos realizados. Se trata de una actitud que a medio plazo generalizaría la irresponsabilidad colectiva sobre la edificación: los creadores de herramientas porque no pueden controlar ni la calidad del conocimiento de sus usuarios ni las repercusiones de ésta en el cada vez más extenso campo de aplicación de las herramientas, y los usuarios por las falsas razones ya señaladas. La licencia con que se distribuye este material de apoyo establece con absoluta claridad que la totalidad de la responsabilidad sobre las soluciones adoptadas corresponde al profesional que las adopta sin posible repercusión ni a las herramientas que emplea para ello, ni a sus creadores.

#### 1.4 CAPACIDADES MECÁNICAS Y LIMITACIONES GEOMÉTRICAS DE LOS TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA PRETENSADOS (TR)

La gama de tornillos adoptada es la de nomenclatura *A* 10.9 según la tabla 3.1 de EN 1993-1-8:2005 y la 4.3 del CTE DB SE-A, con límite elástico 900 N/mm<sup>2</sup> y resistencia última a la tracción 1000 N/mm<sup>2</sup>. Corresponden a los descritos en la siguiente figura de la norma DIN 7999, del tipo «high strength close-tolerance»:

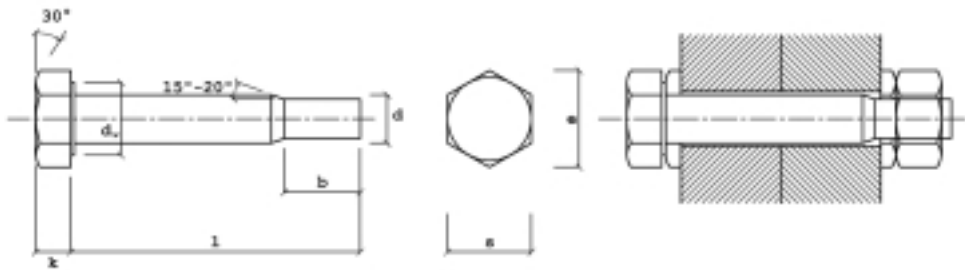


FIGURA 1: TR

Las características de las diferentes métricas se definen en la siguiente tabla (en los ejemplos se ha descartado el *M30*, de uso menos común):

TABLA 1: MÉTRICA Y GEOMETRÍA DE LOS TR

		<i>M12</i>	<i>M16</i>	<i>M20</i>	<i>M22</i>	<i>M24</i>	<i>M27</i>	<i>M30</i>
Diámetro nominal .....	<i>d</i>	12	16	20	22	24	27	30
Area bruta .....	<i>A</i>	113	201	314	380	452	573	707
Area resistente.....	<i>A<sub>s</sub></i>	84,3	157	245	303	353	459	561
Distancia entre arista.....	<i>c<sub>min</sub></i>	22,78	29,59	37,29	39,55	45,2	50,85	55,37
Grosor de la cabez .....	<i>k</i>	8	10	13	14	15	17	19
Paso .....	<i>p</i>	1,75	2	2,5	2,5	3	3	3,5
Diámetro del agujero								
prEN 1090:2006-1 .....	<i>d<sub>0</sub></i>	13	18	22	24	26	30	33

Las separaciones ( $p$ ) y distancias a bordes interiores ( $m$ ) y exteriores ( $e$ ) mínimas se definen a continuación

TABLA 2: MÍNIMOS SEGÚN TABLA 3.3 DE EN 1993-1-8:2005

	<i>M12</i>	<i>M16</i>	<i>M20</i>	<i>M22</i>	<i>M24</i>	<i>M27</i>	<i>Observaciones</i>
$p_1$ .....	29	40	49	53	58	66	$2,2 d_0$
$p_2$ .....	32	44	53	58	63	72	$2,4 d_0$
$e$ (ext.) .....	16	22	27	29	32	36	$1,2 d_0$

TABLA 3: MÍNIMOS TÍPICOS POR MAQUINARIA DE APRIETE, SEGÚN ACCESIBILIDAD  
(VALORES ESTIMADOS ORIENTATIVOS)

	<i>M12</i>	<i>M16</i>	<i>M20</i>	<i>M22</i>	<i>M24</i>	<i>M27</i>	<i>Observaciones</i>
$p$ .....	35	43	47	53	57	65	Variables s. utillaje.
$m$ (int.) $\approx$ .....	30-40	30-40	35-40	40-50	40-50	45-60	$\approx \max \{2d; 35\} \pm 5$

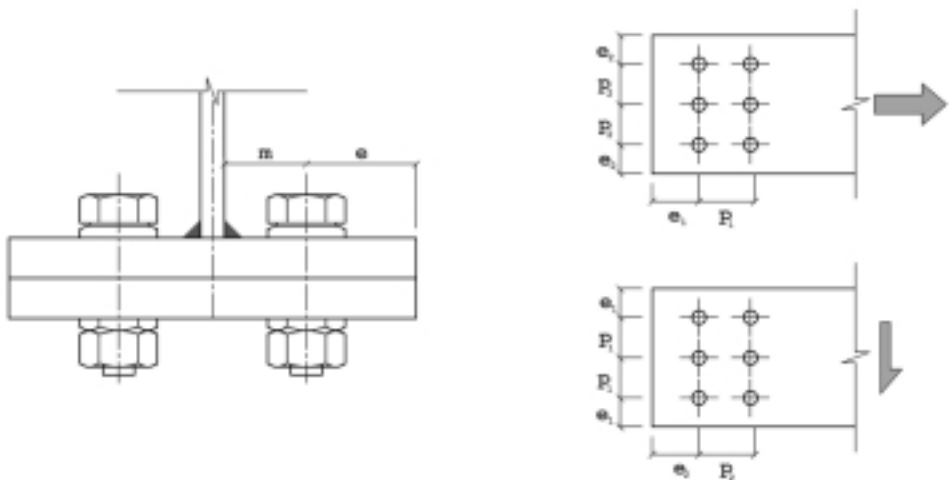


FIGURA 2: SEPARACIÓN ( $p$ ), DISTANCIA AL BORDE INTERIOR ( $m$ ) Y EXTERIOR ( $e$ )

En las siguientes tablas se calculan las resistencias de cada uno de los tornillos previamente definidos (salvo fallo del resto de elementos de la unión por flexión local, aplastamiento, desgarró, etc.). Las expresiones utilizadas se han tomado de EN 1993-1-8 tabla 3.4 y artículo 3.9.1:

$$\begin{aligned} F_{t,Rd} &= 0,9 f_{ub} A_s / \gamma_{M2} \\ F_{v,Rd} &= 0,6 f_{ub} A / \gamma_{M2} \\ F_{s,Rd,ser} &= \mu F_{p,C} / \gamma_{M3}; \end{aligned} \quad F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s$$

Los valores de  $A$  y  $A_s$  están tomados de la tabla 1

TABLA 4: RESISTENCIA DE CADA TORNILLO (CÁLCULOS)

M12:	$F_{t,Rd}$	0,9·84,3·1000/1,25 N	60,7 kN
	$F_{v,Rd}$	0,6·113·1000/1,25 N	54,2 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0,5·0,7·84,3·1000/1,1 N	26,8 kN
M16:	$F_{t,Rd}$	0,9·157·1000/1,25 N	113 kN
	$F_{v,Rd}$	0,6·201·1000/1,25 N	96,5 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0,5·0,7·157·1000/1,1 N	50 kN
M20:	$F_{t,Rd}$	0,9·245·1000/1,25 N	176 kN
	$F_{v,Rd}$	0,6·314·1000/1,25 N	151 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0,5·0,7·245·1000/1,1 N	78 kN
M22:	$F_{t,Rd}$	0,9·303·1000/1,25 N	218 kN
	$F_{v,Rd}$	0,6·380·1000/1,25 N	182 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0,5·0,7·303·1000/1,1 N	96,4 kN
M24:	$F_{t,Rd}$	0,9·353·1000/1,25 N	254 kN
	$F_{v,Rd}$	0,6·452·1000/1,25 N	217 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0,5·0,7·353·1000/1,1 N	112 kN
M27:	$F_{t,Rd}$	0,9·459·1000/1,25 N	330 kN
	$F_{v,Rd}$	0,6·573·1000/1,25 N	275 kN
	$F_{s,Rd,ser}$	0,5·0,7·459·1000/1,1 N	146 kN



TABLA 5: RESISTENCIA DE CADA TORNILLO (TABLA RESUMEN)

	<i>M12</i>	<i>M16</i>	<i>M20</i>	<i>M22</i>	<i>M24</i>	<i>M27</i>	<i>Observaciones</i> <i>Categoría B</i>
$F_{t,Rd}$ (kN)	60,7	113	176	218	254	328	ELU, tracción
$F_{v,Rd}$ (kN)	54	96,5	151	182	217	274	ELU, cortante
$F_{s,Rd,ser}$ (kN)	26,8	50	78	96,4	112	145	ELS, cortante

Material: A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1)

Superficies preparadas y/o tratadas para  $\mu \geq 0,5$   
(EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejo G)

Apretadura: El par de apriete según CTE, EAE o prEN 1090-2:2006-10 (y antigua EA95) para tornillos de alta resistencia tiene mero valor orientativo, para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento empleado

TABLA 6: RESISTENCIA DE TR SOLICITADOS SIMULTÁNEAMENTE A TRACCIÓN Y CORTANTE

<i>EC3 y CTE</i>		<i>EAE</i>	
$F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1,4F_{t,Rd} \leq 1$		$(F_{v,Ed}/F_{v,Rd})^2 + (F_{t,Ed}/1,4F_{t,Rd})^2 \leq 1$	
$F_{v,Ed}/F_{v,Rd}$	$F_{t,Ed}/F_{t,Rd}$	$F_{v,Ed}/F_{v,Rd}$	$F_{t,Ed}/F_{t,Rd}$
0	1	0	1
0,286	1	0,700	1
0,357	0,900	0,766	0,900
0,429	0,800	0,821	0,800
0,500	0,700	0,866	0,700
0,571	0,600	0,904	0,600
0,643	0,500	0,934	0,500
0,714	0,400	0,958	0,400
0,786	0,300	0,977	0,300
0,857	0,200	0,990	0,200
0,929	0,100	0,997	0,100
1	0	1	0

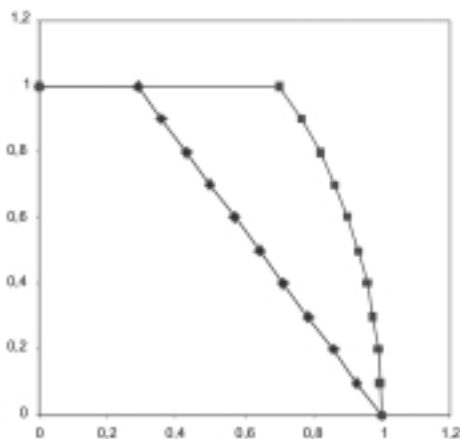


FIGURA 3: RESISTENCIA DE TR SOLICITADOS SIMULTÁNEAMENTE A TRACCIÓN Y CORTANTE (EC3 Y CTE –DIAGRAMA LINEAL–, EAE)

### Comentarios:

Se han supuesto las siguientes condiciones en las tablas previas: Tornillos no avellanados, por lo que  $k_2 = 0,9$  en la expresión de la resistencia a tracción ( $F_{t,Rd}$ ). En el cálculo de  $F_{v,Rd}$  (resistencia a cortante) el plano de corte pasa por la parte no roscada del tornillo tomándose entonces  $\alpha_v = 0,6$  (según CTE DB SE-A el valor a considerar es 0,5). Finalmente en el cálculo de  $F_{s,Rd,ser}$  se ha supuesto un plano de corte y agujeros normales ( $n = 1$  y  $k_s = 1$ ). El valor del coeficiente de rozamiento considerado en la resistencia a deslizamiento en ELS ( $F_{s,Rd,ser}$ ) se discute con detalle en los párrafos que siguen.

Para estructuras de edificación se ha supuesto como «normal» para las uniones atornilladas la categoría B definida por el Eurocódigo 3, para la cual la ausencia de deslizamientos y/o descompresiones de la unión se exige sólo en el estado de servicio. Se trata del tipo adoptado de forma general en CTE-DB-SEA.

La calidad del material del tornillo y las condiciones de preparación de superficies supuestas son las máximas estipuladas por dichos códigos. El coeficiente de rozamiento especificado ( $\mu \geq 0,5$ ) se puede garantizar por uno de los tres procedimientos señalados a continuación: 1) chorreado o granallado al grado  $Sa\ 2\ 1/2$ , sin picaduras de corrosión; 2) chorreado o granallado al grado  $Sa\ 2\ 1/2$  y metalizado por pulverización con aluminio; 3) chorreado o granallado metalizados por pulverización a base de zinc, con ensayo de deslizamiento. Pue-

de encontrarse información adicional en el apartado 8.4 (tabla 14) de prEN 1090-2:2006-10 y en su anejo G, donde se especifica el procedimiento para determinar, mediante ensayo, el coeficiente de rozamiento de cualquier superficie.

En caso de especificarse condiciones menos exigentes, los valores de  $F_{t,Rd}$  y  $F_{v,Rd}$  deben disminuirse proporcionalmente a la resistencia del acero del tornillo, y/o  $F_{s,Rd,ser}$  debe reducirse según el coeficiente de rozamiento especificado en el Proyecto.

El procedimiento de apriete debe garantizar un esfuerzo de pretensado en el tornillo ( $F_{p,C}$ ) correspondiente al 70% de su resistencia a la tracción, tal como se aprecia en los cálculos anteriores, salvo coeficientes parciales de seguridad de la unión ( $\gamma_{M2} = 1,25$  en ELU y  $\gamma_{M3} = 1,1$  en ELS). El control mediante llave dinamométrica del par torsor  $M_t = 0,18 d F_{p,C}$  (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo, para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico debe aportar certificación de la homologación del procedimiento empleado (ensayo según prUNE-EN 14392 o prEN 1090-2:2006-10 anejo O) y debe controlarse expresamente el estado de suministro real de los tornillos respecto del supuesto en los ensayos.

Especialmente clarificador a este respecto resulta el trabajo recientemente publicado por S. Pérez-Fadón, J. E. Herrero, et al. (Hormigón y Acero, nº 236, 2005), del que se toman las figuras adjuntas, en cuya parte inferior se incluyen diferentes tipos de lubricantes ensayados: a) cera petrolífera; b) grasa petrolífera con adición de grafito de consistencia líquida; c) lubricante de bisulfuro de molibdeno; d) pasta de bisulfuro de molibdeno, de los cuales los autores citados recomiendan este último. En los ensayos realizados han medido con célula de carga las fuerzas de pretensado reales en el tornillo: el histograma de frecuencias porcentuales muestra la amplia dispersión de valores, incluso con el lubricante recomendado y bajo condiciones de laboratorio, lo que justifica la aplicación en los cálculos de un coeficiente parcial de seguridad  $\gamma_M > 1$  también para los ELS. Pero especialmente clarificadora resulta la verificación de que el par de apriete experimentalmente evaluado para conseguir la fuerza de pretensado ( $F_{p,C}$ ) deseada, con esas condiciones idóneas de lubricación es aproximadamente un 30% menor que el par torsor teórico  $M_t = 0,18 d F_{p,C}$  (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95), mientras que, en ausencia de lubricación, incluso con un exceso del orden del 15% sobre dicho par teórico, el valor real de  $F_{p,C}$  apenas alcanza el 60% de su valor nominal.

Por lo tanto la homologación del procedimiento y su control expreso en obra son indispensables tanto para evitar roturas de tornillos por posibles aprietes inadecuados, como para garantizar las fuerzas de pretensado teóricas cuando su valor resulte crítico en el cálculo de la unión.

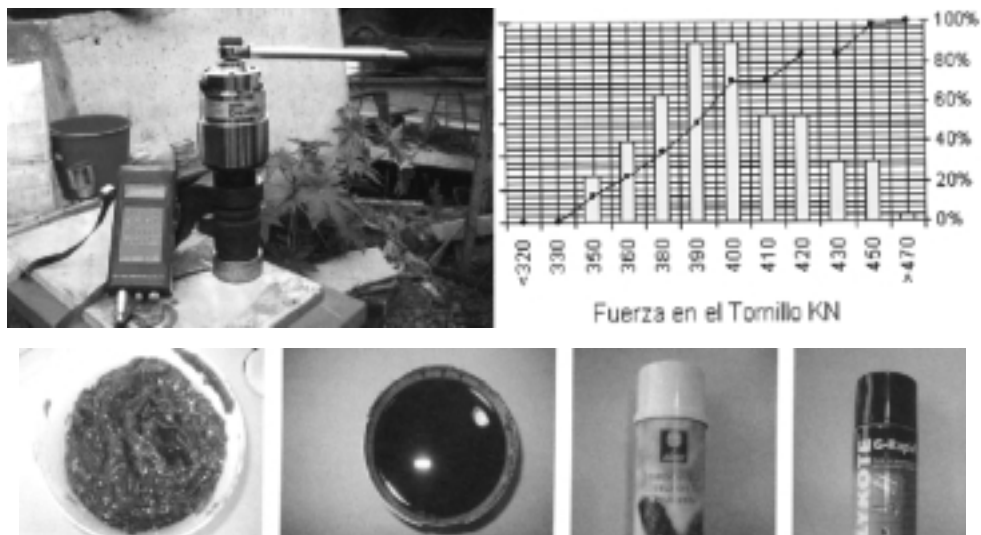


FIGURA 4: S. PÉREZ-FADÓN, J. E. HERRERO, ET AL.  
(HORMIGÓN Y ACERO, Nº 236, 2005)

En la tabla 6 y la figura 3 se comparan los diagramas de interacción para tornillos solicitados simultaneamente a tracción y cortante propuestos por EN 1993-1-8:2005 y CTE DB SE-A por un lado y EAE por otro. En los apartados siguientes siempre se tomará la expresión de la tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005.

En el momento de publicarse el presente manual, la antigua Instrucción EA95 ha quedado definitivamente derogada, mientras que el Código Técnico de la Edificación no incluye especificaciones sobre apriete de los tornillos. La instrucción EAE no existe todavía como norma vigente, y por lo tanto las especificaciones de los Pliegos de Condiciones de los Proyectos deben referirse a los documentos UNE ENV 1090 1:1997 PARTE 1 y UNE ENV 1090 5:1999 PARTE 5, de las que se han extractado los criterios de aplicación en el Anejo del presente manual. Estos documentos serán sustituidos por la euronorma (pr)EN 1090-2:2006-10 aún no publicada en castellano. Los criterios de aplicación de las UNE antedichas no se modifican sustancialmente, aunque sí se amplían algunos; en particular, los relativos al uso de los DTI (IDT = indicadores directos de tensión), cuyo empleo empieza a divulgarse en nuestro país, pero que no están exentos de requisitos para su buena utilización y control.



## 2. Uniones atornilladas

En este capítulo se describen varios aspectos comunes a las uniones que se desarrollan en los siguientes. Su propósito principal es evitar la repetición de conceptos y facilitar el uso del texto: en caso de interesar el estudio de la unión del último capítulo (P00P) bastaría leer aquél y éste, sin necesidad de buscar ideas expuestas en otros capítulos intermedios. El resto de los capítulos del texto, junto con éste, tienen los mismos apartados por lo que la relación entre ellos es inmediata aunque su título varía ligeramente en el actual.

### 2.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN DE LAS UNIONES ESTUDIADAS

Por contraposición a las uniones atornilladas frontales estudiadas en otro Manual, las uniones atornilladas analizadas en éste proceden de soluciones clásicas de la antigua construcción roblonada.

Su utilización está especialmente indicada en aquellos casos donde las soluciones frontales no son utilizables por condiciones de tipo geométrico, o porque no permiten algunos de los grados de libertad de movimiento exigidos a la unión. Como contrapartida, en general cabe esperar en las mismas un número mayor de tornillos y/o elementos secundarios (casquillos, cubrejuntas, etc.)

Por ejemplo, el problema típico de las uniones frontales, de que no se adaptan exactamente a la silueta de la sección de la pieza, sino que requieren extenderse en sentido transversal o vertical, puede minimizarse con uniones atornilladas laterales, pero a costa de uniones más prolijas, lo que aconsejará tener muy presente la buena práctica de alejar la unión de las secciones más solicitadas: esta regla clásica puede relajarse frecuentemente en las uniones frontales, pero aquí debe aplicarse con carácter radical, lo que determinará que los despieces para fabricación, transporte y montaje puedan diferir de los que resultarían más idóneos por razones constructivas.

Las uniones articuladas en las que no basta cumplimentar la condición estática de transmitir sólo fuerzas sin excentricidades significativas respecto del punto teórico de unión, sino que además deben proporcionar una prestación cinemática cuantificable, es decir, un desplazamiento o un giro permitidos de valores concretos, son prácticamente inviables con

uniones atornilladas frontales, y por supuesto también con uniones soldadas, siendo éste en cambio un campo apropiado para las uniones «laterales» como las aquí desarrolladas.

Las tolerancias constructivas, que son casi nulas en la construcción soldada, y estrictas y difíciles de implementar en las uniones atornilladas frontales, se consiguen más fácilmente en las uniones atornilladas laterales, mediante taladros alargados adecuadamente diseñados y considerados en el cálculo.

El empleo de elementos de unión pretensados («tornillos de alta resistencia») o no pretensados (tornillos «ordinarios» y «bulones» o «pasadores»), dentro de las uniones consideradas en este manual, debe efectuarse en función del grado de movilidad requerido de los mismos.

Por ejemplo, como caso extremo, una articulación con bulón, con requerimiento de giros importantes, obviamente no puede realizarse con un elemento pretensado. Esto no quiere decir que no sean posibles diseños de uniones articuladas con tornillos pretensados, como son por ejemplo las clásicas uniones con casquillos de angular adosados, cuya flexibilidad puede ser compatible con los giros requeridos de la unión.

Un caso donde los tornillos pretensados son indispensables es en los empalmes laterales con cubrejuntas. En éstos, salvo en uniones con solicitaciones dinámicas, es habitual realizar el cálculo en estado límite último admitiendo deslizamientos en la unión. Pero tales deslizamientos son, en cambio, totalmente inaceptables en situaciones de servicio, salvo que se evalúen los generalmente prohibitivos incrementos de movimientos globales de la pieza y/o de la estructura, por efecto de las discontinuidades de giros y desplazamientos de los elementos unidos, cuando se rompe la fricción que impide los deslizamientos. Por este motivo el correcto apriete de los tornillos y su indispensable control de calidad son críticos en este tipo de uniones laterales. Según se ha indicado ya anteriormente, sobre dicha cuestión se extractan en el Anejo final de este Manual los criterios normativos actualmente vigentes (2008).

Por el mismo motivo, en dichos tipos de uniones son críticos los coeficientes de rozamiento de las superficies en contacto, cuyos valores deberán quedar clarísimamente indicados en el Proyecto, así como los criterios de aceptación o rechazo, para el indispensable control de calidad (EAE, M.F. 2006: 58.7; CTE DB SE-A, M.V. 2006: 7.3.2; EN 1993-1-8: 2005 3.9.1, tabla 3.7 y prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14).

## 2.2 EJEMPLOS NUMÉRICOS

En el apartado número 2 de los capítulos que siguen se desarrollan los cálculos necesarios para comprobar cada unión, constituyendo, por tanto, el núcleo de los mismos. 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). De este modo se entiende la tabla 6.1 (y los artículos posteriores) de EN 1993-1-8:2005 donde se enumeran cada una de las «componentes básicas» de una unión entre una viga y un pilar: 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 del 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 básico de la cadena invalida todo el sistema.

La estructura del apartado 2 de todos los capítulos que siguen es común para todos ellos, salvo pequeñas diferencias marginales. Dicha estructura está recogida en la siguiente tabla.

ESTRUCTURA DEL APARTADO 2 DE LOS SIGUIENTES CAPÍTULOS

---

**Capítulos 3, 4 y 5 [LP]\*\*B**

*Capacidad resistente del perfil base*  
*Solicitaciones nominales de la unión*

*ELU según EN 1993-1-8:2005*

Cálculos preliminares

Conjunto de la unión

*ELS (categoría B) según EN1993-1-8:2005*

Cálculos preliminares

Conjunto de la unión

*Resistencia de la sección neta*

*Resistencia a desgarro del alma*

**Capítulos 6 y 7 [EP]\*\*[BP]**

*[Capacidad resistente del perfil base]*

*Solicitaciones nominales de la unión*

*ELU según EN 1993-1-8:2005*

Cálculos preliminares

Conjunto de la unión

*[Resistencia de la sección neta]*

*[Resistencia de la sección neta]*

---

El título de la primera sección de este apartado se ajusta a la codificación de la unión propuesta en el apartado 1.2, a la que se añade el tipo y calibre del perfil base junto con la clase del acero y, opcionalmente, alguna característica adicional relevante de la unión. En dicha sección se describe cada unión a través de un cuadro autocontenido, de manera que



puede transcribirse inmediatamente a los planos y/o al resto de documentación de proyecto. En el cuadro se sintetizan, por tanto, los datos básicos de cada unión. El cuadro tiene siempre la siguiente estructura con retoques menores.

<b>TORNILLOS</b>			
<p><i>A</i> 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1)            Superficies preparadas y/o tratadas para <math>\mu \geq 0,5</math>            (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejo G)</p>			
<p>El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.</p>			
Valores característicos (N/mm <sup>2</sup> )		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1,25$

<b>Definición de la Unión:</b> <b>[LEP][n][BP] [IPE][HE]nnn[ABM] (S[275/355][JR/J2G3])</b>			
Cubrejuntas alma (S[275/355])		Cubrejuntas alas (S[275/355])	
n # b · h · t		n # b · h · t	
<b>Tornillos alma</b>		<b>Tornillos alas</b>	
Tornillos	Distancias	Tornillos	Distancias
<i>A</i> 10.9 ( $\mu = 0,5$ )	(mm)	<i>A</i> 10.9 ( $\mu = 0,5$ )	(mm)

En las uniones sin cubrejuntas de alas se eliminan las celdas correspondientes por lo que las últimas filas de la tabla se reestructuran ligeramente. El significado de los símbolos  $[\ ]$  y el de  $|$  es el dado en la sección 1.2. En el cuadro se incluyen los datos geométricos que permiten definir la unión y también las propiedades de los materiales de la unión, de forma que si se incorpora el cuadro en los planos del proyecto la unión quede definida de forma autocontenida. Como se indicó en 1.4 en todas las uniones pretensadas se ha optado por utilizar los tornillos de la máxima categoría de los contemplados en la tabla 3.1 de EN 1993-1-8:2005 (en realidad sólo puede optarse por esta clase y la 8.8 si las uniones son de categoría B según EN 1993-1-8:2005 tabla 3.2 o artículo 3.9.1) y el coeficiente de rozamiento en todas las uniones estudiadas es el máximo posible según EN 1993-1-8:2005 (tabla 3.7). En el citado apartado 1.4 se han indicado los procedimientos para garantizar este valor de  $\mu$ , y en él se justifican las razones para reiterar en todos los documentos del proyecto las referencias al procedimiento de pretensado. Obviamente todas estas consideraciones son superfluas en las uniones no pretensadas de los últimos capítulos, por lo que se han suprimido las filas correspondientes de la tabla anterior y reducido la calidad del acero de los bulones de dichas uniones. En los cuadros de algunos capítulos se incluyen los valores de diversas holguras de fabricación y montaje. Esto es así cuando dichas holguras son condicionantes para el buen funcionamiento de la unión: Cuando son necesarias para asegurar un comportamiento acorde de la unión con las hipótesis del modelo de análisis (CTE DB SE A 8.1). Salvo en los casos indicados todas las uniones de esta guía se comprueban asumiendo unas tolerancias de fabricación (g) y montaje de 15mm. Los valores estándar en estructuras metálicas de edificación son del orden de los 10mm, valores que deberán asumirse, aumentarse o disminuirse según los criterios del proyectista.

### **Capacidad resistente del perfil base. Solicitaciones (nominales) de la unión.**

Caracterizada la unión, en las dos siguientes secciones de este apartado se determinan las sollicitaciones para las que se desarrollarán los cálculos de la unión y se comprueba el perfil de la misma. Para obtener las sollicitaciones se han seguido los dos métodos propuestos en EN 1993-1-1:2005: Diseño en capacidad (1.5.8) o un análisis global estándar (5.2). En los capítulos 3, 4, 5 y 6 se optó por el diseño en capacidad en el cual se parte no de los esfuerzos obtenidos en un análisis global sino de los máximos que pueden ser transmitidos desde elementos contiguos. Así se justifica que antes de indicar los valores de cálculo de la unión se evalúen los del diagrama de interacción M/V del perfil base. El estudio de la unión se

concluye una vez verificado que el diagrama de interacción de la unión incluye al de la sección base. En la práctica habitual se verificarán sólo algunos puntos del diagrama, si bien en los capítulos siguientes el estudio se reducirá al punto del diagrama que se considera más significativo.

Las solicitaciones con las que se estudian las uniones del capítulo 7 se toman de un «análisis global» estándar de la estructura. En este capítulo las solicitaciones de servicio se pueden obtener del mismo análisis global antedicho, mientras que para las uniones calculadas por «capacidad» deben determinarse dividiendo las solicitaciones de cálculo para un valor  $\gamma_f$  promedio entre 1,5 y 1,35. Dicho valor promedio depende de la relación entre las distintas categorías de las acciones de cada proyecto. Un valor típico en edificación es 1,41.

### **ELU según EN 1993-1-8:2005**

En esta sección y en la siguiente de cada uno de los próximos capítulos se realiza propiamente la comprobación de la unión atornillada correspondiente.

Los cálculos se plantean en forma de «comprobación», no de «dimensionado». En la práctica del proyecto este planteamiento es útil si se parte de un dimensionado estimado a priori, próximo al dimensionado final (por consideraciones semiempíricas, tales como ubicar el conjunto de tornillos con su CDG próximo a la posición de la resultante del conjunto de solicitaciones, y dotándoles de una capacidad mecánica global ligeramente superior a la resultante antedicha) y el «ajuste fino» se realiza por «prueba y error» con herramientas informáticas apropiadas (por ejemplo, «libros de cálculo» con las diversas comprobaciones programadas, que agilicen dicha labor que de otro modo puede resultar muy tediosa).

El análisis del ELU se inicia estimando la resistencia a cortante de cálculo de cada uno de los tornillos ( $F_{v,Rd}$ , tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005), asumiendo que los planos de corte no atraviesan la zona roscada. Asimismo, se calcula la resistencia a aplastamiento tanto de los cubrejuntas como del alma y las alas del perfil base ( $F_{b,Rd}$ , tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005), tomando en los cálculos manuales  $k_t = 2,5$ ; hipótesis plausible si en el diseño de la unión se satisfacen las distancias mínimas de EN 1993-1-8:2005, aunque en los «libros de cálculo» este valor se ajusta automáticamente. En los capítulos 6 y 7 estas comprobaciones se complementa y/o sustituyen por la comprobación del tornillo como un bulón según el artículo 3.13 de EN 1993-1-8:2005.

Obtenidos estos valores se inicia la sección «*Conjunto de la unión*», en la cual se propone simplemente una distribución equilibrada de esfuerzos en los tornillos que además cum-

ple con sus condiciones de resistencia previamente calculadas. Siempre que se cumplan las condiciones de aplicación de la teoría de la plasticidad, aun con la certeza de que la distribución propuesta no es la real, la unión es segura por basarse el procedimiento en el teorema estático. EN 1993-1-8:2005 3.12 (1) avala el uso del cálculo plástico en las uniones que se estudian en esta guía siempre que la resistencia de cálculo a cortante de los tornillos sea inferior a la resistencia de cálculo a aplastamiento de la chapa que unen (artículo 3.12 (2)). En este caso deben asignarse «elásticamente» los esfuerzos a cada uno de los tornillos según las reglas de la resistencia de materiales. Los criterios adoptados por CTE DB SE A en este aspecto (artículo 8.8.4 1) son equivalentes a los del Eurocódigo.

### **ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005**

Esta comprobación se realiza únicamente para las uniones de los capítulos 3, 4 y 5. EN 1993-1-8:2005 clasifica las uniones pretensadas en 5 categorías. Para la categoría B se indica que no deben producirse deslizamientos en el estado límite de servicio.

Se inicia este apartado calculando la fuerza de pretensado de cada tornillo  $F_{p,C}$  y su resistencia de cálculo a deslizamiento  $F_{s,Rd}$  de acuerdo con EN 1993-1-8:2005 3.9.1 (2) y (1) respectivamente. Comparando estos valores con una estimación de los efectos de las solicitaciones de servicio se comprueba que no superan el «Rozamiento» de la unión, por lo que en servicio no se producen deslizamientos. La labor más tediosa del proceso es distribuir «elásticamente» las solicitaciones de la unión entre los elementos de unión (tornillos) de acuerdo con las reglas de la resistencia de materiales avaladas por EN 1993-1-8:2005 y CTE DB SE A (el axil de forma proporcional al área de los cubrejuntas, el momento de manera proporcional a la inercia de cada cubrejuntas, etc.).

### **Resistencia de la sección neta. Resistencia a desgarrar del alma**

En el primero de estos dos apartados finales se comprueba la sección neta tanto de los cubrejuntas como de las alas y el alma del perfil base según los artículos 6.2.3 y 6.2.6 de EN 1993-1-1:2005. En el segundo se hacen las comprobaciones propuestas en el artículo 3.10.2 de EN 1993-1-8:2005 y las del artículo 8.5.2 del CTE DB SE A, que aunque conceptualmente iguales difieren en algún factor numérico.

## 2.3 EXPLICACIONES COMUNES PARA TODOS LOS LIBROS DE CÁLCULO DISPONIBLES EN <http://catedracero.ee.upm.es>

Como ya se ha indicado los cálculos que se exponen en el apartado 2 de cada capítulo se plantean en forma de «comprobación», no de «dimensionado». Este planteamiento es útil en la práctica del proyecto si se parte de un dimensionado inicial estimado próximo al dimensionado final, y si el «ajuste fino» se realiza rápidamente con ayuda de herramientas informáticas apropiadas.

Para satisfacer la segunda condición se aporta un «libro de cálculo» para cada unión estudiada en los capítulos que siguen. En cada uno de ellos se han programado las diversas comprobaciones necesarias para verificar la unión correspondiente. Los «libro de cálculo» se han desarrollado por CátedAcero en formato de «código abierto», lo cual permite a quien los utilice examinar las expresiones programadas, asumirlas si lo considera oportuno, o modificarlas según su propio criterio.

Como se indicó en el apartado 1.3 los «libros de cálculo» se distribuyen bajo licencia *Reconocimiento-CompartirIgual 2.5 Spain License de Creative Commons*. Los términos de la licencia y la relación de autores, por orden alfabético, se incluyen en una primera hoja del «libro de cálculo» titulada licencia.

### 2.3.1 Contenidos

Además de la hoja anterior los «libros de cálculo» contienen las siguientes hojas:

*licencia, PRESENTACION, DATOS, DISTANCIAS, NUDO, Datos\_PI, Resul\_PI, FB, CHAPA, perfiles, aceros, tornillos, codigos, dxf y dibujos.*

De estas hojas están ocultas las que no se imprimirían en un informe profesional sobre la unión que se estudia (licencia, Datos\_PI, Resul\_PI, perfiles, aceros, tornillos, codigos, dxf y dibujos). En varias uniones algunas de estas hojas carecen de contenido por lo que se han eliminado. Se ha seguido el criterio de nombrar a las hojas ocultas con letras minúsculas. A continuación se describen brevemente esta primera clase de hojas:

1. Hoja perfiles: incluye una tabla con las constantes estáticas de los perfiles comerciales habituales. Sólo pueden analizarse nudos formados por perfiles incluidos en esta

tabla. Para estudiar nudos constituidos por otros perfiles debe accederse a esta tabla («mostrarla») e incluir en ella las propiedades de la nueva sección, con la precaución de que los primeros caracteres del campo «id» (columna A) no coincidan con los de otro registro de la tabla, pues de otro modo aparecerá un error al intentar acceder a los datos del nuevo perfil. Para nombrar a los perfiles de la familia *HE* se ha seguido el criterio que usualmente utilizan los fabricantes en sus catálogos: tras el código *HE* se añade un número y finalmente una o varias letras que indica la serie: *A*, *B*, *M*, *\_AA* (el carácter ‘\_’ es necesario en la serie *AA* pues de otro modo la hoja de cálculo confunde *HE\*\*\*A* con *HE\*\*\*AA*, mostrando el error ya comentado).

2. Hoja aceros: Esta hoja incluye una tabla con las propiedades de los aceros junto con diversos coeficientes  $\gamma$  asociados al material. El único dato que se introduce en el uso común de las hojas de cálculo es la clase del acero, que, obviamente, debe estar descrito en esta hoja. En todos los ficheros están definidos los aceros S355, S275 y el A10.9. Para utilizar otro acero simplemente se sustituye uno de los anteriores o se «inserta» una fila entre los anteriores y se define el nuevo material (conviene insertar una fila en lugar de añadirla a continuación de las ya existentes. De este modo se redefinen las «áreas de datos» automáticamente). En el fichero F00LC.xls a los aceros anteriores se añade el de las armaduras pasivas. El valor de  $\gamma_M$  que se usa en los cálculos es 1.0. Puede cambiarse editando esta hoja (1.0 según EAE y EN 1993-1-8:2005 o 1.05 si se utiliza el CTE).
3. Hoja tornillos: Se definen las propiedades geométricas ( $d$ ,  $d_0$ ,  $A$ ,  $A_s$ , etc.) de los tornillos usuales (*M12*, *M16*, *M20*, *M22*, *M24*, *M27*). Asimismo, se incluyen las distancias mínimas contempladas en EN 1993-1-8:2005 y las distancias mínimas basadas en criterios de accesibilidad derivados del uso de la maquinaria de apriete.
4. Hoja códigos: Aquí se definen algunas variables que se utilizan en el resto de las hojas.
5. Hoja Datos\_PI: Se escriben en forma matricial las ecuaciones y restricciones que rigen el problema para facilitar la implementación del algoritmo (de Punto Interior) que las resuelve. En esta hoja se puede variar el dato Niter (número de iteraciones).
6. Hoja Resul\_PI: Resultados del algoritmo antedicho.
7. Hojas dxf y dibujo: Contienen los datos necesarios para trazar un dibujo en formato dxf de la unión que se analiza. Cada vez que se modifica un valor en la hoja DATOS se actualizan estas hojas y el fichero gráfico, el cual se archiva en el directorio de trabajo (que normalmente es la carpeta «Mis Documentos»).
8. La hoja licencia ya ha sido comentada.

Las hojas que a continuación se describen son las que normalmente se imprimirían a la hora de realizar un estudio profesional de la unión: son las hojas del libro que normalmente no estarán ocultas. Se ha seguido el criterio de nombrarlas con letras mayúsculas y su contenido es el siguiente:

1. Hoja PRESENTACION: En ella se incluye una descripción gráfica de la unión junto con unos criterios básicos de diseño y utilización.
2. Hoja DATOS: Esta es la única hoja que debe manipular el usuario en el uso habitual del libro de cálculo. Las únicas celdas que deben modificarse son las coloreadas en verde claro. Los demás valores se ajustan automáticamente.  
Cuando existe alguna inconsistencia geométrica aparecerá el mensaje NO VÁLIDO en la casilla correspondiente.
3. Hoja DISTANCIAS: Para cada fila de tornillos se chequean las distancias entre ellos ( $p$ ) y la distancia al borde exterior de la chapa ( $e$ ). Se comprueban las prescripciones de EN 1993-1-8:2005 y los valores mínimos por accesibilidad que dicta la experiencia. Las comprobaciones se realizan tanto en la dirección de transmisión del esfuerzo como en la perpendicular. Se calculan los factores de reducción  $\beta_{Lj}$  (unión larga EN 1993-1-8:2005 3.8),  $\alpha$  y  $k_1$  (tabla 3.4) de  $F_{b,Rd}$ . Para cada una de las comprobaciones la hoja devuelve los valores VÁLIDO o NO VÁLIDO de interpretación inmediata. En algunos casos el resultado de la hoja es (*VÁLIDO*)(entre paréntesis y en cursiva). Éste aparece cuando las distancias son mayores que los mínimos de EC3, pero tales que  $\alpha$  es menor que 1 (es decir, la distribución de los tornillos no permite aprovechar toda la capacidad  $F_{b,Rd}$  de la chapa, lo que para las tipologías estudiadas en esta guía no suele ser la condición más restrictiva). Las distancias sólo resultan válidas si además de cumplir los mínimos, resultan concordantes con las dimensiones totales de la chapa frontal; comprobaciones que se realizan en la hoja DATOS.
4. Hoja NUDO: Se hacen diversas comprobaciones del perfil base.
5. Hoja LB: Es en esta hoja donde se realizan las principales comprobaciones de la unión tanto en ELU como en ELS. Estas son las siguientes:
  - a. Comprobación de la unión en ELU.
    - i. Se comprueban, para cada tornillo, las condiciones de resistencia del mismo y las de aplastamiento de la chapa.
    - ii. Se comprueban las ecuaciones de equilibrio para el conjunto de la unión.

- b. Comprobación de la unión en ELS.
  - i. Se verifica que en servicio no se producen deslizamientos en la unión.

Como anteriormente para cada comprobación la hoja devuelve los valores VÁLIDO o NO VÁLIDO.

- 6. Hoja CHAPA: En esta última hoja se hacen los siguientes chequeos:
  - a. Se comprueba la sección neta de los cubrejuntas y del alma y alas del perfil base según EC3 (EN 1993-1-1: 2005): art. 6.2.3 y 6.2.6.
  - b. Se comprueba el desgarro de los cubrejuntas y el perfil base según EC3 (EN 1993-1-8: 2005) art. 3.10.2 y CTE DB SE A: art. 8.5.2.

### 2.3.2 Algoritmos

Actualmente los algoritmos están programados como varios «módulos» de VisualBasic.

En el primer módulo se encuentra el algoritmo que se destina a determinar la distribución de esfuerzos entre los diferentes tornillos de la unión y el perfil base.

Como cualquier análisis rígido-plástico en el que las restricciones se han linealizado el problema de obtener la «mejor» distribución de esfuerzos se reduce a un problema matemático de programación lineal. La función IP es una mera transcripción del algoritmo para resolver esta clase de problemas descrito en el texto «Linear Programming: Foundations and Extensions. Robert J. Vanderbei. 2nd ed., springer 2001. (puede localizarse el texto en formato pdf en <http://www.princeton.edu/~rvdb/LPbook/>)». Únicamente se han «traducido» los nombres de las distintas matrices y vectores del texto original al «lenguaje estructural» de forma que resulte más sencillo de leer por un especialista en este área del conocimiento.

El algoritmo, tal como está formulado, permite obtener el máximo factor de carga para el cual se satisfacen las ecuaciones de equilibrio (primera regla que debe cumplirse en el diseño estructural) junto con cualesquiera otras restricciones lineales. Estas restricciones pueden ser de igualdad o de desigualdad, pudiendo fácilmente pasarse de una clase a otra mediante adecuadas variables de holgura positivas (que es lo que se hace en la hoja Datos\_PI). El resultado del algoritmo se escribe sobre la hoja Resul\_PI, donde junto al mayor factor de carga posible de las solicitaciones se presenta para dicho estado los esfuerzos en cada tornillo, así como las distintas variables de holgura y duales (todas ellas con significado físico aun cuando no se uti-



licen). Si el factor de carga máximo es mayor que 1 el diseño propuesto para la unión es satisfactorio. No ocurre así cuando este factor de carga es inferior a la unidad. Puesto que en la hoja LB se desea escribir una distribución de esfuerzos que satisfaga exactamente las ecuaciones de equilibrio, los esfuerzos obtenidos para el «estado óptimo» se dividen por el factor de carga máximo. Si éste es menor que uno, se «amplificarán» los esfuerzos y no cumplirán las condiciones de resistencia. Por el contrario, cuando el factor de carga sea mayor que la unidad, los esfuerzos se «reducen» y cumplirán de sobra con los criterios de resistencia.

La distribución «elástica» de esfuerzos en los tornillos en ELS se realiza de acuerdo con las leyes de la resistencia de materiales, siguiendo los criterios de EN 1993-1-8:2005 y CTE que se indican en cada unión particular. Para la unión «mixta» del capítulo cuarto se implementa sobre la propia hoja de cálculo un sencillo algoritmo para obtener las constantes estáticas de una sección fisurada.

El cálculo de las constantes antedichas de una sección fisurada es trivial si se conoce la posición de la fibra neutra: basta omitir la parte «traccionada» de la losa. Con ayuda de una hoja de cálculo determinar con precisión suficiente la posición de la fibra neutra es asimismo otro ejercicio trivial, siempre que sean posible las referencias cruzadas. Junto con los valores de  $A$ , e  $I$  se determina el  $CDG$  de la sección y se hace que la celda en la cual se introduce la cota de la fibra neutra sea igual a la celda en la que se calcula el  $CDG$  (en algunas ocasiones —frecuentemente si se interrumpen los cálculos sin haber concluido— las celdas con referencias cruzadas dan un error. Para subsanarlo se asigna un valor fijo arbitrario a la cota de la fibra neutra y a continuación se iguala la celda anterior a la que muestra el  $CDG$  de la sección. Cuando se produce este error en la propia hoja de cálculo se indican los pasos a seguir para subsanarlo. Obviamente debe estar activada la opción del programa que permite referencias cruzadas y es recomendable que el número de iteraciones se fije en 1000).

Calculadas las constantes estáticas de esta sección ideal fisurada la obtención de las fuerzas  $F_{x,ser}$  es trivial de acuerdo con las leyes de la resistencia de materiales.

### 2.3.3 Introducción de datos

Como se ha indicado el usuario final de las hojas de cálculo normalmente sólo tiene que manipular las casillas coloreadas en verde claro de la hoja DATOS. Los datos que se introducen son los siguientes:

1. Solicitaciones de cálculo de la unión y coeficiente  $\gamma$ .

2. Perfil o perfiles de la unión, clase de acero y cuando procede ancho de garganta de las soldaduras.
3. Geometría de los cubrejuntas, los casquillos, etc., clase de acero y coeficiente de rozamiento.
4. Métrica de las distintas filas de tornillos y clase de acero de los mismos.
5. Número de tornillos de cada fila y distancias entre ellos. Cuando exista alguna inconsistencia geométrica en las distancias facilitadas aparecerá el mensaje NO VÁLIDO en la casilla correspondiente.

En alguna situación «patológica» el algoritmo IP, brevemente descrito previamente, puede no converger con el número de iteraciones preestablecido en la hoja (oculta) Datos\_PI. En este caso el usuario puede modificar el número de iteraciones del algoritmo introduciendo el nuevo valor en la única casilla coloreada en verde claro de dicha hoja.

Las casillas « $\alpha e_2$ » de la hoja DISTANCIAS permite considerar en el cálculo de  $\alpha$  (tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005) el término debido a  $e_1$  (distancia al borde en la dirección de transmisión del esfuerzo) u omitirlo. Esto tiene sentido cuando se estudia el alma del perfil base y el esfuerzo predominante es de compresión. Aun siendo un dato que puede modificar el usuario no se ha seguido el código de colores de la hoja DATOS, pues en el uso habitual de las fichas esta opción raramente se considerará.

#### 2.3.4 Interpretación de resultados

Como se ha visto la interpretación de los resultados es trivial. Cada libro de cálculo propone una distribución de fuerzas en los tornillos obtenida automáticamente de acuerdo con el algoritmo someramente descrito. Para este estado se comprueban los distintos eslabones que componen la unión resaltándose su validez o invalidez. De este modo, una rápida inspección visual de la hoja permite aceptar o rechazar el diseño de la unión.

Junto a estos resultados se crea un fichero gráfico de la unión en formato dxf. El objeto de dicho fichero es poder incluir de forma inmediata en la documentación gráfica del proyecto los resultados del análisis, si bien, es responsabilidad del usuario asumir los cálculos y los dibujos propuestos o modificarlos según su propio criterio.

## **2.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD**

Las conclusiones, recomendaciones y métodos de cálculo expuestos en los capítulos que siguen no deben extenderse más allá de los límites sancionados por la experiencia. En particular puede resultar temerario el uso no crítico de los «libros de cálculo» que se distribuyen con esta guía, al no limitarse en ellos el número de tornillos por fila ni el número de estas, lo que se deja al buen criterio del usuario de las mismas.

# 3. Uniones atornilladas laterales en flexión simple, tipo L00B

## 3.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN

Sirve esta unión para realizar el empalme en continuidad de piezas de sección doble T, destinadas a transmitir solicitaciones de flexión simple (momento flector y esfuerzo cortante), pudiendo generalizarse también para casos con esfuerzo axil concomitante.

El diseño de esta unión procede de la antigua construcción roblonada, y responde a la concepción de transformar las resultantes de fuerzas longitudinales (tracciones y compresiones producidas por el momento flector) en esfuerzos rasantes que se canalizan a través de los medios de unión hacia chapas dispuestas a modo de cubrejuntas. Éstas vuelven a trabajar en tracción o compresión, para devolver de nuevo en su otro extremo dichas fuerzas, mediante esfuerzos rasantes, a la otra pieza unida.

Se evitan de esta manera radicalmente las solicitaciones de tracción perpendiculares al plano de laminación, condición «sine qua non» para unir los antiguos aceros, muy susceptibles al temible «defecto de hoja». Fenómeno que sin tanta virulencia ha subsistido hasta nuestros días en forma de otra patología, denominada «desgarro laminar» en el Código Técnico de la Edificación, que no por ser menos probable con los aceros actuales, es menos peligrosa.

Con esta denominación de «desgarro laminar», traducción del «lamelar tearing» de los Eurocódigos, vuelve a estar presente dicho fenómeno en los condicionantes del proyecto y control, después de un paréntesis de dos generaciones (las cuales, por «formarse» a través de las normas, han ignorado aquel fenómeno, que tan vívido ha permanecido entre los buenos constructores y los viejos proyectistas).

La nueva situación normativa no debe llevar a exacerbar la predisposición en contra de la transmisión de fuerzas perpendiculares al plano de las chapas: Por ejemplo, en las uniones atornilladas frontales los propios tornillos «cosen» perpendicularmente el virtual plano de exfoliación minimizando el riesgo de las patologías antedichas. En estos casos son obligados sencillos controles ultrasónicos específicos de las chapas y zonas afectadas, adicionales a los controles genéricos de suministro de la siderurgia, entre otras razones porque dichos controles deben ser posteriores a las soldaduras que se efectúen, y deben extenderse a

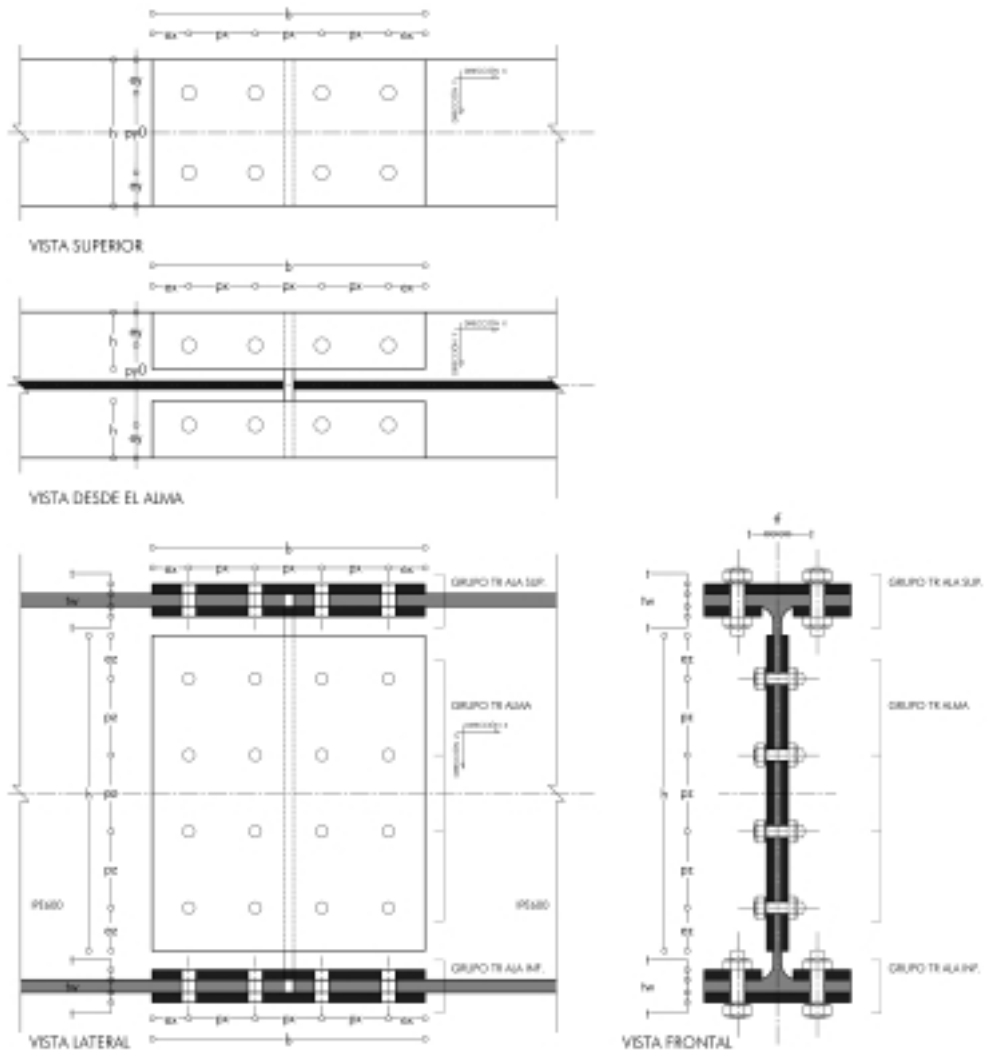


FIGURA 5: UNIÓN ATORNILLADA LATERAL. DISEÑO L00B.

la zona de transición de las mismas y a todo el material base. En el caso de las uniones laterales comentadas en este epígrafe, claro está, dichos controles no son necesarios, bastando con certificar las calidades de origen por lo que respecta al material base, además de otros controles mencionados en 3.4.

Las servidumbres geométricas de este tipo de uniones no suelen plantear dificultades con otros elementos constructivos, salvo tal vez por el resalto creado en las alas superiores por las chapas cubrejuntas y cabezas de los tornillos, que pueden estorbar para la colocación y unión de elementos de forjado o paneles «deck» de cubierta, etc.

En esta unión se contempla sólo el empleo de elementos de «tornillos de alta resistencia» pretensados, ya que resulta esencial conseguir, al menos en situación de servicio, que la fricción de las superficies en contacto garantice la ausencia de deslizamientos. De no ser así, las holguras de la unión pueden inducir incrementos muy importantes de los movimientos globales de la pieza y/o de la estructura como conjunto.

Es evidente que la disposición de estas uniones en secciones poco solicitadas, redundará no sólo en una mayor economía de la unión, sino que además reducirá el riesgo de que un defecto de construcción (improbable si se ejecuta y controla como se debe, pero nunca «imposible»), provoque las patologías antedichas. Por ejemplo, y aunque las uniones no deben calcularse nunca para menos que 1/3 de la capacidad de las piezas unidas, en una pieza flechada conviene ubicarlas en el entorno de los puntos de flector nulo, huyendo del centro del vano y de las secciones de empotramiento, en su caso.

Para las solicitaciones predominantemente estáticas comunes en la edificación, desde la aparición de los Eurocódigos, y más recientemente, con el CTE., suele considerarse idóneo el cálculo en estado límite último admitiendo deslizamientos en la unión, es decir, suponiendo un trabajo por «cortadura» de los tornillos y no por fricción de las superficies metálicas, tal como puede seguirse en los cálculos del ejemplo.

### **3.2 EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO**

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión particular que se describe a continuación. La mayoría de los comentarios a estos cálculos, comunes al resto de uniones que se estudian en otros capítulos, pueden encontrarse en el apartado 2.2.

#### **L00B IPE 600 (S355).**

La unión se emplea para equilibrar el cortante y el momento flector negativo o positivo (e incluso el axil) de la viga que, sea por razones de continuidad o de rigidez del elemento contiguo, tiene fuertemente impedida la rotación en el extremo enlazado.

<b>TORNILLOS</b>			
<p>A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1)            Superficies preparadas y/o tratadas para <math>\mu \geq 0,5</math>            (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4,            tabla 14 y anejo G)</p>			
<p>El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.</p>			
Valores característicos (N/mm <sup>2</sup> )		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1,25$

<b>Definición de la Unión:</b> <b>L00B IPE 600 (S355)</b>			
<b>Cubrejuntas alma (S275)</b>		<b>Cubrejuntas alas (S275)</b>	
2#410·475·10		# 410·220·15 +2 # 410·86·15	
<b>Tornillos alma</b>		<b>Tornillos alas</b>	
Tornillos A 10.9 ( $\mu = 0,5$ )	Distancias (mm)	Tornillos A 10.9 ( $\mu = 0,5$ )	Distancias (mm)
4 × 4M16 (taladros $\phi$ 18)	$e_x = 55$ $p_x = 100$ $e_z = 65$ $p_z = 125$	4 × 2M20 4 × 2M20 (taladros $\phi$ 22)	$e_x = 55$ $p_x = 100$ $e_y = 50$ $p_y = 120$

**Capacidad resistente del perfil base en flexión simple (IPE600)**

$V_{pl,Rd} = 8378 \cdot 355 / 1,0 / \sqrt{3} \text{ N} = 1717 \text{ kN}$ , $M_{pl,Rd} = 3512000 \cdot 355 / 1,0 \text{ Nmm} = 1247 \text{ kNm}$				
	$\rho = 0$	$\rho = (1/3)^2$	$\rho = (2/3)^2$	$\rho = 1$
$V_{Rd} =$ $V_{pl,Rd} (1 + \sqrt{\rho}) / 2$ EN 1993-1-8 6.2.8(3)	$(1/2)V_{pl,Rd}$	$(2/3)V_{pl,Rd}$	$(5/6)V_{pl,Rd}$	$V_{pl,Rd}$
	859	1145	1431	1717
$M_{V,Rd} = M_{pl,Rd} -$ $\rho / 4 A_v^2 f_{yd} / t_w$ EN 1993-1-8 6.2.8(5)	$M_{pl,Rd}$	$M_{pl,Rd} -$ 58	$M_{pl,Rd} -$ 231	$M_{pl,Rd} -$ 519
	1247	1189	1016	728

**Solicitaciones nominales de la unión**

$$V_{Ed} = (2/3)V_{pl,Rd} \quad 1144 \text{ kN} \quad M_{Ed} = -(1/2)M_{pl,Rd} \quad -623 \text{ kNm}$$

$$\gamma_f = 1,45$$

$$V_{E,ser} \quad 789 \text{ kN} \quad M_{E,ser} \quad -430 \text{ kNm}$$

**3.2.1 Cálculo 1º: Distribución plástica de esfuerzos en los TR, según EN 1993-1-8:2005, 3.12**

EN 1993-1-8:2005 no impone ninguna restricción específica a la «forma» en que se distribuyen los esfuerzos en los TR para la unión que se estudia: La unión puede calcularse siguiendo criterios plásticos (artículo 3.12). En la práctica, se debe tener en cuenta el carácter finito de la ductilidad de los materiales reales, que limita la aplicación del cálculo plástico a distribuciones de esfuerzos no incompatibles con dicha ductilidad real, siempre más o menos limitada. En el diseño de uniones metálicas de edificación, bajo cargas predominantemente estáticas, y con tipologías de uniones apropiadas, basta en general para cumplir lo anterior con que los diseños y criterios aplicados sean coherentes con aquellos que la experimentación y la buena práctica constructiva dictan como válidos a dicho efecto. Como se



verá en el apartado 3.2.2 estas condiciones no se satisfacen estrictamente para la unión estudiada por lo que de acuerdo tanto EN 11993-1-8 como CTE habría que adoptar una distribución de fuerzas en los tornillos «elástica».

### ***ELU según EN 1993-1-8:2005***

#### *Cálculos preliminares:*

- Resistencias de cálculo de cada tornillo. Tabla 3.4

M20:	$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 314 \cdot 1000 / 1,25 \text{ N}$	151 kN
M16:	$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 201 \cdot 1000 / 1,25 \text{ N}$	96,5 kN

- Resistencia a aplastamiento del alma y el ala del perfil base ( $F_{b,Rd}$ ).

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

M20: $L_j = 100,0$	$\beta_{L_f} = 1 - (100,0 - 15 \cdot 20) / (200 - 20) < 1$	$\beta_{L_f} = 1,00$
M16: $L_j = 345,0$	$\beta_{L_f} = 1 - (345,0 - 15 \cdot 16) / (200 \cdot 16) < 1$	$\beta_{L_f} = 0,967$

Para el cálculo de  $L_j$  en los tornillos de las alas se ha considerado la distancia entre los extremos en la dirección  $x$  de la unión. Lógicamente se contabilizan únicamente la mitad de los tornillos de cada fila que son los involucrados en cada «lado» de la unión. En el alma se transmite carga tanto en la dirección del eje  $x$  como en la del  $z$ , —véase la sección «conjunto de la unión» posterior—. Para el diseño aquí estudiado es mayor el valor de  $L_j$  correspondiente al eje  $z$ , pero, es claro, que si las componentes de las fuerzas en los tornillos  $F_x$  son muy superiores a las  $F_z$  el valor de  $L_j$  calculado puede ser muy conservador. En cualquier caso, el valor de  $L_j$  es tan próximo a  $15 \cdot d$  que la reducción de  $F_{b,Rd}$  es intrascendente ( $\beta_{L_f} = 0,967$ )

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

Distancia de los tornillos al borde del perfil (alas y alma)

$e_x = (p_x - g) / 2 = (100 - 15) / 2$	42,5
M20 ext: $\alpha = \min \{42,5 / (3 \cdot 22); 100 / (3 \cdot 22) - 1/4; 1000 / 510; 1\}$	0,640
M20 int: $\alpha = \min \{100 / (3 \cdot 22) - 1/4; 1000 / 510; 1\}$	1,000
$\alpha = (0,64 \cdot 1 + 1,00 \cdot 1) / 2$	0,822
$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 2,5 \cdot 0,822 \cdot 20 \cdot 19 \cdot 510 / 1,25 \text{ N}$	318,6 kN
M16 ext: $\alpha = \min \{42,5 / (3 \cdot 18); 100 / (3 \cdot 18) - 1/4; 1000 / 510; 1\}$	0,787

$$\begin{aligned}
 M16 \text{ int: } \alpha &= \min \{100/(3 \cdot 18) - 1/4; 1000/510; 1\} && 1 \\
 \alpha &= (0,787 \cdot 1 + 1,00 \cdot 1)/2 && 0,894 \\
 F_{b,Rd} &= 0,967 \cdot 2,5 \cdot 0,894 \cdot 16 \cdot 12 \cdot 510/1,25 \text{ N} && 169,3 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

- Resistencia a aplastamiento de los cubrejuntas ( $F_{b,Rd}$ ).

Los cálculos que siguen son superfluos salvo en situaciones de diseño extremas (óptimas) o patológicas: Nótese que tanto el alma como las alas del perfil están recubiertas por dos cubrejuntas que, con la única precaución de que la suma de sus espesores supere la del perfil base y las distancias a los bordes de los agujeros sean iguales o mayores que las del perfil base tendrán un valor de  $F_{b,Rd}$  mayor que el del perfil base. Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$\begin{aligned}
 M20: L_j = 100,0 & \quad \beta_{L_f} = 1 - (100,0 - 15 \cdot 20)/(200 \cdot 20) < 1 & \quad \beta_{L_f} = 1,00 \\
 M16: L_j = 345,0 & \quad \beta_{L_f} = 1 - (345,0 - 15 \cdot 16)/(200 \cdot 16) < 1 & \quad \beta_{L_f} = 0,967
 \end{aligned}$$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

Distancia de los tornillos al borde de los cubrejuntas (alas y alma)

$$\begin{aligned}
 e_x &= && 50 \\
 M20 \text{ ext: } \alpha &= \min \{55/(3 \cdot 22); 100/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\} && 0,833 \\
 M20 \text{ int: } \alpha &= \min \{100/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\} && 1,000 \\
 \alpha &= (0,833 \cdot 1 + 1,00 \cdot 1)/2 && 0,917 \\
 F_{b,Rd} &= 1,00 \cdot 2,5 \cdot 0,917 \cdot 20 \cdot 15 \cdot 430/1,25 \text{ N} && 236,5 \text{ kN} \\
 M16 \text{ ext: } \alpha &= \min \{55/(3 \cdot 18); 100/(3 \cdot 18) - 1/4; 1000/510; 1\} && 1 \\
 M16 \text{ int: } \alpha &= \min \{100/(3 \cdot 18) - 1/4; 1000/510; 1\} && 1 \\
 \alpha &= (1,00 \cdot 1 + 1,00 \cdot 1)/2 && 1,000 \\
 F_{b,Rd} &= 0,967 \cdot 2,5 \cdot 1,00 \cdot 16 \cdot 10 \cdot 430/1,25 \text{ N} && 133,1 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

En algunos diseños puede además ocurrir que el valor de  $F_{b,Rd}$  sea distinto para los cubrejuntas interiores y exteriores de las alas (las distancias  $e_2$  y  $p_2$  —dirección perpendicular a la de transmisión de la carga— no son iguales en ambas y pueden afectar al valor de  $k_1$  que en aras de la sencillez siempre toma el valor 2,5 en los cálculos manuales de este texto, aunque en los libros de cálculo adjuntos se determina con precisión).

- Valores de cálculo

$$\begin{aligned}
 M20: \quad F_{Rd} &= \min \{2 \cdot 151; 318,6; 2 \cdot 236,5\} && 2 \cdot 151 \text{ kN} \\
 M16: \quad F_{Rd} &= \min \{2 \cdot 96,5; 169,3; 2 \cdot 133,1\} = 2 \cdot 84,6 && 169,3 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Nótese que con objeto de comparar la resistencia a aplastamiento de cálculo por tornillo del perfil base,  $F_{b,Rd}$ , con la resistencia a cortante de cálculo por tornillo,  $F_{v,Ed}$ , debe considerarse el número de planos de corte de estos. Por lo mismo, para comparar la resistencia a aplastamiento de cálculo por tornillo del perfil base con la resistencia a aplastamiento de los dos cubrejuntas deben sumarse la resistencia de estos dos.

*Conjunto de la unión:*

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
TR alas		$2 \cdot 4 \cdot 151,0 \rightarrow$	$-0,291 \uparrow$	$2 \cdot 4 \cdot 151,0$
TR fila 1ª	$2 \cdot 163,0 \downarrow$	$2 \cdot 31,4 \rightarrow$	$-0,270 \uparrow$	$2 \cdot 166,0$
TR fila 2ª	$2 \cdot 169,3 \downarrow$	$2 \cdot 0 \rightarrow$	$-0,165 \uparrow$	$2 \cdot 169,3$
Eje de la pieza	<hr/>			
TR fila 3ª	$2 \cdot 169,3 \downarrow$	$-2 \cdot 0 \leftarrow$	$0,058 \downarrow$	$2 \cdot 169,3$
TR fila 4ª	$2 \cdot 163,0 \downarrow$	$-2 \cdot 31,4 \leftarrow$	$0,173 \downarrow$	$2 \cdot 166,0$
TR alas		$-2 \cdot 4 \cdot 151,0 \leftarrow$	$0,291 \downarrow$	$2 \cdot 4 \cdot 151,0$

$$V_{Rd} = \Sigma F_z = 1329$$

$$N_{Rd} = \Sigma F_x = 0$$

$$M_{Rd} = \Sigma F_x \cdot z = 724,8 \text{ kNm}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = \underline{\underline{0,861 \leq 1}}$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = \underline{\underline{0,860 \leq 1}}$$

En las alas se produce el agotamiento por cortante de los tornillos antes que el aplastamiento de la chapa  $n \cdot F_{v,Rd} = 2 \cdot F_{v,Rd} < F_{b,Rd}$  por lo que el valor de la fuerza  $F_x$  máxima de la que son capaces los tornillos del ala se obtiene multiplicando la resistencia a cortante de cada tornillo por el número de tornillos y el número de planos de corte. En el alma, por el contrario, el aplastamiento de la misma se produce antes que el agotamiento de los tornillos,  $n \cdot F_{v,Rd} = 2 \cdot F_{v,Rd} > F_{b,Rd}$ , por lo que el valor máximo del módulo de la fuerza proporcionada por cada fila de tornillos se obtiene multiplicando el de cada tornillo por el número de estos.

La distribución de «fuerzas internas» ( $F_x, F_z$ ) adoptada, no es la única posible que cumple todas las condiciones de equilibrio ( $\Sigma F_x = N_{Ed} = 0, \Sigma F_z = V_{Ed}, \Sigma F_x \cdot z = M_{Ed}$ ) y de resistencia ( $(F_{x,Ed}/F_{Rd})^2 + (F_{z,Ed}/F_{Rd})^2 \leq 1, F_{x,Ed}/F_{Rd} \leq 1$ , etc.); pero uno de los teoremas fundamentales de la teoría de la plasticidad («teorema estático») permite validar la seguridad en ELU

tan sólo con encontrar una solución completamente equilibrada que verifique todos los límites resistentes de los elementos, con las limitaciones relativas a la ductilidad de la unión ya comentadas. La siguiente es, por tanto, una comprobación alternativa de la unión igual de válida que la anterior:

$$V_{Rd} = 8 \cdot 169,3 \quad 1354 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = 1144/1354 \quad \underline{\underline{0,845 < 1}}$$

En los tornillos de alma:  $(F_x/F_{Rd})^2 + 0,845^2 = 1$

$$F_x/F_{Rd} = 0,535$$

$$F_x = 0,535 \cdot 169,3 = 90,6$$

$$F_z = 0,845 \cdot 169,3 = 143,1$$

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
TR alas		2·4·116,0→	-0,291↑	2·4·116,0
TR fila 1ª	2·143,1↓	2·90,5→	-0,173↑	2·169,3
TR fila 2ª	2·143,1↓	2·90,5→	-0,058↑	2·169,3
Eje de la pieza				
TR fila 3ª	2·143,1↓	-2·90,6←	0,058↓	2·169,3
TR fila 4ª	2·143,1↓	-2·90,6←	0,173↓	2·169,3
TR alas		-2·4·116,0←	0,291↓	2·4·116,0

$$V_{Rd} = \quad \Sigma F_z = 1144,8$$

$$N_{Rd} = \quad \Sigma F_x = 0$$

$$M_{Rd} = \quad \Sigma F_x z = 623,7 \text{ kNm}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = \quad \underline{\underline{0,999 \leq 1}}$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = \quad \underline{\underline{0,999 \leq 1}}$$

### ***ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005***

#### *Cálculos preliminares:*

Para este cálculo se asume una distribución de esfuerzos en los tornillos proporcional a la distancia desde su CDG. De acuerdo con el CTE «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», resultado de justificación inmediata según las leyes elementales de la resistencia de materiales.

- Pretensado y resistencia a deslizamiento. Artículos 3.6.1 y 3.9.1:

M20:	$F_{p,C} = 0,7 \cdot 245 \cdot 1000 \text{ N}$	172 kN
	$F_{s,Rd,ser} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot 245 \cdot 1000 / 1,1$	78 kN
M16:	$F_{p,C} = 0,7 \cdot 157 \cdot 1000 \text{ N}$	110 kN
	$F_{s,Rd,ser} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot 157 \cdot 1000 / 1,1$	50 kN

- Inercia de los cubrejuntas:

$I_{\text{alas}} = 101027 \text{ cm}^4$	$0,850 \cdot I_{\text{total}}$
$I_{\text{alma}} = 17861 \text{ cm}^4$	$0,150 \cdot I_{\text{total}}$
$I_{\text{total}} =$	118889 $\text{cm}^4$
$(I_{\text{IPE}} = 92080)$	

- Distribución del momento flector entre los tornillos del alma y los de las alas

$M_{E,ser,alas} = 0,850 \cdot 430$	365,3 kNm
$M_{E,ser,alma} = 0,150 \cdot 430$	64,6 kNm

Conjunto de la unión:

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
TR alas		$2 \cdot 4 \cdot 78,6 \rightarrow$	$-0,291 \uparrow$	$2 \cdot 4 \cdot 78,6$
TR fila 1ª	$2 \cdot 2 \cdot 49,3 \downarrow$	$2 \cdot 2 \cdot 42,1 \rightarrow$	$-0,173 \uparrow$	$2 \cdot 2 \cdot 64,9$
TR fila 2ª	$2 \cdot 2 \cdot 49,3 \downarrow$	$2 \cdot 2 \cdot 14,0 \rightarrow$	$-0,058 \uparrow$	$2 \cdot 2 \cdot 51,3$
Eje de la pieza	<hr/>			
TR fila 3ª	$2 \cdot 2 \cdot 49,3 \downarrow$	$-2 \cdot 2 \cdot 14,0 \leftarrow$	$0,058 \downarrow$	$2 \cdot 2 \cdot 51,3$
TR fila 4ª	$2 \cdot 2 \cdot 49,3 \downarrow$	$-2 \cdot 2 \cdot 42,1 \leftarrow$	$0,173 \downarrow$	$2 \cdot 2 \cdot 64,9$
TR alas		$-2 \cdot 4 \cdot 78,6 \leftarrow$	$0,291 \downarrow$	$2 \cdot 4 \cdot 78,6$

$$V_{R,ser} = \Sigma F_z = 789$$

$$N_{R,ser} = \Sigma F_x = 0$$

$$M_{R,ser} = \Sigma F_x \cdot z = -430 \text{ kNm}$$

$$|V_{E,ser} / V_{R,ser}| = \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

$$|M_{E,ser} / M_{R,ser}| = \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

Para los tornillos de las alas y los interiores del alma se excede ligeramente el valor de  $F_{s,Rd,ser} = (78,6/78,2 = 1,005 \text{ y } 51,3/50 = 1,026)$ , por contra, para los tornillos exteriores del alma el valor de la resistencia al deslizamiento de cálculo por tornillo en el ELS se supera

ampliamente ( $64,9/50 = 1,298$ ). Si en lugar de la distribución de esfuerzos anterior se acepta una proporcional a la primera propuesta en ELU la resultante de la fuerza en las distintas filas de tornillos será:

TR alas	$0,860 \cdot 151,0/1,45$	89,5 kN
TR fila 1ª	$0,860 \cdot 166/2/1,45$	49,2 kN
TR fila 2ª	$0,860 \cdot 169,3/2/1,45$	50,2 kN

Valores para los que obviamente se satisfacen estrictamente las relaciones  $|V_{E,ser}/V_{R,ser}| = 1$  y  $|M_{E,ser}/M_{R,ser}| = 1$ . Corresponde al autor del proyecto aceptar o rechazar el diseño propuesto, para lo cual las consideraciones del apartado 3.4 pueden ser de gran utilidad. En cualquier caso siempre pueden reducirse las prestaciones de la unión en servicio, y por ende en ELU, por el factor 1,298 ( $M_{E,ser} = 430/1,298 = 331 \text{ kNm}$ ,  $V_{E,ser} = 779/1,298 = 608 \text{ kN}$ ).

**RESISTENCIA DE LA SECCION NETA según EC3 (EN 1993-1-1: 2005):**  
**artículos 6.2.3, 6.2.6**

- Alas

Axil de cálculo (dos comprobaciones independientes)

$$N_{Ed} = 0,860 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 151,0 \quad 1039 \text{ kN}$$

$$A_f f_y = 220 \cdot 19 \cdot 355 \text{ N} \quad 1483 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = (M_{Ed}/M_{pl,Rd}) 1483 = 0,860 \cdot 1483 \quad 1275 \text{ kN}$$

Resistencia a tracción de la sección neta

$$N_{Rd} = 0,9 A_{f,net} f_u / 1,25 = 0,9(220 - 2 \cdot 22) 19 \cdot 510 / 1,25 \text{ N} \quad 1228 \text{ kN}$$

$$|N_{Ed}/N_{Rd}| = \quad \quad \quad \underline{\underline{0,846 < 1}}$$

$$|N_{Ed}/N_{Rd}| = \quad \quad \quad \underline{\underline{1,038 \approx 1}}$$

- Alma

$$V_{Ed} = (2/3) V_{pl,Rd} \quad 1145 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = A_{V,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (8378 - 4 \cdot 18 \cdot 12) 510 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 1770 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = \quad \quad \quad \underline{\underline{0,647 < 1}}$$

- Cubrejuntas de alas y alma

Conservadoramente se comprueba que su sección neta homogeneizada es aproximadamente igual que la correspondiente sección parcial del perfil sin descontar agujeros:

$$A_{net} = (220 + 2 \cdot 86 - 2 \cdot 2 \cdot 22) 15 \text{ mm}^2 \cdot 430/510 = 38,5 \text{ cm}^2 \approx b_f t_f = 22 \cdot 1,9 = 41,8 \text{ cm}^2$$

$$A_{net} = (475 - 4 \cdot 18) \cdot 2 \cdot 10 \text{ mm}^2 \cdot 430/510 = 67,9 \text{ cm}^2 \approx t_w h = 1,2 \cdot 60 = 72 \text{ cm}^2$$

### **RESISTENCIA A DESGARRO DEL ALMA según CTE DB SE A: artículo 8.5.2**

- $V_{Rd} = A_v f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 8378 \cdot 355 / \sqrt{3} / 1,05 = 1717 / 1,05$  1635 kN
- $V_{Rd} = A_{v,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (8378 - 4 \cdot 18 \cdot 12) 510 / \sqrt{3} / 1,25$  1769 kN
- $V_{Rd} = A_{v,eff} f_y / \sqrt{3} / 1,05 =$   
 $((600 - 127,5) 12 + 589 + 1386 \cdot f_u / f_y) f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 1691 / 1,05$  1610 kN

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = 1145 / 1610 \quad \underline{\underline{0,711 < 1}}$$

### **RESISTENCIA A DESGARRO DEL ALMA según EC3 (EN 1993-1-1:2005): artículo 3.10.2**

Además de las comprobaciones del CTE DB SE A debe hacerse la que sigue:

- Área neta en tracción  
 $A_{nt} = (42,5 + 100 - 1,5 \cdot 18) 12$  1386 mm<sup>2</sup>
- Área neta solicitada a cortante  
 $A_{v,ef} = (8378 - 600 \cdot 12) / 2$  589,0 mm<sup>2</sup>  
 $A_{nv} = (600 - 127,5 - 3,5 \cdot 18) 12 + 589$  5503 mm<sup>2</sup>
- $V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot 510 \cdot 1386 / 1,25 + 1 / \sqrt{3} \cdot 355 \cdot 5503 / 1,0 = 282,7 + 1128,0$

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = 1145 / 1419 \quad \underline{\underline{0,811 < 1}}$$

### **3.2.2 Cálculo 2º: Distribución de esfuerzos en los TR proporcional a su distancia la CDG**

Ya se ha indicado que EN 1993-1-8:2005, 3.12 (1) permite una distribución de esfuerzos en los tornillos plástica o proporcional a la distancia. La distribución «elástica» debe adoptarse de acuerdo con 3.12 (2) y el artículo 8.8.4 de CTE DB SE-A en uniones pretensadas en las que se deba impedir el desplazamiento en estado límite último y si la resistencia de cálculo a cortante,  $F_{v,Rd}$  del tornillo es menor que la resistencia de cálculo a aplastamiento,  $F_{b,Rd}$  de las chapas que une.

De acuerdo con los cálculos ya realizados para las alas del perfil se tiene

$$\begin{aligned} F_{v,Rd} &= & 318,6 \text{ kN} \\ F_{b,Rd} &= 2 \cdot 151 & 302 \text{ kN} \end{aligned}$$

por lo que en la unión estudiada debería adoptarse la distribución de esfuerzos «elástica».

*Cálculos preliminares:*

- Valores de cálculo

$$M20: F_{Rd} = \min \{2 \cdot 151; 318,6; 2 \cdot 208,5\} \quad 2 \cdot 151 \text{ kN}$$

$$M16: F_{Rd} = \min \{2 \cdot 96,5; 169,3; 2 \cdot 157,8\} = 2 \cdot 84,6 \quad 169,3 \text{ kN}$$

- Inercia de los cubrejuntas:

$$I_{\text{alas}} = 101027 \text{ cm}^4 \quad 0,850 \cdot I_{\text{total}}$$

$$I_{\text{alma}} = 17861 \text{ cm}^4 \quad 0,150 \cdot I_{\text{total}}$$

$$I_{\text{total}} = \quad 118889 \text{ cm}^4$$

$$(I_{\text{IPE}} = 92080)$$

- Distribución del momento flector entre los tornillos del alma y los de las alas

$$M_{E,\text{ser},\text{alas}} = 0,850 \cdot 623 \quad 529,5 \text{ kNm}$$

$$M_{E,\text{ser},\text{alma}} = 0,150 \cdot 623 \quad 93,5 \text{ kNm}$$

*Conjunto de la unión:*

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
TR alas		$2 \cdot 4 \cdot 114 \rightarrow$	$-0,291 \uparrow$	$2 \cdot 4 \cdot 114,0$
TR fila 1ª	$2 \cdot 143 \downarrow$	$2 \cdot 122,2 \rightarrow$	$-0,173 \uparrow$	$2 \cdot 188,2$
TR fila 2ª	$2 \cdot 143 \downarrow$	$2 \cdot 40,8 \rightarrow$	$-0,058 \uparrow$	$2 \cdot 148,8$
Eje de la pieza	<hr/>			
TR fila 3ª	$2 \cdot 143 \downarrow$	$-2 \cdot 40,8 \leftarrow$	$0,058 \downarrow$	$2 \cdot 148,8$
TR fila 4ª	$2 \cdot 143 \downarrow$	$-2 \cdot 122,2 \leftarrow$	$0,173 \downarrow$	$2 \cdot 188,2$
TR alas		$-2 \cdot 4 \cdot 114 \leftarrow$	$0,291 \downarrow$	$2 \cdot 4 \cdot 114,0$
$V_{R,\text{ser}} =$	$\Sigma F_z = 1145$			
$N_{R,\text{ser}} =$		$\Sigma F_x = 0$		
$M_{R,\text{ser}} =$			$\Sigma F_x z = -623 \text{ kNm}$	
$ V_{E,\text{ser}}/V_{R,\text{ser}}  =$	<b><u>1,000 ≤ 1</u></b>			
$ M_{E,\text{ser}}/M_{R,\text{ser}}  =$				<b><u>1,000 ≤ 1</u></b>



Para los tornillos de las alas y los interiores del alma se satisfacen los límites de resistencia para  $F_{Rd}$  ( $114/151 = 0,755$  y  $148,2/169,3 = 0,879$ ), por contra, para los tornillos exteriores del alma el valor de la resistencia a aplastamiento de la chapa en el ELU se supera ampliamente ( $188,2/169,3 = 1,112$ ).

La distribución de  $V$  se hace de forma uniforme entre todos los tornillos del alma (3.12 (3)). El resto de comprobaciones son idénticas a las del primer cálculo.

### **3.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN <http://catedracero.ee.upm.es>, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR**

#### **3.3.1 Consideraciones generales**

Las notas generales del apartado 2.3 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten. A continuación realizan algunas aclaraciones particulares sobre el libro que permite comprobar la unión tipo LB.

#### **3.3.2 Datos**

La unión, siguiendo los criterios generales, se define en la hoja DATOS. Se caracteriza definiendo geoméricamente los cubrejuntas además de los tornillos de las alas (TR alas) y los del alma (TR alma). El número de los primeros no tiene ninguna limitación, ni en la dirección  $x$  ni la  $y$ , mientras que el número de filas del último grupo (TR alma) puede variar sólo de 1 hasta 6. Así, con un único libro de cálculo se pueden estudiar, si no todas las disposiciones posibles, al menos un número de uniones del tipo LB suficientemente amplio y variado. Por lo mismo debe prevenirse al proyectista sobre el peligro de extender los diseños más allá de los límites validados experimentalmente o por las reglas de buena práctica, aunque éstos diseños puedan ser analizados y validados por los libros de cálculo de CatedrAcero u otras herramientas informáticas.

Los datos con los que se ha cumplimentado la hoja DATOS del fichero que se distribuye en [www://catedracero.ee.upm.es](http://www://catedracero.ee.upm.es) corresponden al «cálculo 1» realizado previamente.

### 3.3.3 Resultados

#### *Comprobaciones del estado límite último*

Para los tornillos de las alas y cada una de las 6 filas de tornillos del alma se comprueban, en la hoja LB, las dos condiciones  $F_{v,Ed}/F_{v,Rd} \leq 1$  y  $F_{v,Ed}/F_{b,Rd} \leq 1$  (resistencia de cálculo a cortante de los tornillos y resistencia a aplastamiento de las chapas). En el fichero que se facilita se han ocultado las comprobaciones para las filas de tornillos TR5 a TR6 del alma, que no están activas para el diseño propuesto (actualmente está implementado un algoritmo burdo que «oculta»/«muestra» de forma automática las comprobaciones de las filas de TR «no activas»/«activas». Por desgracia si el usuario final manipula la hoja de cálculo insertando o eliminando filas tendrá que manipular a su vez el algoritmo para que vuelva a funcionar correctamente. En versiones posteriores se espera que esta labor también se realice automáticamente).

Por la misma razón permanecen ocultas las filas en las que se muestran los esfuerzos en los TR antedichos.

Tanto los cubrejuntas como el ala y el alma del perfil base se comprueban en la hoja CHAPA. En primer lugar se chequea la sección neta de los diferentes componentes de la unión según EN 1993-1-1:2005 y en segundo lugar se comprueba el desgarro del alma según EN 1993-1-1:2005 y CTE DB SE A.

#### *Comprobaciones del estado límite de servicio*

Igual que en los cálculos del ELU se han ocultado las filas de los TR no activos en el cálculo. Para el resto de tornillos se verifica  $F_{ser}/F_{s,Rd,ser} < 1$ , donde la distribución de esfuerzos en los tornillos ( $F_{ser}$ ) es lineal de acuerdo con los criterios establecidos en EN 1993-1-8:2005 y CTE DB SE A. Se recuerda que en algunas ocasiones —frecuentemente si se interrumpen los cálculos sin haber concluido— las celdas con referencias cruzadas que se utilizan para realizar esta comprobación dan lugar a un error. El modo de subsanarlo ya se describió en 2.3.2.

Las figuras que siguen son varias hojas de libro de cálculo LB, particularizadas para el diseño 3.2.1.

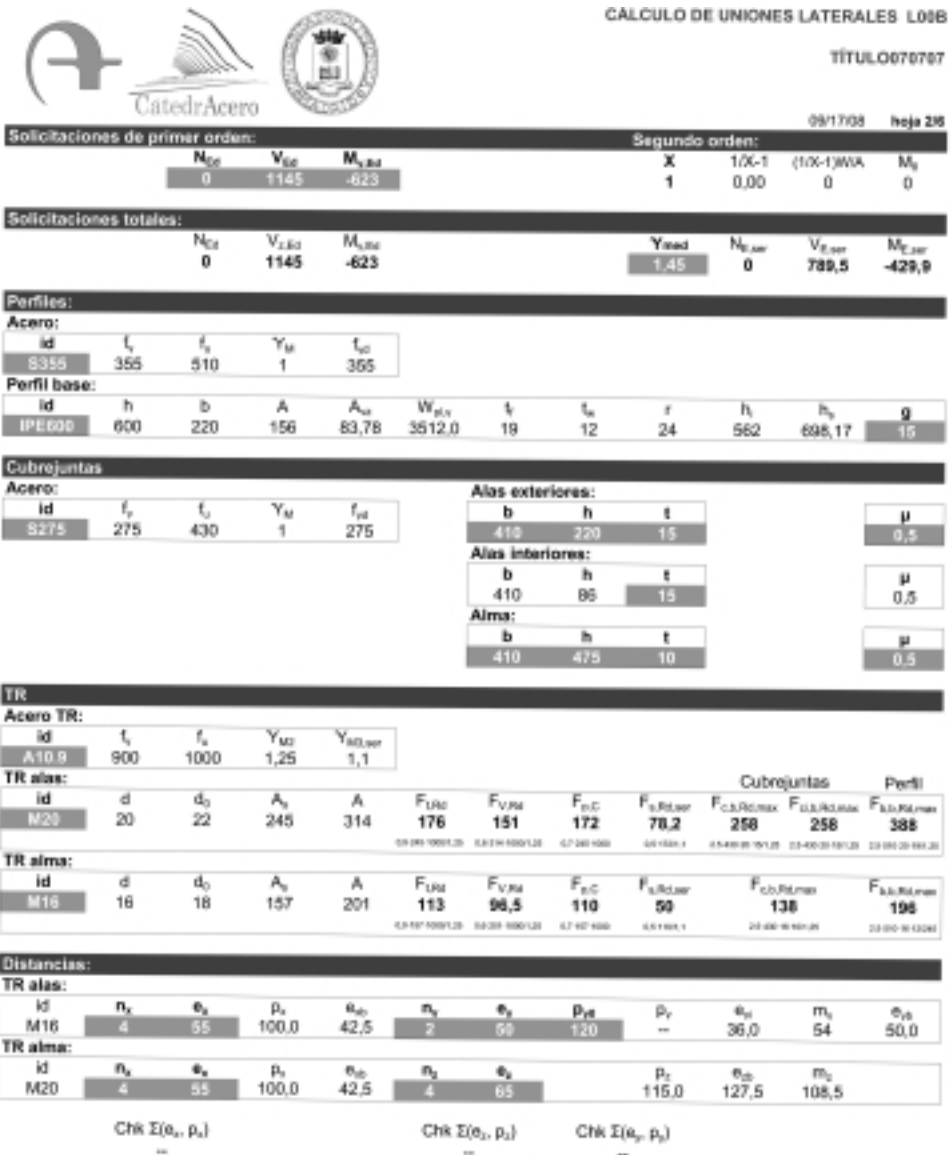


FIGURA 6: HOJA DATOS PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 3.2.1



CÁLCULO DE UNIONES LATERALES L00B

TÍTULO070707

06/17/08 hoja 5/6

Resistencia de cada TR: ELU según EN 1993-1-8: 2005

TR alas:

TR alas 1:							
$F_{V,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_c$	$F_s$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Rd}/F_{t,Rd}$	
151	0,0	1040,8	0,0	130,1	130,1	0,86	< 1 VÁLIDO
TR alas 2:							
$F_{V,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_c$	$F_s$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Rd}/F_{t,Rd}$	
151,0	0,0	-1040,8	0,0	-130,1	130,1	0,86	< 1 VÁLIDO
TR alma:							
TR alma 1:							
$F_{V,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_c$	$F_s$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Rd}/F_{t,Rd}$	
96,5	280,9	54,1	70,2	13,5	71,5	0,74	< 1 VÁLIDO
TR alma 2:							
$F_{V,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_c$	$F_s$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Rd}/F_{t,Rd}$	
96,5	291,5	0,3	72,9	0,1	72,9	0,76	< 1 VÁLIDO
TR alma 3:							
$F_{V,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_c$	$F_s$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Rd}/F_{t,Rd}$	
96,5	291,5	-0,3	72,9	-0,1	72,9	0,76	< 1 VÁLIDO
TR alma 4:							
$F_{V,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_c$	$F_s$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Rd}/F_{t,Rd}$	
96,5	280,9	-54,1	70,2	-13,5	71,5	0,74	< 1 VÁLIDO

Esfuerzos en los TR:

TR alas:	$F_c$	$F_s$	$z$	$M_y$
TR alas 1:	0,00	1040,78	-0,291	-302,35
TR alas 2:	0,00	-1040,78	0,291	-302,35
TR alma:				
TR alma 1:	280,86	54,07	-0,173	-9,33
TR alma 2:	291,52	0,30	-0,058	-0,02
TR alma 3:	291,52	-0,30	0,058	-0,02
TR alma 4:	280,86	-54,07	0,173	-9,33

Equilibrio

			$\Sigma F, \Sigma M$	0,01-E	
$V_{Ed} = \Sigma F_z$	1144,77	-	$V_{Ed} = 0,00$	< 11,45	VÁLIDO
$N_{Ed} = \Sigma F_x$	0,00	-	$N_{Ed} = 0,00$	< 11,45	VÁLIDO
$M_{y,Ed} = \Sigma M$	-623,38	-	$M_{y,Ed} = 0,00$	< 6,23	VÁLIDO

Aplastamiento de la chapa

TR alas:	Distribución plástica de esfuerzos							CTE
TR alas 1:								0
Perfil base:								
$F_{b,Rd,lim}$	$\alpha_b$	$\beta_{L1}$	$F_{b,Rd}$	$F_s$	$F_c$	$F_{V,Rd}$	$F_{V,Rd}/F_{b,Rd}$	
387,6	0,82	1,00	318,6	260,2	0,0	260,2	0,82	< 1 VÁLIDO
TR alas 2:								
Perfil base:								
$F_{b,Rd,lim}$	$\alpha_b$	$\beta_{L1}$	$F_{b,Rd}$	$F_s$	$F_c$	$F_{V,Rd}$	$F_{V,Rd}/F_{b,Rd}$	
387,6	0,82	1,00	318,6	-260,2	0,0	260,2	0,82	< 1 VÁLIDO

FIGURA 7: HOJA LB PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 3.2.1. E.L.U.

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8: 2005						
				$N_{t,Rd}$	$V_{t,Rd}$	$M_{t,Rd}$
				0	789,5	-429,9
Alas	A	I	$A/A_{out}$	0,853	0,850	
	11760	1918201380				
Alma			$I/I_{out}$	0,447	0,190	
	9500	170610792				
	21260	1168051152				
	n	As	z	A		I
TR alas:						
TR alas 1:	0	245	-291	1960		165404880
TR alas 2:	0	245	291	1960		165404880
				3000		33691
TR alma:						
TR alma 1:	4	157	-173	620		10660825
TR alma 2:	4	157	-68	620		2376325
TR alma 3:	4	157	58	620		2376325
TR alma 4:	4	157	173	620		10660825
				2512		4153

Solicitaciones $F_{k,Rd}$ sobre cada TR. Rozamiento						
TR alas:						
TR alas 1:						
$F_{k,Rd,Rd}$	$A_s$	z	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}/F_{k,Rd,Rd}$	
78,2	245	-291	78,6		1,005	< 1 NO VÁLIDO
TR alas 2:						
$F_{k,Rd,Rd}$	$A_s$	z	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}/F_{k,Rd,Rd}$	
78,2	245	291	-78,6		1,005	< 1 NO VÁLIDO
TR alma:						
TR alma 1:						
$F_{k,Rd,Rd}$	$A_s$	z	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}/F_{k,Rd,Rd}$
50	157	-173	42,1	49,3	64,9	1,298 < 1 NO VÁLIDO
TR alma 2:						
$F_{k,Rd,Rd}$	$A_s$	z	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}/F_{k,Rd,Rd}$
50	157	-58	14,0	49,3	51,3	1,026 < 1 NO VÁLIDO
TR alma 3:						
$F_{k,Rd,Rd}$	$A_s$	z	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}/F_{k,Rd,Rd}$
50	157	58	-14,0	49,3	51,3	1,026 < 1 NO VÁLIDO
TR alma 4:						
$F_{k,Rd,Rd}$	$A_s$	z	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}$	$F_{k,Rd}/F_{k,Rd,Rd}$
50	157	173	-42,1	49,3	64,9	1,298 < 1 NO VÁLIDO


  

Esfuerzos en los TR:				
TR alas:	$F_x$	$F_y$	z	$M_y$
TR alas 1:	0,00	628,76	-0,291	-182,66
TR alas 2:	0,00	-628,76	0,291	-182,66
TR alma:				
TR alma 1:	197,38	168,48	-0,173	-29,06
TR alma 2:	197,38	56,16	-0,058	-3,23
TR alma 3:	197,38	-56,16	0,058	-3,23
TR alma 4:	197,38	-168,48	0,173	-29,06

Equilibrio					
$V_{Ed} = \sum F_y$	789,50		=	$V_{Ed} = 0,01$	< 7,89 VÁLIDO
$N_{Ed} = \sum F_x$		0,00	=	$N_{Ed} = 0,00$	< 7,89 VÁLIDO
$M_{Ed} = \sum M$			=	$M_{Ed} = -429,89$	< 4,30 VÁLIDO
				$\sum F_x, \sum M$	0,01-E

FIGURA 8: HOJA LB PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 3.2.1. E.L.S.



CATEDRA ACERO  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

CÁLCULO DE UNIONES LATERALES L00B

09/11/08 hoja 6/6

---

**Resistencia de la sección neta**

**Perfil base**

<b>Alce:</b>	$N_{Ed}$	$N_{Rd}$	$N_{Ed}/N_{Rd}$		
1049,78	1227,92	1227,92	0,85	< 1	VÁLIDO

<b>Alma:</b>	$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
1544,77	1789,99	1789,99	0,85	< 1	VÁLIDO

**Cubrejuntas**

**Cubrejuntas exterior:**

$N_{Ed}$	$N_{Rd}$	$N_{Ed}/N_{Rd}$		
520,39	817,34	0,64	< 1	VÁLIDO

**Cubrejuntas interior:**

$N_{Ed}$	$N_{Rd}$	$N_{Ed}/N_{Rd}$		
260,19	297,32	0,88	< 1	VÁLIDO

<b>Alma:</b>	$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
572,38	800,39	800,39	0,72	< 1	VÁLIDO

---

**Resistencia a desgarro del alma** EN 1993-1-8-2005

**Perfil base**

$V_{Ed}$	$V_{Rd,1}$	$V_{Rd,2}$	1410,64	$V_{Ed}/V_{Rd}$	
1544,77	1127,89	282,74	1410,64	0,81	< 1

**Cubrejuntas**

$V_{Ed}$	$V_{Rd,1}$	$V_{Rd,2}$	771,90	$V_{Ed}/V_{Rd}$	
572,38	550,94	220,16	771,90	0,74	< 1

---

**Resistencia a desgarro del alma** CTE DB SE A

**Perfil base**

$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
1544,77	1717,15	0,87	< 1	VÁLIDO

$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
1544,77	1789,99	0,85	< 1	VÁLIDO

$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
1544,77	1896,95	0,81	< 1	VÁLIDO

**Cubrejuntas**

$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
572,38	754,16	0,76	< 1	VÁLIDO

$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
572,38	800,39	0,72	< 1	VÁLIDO

$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
572,38	960,74	0,59	< 1	VÁLIDO

FIGURA 9: HOJA CHAPA PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 3.2.1.

### 3.3.4 Variaciones sobre el diseño L00B

En la figura 10 se muestra el uso de varias uniones L00B para materializar la unión de las diagonales y el montante extremo de una celosía de grandes dimensiones. Es una aplicación radicalmente distinta de la considerada en los apartados anteriores pues las solicitaciones predominantes en la unión son los esfuerzos axiales, siendo residuales los momentos flectores y esfuerzos cortantes. El cálculo, salvo por su mayor sencillez, en nada difiere de los ya realizados.

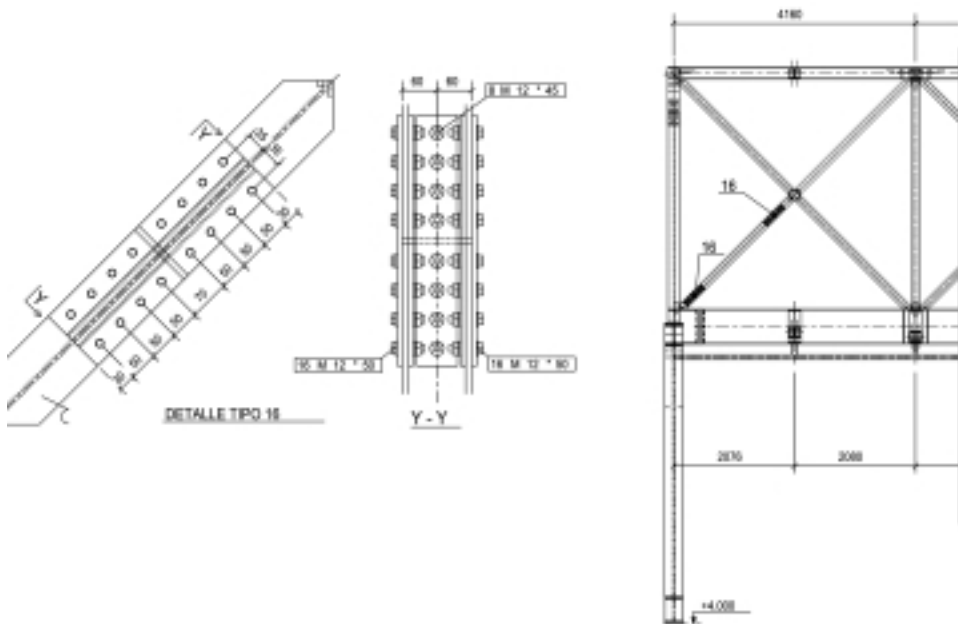


FIGURA 10: UNIONES TIPO L00B EN UNA CELOSÍA

En las figuras 11 y 12 se incluyen algunas variaciones de la unión estudiada. Los cálculos son similares a los realizados en este capítulo por lo que no se repiten. Sin embargo, si se han desarrollado los libros de cálculo correspondientes accesibles en <http://catedracer0.ee.upm.es>

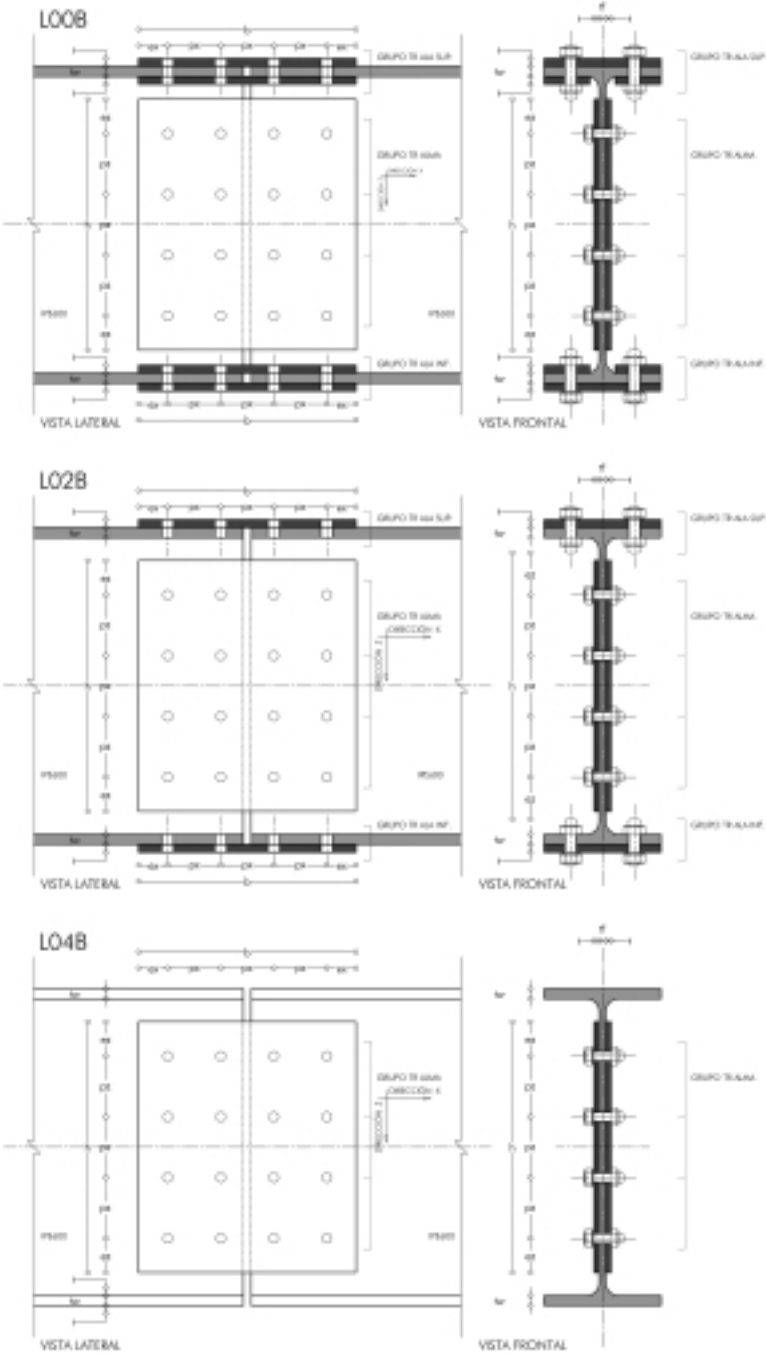


FIGURA 11: VARIACIONES DEL DISEÑO L00B.



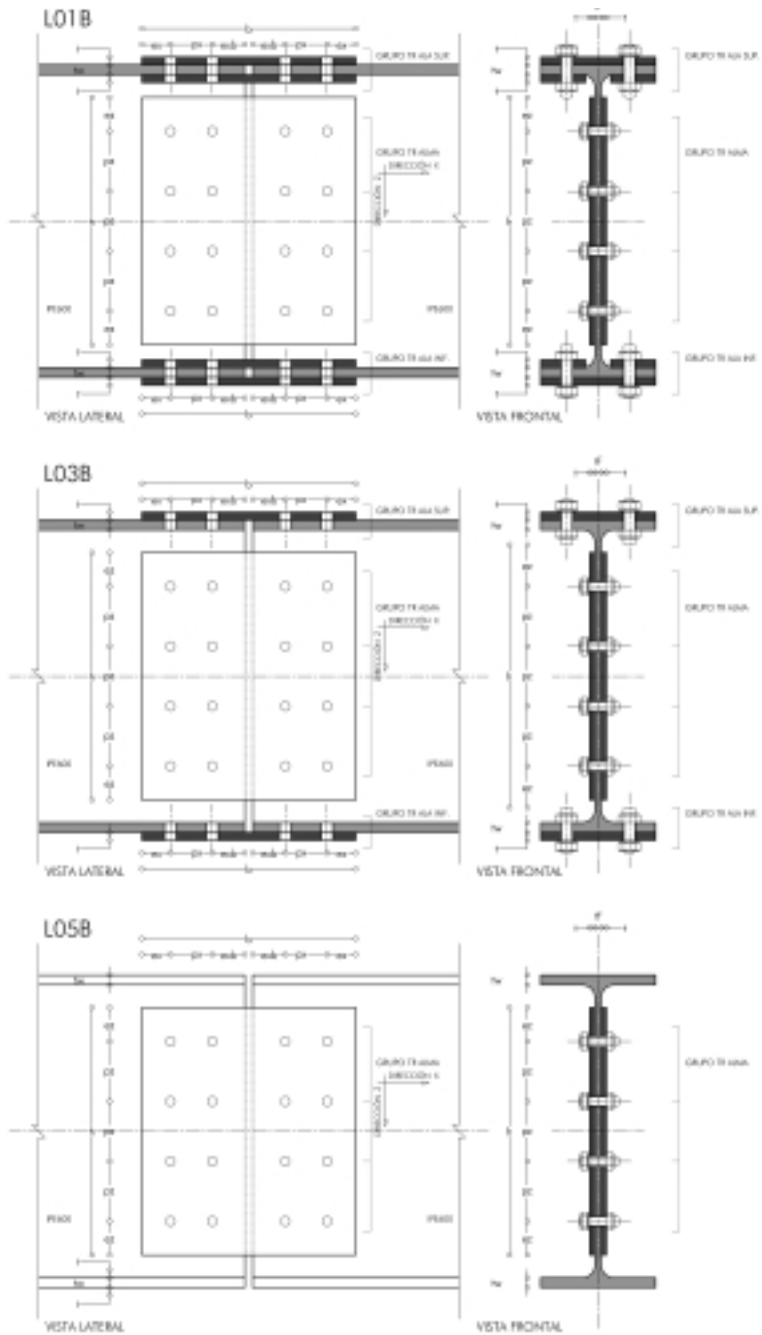


FIGURA 12: VARIACIONES DEL DISEÑO L00B.

### Uniones L02B y L03B con cubrejuntas simples

En cada cabeza de la viga de la unión F00B analizada en el apartado 3.2, las resultantes de tensiones internas en las chapas cubrejuntas quedan alineadas con la fuerza resultante de cada ala de la viga; pero esto no es factible si se disponen cubrejuntas simples, es decir, chapas únicamente en la cara exterior de las alas (además de las cubrejuntas de alma). En el ala traccionada la excentricidad de fuerzas internas se reducirá en parte por deformación de flexión de las chapas, pero lo contrario ocurrirá en el ala comprimida; en cualquier caso, las flexiones locales de las chapas están muy coaccionadas por la presencia del alma de la pieza, y se desprecian en el razonamiento siguiente, de carácter más cualitativo que cuantitativo.

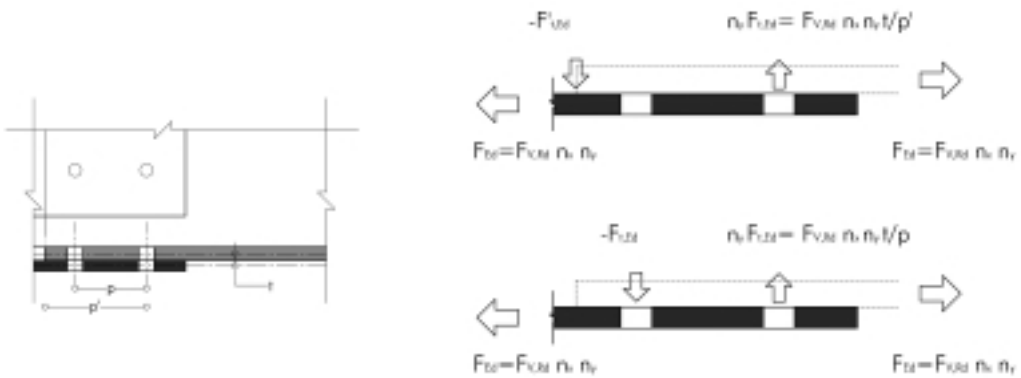


FIGURA 13: EQUILIBRIO DE LOS CUBREJUNTAS EN LA UNIÓN L01B

El equilibrio se restituye suponiendo que aparecen fuerzas perpendiculares a las anteriores, cuyo orden de magnitud en cada tornillo será como máximo  $F_{t,Ed} \approx \pm n_x F_{V,Ed} \cdot t/p$ , siendo  $F_{V,Ed}$  el esfuerzo de cortadura de cada tornillo,  $t$  el promedio de espesores del ala de la viga y de la chapa cubrejuntas y  $p$  la separación longitudinal entre tornillos (en el caso de la figura la estimación anterior de  $F_{t,Ed}$  es correcta, y será en cambio conservadora en caso de uniones más largas). Puesto que  $\sum F_{t,Ed} = 0$ , el comportamiento en servicio de la unión, supuesta de clase *A* o *B*, no se verá afectado. En estado último, para el caso típico de uniones de clase *B*, las resistencias a cortadura de los tornillos en los que las fuerzas parásitas  $F_{t,Ed}$  sean de tracción (en principio, la mitad del grupo de tornillos), se verán mermadas

por el factor  $1 - F_{t,Ed}/1,4F_{t,Rd}$ , y la resistencia del grupo de tornillos, por el factor  $\gamma_T = 1 - F_{t,Ed}/2,8F_{t,Rd} \approx 1 - tF_{V,Ed}/1,4pF_{t,Rd}$ , que en general será lo suficientemente próximo a la unidad como para poder ignorar su efecto, si las separaciones entre tornillos ( $p$ ) son relativamente grandes comparadas con los espesores de las chapas ( $p/10t$ ).

En realidad las fuerzas parásitas antedichas son también necesarias en las uniones con cubrejuntas simétricos como la estudiada en el apartado 3.2. Siempre cabe aislar el cubrejuntas exterior de las alas del perfil y plantear su equilibrio. La diferencia con la unión no simétrica es que por el elemento estudiado se canaliza sólo la mitad de la fuerza transmitida por el ala del perfil, pero la resultante de la fuerza escrita en función de la resistencia de cada tornillo sigue siendo  $F_{t,Ed} \approx \pm n_x \cdot F_{V,Ed} \cdot t/p$ : El número de planos de corte de los tornillos involucrados en el equilibrio del cubrejuntas exterior es el mismo en las uniones L00B, L01B, L02B y L03B. Lo que necesariamente ocurrirá es que en las uniones con un cubrejuntas los tornillos serán de mayor calibre o más numerosos.

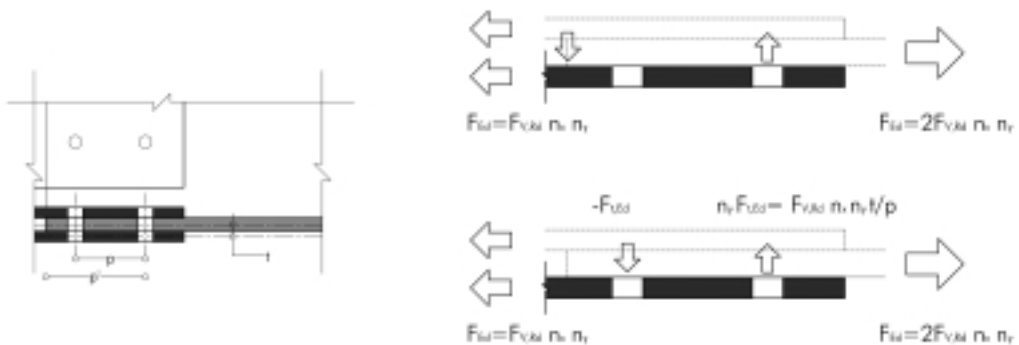


FIGURA 14: EQUILIBRIO DE LOS CUBREJUNTAS EN LA UNIÓN L01B

Para la unión del apartado 3.2.1 se halló para cada tornillo:

$$\begin{aligned}
 M20: \quad F_{Rd} &= \min\{2 \cdot 151; 318,6; 2 \cdot 236,5\} && 2 \cdot 151 \\
 1 - tF_{V,Ed}/1,4pF_{t,Rd} &= 1 - (15 + 19)/2 \cdot 151 / (1,4 \cdot 100 \cdot 176) && 0,896
 \end{aligned}$$

Lo que supone que en los cálculos del apartado 3.2.1 se ha cometido un error en la capacidad de los tornillos de las alas de aproximadamente un 10%. Pero ahora debe notarse que  $F_{t,Ed}$  ha disminuido  $F_{t,Ed} \approx \pm n_x \cdot \gamma_T \cdot F_{V,Ed} \cdot t/p$ , y por tanto el factor  $\gamma_T$  aumentará. Sustit

tuyendo el nuevo valor de  $F_{t,Ed}$  en  $\gamma_T = 1 - F_{t,Ed}/2,8F_{t,Rd}$  y haciendo como antes  $n_x = 2$  resulta  $\gamma_T \approx 1/(1 + tF_{V,Ed}/1,4pF_{t,Rd})$

$$1/(1 + tF_{V,Ed}/1,4pF_{t,Rd}) = 1/(1 + (15 + 19)/2 \cdot 151/(1,4 \cdot 100 \cdot 176)) = 0,906.$$

Si se toma la primera distribución de esfuerzos propuesta

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
TR alas		$2 \cdot 4 \cdot 151,0 \rightarrow$	$-0,291 \uparrow$	$2 \cdot 4 \cdot 151,0$

...

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = \quad \quad \quad \mathbf{0,861 \leq 1}$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = \quad \quad \quad \mathbf{0,860 \leq 1}$$

$$1 - tF_{V,Ed}/1,4pF_{t,Rd} = 1 - (15 + 19)/2 \cdot (0,86 \cdot 151)/(1,4 \cdot 100 \cdot 176) \quad \quad \quad 0,910$$

$$1/(1 + tF_{V,Ed}/1,4pF_{t,Rd}) = 1/(1 + (15 + 19)/2 \cdot 0,86 \cdot 151/(1,4 \cdot 100 \cdot 176)) \quad \quad \quad 0,918$$

y asumiendo una merma en la capacidad de las filas de tornillos del alma igual a las de las alas

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = 0,860/0,918 \quad \quad \quad \mathbf{0,937 < 1}$$

Si para estimar  $F_{t,Ed}$  se toma como distancia entre los tornillos traccionados y la resultante de compresiones  $1,5 \cdot p$  (distancia de los tornillos al extremo del perfil base) se hallan los siguientes resultados:

$$1 - tF_{V,Ed}/1,4(1,5 \cdot p)F_{t,Rd} = 1 - (15 + 19)/2 \cdot (0,86 \cdot 151)/(1,4 \cdot 150 \cdot 176) \quad \quad \quad 0,940$$

$$1/(1 + tF_{V,Ed}/1,4(1,5 \cdot p)F_{t,Rd}) = 1/(1 + (15 + 19)/2 \cdot 0,86 \cdot 151/(1,4 \cdot 150 \cdot 176)) \quad \quad \quad 0,944$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = 0,860/0,944 \quad \quad \quad \mathbf{0,911 < 1}$$

En suma, el error cometido en los cálculos del apartado 3.2.1 por omitir en los mismos el efecto de las tracciones parásitas en los tornillos de los cubrejuntas está acotado entre un 5 y un 10%. Esta incertidumbre (10%) puede considerarse típica del cálculo de cualquier unión atornillada, por lo que las laboriosas comprobaciones anteriores no se realizan en los cálculos rutinarios de estas uniones. Consecuencia inmediata es que los resultados obtenidos en este capítulo y los siguientes no deban extrapolarse a diseños no sancionados por la práctica.

### ***Uniones L04B y L05B con tornillos sólo en el alma***

Parecería lógico recomendar el uso de este tipo de unión en secciones donde domine el esfuerzo cortante sobre el momento flector, como por ejemplo los extremos de «vigas simplemente apoyadas», o secciones de «momento nulo» de vigas continuas. Cabe no obstante formular serias objeciones en ambos casos:

- Vigas simplemente apoyadas: La consideración del extremo de una viga como «apoyo simple» lleva implícita la hipótesis de que dicho extremo puede girar como tal, mientras que en tanto no se vence el rozamiento y se entra en la fase posterior de agotamiento por cortadura de los tornillos, esta unión no se comporta como una «articulación», y aun en esa fase lo hace con rotaciones muy restringidas (y permanentes) por la limitada ductilidad del acero de los tornillos pretensados. El valor máximo de estas rotaciones se puede estimar como sigue teniendo en cuenta la holgura de los taladros respecto del diámetro de los tornillos: Por ejemplo, para una holgura de 2mm,  $n_z = 4$  ( $n_z - 1 = 3$ ) y  $p_z = 0,100$  m, la rotación puede alcanzar  $2 \cdot 0,001 / 0,300$  rad a 6,7 milésimas de radián siempre que los tornillos se coloquen exactamente centrados en sus taladros respectivos; pero esto último evidentemente es imposible de garantizar en la práctica. Además, estas rotaciones serían irreversibles como ya se ha indicado, y nunca deben considerarse en el cálculo.

Por lo tanto este tipo de unión se desaconseja en este Manual para constituir «apoyos articulados», los cuales se estudian en los tres últimos capítulos .

- Secciones de «momento nulo» de vigas continuas: En este caso la objeción no es de tipo conceptual, ya que la rotación requerida será muy pequeña siempre que la unión se ubique en el entorno próximo de la sección de momento flector nulo. Incluso con la inevitable incertidumbre sobre la posición de dicha sección, lo que ocurrirá simplemente es que la unión, que mantiene la continuidad de giros (al menos en servicio), tomará un cierto momento, aproximadamente proporcional a su distancia a la auténtica sección de momento nulo. Siempre que dicha distancia sea efectivamente pequeña, dicho momento flector «secundario» en la unión no debería perjudicar significativamente su capacidad resistente nominal frente a esfuerzo cortante; no obstante parece conveniente recomendar que se tenga en cuenta siempre un cierto momento imprevisto en el dimensionamiento de la unión. Nótese que, si en servicio se vence el rozamiento —por ejemplo, por no considerar en el cálculo el momento flector fruto de las incertidumbres indicadas— se producirán giros muy significativos en la unión. Como orden

de magnitud de los mismos puede tomarse las milésimas de radián calculadas previamente, que las cuales harían aumentar muy notablemente las flechas obtenidas mediante el análisis elástico de la pieza.

Las objeciones en este caso son de índole constructivo:

- La ubicación de los empalmes en el entorno de las secciones de momento flector nulo (típicamente en el quinto de la luz de los vanos), supone un despiece antinatural e incluso desigual entre vanos interiores y extremos. Esto supone una clara desventaja frente a un despiece constructivo consistente en adoptar una pieza para cada vano.
- Es obvio que la puesta en obra de la unión es más costosa que si ésta se materializa sobre la pieza sustentante transversal.
- En el caso, frecuente en edificios no industriales, en que las dos familias de piezas longitudinales y transversales no puedan generalmente quedar superpuestas (por la pérdida inadmisible de volumen que ello implica), este tipo de unión conlleva traer de taller las piezas principales con unos «muñones» soldados. Esto dificulta seriamente el transporte, lo que puede aconsejar disminuir la longitud de dichos «muñones» desplazando la posición de la unión a secciones con un momento flector no desdeñable.

Todo ello hacer derivar el diseño de este tipo de unión hacia una nueva ubicación: llevando al límite el diseño del último párrafo, las longitudes mínimas de los «muñones» soldados en taller son simplemente las de unas cartelas como las de la figura siguiente:

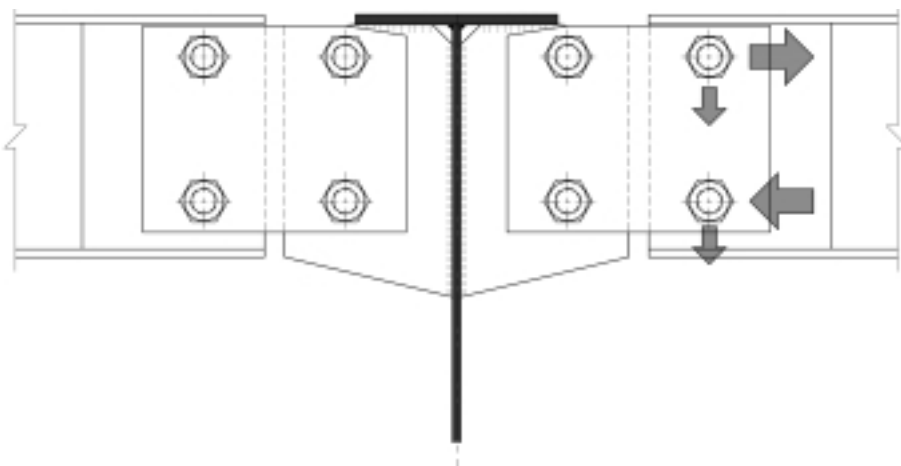


FIGURA 15: UNIÓN TIPO L04B EN CONTINUIDAD

Se trata de una unión en continuidad. Salvo que se considere una cierta reducción por la pequeña distancia del centro de la unión hasta el eje de apoyo (reducción que puede ser significativa ya que en esta zona el gradiente de la distribución de momentos flectores es muy elevado), el momento flector de dimensionado de la unión será prácticamente el de máximo valor absoluto de la pieza. Todo ello limita considerablemente el rango de aplicación de esta clase de unión, que queda restringido a perfiles relativamente pequeños (correas de cubierta o viguetas de piso). Se comentan seguidamente algunas cuestiones conceptuales importantes de este tipo de uniones:

- Uniones sólo de alma «en continuidad»: La efectividad de la continuidad en servicio, y por lo tanto la drástica reducción de flechas que se consigue frente a soluciones simplemente apoyadas, depende esencialmente de la buena realización del apriete de los tornillos y de las condiciones de tratamiento superficial relativas al coeficiente de rozamiento. Obviamente éstos constituyen puntos críticos de este diseño de unión, que requieren por ello un control de calidad intenso de los aspectos mencionados.

Aunque en estado último la capacidad resistente de la unión no se ve afectada por los aspectos antedichos, sin embargo debe tenerse en cuenta la relativamente reducida ductilidad de los tornillos (frente a la del material base) en la adopción de redistribuciones anelásticas de los momentos hiperestáticos en estado último.

Esta solución requerirá normalmente un refuerzo del alma del perfil en la zona de introducción del momento flector en forma de par de fuerzas transmitidas por los tornillos (fuerzas horizontales indicadas en la figura). Por ello, y por la magnitud de dichas fuerzas (muy superiores a las que aparecen en la unión en los puntos de momento casi nulo), este diseño de unión no resulta óptimo desde el punto de vista estricto de la cantidad de materiales empleados. Las cambiantes relaciones de mercado entre costes del material base y de la mano de obra de fabricación en taller y montaje, pueden determinar que otras soluciones más prolijas, vuelvan quizás a resultar más competitivas.

Sin embargo no hay que olvidar otras ventajas muy importantes de esta solución:

- Su prácticamente nula interferencia geométrica con otros elementos constructivos, ya que queda completamente inscrita en la «huella» definida por el ancho y canto del perfil unido. Esto es muy difícil de conseguir en general con uniones atornilladas.
- Su libertad de orientación, tanto en planta como en alzado.
- Su despiece constructivo natural (una pieza para cada vano).
- Su facilidad de montaje como consecuencia de su ubicación.
- Su apropiada tolerancia constructiva.

Se concluye pues este apartado de las uniones L02B y L05B con tornillos sólo en el alma con un planteamiento justamente opuesto a la apreciación inicial de que el campo de aplicación lógico de este tipo de unión debería ser el de las secciones donde domine el esfuerzo cortante sobre el momento flector: para relaciones canto/luz típicas, la proporción entre las fuerzas longitudinales y verticales representadas en la última figura será típicamente del orden de 15:1.

### 3.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD

Por lo ya expuesto en apartados precedentes, queda claro que en este tipo de uniones no son probables los fenómenos de desgarro laminar. En todo caso, la presencia de taladros y líneas de corte requiere siempre verificar los procedimientos empleados, así como la ausencia de irregularidades en los bordes, de ángulos entrantes vivos en los perímetros de corte, etc., que, como es bien sabido, son puntos susceptibles de inicio de roturas frágiles.

En el tipo de uniones del presente apartado, el control debe centrarse básicamente en:

La homologación y aplicación rigurosa de los procedimientos de apriete de los tornillos, sobre cuya importancia ya se ha enfatizado anteriormente, y para cuya implementación se extractan en el ANEJO final de este Manual los criterios normativos actualmente vigentes (2008).

La verificación de las características de las superficies en contacto en relación con el coeficiente de rozamiento exigido (EAE, M.F. 2006: 58.7; CTE DB SE-A, M.V. 2006: 7.3.2; EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7 y prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14).

Las condiciones relativas al apriete de los tornillos y al rozamiento de las superficies en contacto para solicitaciones predominantemente estáticas tienen relación con los estados límites de servicio. La no conformidad de dichas condiciones no debería llevar aparejada necesariamente una merma del coeficiente de seguridad frente a rotura de la unión, lo que puede ser tenido en cuenta para la toma de decisiones razonables en obras ya ejecutadas cuya reparación es usualmente muy costosa y traumática. En una situación como la teórica anterior siempre debe considerarse la elevada correlación entre los distintos factores de mala ejecución, que todo director facultativo experimentado sabrá valorar adecuadamente.





# **4. Uniones atornilladas laterales en flexión simple, tipo L00BC: para vigas mixtas**

## **4.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN**

Las acciones sobre las vigas mixtas de edificación suelen ser en general muy superiores a las típicas de las cubiertas ligeras. La sección mixta se consigue habitualmente por conexión de la sección metálica al hormigón de los forjados de piso, ya sean de chapa grecada colaborante, losas macizas, losas aligeradas, etc. Evidentemente estos forjados son mucho más masivos y con mayores sobrecargas de uso que los típicos en cubiertas ligeras. Esto, ya de por sí, crea diferencias importantes en las uniones correspondientes, pero además existen otras diferencias de índole tanto cualitativo como cuantitativo, derivadas de las particulares características de las piezas mixtas. Por ejemplo, en las uniones de las vigas mixtas la proporción del esfuerzo cortante en relación al cortante último del perfil es generalmente mucho más elevada que en las vigas metálicas puras, y salvo un análisis minucioso debería presuponerse igual a la unidad.

En las vigas mixtas continuas la continuidad de las sollicitaciones de tracción puede llegar a conseguirse sólo mediante armadura pasiva, sin considerar tracciones en la sección metálica de la unión. Sin embargo, esto supone un incremento de dicha unidad de obra, así como de la densidad de conectadores necesarios entre perfil y forjado, lo cual tiene no sólo repercusiones económicas sino también constructivas: Especialmente en los forjados mixtos de chapa grecada colaborante los espesores de la losa de hormigón suelen ser demasiado pequeños tanto para alojar grandes cantidades de armadura, como para transmitir esfuerzos rasantes muy elevados incluso estando adecuadamente armados. Por ello conviene dotar de plena continuidad al perfil metálico transmitiendo a su través un momento parcial igual a su momento último, salvo, como ocurría con el esfuerzo cortante, un análisis muy detallado. En suma, el elevado valor relativo del esfuerzo cortante y del momento flector determina que en esta variante de uniones atornilladas puedan llegar a concurrir fuertes sollicitaciones.

Otra prestación generalmente requerida de las soluciones mixtas es su carácter autoportante, lo cual determina que en la fase constructiva la sección metálica sola deba hacer fren-

te a la totalidad de las acciones de su peso propio y del forjado, más una cierta sobrecarga. Esto constituye una razón más para que las uniones de la sección metálica se dimensionen para una fracción importante de las solicitaciones finales, con plena continuidad entre los vanos consecutivos de las piezas metálicas.

Salvo las peculiaridades antedichas, tienen plena vigencia las observaciones formuladas en 3.1, acerca de ciertas dificultades que puede ocasionar el resalto creado en las alas superiores para la colocación y unión de los elementos de forjado; la conveniencia de disponer las uniones en el entorno de las secciones de flector nulo, huyendo del centro del vano y de las secciones de empotramiento, en su caso; y la importancia de conseguir, al menos en situación de servicio, que la fricción de las superficies en contacto garantice la ausencia de deslizamientos

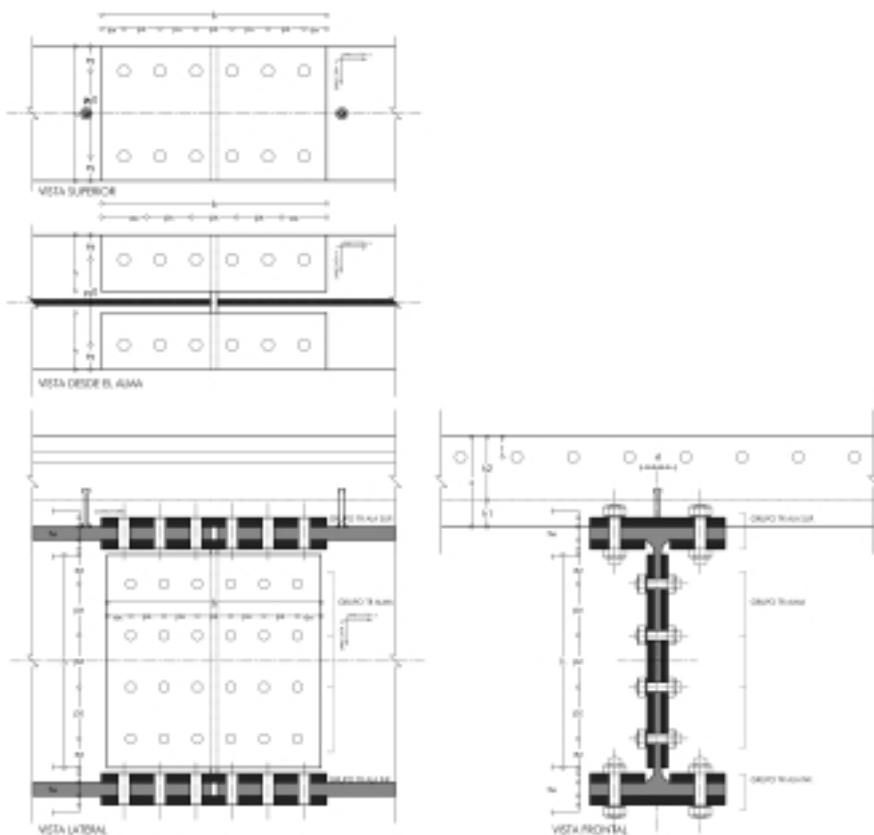


FIGURA 16: UNIÓN ATORNILLADA LATERAL MIXTA. DISEÑO L00BC

## 4.2 EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión que se describe a continuación, los comentarios generales a estos cálculos se encuentran en el apartado 2.2.

### **L00BC HEB 600 (S275)**

En las tablas que siguen, mediante las cuales se caracteriza la unión, no se incluyen las dimensiones de la losa de hormigón ( $b_{ef} = 1000\text{mm}$ ,  $h = 200\text{mm}$ , H25) ni las armaduras de la viga mixta ( $8\phi 25$  B500S en flexión negativa), que deben quedar reflejadas en los correspondientes planos de armado. Como en el resto de las uniones estudiadas se sigue el criterio de caracterizar la unión mediante unas tablas que pueden formar parte de los documentos del proyecto, en este caso de los planos que deberían facilitarse al taller metálico para la fabricación de la unión (lo cual justifica que no se definan en ellas ni la losa de hormigón ni sus armaduras).

<b>TORNILLOS</b>			
<p>A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1)            Superficies preparadas y/o tratadas para <math>\mu \geq 0,5</math>            (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4,            tabla 14 y anejo G)</p>			
<p>El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.</p>			
Valores característicos (N/mm <sup>2</sup> )		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1,25$

<b>Definición de la Unión: L00BC HEB 600 (S275)</b>			
<b>Cubrejuntas alma (S275)</b>		<b>Cubrejuntas alas (S275)</b>	
2#480·475·15		# 500·300·20 +2 # 500·122·20	
<b>Tornillos alma</b>		<b>Tornillos alas</b>	
Tornillos A 10.9 ( $\mu = 0,5$ )	Distancias (mm)	Tornillos A 10.9 ( $\mu = 0,5$ )	Distancias (mm)
6 × 4M20  (taladros $\phi$ 22)	$e_x = 55$ $p_x = 74$ $e_z = 65$ $p_z = 115$	6 × 2M24 6 × 2M24 (taladros $\phi$ 26)	$e_x = 50$ $p_x = 80$ $e_y = 55$ $p_y = 190$

### Capacidad resistente del perfil base en flexión simple flexión (HEB600)

$V_{pl,Rd} = 11080 \cdot 275 / 1,0 / \sqrt{3} \text{N} = 1759 \text{kN}$ , $M_{pl,Rd} = 6425000 \cdot 275 / 1,0 \text{ Nmm} = 1767 \text{kNm}$				
$V_{Rd} = \frac{V_{pl,Rd}}{1 + \sqrt{\rho}} / 2$ EN 1993-1-8:2005 6.2.8(3)	$\rho = 0$	$\rho = (1/3)^2$	$\rho = (2/3)^2$	$\rho = 1$
		$(1/2)V_{pl,Rd}$	$(2/3)V_{pl,Rd}$	$(5/6)V_{pl,Rd}$
	880	1173	1466	1759
$M_{V,Rd} = M_{pl,Rd} - \frac{\rho}{4} A_v^2 f_{yd} / t_w$ EN 1993-1-8:2005 6.2.8(3)	$M_{pl,Rd}$	$M_{pl,Rd} - 61$	$M_{pl,Rd} - 242$	$M_{pl,Rd} - 545$
	1767	1706	1525	1222

#### 4.2.1 Cálculo 1º: Flexión positiva

De acuerdo con las consideraciones iniciales de este capítulo se comprueba la unión en flexión positiva. La colaboración de la losa debe permitir que el «conjunto de la unión mixta» alcance el 100% del momento plástico de la sección parcial metálica en flexión pura. Junto a las comprobaciones que siguen es obligado verificar de la sección metálica «pura» en fase de proyecto para las solicitaciones correspondientes. El cálculo en nada difiere de los desarrollados en el capítulo 3 por lo que en éste se omiten.

##### *Solicitaciones nominales de la unión*

$$\begin{array}{llll}
 V_{Ed} = V_{pl,Rd} & 1759 \text{ kN} & M_{Ed} = M_{pl,Rd} & 1767 \text{ kNm} \\
 \gamma_f = 1,45 & & & \\
 V_{E,ser} & 1213 \text{ kN} & M_{E,ser} & 1219 \text{ kNm}
 \end{array}$$

Como se verificará inmediatamente el agotamiento de los tornillos es posterior al de los cubrejuntas, por lo que EN 1993-1-8:2005 avala el cálculo de la unión siguiendo criterios plásticos (artículo 3.12). No se reiteran las advertencias sobre la ductilidad real de los materiales, apuntadas en el apartado 3.2.1 que aquí serían nuevamente de aplicación.

##### *ELU según EN 1993-1-8:2005*

###### *Cálculos preliminares:*

- Resistencias de cálculo de cada tornillo. Tabla 3.4

$$\begin{array}{lll}
 M24: & F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 452 \cdot 1000 / 1,25 \text{ N} & 217 \text{ kN} \\
 M20: & F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 314 \cdot 1000 / 1,25 \text{ N} & 151 \text{ kN}
 \end{array}$$

- Resistencia a aplastamiento del alma y el ala del perfil base ( $F_{b,Rd}$ ).

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$\begin{array}{llll}
 M24: & L_j = 160,0 & \beta_{L_f} = 1 - (160,0 - 15 \cdot 24) / (200 - 24) < 1 & \beta_{L_f} = 1,00 \\
 M20: & L_j = 345,0 & \beta_{L_f} = 1 - (345,0 - 15 \cdot 20) / (200 - 20) < 1 & \beta_{L_f} = 0,989
 \end{array}$$

Para el cálculo de  $L_j$  en los tornillos de las alas se ha considerado la distancia entre los extremos en la dirección  $x$  de la unión. Lógicamente se contabilizan únicamente la mitad de los tornillos de cada fila que son los involucrados en cada «lado» de la unión. En el alma se transmite carga tanto en la dirección del eje  $x$  como en la del  $z$ , —véase la sección «conjunto de la unión» posterior—. Para el diseño aquí estudiado es mayor el valor de  $L_j$  correspondiente al eje  $z$ . Sin embargo, si las componentes de las fuerzas en los tornillos  $F_x$  son muy superiores a las  $F_z$  el valor de  $L_j$  considerado puede ser conservador. En cualquier caso, el valor de  $L_j$  considerado es tan próximo a  $15 \cdot d$  que la reducción de  $F_{b,Rd}$  es intrascendente ( $\beta_{L_f} = 0,989$ ).

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

Distancia de los tornillos al borde del perfil (alas y alma)

$e_x = (p_x - g)/2 = (80 - 15)/2$	32,5
$e_x = (p_x - g)/2 = (74 - 15)/2$	29,5
$M24 \text{ ext: } \alpha = \min \{32,5/(3 \cdot 26); 80/(3 \cdot 26) - 1/4; 1000/430; 1\}$	0,416
$M24 \text{ int: } \alpha = \min \{80/(3 \cdot 26) - 1/4; 1000/430; 1\}$	0,776
$\alpha = (0,416 \cdot 1 + 0,776 \cdot 2)/3$	0,656
$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 2,5 \cdot 0,656 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 430/1,25 \text{ N}$	406,2 kN
$M20 \text{ ext: } \alpha = \min \{29,5/(3 \cdot 22); 74/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\}$	0,447
$M20 \text{ int: } \alpha = \min \{74/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\}$	0,871
$\alpha = (0,447 \cdot 1 + 0,871 \cdot 2)/3$	0,730
$F_{b,Rd} = 0,989 \cdot 2,5 \cdot 0,730 \cdot 20 \cdot 15,5 \cdot 430/1,25 \text{ N}$	192,4 kN

- Resistencia a aplastamiento de los cubrejuntas ( $F_{b,Rd}$ ).

Los cálculos que siguen son superfluos salvo en situaciones de diseño extremas (óptimas) o patológicas: Nótese que tanto el alma como las alas del perfil están recubiertas por dos cubrejuntas que, con la única precaución de que la suma de sus espesores supere la del perfil base y las distancias a los bordes de los agujeros sean iguales o mayores que las del perfil base tendrán un valor de  $F_{b,Rd}$  mayor que el del perfil base.

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$M24: L_j = 160,0$	$\beta_{L_f} = 1 - (160,0 - 15 \cdot 24)/(200 \cdot 24) < 1$	$\beta_{L_f} = 1,00$
$M20 L_j = 345,0$	$\beta_{L_f} = 1 - (345,0 - 15 \cdot 20)/(200 \cdot 20) < 1$	$\beta_{L_f} = 0,989$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

Distancia de los tornillos al borde de los cubrejuntas (alas y alma)

$e_x =$	50 mm
$e_x =$	55 mm
M24 ext: $\alpha = \min \{50/(3 \cdot 26); 80/(3 \cdot 26) - 1/4; 1000/430; 1\}$	0,641
M24 int: $\alpha = \min \{80/(3 \cdot 26) - 1/4; 1000/430; 1\}$	0,776
$\alpha = (0,641 \cdot 1 + 0,776 \cdot 2)/3$	0,731
$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 2,5 \cdot 0,731 \cdot 24 \cdot 20 \cdot 430 / 1,25 \text{ N}$	301,9 kN
M20 ext: $\alpha = \min \{55/(3 \cdot 22); 74/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\}$	0,833
M20 int: $\alpha = \min \{74/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\}$	0,871
$\alpha = (0,833 \cdot 1 + 0,871 \cdot 2)/3$	0,858
$F_{b,Rd} = 0,989 \cdot 2,5 \cdot 0,858 \cdot 20 \cdot 15 \cdot 430 / 1,25 \text{ N}$	218,9 kN

En algunos diseños puede además ocurrir que el valor de  $F_{b,Rd}$  sea distinto para cada uno de los cubrejuntas de las alas (las distancias  $e_2$  y  $p_2$  —dirección perpendicular a la de transmisión de la carga— no son iguales en ambas y pueden afectar al valor de  $k_1$  que en esta unión siempre toma el valor 2,5)

- Valores de cálculo

M24: $F_{Rd} = \min \{2 \cdot 217; 406,2; 2 \cdot 301,9\}$	406,2 kN
M20: $F_{Rd} = \min \{2 \cdot 151; 192,4; 2 \cdot 218,9\}$	192,4 kN

Nótese que con objeto de comparar la resistencia a aplastamiento de cálculo por tornillo del perfil base,  $F_{b,Rd}$  con la resistencia a cortante de cálculo por tornillo,  $F_{v,Ed}$  debe considerarse el número de planos de corte de estos. Por lo mismo, para comparar la resistencia a aplastamiento de cálculo por tornillo del perfil base con la resistencia a aplastamiento de los dos cubrejuntas deben sumarse la resistencia de estos dos. Puesto que el aplastamiento del ala y las almas del perfil base es previo al agotamiento por cortadura de los tornillos puede adoptarse una distribución plástica de esfuerzos.



Conjunto de la unión:

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
Losa de hormigón (H25, $f_{cd} = 16,67$ )		$(0,85 \cdot 16,67 \cdot 1000 \cdot 200 / 1000 = 2833$ kN)		
		2833→	-0,400↑	
TR alas		2·3·0→	-0,285↑	2·3·0,0
TR fila 1ª	3·192,4↓	-3·0←	-0,173↑	3·192,4
TR fila 2ª	3·192,4↓	-3·0←	-0,058↑	3·192,4
Eje de la pieza	<hr/>			
TR fila 3ª	3·192,4↓	-3·0←	0,058↓	3·192,4
TR fila 4ª	3·9,133↓	-3·131,9←	0,173↓	3·131,6
TR alas		-2·3·406,2←	0,285↓	2·3·406,2

$$V_{Rd} = \quad \Sigma F_z = 1759$$

$$N_{Rd} = \quad \Sigma F_x = 0$$

$$M_{Rd} = \quad \Sigma F_x \cdot z = 1896 \text{ kNm}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = \quad \underline{\mathbf{1 \leq 1}}$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = \quad \underline{\mathbf{0,931 \leq 1}}$$

La distribución de «fuerzas internas» ( $F_x$ ,  $F_z$ ) adoptada, no es la única posible que cumple todas las condiciones de equilibrio ( $\Sigma F_x = N_{Ed} = 0$ ,  $\Sigma F_z = V_{Ed}$ ,  $\Sigma F_x \cdot z = M_{Ed}$ ) y de resistencia ( $(F_{x,Ed}/F_{Rd})^2 + (F_{z,Ed}/F_{Rd})^2 \leq 1$ ,  $F_{x,Ed}/F_{Rd} \leq 1$ , etc.); pero como ya se ha indicado permite validar la seguridad en ELU de la unión. La siguiente es, por tanto, una comprobación alternativa de la unión igual de válida que la anterior, en la cual se ha optimizado la distribución de fuerzas en los tornillos.

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
Losa de hormigón (H25, $f_{cd} = 16,67$ )		$(0,85 \cdot 16,67 \cdot 1000 \cdot 200 / 1000 = 2833 \text{ kN})$		
		2450→	-0,400↑	
TR alas		2·3·81,4→	-0,285↑	2·3·81,4
TR fila 1ª	3·160,7↓	-3·30,2←	-0,173↑	3·163,5
TR fila 2ª	3·154,0↓	-3·63,7←	-0,058↑	3·166,7
Eje de la pieza	<hr/>			
TR fila 3ª	3·153,8↓	-3·64←	0,058↓	3·166,6
TR fila 4ª	3·117,9↓	-3·117,7←	0,173↓	3·166,6
TR alas		-2·3·352,0←	0,285↓	2·3·352,0

$$V_{Rd} = \Sigma F_z = 1759$$

$$N_{Rd} = \Sigma F_x = 0$$

$$M_{Rd} = \Sigma F_x z = 1767 \text{ kNm}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = \underline{\underline{1 \leq 1}}$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = \underline{\underline{1 \leq 1}}$$

Para esta distribución «óptima» de fuerzas en los tornillos el factor de utilización de todos ellos y de la losa es 0,866 ( $166,6/192,4 = 0,866$ ;  $352,0/406,2 = 0,866$ ;  $2450/2833 = 0,864$ ). Se puede fácilmente aumentar la capacidad de la unión ajustando las distancias  $e_l$  y  $p_l$  de los tornillos. Manteniendo el criterio de que  $F_{b,Rd} < F_{v,Rd}$  con el propósito de que el eurocódigo avale una distribución plástica como la adoptada, el ajuste de las distancias antedichas permitiría rehacer los cálculos con:

$$M24: \quad F_{Rd} = \min \{2 \cdot 217; (406,2); 2 \cdot 301,9\} \quad 434 \text{ kN}$$

$$M20: \quad F_{Rd} = \min \{2 \cdot 151; (192,4); 2 \cdot 218,9\} \quad 302 \text{ kN}$$

Lo que parece indicar que puede disminuirse el número de tornillos de la unión. Sin embargo, este ajuste es superfluo pues, como se advirtió en el primer apartado de este capítulo, el estado condicionante en esta tipología es el ELS de deslizamiento, como muestran la siguiente comprobación.

### **ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005**

#### *Cálculos preliminares:*

Para este cálculo se asume una distribución de esfuerzos en los tornillos proporcional a la distancia desde su CDG. Se recuerda que el CTE propone repartir el momento flector que

actúa sobre la sección metálica «entre las cubrejuntas de las alas, y del alma, de forma proporcional a sus inercias respecto del eje de flexión». Criterio que a su vez se seguirá para distribuir el flector entre la losa de hormigón (homogeneizada) y el perfil metálico. A la hora de obtener la distribución de fuerzas sobre los tornillos no debe olvidarse que la resultante de fuerzas horizontales sobre el perfil metálico no es nula debiendo repartirse entre los tornillos del alma y de las alas de forma proporcional a las áreas de los cubrejuntas.

- Pretensado y resistencia a deslizamiento. Artículos 3.6.1 y 3.9.1:

M24:	$F_{p,C} = 0,7 \cdot 353 \cdot 1000 \text{ N}$	247 kN
	$F_{s,Rd,ser} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot 353 \cdot 1000 / 1,1$	112 kN
M20:	$F_{p,C} = 0,7 \cdot 245 \cdot 1000 \text{ N}$	172 kN
	$F_{s,Rd,ser} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot 245 \cdot 1000 / 1,1$	78 kN

- Áreas de los cubrejuntas y la losa (homogeneizada  $m = 7,55$ )

$A_{losa} = 1000/7,55 \cdot 200$	26490 mm <sup>2</sup>
$A_{alas} = 2(300 \cdot 20 + 2 \cdot 122 \cdot 20)$	21760 mm <sup>2</sup>
$A_{alma} = 2 \cdot 475 \cdot 15$	14250 mm <sup>2</sup>
$A_{total} =$	62500 mm <sup>2</sup>

- Posición del centro de gravedad de la unión respecto del centro de gravedad de la sección metálica

$$z_{cdg} = (26490 \cdot (-300 - 100)) / (62500) \quad -169,5 \text{ mm}$$

- Momento estático los cubrejuntas y de la losa (homogeneizada  $m = 7,55$ ) respecto del CDG del conjunto:

$S_{losa} = 26490(-169,5 + 300 + 100)$	6104999 mm <sup>3</sup>
$S_{alas} = 21760 \cdot 169,5$	3689109 mm <sup>3</sup>
$S_{alma} = 14250 \cdot 169,5$	2415890 mm <sup>3</sup>

- Inercia de los cubrejuntas y de la losa (homogeneizada  $m=7,55$ ) respecto del CDG del conjunto:

$I_{losa} = 149528 \text{ cm}^4$	$0,324 \cdot I_{total}$
$I_{alas} = 243913 \text{ cm}^4$	$0,529 \cdot I_{total}$
$I_{alma} = 67751 \text{ cm}^4$	$0,147 \cdot I_{total}$
$I_{total} =$	461193 cm <sup>4</sup>
$(I_{HE600B} = 171000)$	

- Distribución del momento flector entre los tornillos del alma, los de las alas y la losa

$$M_{E,ser,losa} = 0,324 \cdot 1219 \quad 395 \text{ kNm}$$

$$M_{E,ser,alas} = 0,529 \cdot 1219 \quad 644 \text{ kNm}$$

$$M_{E,ser,alma} = 0,147 \cdot 1219 \quad 179 \text{ kNm}$$

- Resultante de tracciones en los tornillos del alma y los de las alas

$$N_{E,ser,alas} = 1219/461193 \cdot 3689109 \quad 975 \text{ kN}$$

$$N_{E,ser,alma} = 1219/461193 \cdot 2415890 \quad 639 \text{ kN}$$

- Tensiones en el hormigón; Resultante y posición

$$\sigma_{(z=-500)} = 1219/461193 \cdot (-500 + 169,5) \cdot 100/7,55 \quad 11,56 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{(z=-300)} = 1219/461193 \cdot (-300 + 169,5) \cdot 100/7,55 \quad 4,56 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{E,x} = (11,56 + 4,56)/2 \cdot 1000 \cdot 200/1000 \quad 1612 \text{ kN}$$

$$z = (-400 \cdot 4,56 - (300 + 2 \cdot 200/3) \cdot (11,56 - 4,56)/2) / ((11,56 + 4,56)/2) \quad -414,47 \text{ mm}$$

$$z_{cdg} = -414,47 - (-169,5) \quad 245,0 \text{ mm}$$

- Resultante de fuerzas en las alas

$$F_{E,x,ser,alas} = 975/2 - (644 - 975 \cdot 0,1695)/(0,600 - 0,030) \quad -352 \text{ kN}$$

$$F_{E,x,ser,alas} = 975/2 + (644 - 975 \cdot 0,1695)/(0,600 - 0,030) \quad 1327 \text{ kN}$$

- Resultante de fuerzas en las filas de tornillos del alma

$$F_{E,x,ser,alas} = 639/4 - (179 - 639 \cdot 0,1695)/(0,115 \cdot 3) \cdot 18/20 \quad -25 \text{ kN}$$

$$F_{E,x,ser,alas} = 639/4 - (179 - 639 \cdot 0,1695)/(0,115 \cdot 3) \cdot 18/20/3 \quad 98,0 \text{ kN}$$

$$F_{E,x,ser,alas} = 639/4 + (179 - 639 \cdot 0,1695)/(0,115 \cdot 3) \cdot 18/20/3 \quad 221 \text{ kN}$$

$$F_{E,x,ser,alas} = 639/4 + (179 - 639 \cdot 0,1695)/(0,115 \cdot 3) \cdot 18/20 \quad 344 \text{ kN}$$

Conjunto de la unión:

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
Losa de hormigón		-1612←	-0,245↑	
TR alas		-2·6·29,4←	-0,115↑	2·6·29,4
TR fila 1ª	2·3·50,6↓	-2·3·4,2←	-0,003↑	2·2·50,7
TR fila 2ª	2·3·50,6↓	2·3·16,3→	0,112↓	2·2·53,1
Eje de la pieza	<hr/>			
TR fila 3ª	2·3·50,6↓	2·3·36,9→	0,227↓	2·2·62,6
TR fila 4ª	2·3·50,6↓	2·3·57,4→	0,342↓	2·2·76,5
TR alas		2·6·110,7→	0,455↓	2·6·110,7

$$V_{R,ser} = \Sigma F_z = 1214$$

$$N_{R,ser} = \Sigma F_x = 0$$

$$M_{R,ser} = \Sigma F_x z = -1218 \text{ kNm}$$

$$|V_{E,ser}/V_{R,ser}| = \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

$$|M_{E,ser}/M_{R,ser}| = \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

En los tornillos de la cuarta fila del alma y en los del ala inferior del perfil el valor de  $F_{s,Rd,ser}$  se encuentra prácticamente en el límite:  $(76,5/78,2 = 0,978$  y  $110,7/112 = 0,988)$ . Por el contrario, el factor de utilización de la unión en ELU es de 0,866; resultado que muestra claramente que el estado más desfavorable en este tipo de uniones es el que acaba de analizarse.

### RESISTENCIA DE LA SECCION NETA según EC3 (UNE-ENV-1993-1-1: 1992):

#### art. 5.4.5.3 (3), 5.4.6 (8)

- Alas

Axil de cálculo (dos comprobaciones independientes)

$$N_{Ed} = 0,931 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 406,2 \quad 2269 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 2 \cdot 3 \cdot 352,0 \quad 2112 \text{ kN}$$

Resistencia a tracción de la sección neta

$$N_{Rd} = 0,9 A_{f,net} f_u / 1,25 = 0,9(300 - 2 \cdot 26)30 \cdot 430 / 1,25 \text{ N} \quad 2303 \text{ kN}$$

$$|N_{Ed}/N_{Rd}| = \underline{\underline{0,985 < 1}}$$

$$|N_{Ed}/N_{Rd}| = \underline{\underline{0,917 < 1}}$$

- Alma

$$V_{Ed} = V_{pl,Rd} \quad 1759 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = A_{V,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (11080 - 4 \cdot 22 \cdot 15,5) 430 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 1930 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = \quad \underline{\underline{0,911 < 1}}$$

- Cubrejuntas de alas y alma

Conservadoramente se comprueba que su sección neta es mayor que la correspondiente sección parcial del perfil sin descontar agujeros:

$$A_{net} = (300 + 2 \cdot 122 - 2 \cdot 2 \cdot 26) 20 \text{ mm}^2 = 88,0 \text{ cm}^2 \approx b_f t_f = 30 \cdot 3 = 90 \text{ cm}^2$$

$$A_{net} = (475 - 4 \cdot 22) 2 \cdot 15 \text{ mm}^2 = 116,1 \text{ cm}^2 > t_w h = 1,55 \cdot 60 = 93 \text{ cm}^2$$

**RESISTENCIA A DESGARRO DEL ALMA según EC3 (UNE-ENV-1993-1-1: 1992):  
art. 3.10.2**

- Área neta en tracción

$$A_{nt} = (29,5 + 74 \cdot 2 - 2,5 \cdot 22) 15,5 \quad 1899 \text{ mm}^2$$

- Área neta solicitada a cortante

$$A_{v,f} = (11080 - 600 \cdot 15,5) / 2 \quad 890,0 \text{ mm}^2$$

$$A_{m,v} = (600 - 127,5 - 3,5 \cdot 22) 15,5 + 890 \quad 7020 \text{ mm}^2$$

$$\bullet V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot 430 \cdot 1898 / 1,25 + 1 / \sqrt{3} \cdot 275 \cdot 7020,2 / 1,0 = 326,5 + 1114,6$$

$$\bullet |V_{Ed} / V_{Rd}| = 1759 / 1441 \quad \underline{\underline{1,221 > 1}}$$

NO VALIDO

**RESISTENCIA A DESGARRO DEL ALMA según CTE DB SE A: art.8.5.2**

$$\bullet V_{Rd} = A_v f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 11080 \cdot 275 / \sqrt{3} / 1,05 = 1759 / 1,05 \quad 1675 \text{ kN}$$

$$\bullet V_{Rd} = A_{V,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (11080 - 4 \cdot 22 \cdot 15,5) 430 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 1930 \text{ kN}$$

$$\bullet V_{Rd} = A_{v,eff} f_y / \sqrt{3} / 1,05 = ((600 - 127,5) 15,5 + 890 + 1899 \cdot f_u / f_y) f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 1776 / 1,05 = 1690 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = 1759 / 1675 \quad \underline{\underline{1,050 \approx 1}}$$

Resultado que indican que la unión es válida de acuerdo con el CTE —obviamente las solicitaciones de la unión deberían haberse afectado por el coeficiente 1,05—, mientras que no lo es según el eurocódigo. Si se aumenta la separación entre tornillos 44 mm (cubrejuntas 2#700-475-15) el área neta en tracción aumenta  $2,5 \cdot 44 \cdot 15,5 = 1705 \text{ mm}^2$  y la resistencia a tracción  $0,5 \cdot 430 \cdot 1705 / 1,25 = 293 \text{ kN}$ . Finalmente  $V_{eff,2,Rd} = 1441 + 293 = 1734 \text{ kN}$  y  $|V_{Ed}/V_{Rd}| = 1759/1734 = 1,01 \approx 1$ . Corresponde al autor del proyecto aceptar o no el diseño propuesto. Como criterio general parece sensato optar por la solución más conservadora, tanto porque una discrepancia tan significativa puede significar un error contrario a la seguridad en uno de los códigos (en este caso el CTE), como porque carece de sentido escatimar material en un detalle del que puede depender la seguridad global de la estructura.

#### 4.2.2 Cálculo 2º: Flexión negativa

Se estudia la misma unión anterior en flexión negativa. Como se verá al comprobar la unión es necesario aumentar el calibre de los tornillos de las alas y por ende sus distancias y la longitud de las platabandas.

<b>TORNILLOS</b>			
A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1) Superficies preparadas y/o tratadas para $\mu \geq 0,5$ (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4, tabla 14 y anejo G)			
El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.			
Valores característicos (N/mm <sup>2</sup> )		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1,25$

<b>Definición de la Unión: L00BC HEB 600 (S275)</b>			
<b>Cubrejuntas alma (S275)</b>		<b>Cubrejuntas alas (S275)</b>	
2 # 480-475-15		# 550-300-20 + 2 # 550-122-20	
<b>Tornillos alma</b>		<b>Tornillos alas</b>	
Tornillos A 10.9 ( $\mu = 0,5$ )	Distancias (mm)	Tornillos A 10.9 ( $\mu = 0,5$ )	Distancias (mm)
6 × 4M20  (taladros $\phi$ 22)	$e_x = 55$ $p_x = 74$ $e_z = 65$ $p_z = 115$	6 × 4M27 6 × 4M27 (taladros $\phi$ 30)	$e_x = 50$ $p_x = 90$ $e_y = 55$ $p_y = 190$

La armadura longitudinal de la viga esta formada por 8  $\phi$  25 B500S situados 155 mm. por encima de la cara superior del perfil metálico.

#### **Solicitaciones nominales de la unión:**

$$\begin{array}{llll}
 V_{Ed} = V_{pl,Rd} & 1759 \text{ kN} & M_{Ed} = -M_{pl,Rd} & -1767 \text{ kNm} \\
 \gamma_f = 1,45 & & & \\
 V_{E,ser} & 1213 \text{ kN} & M_{E,ser} & -1219 \text{ kNm}
 \end{array}$$

#### **ELU según EN 1993-1-8:2005**

##### **Cálculos preliminares:**

- Resistencias de cálculo de cada tornillo. Tabla 3.4

$$\begin{array}{ll}
 M27: & F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 573 \cdot 1000 / 1,25 \text{ N} \quad 275 \text{ kN} \\
 M20: & F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 314 \cdot 1000 / 1,25 \text{ N} \quad 151 \text{ kN}
 \end{array}$$



- Resistencia a aplastamiento del alma y el ala del perfil base ( $F_{b,Rd}$ ).

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$M27: \quad L_j = 180,0 \quad \beta_{L_f} = 1 - (180,0 - 15 \cdot 27)/(200 \cdot 27) < 1 \quad \beta_{L_f} = 1,00$$

$$M20: \quad L_j = 345,0 \quad \beta_{L_f} = 1 - (345,0 - 15 \cdot 20)/(200 \cdot 20) < 1 \quad \beta_{L_f} = 0,989$$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

Distancia de los tornillos al borde del perfil (alas y alma)

$$e_x = (p_x - g)/2 = (90 - 15)/2 \quad 37,5$$

$$e_x = (p_x - g)/2 = (74 - 15)/2 \quad 29,5$$

$$M27 \text{ ext: } \alpha = \min \{37,5/(3 \cdot 30), 90/(3 \cdot 30) - 1/4; 1000/430; 1\} \quad 0,417$$

$$M27 \text{ int: } \alpha = \min \{90/(3 \cdot 30) - 1/4; 1000/430; 1\} \quad 0,750$$

$$\alpha = (0,417 \cdot 1 + 0,750 \cdot 2)/3 \quad 0,639$$

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 2,5 \cdot 0,639 \cdot 27 \cdot 30 \cdot 430/1,25 \text{ N} \quad 445,1 \text{ kN}$$

$$M20 \text{ ext: } \alpha = \min \{29,5/(3 \cdot 22); 74/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\} \quad 0,447$$

$$M20 \text{ int: } \alpha = \min \{74/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\} \quad 0,871$$

$$\alpha = (0,447 \cdot 1 + 0,871 \cdot 2)/3 \quad 0,730$$

$$F_{b,Rd} = 0,989 \cdot 2,5 \cdot 0,730 \cdot 20 \cdot 15 \cdot 430/1,25 \text{ N} \quad 192,4 \text{ kN}$$

- Resistencia a aplastamiento de los cubrejuntas ( $F_{b,Rd}$ ).

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$M24: \quad L_j = 180,0 \quad \beta_{L_f} = 1 - (180,0 - 15 \cdot 27)/(200 \cdot 27) < 1 \quad \beta_{L_f} = 1,00$$

$$M20: \quad L_j = 345,0 \quad \beta_{L_f} = 1 - (345,0 - 15 \cdot 20)/(200 \cdot 20) < 1 \quad \beta_{L_f} = 0,989$$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

Distancia de los tornillos al borde de los cubrejuntas (alas y alma)

$$e_x = \quad 50$$

$$e_x = \quad 55$$

$$M27 \text{ ext: } \alpha = \min \{50/(3 \cdot 30); 90/(3 \cdot 30) - 1/4; 1000/430; 1\} \quad 0,556$$

$$M27 \text{ int: } \alpha = \min \{90/(3 \cdot 30) - 1/4; 1000/430; 1\} \quad 0,750$$

$$\alpha = (0,556 \cdot 1 + 0,750 \cdot 2)/3 \quad 0,685$$

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 2,5 \cdot 0,685 \cdot 27 \cdot 20 \cdot 430/1,25 \text{ N} \quad 318,1 \text{ kN}$$

$$M20 \text{ ext: } \alpha = \min \{55/(3 \cdot 22); 74/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\} \quad 0,833$$

$$M20 \text{ int: } \alpha = \min \{74/(3 \cdot 22) - 1/4; 1000/430; 1\} \quad 0,871$$

$$\alpha = (0,833 \cdot 1 + 0,871 \cdot 2)/3 \quad 0,858$$

$$F_{b,Rd} = 0,989 \cdot 2,5 \cdot 0,858 \cdot 20 \cdot 15 \cdot 430/1,25 \text{ N} \quad 218,9 \text{ kN}$$

- Valores de cálculo

$$M24: \quad F_{Rd} = \min \{2 \cdot 275; 445,1; 2 \cdot 318,1\} \quad 445,1 \text{ kN}$$

$$M20: \quad F_{Rd} = \min \{2 \cdot 151; 192,4; 2 \cdot 218,9\} \quad 192,4 \text{ kN}$$

Conjunto de la unión:

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
Armadura pasiva:	$(8 \cdot 491 \cdot 0,500 / 1,15 = 1712 \text{ kN})$			
		1712 →	-0,455 ↑	
TR alas		2 · 3 · 292,1 →	-0,285 ↑	2 · 3 · 292,1
TR fila 1ª	3 · 192,1 ↓	-3 · 1,09 ←	-0,173 ↑	3 · 192,1
TR fila 2ª	3 · 177,7 ↓	-3 · 73,4 ←	-0,058 ↑	3 · 192,3
Eje de la pieza	<hr/>			
TR fila 3ª	3 · 177,7 ↓	-3 · 73,7 ←	0,058 ↓	3 · 192,3
TR fila 4ª	3 · 149,1 ↓	-3 · 116,4 ←	0,173 ↓	3 · 189,2
TR alas		-2 · 3 · 445,1 ←	0,285 ↓	2 · 3 · 445,1
$V_{Rd} =$	$\Sigma F_z = 2090$			
$N_{Rd} =$		$\Sigma F_x = 0$		
$M_{Rd} =$			$\Sigma F_x z = -2099 \text{ kNm}$	
$ V_{Ed} / V_{Rd}  =$	<b><u>0,842 ≤ 1</u></b>			
$ M_{Ed} / M_{Rd}  =$			<b><u>0,842 ≤ 1</u></b>	

**ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005**

Cálculos preliminares:

- Pretensado y resistencia a deslizamiento. Artículos 3.6.1 y 3.9.1:

$$M27: \quad F_{p,C} = 0,7 \cdot 459 \cdot 1000 \text{ N} \quad 321 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd,ser} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot 459 \cdot 1000 / 1,1 \quad 146 \text{ kN}$$

$$M20: \quad F_{p,C} = 0,7 \cdot 245 \cdot 1000 \text{ N} \quad 172 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd,ser} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot 245 \cdot 1000 / 1,1 \quad 78 \text{ kN}$$

- Áreas de los cubrejuntas y la armadura

$$\begin{aligned}
 A_{armadura} &= 8 \cdot 491 && 3928 \text{ mm}^2 \\
 A_{alas} &= 2 \cdot (300 \cdot 20 + 2 \cdot 122 \cdot 20) && 21760 \text{ mm}^2 \\
 A_{alma} &= 2 \cdot 475 \cdot 15 && 14250 \text{ mm}^2 \\
 A_{total} &= && 39938 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Posición del centro de gravedad de la unión respecto del centro de gravedad de la sección metálica

$$z_{cdg} = (3928 \cdot (-300 - 155)) / (39938) \quad -44,75 \text{ mm}$$

- Momento estático los cubrejuntas y de la armadura respecto del CDG del conjunto:

$$\begin{aligned}
 S_{armadura} &= 3928(-44,75 + 300 + 155) && 161146 \text{ cm}^3 \\
 S_{alas} &= 21760 \cdot 44,75 && 97377 \text{ cm}^3 \\
 S_{alma} &= 14250 \cdot 44,75 && 63769 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

- Inercia de los cubrejuntas y de la armadura respecto del CDG del conjunto:

$$\begin{aligned}
 I_{armadura} &= 66110 \text{ cm}^4 && 0,235 \cdot I_{total} \\
 I_{alas} &= 185727 \text{ cm}^4 && 0,660 \cdot I_{total} \\
 I_{alma} &= 29646 \text{ cm}^4 && 0,105 \cdot I_{total} \\
 I_{total} &= && 281485 \text{ cm}^4 \\
 (I_{HE600B} &= 171000)
 \end{aligned}$$

- Distribución del momento flector entre los tornillos del alma, los de las alas y la armadura

$$\begin{aligned}
 M_{E,ser,losa} &= -1219 \cdot 0,235 && -286 \text{ kNm} \\
 M_{E,ser,alas} &= -1219 \cdot 0,660 && -804 \text{ kNm} \\
 M_{E,ser,alma} &= -1219 \cdot 0,105 && -128 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

- Resultante de tracciones en los tornillos del alma y los de las alas

$$\begin{aligned}
 N_{E,ser,alas} &= 1219 / 281485 \cdot 97377 && -422 \text{ kN} \\
 N_{E,ser,alma} &= -1219 / 281485 \cdot 63769 && -276 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

- Resultante de fuerzas en la armadura

$$F_{E,x,ser,armadura} = -1219 / 281485 \cdot 161146 \quad 698 \text{ kN}$$

- Resultante de fuerzas en las alas

$$\begin{aligned}
 F_{E,x,ser,alas} &= -422/2 - (-804 + 422 \cdot 0,04475) / (0,600 - 0,030) && 1167 \text{ kN} \\
 F_{E,x,ser,alas} &= -422/2 + (-804 + 422 \cdot 0,04475) / (0,600 - 0,030) && -1588 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

- Resultante de fuerzas en las filas de tornillos del alma

$$\begin{aligned}
 F_{E,x,ser,alas} &= -276/4 - (-128 + 276 \cdot 0,04475)/(0,115 \cdot 3) \cdot 18/20 && 232 \text{ kN} \\
 F_{E,x,ser,alas} &= -276/4 - (-128 + 276 \cdot 0,04475)/(0,115 \cdot 3) \cdot 18/20/3 && 32 \text{ kN} \\
 F_{E,x,ser,alas} &= -276/4 + (-128 + 276 \cdot 0,04475)/(0,115 \cdot 3) \cdot 18/20/3 && -170 \text{ kN} \\
 F_{E,x,ser,alas} &= -276/4 + (-128 + 276 \cdot 0,04475)/(0,115 \cdot 3) \cdot 18/20 && -371 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Conjunto de la unión:

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
Armadura		698→	-0,410↑	
TR alas		2·6·97,2→	-0,240↑	2·6·97,2
TR fila 1ª	2·3·50,6↓	2·3·38,9→	-0,128↑	2·3·63,8
TR fila 2ª	2·3·50,6↓	2·3·5,3→	-0,013↑	2·3·50,8
Eje de la pieza	<hr/>			
TR fila 3ª	2·3·50,6↓	-2·3·28,6←	0,102↓	2·3·57,9
TR fila 4ª	2·3·50,6↓	-2·3·61,9←	0,217↓	2·3·79,9
TR alas		-2·6·132,3←	0,330↓	2·6·132,3

$$V_{R,ser} = \Sigma F_z = 1214$$

$$N_{R,ser} = \Sigma F_x = 0$$

$$M_{R,ser} = \Sigma F_x z = -1218 \text{ kNm}$$

$$|V_{E,ser}/V_{R,ser}| = \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

$$|M_{E,ser}/M_{R,ser}| = \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

En los tornillos de la ala inferior el factor de utilización es  $132,3/146 = 0,906$ . Como la distribución de las fuerzas no depende del calibre de los tornillos cuando se adopta una distribución lineal, es claro que el diseño adoptado para flexiones positivas (apartado 4.2.1) es insuficiente ( $F_{s,Rd,ser} = 112$  para M24 y  $132,3/112 = 1,181$ ). En la cuarta fila de tornillos del alma se supera ligeramente el valor máximo de  $F_{s,Rd,ser}$  ( $79,9/78,2 = 1,022$ ), dejando al buen criterio del autor del proyecto la validación o el rechazo del diseño.

El objeto prioritario de este segundo cálculo es comparar el diseño con el de una «unión frontal» con idénticas sollicitaciones. La comprobación detallada de la última puede encontrarse en el «manual de uniones atornilladas frontales pretensadas» publicado por APTA y Cátedra Acero. En las figuras que siguen están representadas ambas uniones.

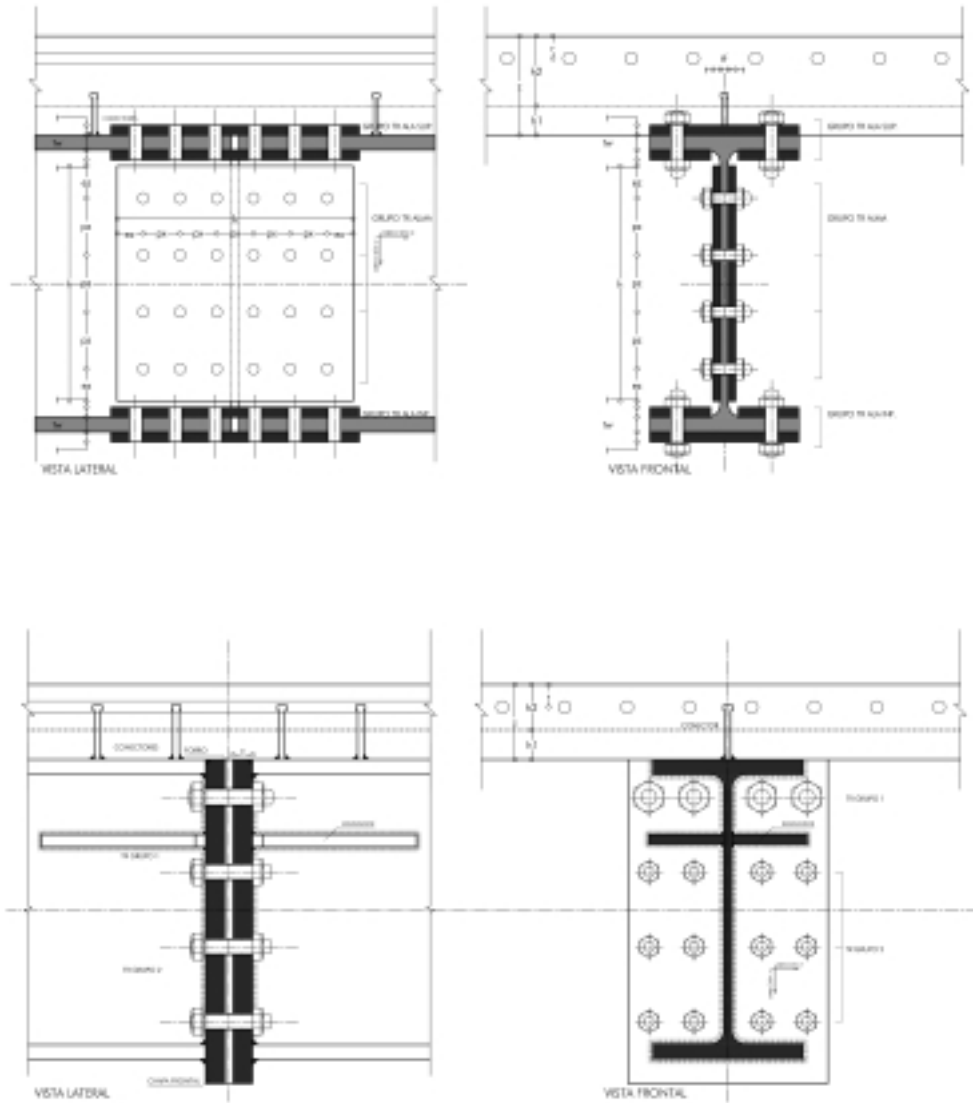


FIGURA 17: UNIONES L00BC Y F00BC

Debe notarse que:

- En el diseño de la unión frontal las armaduras longitudinales se encontraban 70mm por encima de la cara superior del perfil metálico, mientras que en la unión que aquí se estudia están situadas 140mm sobre la posición indicada.
- En el diseño de la unión frontal se tomo  $\gamma_f = 1,4$  por lo que las solicitaciones en servicio son mayores que las consideradas en el presente cálculo.

### **4.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN <http://catedracero.ee.upm.es>, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR**

#### **4.3.1 Consideraciones generales**

Las notas generales del apartado 2.3 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten. A continuación realizan algunas aclaraciones particulares sobre el libro que permite comprobar la unión tipo LB.

#### **4.3.2 Datos**

La unión, siguiendo los criterios generales, se define en la hoja DATOS, donde en primer lugar se introducen las solicitaciones de la unión, que por comodidad se refieren al *CDG* de la sección del perfil base. Si, como es habitual en las vigas de edificación, el esfuerzo axial no es significativo la elección anterior es intrascendente, pero no ocurrirá así en otros casos, como se verá en el siguiente apartado. La geometría se caracteriza además de por los cubrejuntas y tornillos de la unión (métrica, distancias, etc. como se hacía en el capítulo anterior), por la losa de hormigón incluyendo sus armaduras longitudinales. Ésta se define mediante dos secciones rectangulares independientes con objeto de poder modelar no sólo secciones de hormigón en «te» sino prioritariamente forjados de chapa colaborante con anchos efectivos distintos en el canto total de la losa. A efectos de cálculo la losa se discretiza internamente mediante 10 bandas, lo que supone un error en la posición de la fibra neutra, en los casos en los que esté contenida en la losa, del orden de  $b_{ct}/10$  (donde  $b_{ct}$  es el canto total de la losa). Teniendo en cuenta el canto total de la unión la discretización propuesta se

estima suficientemente precisa para los diseños habituales en edificación. En cualquier caso se puede decidir el número de bandas de la primera sección rectangular ( $nb_1 \leq 10$  y obviamente para la segunda sección  $nb_2 = 10 - nb_1$ ), con lo cual puede disminuirse tanto como se desee el ancho de las bandas en el entorno de la fibra neutra y por tanto precisarse su posición. En principio sólo se considera la armadura si trabaja en tracción. Si es necesario considerarla en los cálculos cuando está comprimida (lo que raramente ocurrirá si, por las razones indicadas en 4.1, la unión se dispone en el entorno de las secciones de flector nulo, huyendo del centro del vano y de las secciones de empotramiento) debe introducirse el número de redondos con signo negativo, pero en este caso se omite la armadura si está traccionada.

Los datos con los que se ha cumplimentado la hoja DATOS del fichero que se distribuye en [www://catedracero.ee.upm.es](http://www://catedracero.ee.upm.es) corresponden al «cálculo 1» del apartado 4.2.1 realizado previamente.

### 4.3.3 Resultados

#### *Comprobaciones del estado límite último:*

Además de las comprobaciones de los tornillos y los cubrejuntas, que en nada difieren de los realizados para la unión L00B, en la hoja datos se comprueba la armadura y las 10 secciones en las cuales se discretiza la losa en el formato estándar  $E/R < 1$ .

#### *Comprobaciones del estado límite de servicio*

Puesto que para los tornillos de la unión sólo se comprueba la ausencia de deslizamientos la presentación de los resultados es la misma que la ya comentada en 3.3.3. No ocurre lo mismo con el cálculo de la distribución de esfuerzos, que como se ha visto en 4.2.1 y 4.2.2 es prolijo. El esfuerzo axial y el momento flector se reparten elásticamente entre la losa (y/o la armadura) y los cubrejuntas del alma y las alas de acuerdo con las reglas de la resistencia de materiales (ver apartado siguiente). Obtenidos estos esfuerzos se reparten, a su vez, entre los tornillos del alma y los de las alas según corresponda, de acuerdo nuevamente con las reglas de la resistencia de materiales, pero considerando una nueva sección (la de los tornillos). Además, en el caso de existir esfuerzos axiales significativos es necesario realizar un

cambio de coordenadas: Los esfuerzos originalmente referidos a *CDG* del perfil base —que son los únicos datos que se introducen en el libro de cálculo— se trasladan al *CDG* de la sección. Finalmente, si la fibra neutra está contenida en la losa de hormigón la sección fisurada se calcula de forma iterativa automáticamente.

Estas dificultades no se encontraron en la unión L00B debido a su simetría, y por lo mismo no volverán a aparecer en las que siguen en los próximos capítulos.

Aunque no se realiza ninguna comprobación, también se muestran las tensiones en el hormigón y las armaduras, lo que permite verificar la ausencia de plastificaciones en ELS (lo que será prácticamente imposible si como se ha reiterado la unión se dispone en el entorno de las secciones de flector nulo)

Las figuras que siguen son varias hojas de libro de cálculo L00BC, particularizadas para el diseño 4.2.1.





CÁLCULO DE UNIONES LATERALES L06BC

TÍTULO0683008

09/17/08 hoja 2/6

Solicitaciones de primer orden:			Segundo orden:			
$N_{Ed}$	$V_{Ed}$	$M_{y,Ed}$	X	10X-1	(10X-1)³/3A	$M_{Ed}$
0	1759	1767	0,7	0,43	10,19841	0

Solicitaciones totales:			$Y_{red}$	$N_{Ed,ser}$	$V_{Ed,ser}$	$M_{Ed,ser}$
0	1759	1767	1,45	0	1213,2	1218,6

**Perfiles:**

**Acero:**

id	$t_f$	$t_c$	$Y_{Ed}$	$t_{ef}$
S275	275	430	1	275

**Perfil base:**

id	h	b	A	$A_{c0}$	$W_{pl,y}$	$t_f$	$t_c$	r	$h_0$	$h_1$	g
HE600B	600	300	270	110,6	6425,0	30	15,5	27	540	714,84	15

**Cubrejuntas**

**Acero:**

id	$t_f$	$t_c$	$Y_{Ed}$	$t_{ef}$
S275	275	430	1	275

**Alas exteriores:**

b	h	t	$\mu$
500	200	20	0,5

**Alas interiores:**

b	h	t	$\mu$
500	122	20	0,5

**Alma:**

b	h	t	$\mu$
490	475	15	0,5

**Armadura pasiva**

**Acero:**

id	r	$Y_{Ed}$	$t_{ef}$
B500S	500	1,15	435

**Armadura**

n	$\Phi$	z	$A_s$	$F_s$
8	25	155	491	214

**Losa de hormigón**

**Hormigón:**

id	t	$Y_{Ed}$	$t_{ef}$
HA25	25	1,5	16,67

**Losa**

b	h	z	$A_c$	$F_c$	m
1000	140	200	140000	1984	7,55
1000	60		60000	850	5

**TR**

**Acero TR:**

id	$t_f$	$t_c$	$Y_{Ed}$	$Y_{Ed,ser}$
A10.8	800	1000	1,25	1,1

**TR alas:**

id	d	$d_0$	$A_s$	A	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}$	$F_{c0}$	$F_{t,Ed,ser}$	$F_{c0,Ed,ser}$	$F_{c0,Ed,ser,max}$	$F_{c0,Ed,ser,max}$
M24	24	28	353	452	254	217	247	112	413	413	619

**TR alma:**

id	d	$d_0$	$A_s$	A	$F_{t,Ed}$	$F_{v,Ed}$	$F_{c0}$	$F_{t,Ed,ser}$	$F_{c0,Ed,ser}$	$F_{c0,Ed,ser,max}$
M20	20	22	245	314	176	151	172	78,2	258	267

**Distancias:**

**TR alas:**


id	$n_s$	$e_s$	$p_s$	$e_{s0}$	$n_0$	$e_0$	$p_{s0}$	$p_s$	$e_{s1}$	$m_s$	$e_{s0}$
M24	6	50	80,0	32,5	2	55	190	--	50,0	67,3	55,0

**TR alma:**

id	$n_s$	$e_s$	$p_s$	$e_{s0}$	$n_0$	$e_0$	$p_{s0}$	$e_{s0}$	$m_s$	
M20	6	55	74,0	29,5	6	65		115,0	127,5	97,5

Chk  $\Sigma(e_s, p_s)$  Chk  $\Sigma(e_s, p_s)$  Chk  $\Sigma(e_s, p_s)$

FIGURA 18: HOJA DATOS PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 4.2.1.



CATEDRA ACERO

CÁLCULO DE UNIONES LATERALES L00BC

TÍTULO 083608

091708 hoja 86

ELU según EN 1993-1-8: 2005

---

**Resistencia de cada TR:**

TR alas:

TR alas 1:	$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_x$	$F_z$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
217	0,0	-489,1	0,0	-40,8	40,8	40,8	0,19	< 1	VÁLIDO
<small>5840-1007,20 2,041 2,463,3 0,0+0,0 0,0+0,0</small>									
TR alas 2:	$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_x$	$F_z$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
217,0	0,0	2111,9	0,0	176,0	176,0	176,0	0,81	< 1	VÁLIDO
<small>5840-1007,20 2,041 2176,3 0,0+0,0 0,0+0,0</small>									

TR alma:

TR alma 1:	$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_x$	$F_z$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
151,0	481,9	91,0	80,3	16,2	81,7	81,7	0,54	< 1	VÁLIDO
<small>5840-1007,20 2,041 216,2 0,0+0,0 0,0+0,0</small>									
TR alma 2:	$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_x$	$F_z$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
151,0	492,0	191,2	77,0	31,9	83,3	83,3	0,55	< 1	VÁLIDO
<small>5840-1007,20 2,075 233,8 0,0+0,0 0,0+0,0</small>									
TR alma 3:	$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_x$	$F_z$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
151,0	491,5	192,1	76,9	32,0	83,3	83,3	0,55	< 1	VÁLIDO
<small>5840-1007,20 2,069 233,3 0,0+0,0 0,0+0,0</small>									
TR alma 4:	$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_z$	$\Sigma F_x$	$F_x$	$F_z$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
151,0	353,8	353,3	99,0	58,9	83,3	83,3	0,55	< 1	VÁLIDO
<small>5840-1007,20 2,065 238,3 0,0+0,0 0,0+0,0</small>									

**Esfuerzos en la armadura positiva:**

Armadura	$F_{t,Rd}$	$z$	$M_p$	$R$	$E/R$		
Armadura	0,19	-0,455	-0,09	1712	0,00	< 1	VÁLIDO

**Esfuerzos en la losa:**

	$F_x$	$z$	$M_p$	$d_1$	$z_1$	$d_2$	$z_2$	$\max(\sigma)_t$	
Losa 1	-343,71	-0,486	167,04	-12,275	-0,800	-12,275	-0,472	-0,74	VÁLIDO
Losa 2	-343,68	-0,458	157,41	-12,274	-0,472	-12,274	-0,444	-0,74	VÁLIDO
Losa 3	-343,64	-0,430	147,77	-12,273	-0,444	-12,273	-0,416	-0,74	VÁLIDO
Losa 4	-343,59	-0,402	138,12	-12,271	-0,416	-12,271	-0,388	-0,74	VÁLIDO
Losa 5	-343,50	-0,374	128,47	-12,269	-0,388	-12,269	-0,360	-0,74	VÁLIDO
Losa 6	-146,06	-0,354	51,99	-12,230	-0,360	-12,230	-0,346	-0,73	VÁLIDO
Losa 7	-146,76	-0,342	50,19	-12,230	-0,348	-12,230	-0,338	-0,73	VÁLIDO
Losa 8	-146,61	-0,330	48,38	-12,217	-0,330	-12,217	-0,324	-0,73	VÁLIDO
Losa 9	-146,35	-0,318	46,54	-12,198	-0,318	-12,198	-0,312	-0,73	VÁLIDO
Losa 10	-145,80	-0,306	44,62	-12,150	-0,312	-12,150	-0,300	-0,73	VÁLIDO

**Esfuerzos en los TR:**

TR alas:	$F_x$	$F_z$	$z$	$M_p$
TR alas 1:	0,00	-489,08	-0,285	139,39
TR alas 2:	0,00	2111,68	0,285	601,69
TR alma:	$F_x$	$F_z$	$z$	$M_p$
TR alma 1:	481,82	91,00	-0,173	-15,70
TR alma 2:	461,98	191,19	-0,058	-10,99
TR alma 3:	461,49	192,07	0,058	11,04
TR alma 4:	353,60	353,25	0,173	69,94

**Equilibrio**

	$\Sigma F_x$	$\Sigma F_z$	$\Sigma M_p$	$\Sigma F_x$	$\Sigma F_z$	$\Sigma M_p$	$\Sigma F_x$	$\Sigma F_z$	$\Sigma M_p$
$V_{Ed} = \Sigma F_x$	1759,19			-	$V_{Ed} = 0,00$	< 17,59	VÁLIDO		
$N_{Ed} = \Sigma F_z$		0,00		-	$N_{Ed} = 0,00$	< 17,59	VÁLIDO		
$M_{Ed} = \Sigma M_p$			1787,80	-	$M_{Ed} = 0,00$	< 17,67	VÁLIDO		

FIGURA 19: HOJA LB PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 4.2.1. E.L.U.

ELS (categoría B) según EN 1993-1-8: 2005										
							$N_{s,ser}$	$V_{s,ser}$	$M_{s,ser}-N_{s,ser} \cdot d$	
							0	1213	1218,6	
									1218,6	
CDG LN	-168,54									
	-168,54									
	b/m	h	$Z_u$	$Z_l$	z	A	S	I		
Armadura					-455,000	0	0	0		
Losa	132,5	140,0	-500,000	-300,000	-430,000	18543	-7072010	c	26206070	1208272000
Losa	132,5	60,0	-300,000	-300,000	-330,000	7047	-3022517	c	2384106	207008876
						26499	-10990205			140521485
					$A/A_{s,ser}$	$U_{s,ser}$	$N/N_{s,ser}$	$M/M_{s,ser}$	$M/N \cdot d/N_{s,ser}$	$+B \cdot R_{s,ser}$
					0,424	0,324	0,0	-1913,1	0,0	385,1
					$A/A_{s,ser}$	$U_{s,ser}$				
					0,340	0,529				646,5
					0,220	0,147				179,0
	$S_{CDG}$	A	I							
Alas	-3689139	21708	2439135952							
Alma	-2415891	14258	677810898							
		36010	3115640816							3116048610
Posición aproximada del cdg del conjunto:								-180,5		
Posición aproximada de la LN del conjunto:								-180,5		
Área y momento de inercia aproximado del conjunto:							625			461193
		n	$A_s$	z	A			I		
TR alas:										
TR alas 1:		12	383	-285	4236			344089130		
TR alas 2:		12	383	285	4236			344089130		
					8472			68814		
TR alma:										
TR alma 1:		6	245	-173	1470			43741868		
TR alma 2:		6	245	-68	1470			4362180		
TR alma 3:		6	245	56	1470			4362180		
TR alma 4:		6	245	173	1470			43741868		
					5880			8720		
<b>Solicitaciones <math>F_{s,ser}</math> sobre cada TR. Rozamiento</b>										
TR alas:										
TR alas 1:										
$F_{s,R,ser}$	$A_s$	z	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}/F_{s,R,ser}$				
112	383	-285	-29,4			0,263	< 1		VÁLIDO	
TR alas 2:										
$F_{s,R,ser}$	$A_s$	z	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}/F_{s,R,ser}$				
112	383	285	116,7			0,988	< 1		VÁLIDO	
TR alma:										
TR alma 1:										
$F_{s,R,ser}$	$A_s$	z	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}/F_{s,R,ser}$				
78,2	245	-173	-4,2	50,6	50,7	0,649	< 1		VÁLIDO	
TR alma 2:										
$F_{s,R,ser}$	$A_s$	z	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}/F_{s,R,ser}$				
78,2	245	-68	16,3	50,6	53,1	0,679	< 1		VÁLIDO	
TR alma 3:										
$F_{s,R,ser}$	$A_s$	z	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}/F_{s,R,ser}$				
78,2	245	68	36,9	50,6	62,6	0,800	< 1		VÁLIDO	
TR alma 4:										
$F_{s,R,ser}$	$A_s$	z	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}$	$F_{s,ser}/F_{s,R,ser}$				
78,2	245	173	57,4	50,6	76,5	0,978	< 1		VÁLIDO	

FIGURA 20: HOJA LB PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 4.2.1. E.L.S.

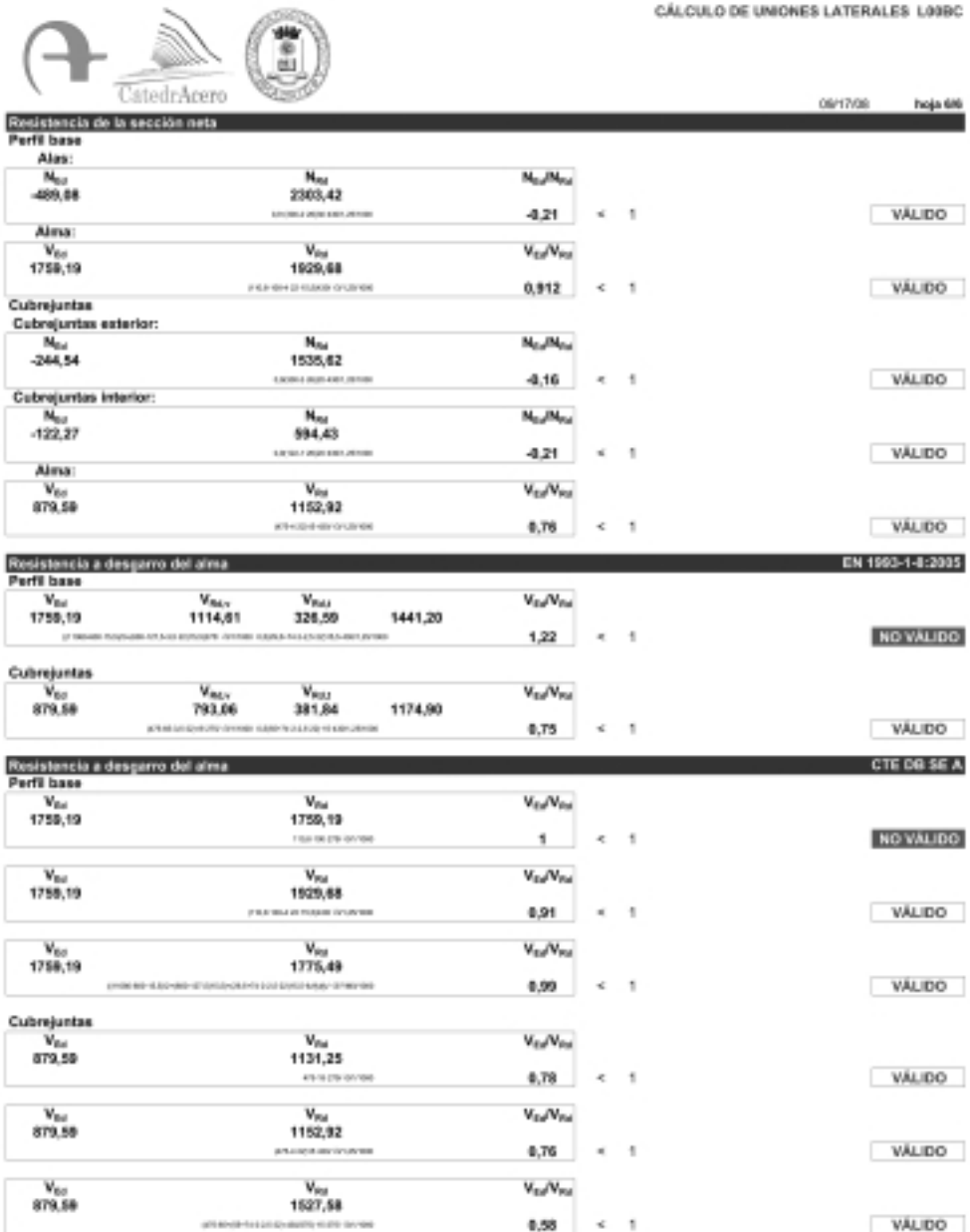


FIGURA 21: HOJA CHAPA PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 4.2.1. COMO SE INDICA EN EL TEXTO SE SATISFACEN LAS CONDICIONES EXIGIDAS POR CTE PERO NO LAS DE EN 1993-1-8:2005

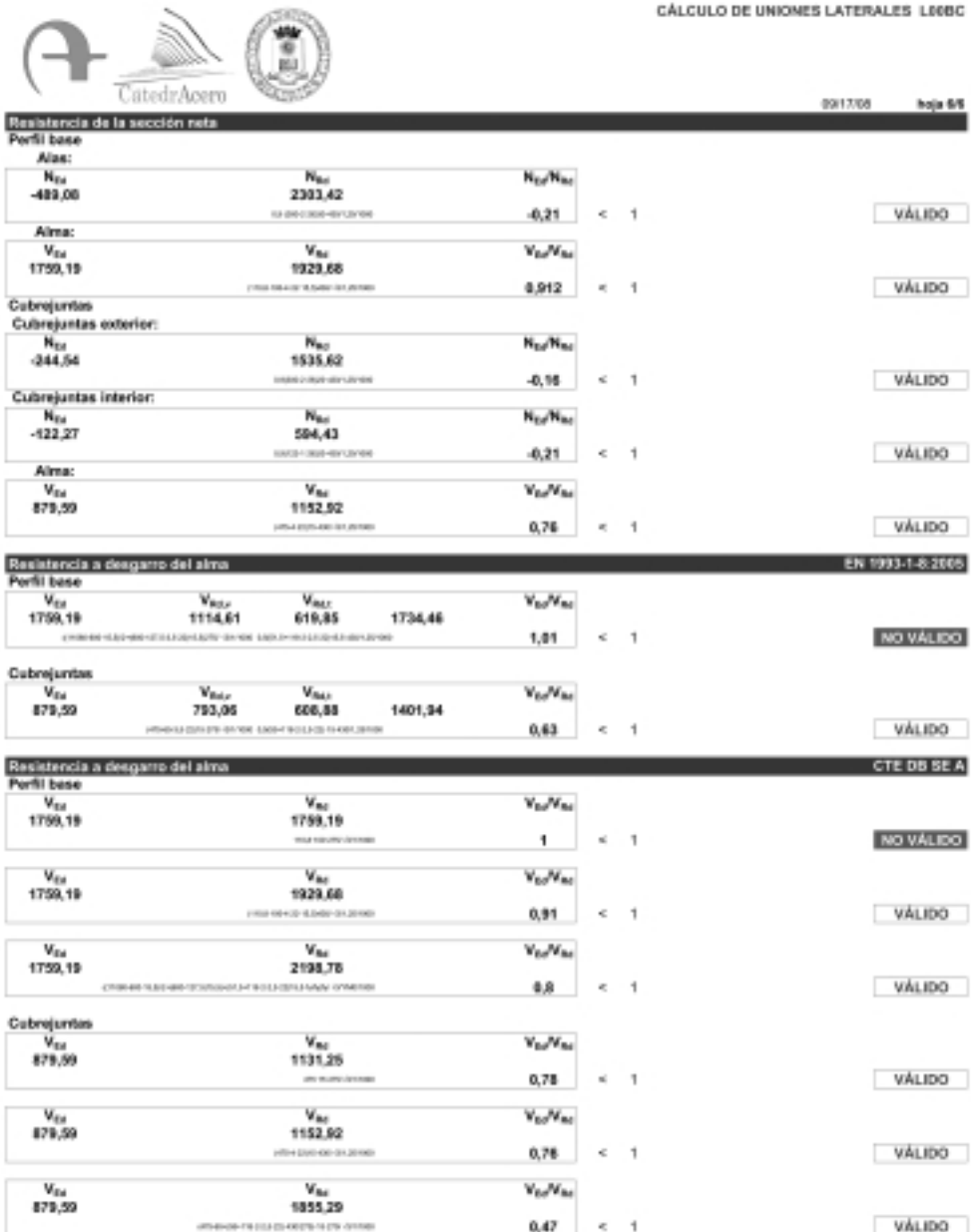


FIGURA 22: HOJA CHAPA PARTICULARIZADA PARA VARIACIÓN PROPUESTA DEL DISEÑO 4.2.1 (CUBREJUNTAS DE ALMA 2#700-475-15). COMO SE INDICA EN EL TEXTO SE SATISFACEN, CON UNA TOLERANCIA RAZONABLE, TODAS LAS CONDICIONES EXIGIDAS POR CTE Y EN 1993-1-8:2005

*Distribución de esfuerzos elásticos.*

Sección  $A$  con esfuerzos  $N$  y  $M$  referidos al  $CDG$  general y  $z$  con origen en el mismo:

$$\begin{aligned} \iint_A dA &= A & \iint_A z dA &= 0 & \iint_A z^2 dA &= I \\ N &= \iint_A \sigma dA & M &= \iint_A z \sigma dA \\ \sigma &= a + bz \Rightarrow \{N = a \iint_A dA + b \iint_A z dA, M = a \iint_A z dA + b \iint_A z^2 dA\} \Rightarrow \sigma = N/A + Mz/I \end{aligned}$$

Sea una partición  $A = \cup_1^n A_i$ ,  $A_i \cap A_j = \emptyset$ ,  $\forall i \neq j$

$\{N_i$  y  $M_{i,CDG} \mid 1 \leq i \leq n\}$  referidos al  $CDG$  general

$$\begin{aligned} \iint_{A_i} dA &= A_i & \iint_{A_i} z dA &= A_i z_{CDG,i} = S_i & \iint_{A_i} z^2 dA &= I_{i,CDG} \\ N_i &= \iint_{A_i} \sigma dA = & a \iint_{A_i} dA + b \iint_{A_i} z dA &= & A_i \cdot N/A + S_i \cdot M/I \\ M_{i,CDG} &= \iint_{A_i} z \sigma dA = & a \iint_{A_i} z dA + b \iint_{A_i} z^2 dA &= & S_i \cdot N/A + I_{i,CDG} \cdot M/I \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} N_i \\ M_{i,CDG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i/A & S_i/I \\ S_i/A & I_{i,CDG}/I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad 1 \leq i \leq n$$

No obstante, si se refieren los esfuerzos locales  $\{N_i, M_i\}$  a cada  $CDG_i$ :

siendo  $z_i = z - z_{CDG,i}$  con origen en  $z_{CDG,i}$ ,  $1 \leq i \leq n$ , se tiene:

$$\begin{aligned} M_i &= \iint_{A_i} z_i \sigma dA = \iint_{A_i} z \sigma dA - z_{CDG,i} \iint_{A_i} \sigma dA = M_{i,CDG} - z_{CDG,i} N_i \\ M_i &= (S_i N/A + I_{i,CDG} M/I) - z_{CDG,i} (A_i N/A + S_i M/I) = I_i M/I, \text{ ya que:} \\ I_{i,CDG} &= I_i + A_i z_{CDG,i}^2 \text{ (Steiner)} = I_i + S_i z_{CDG,i} \text{ con } I_i = \iint_{A_i} z_i^2 dA \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} N_i \\ M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i/A & S_i/I \\ 0 & I_i/I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad 1 \leq i \leq n$$

Por ejemplo, en el apartado 4.2.1 se ha obtenido para el alma del perfil  $N = 639$  kN;  $M = 179$  kNm y  $z_{cdg} = -169,5$  mm. Si se refieren los esfuerzos locales a cada  $CDG_i$  será  $N = 639$  kN y  $M = ((1/12 \cdot 475^3 \cdot 15)/2/10000)/461193 \cdot 1219 = 70,8$  kNm y es inmediato verificar que  $179 - 639 \cdot 0,1695 = 70,7$  kNm.

#### 4.3.4 Variaciones sobre el diseño L00BC

En las figuras 22 y 23 se incluyen algunas variaciones de la unión estudiada. Los cálculos no difieren de los realizados en este capítulo por lo que no se repiten. Sin embargo, si se han desarrollado los libros de cálculo correspondientes accesibles en <http://catedracero.ee.upm.es>. Todas las observaciones realizadas en el apartado 3.3.4 son directamente aplicables aquí.

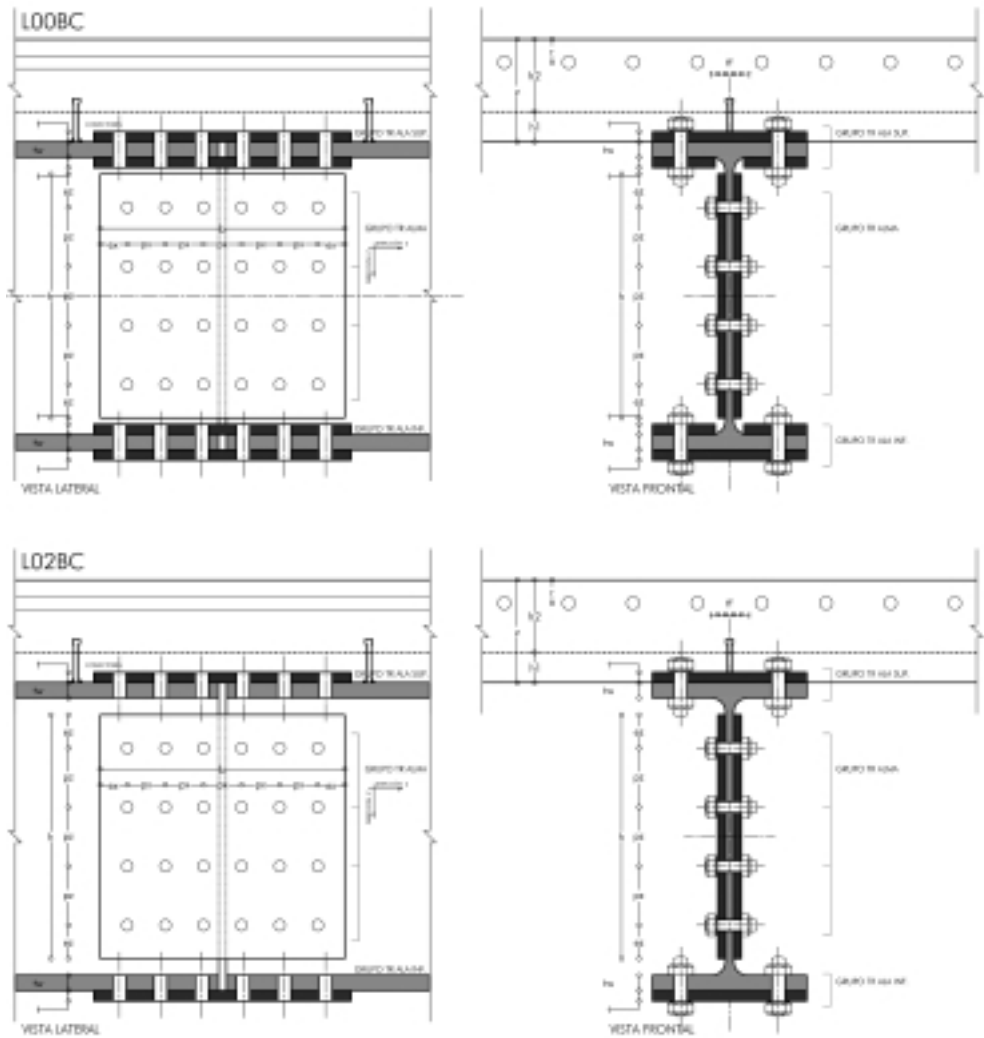


FIGURA 23: VARIACIONES DEL DISEÑO L00BC.

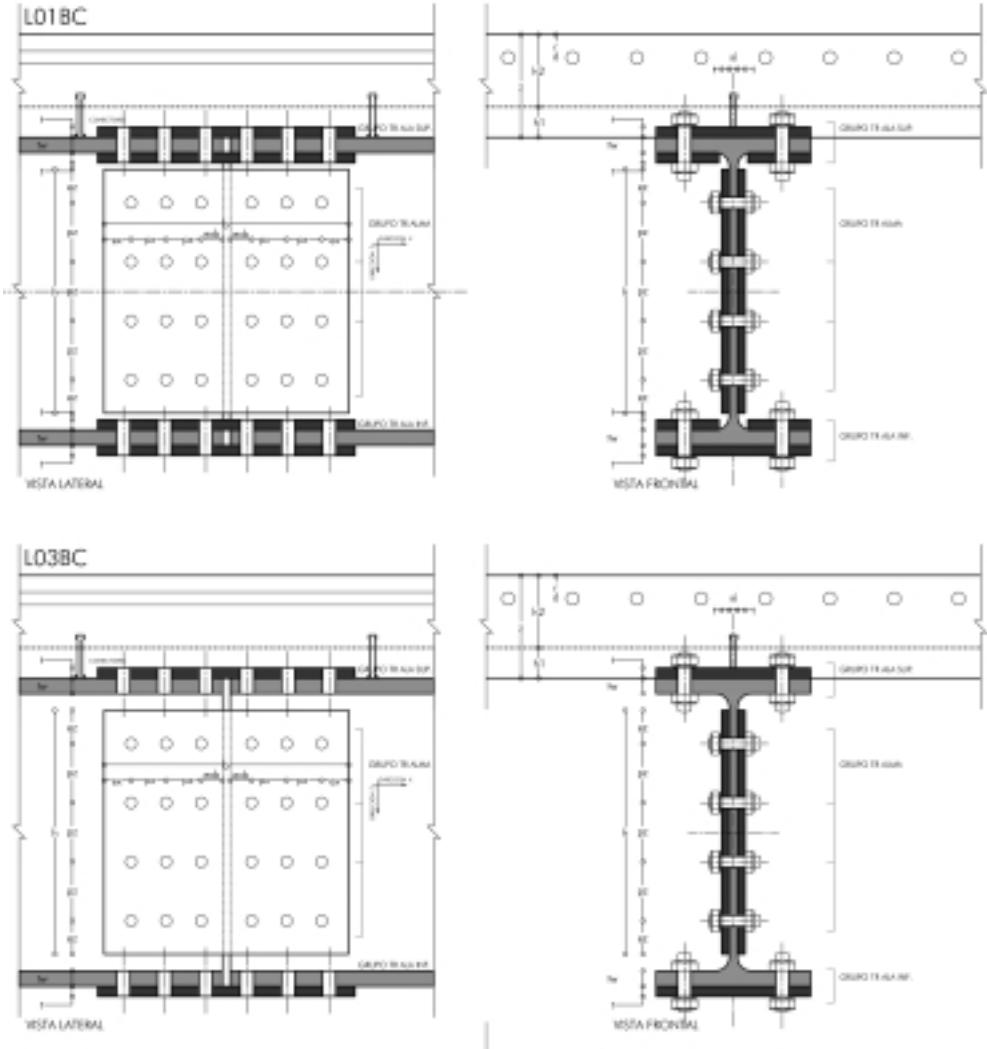


FIGURA 24: VARIACIONES DEL DISEÑO L00BC.



#### **4.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD**

Se reitera lo ya indicado en 3.4 acerca de que el control de este tipo de uniones debe centrarse básicamente en la homologación y aplicación rigurosa de los procedimientos de apriete de los tornillos, y la verificación de las características de las superficies en contacto en relación con el coeficiente de rozamiento exigido, todo ello en relación con las hipótesis de cálculo típicas relativas a los estados límites de servicio.

La diferencia fundamental con las uniones similares de piezas metálicas puras radica en la elevada concentración de sollicitaciones en la sección parcial metálica, lo que eleva la responsabilidad de los medios de unión, y al mismo tiempo dificultará su puesta en obra salvo un proyecto muy cuidadoso con las condiciones de accesibilidad. Por todo ello deben extremarse las tareas de control de calidad en estos casos.

# 5. Uniones atornilladas articuladas, tipo P00B

## 5.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN

El tipo de unión aquí considerada permite transmitir reacciones verticales de una viga metálica a un soporte del mismo material, sin oponer prácticamente resistencia a los giros moderados del extremo de la viga unida. Materializa pues adecuadamente un «apoyo articulado», dentro de rangos moderados de prestaciones estáticas y cinemáticas.

La rotación del extremo de la viga se consigue merced a la deformación de las alas de los angulares, con centro de rotación en un cierto punto de la zona inferior, y abriéndose la zona superior de la unión. Por lo tanto es esencial no soldar al soporte el borde superior de los angulares, sino sólo su lado vertical. Sin embargo la soldadura antedicha debe rebordearse en su extremo superior; es decir, no debe dejarse el cráter de terminación del cordón de la soldadura en el punto de máxima sollicitación de la misma, que es dicha esquina superior el ala del angular.

Es importante tener en cuenta en el cálculo de la unión diversas excentricidades de la reacción, pues su incidencia es muy significativa como se justifica a continuación.

En efecto, si se considera en primer lugar que el grupo de tornillos no transmite ningún momento, la reacción de la viga pasa necesariamente por la línea de unión de los centros de los tornillos. Por lo tanto, la excentricidad de la reacción respecto de las soldaduras ha de ser considerada en el cálculo de éstas, además de la ineludible excentricidad en la dirección transversal de la viga. Asimismo, en el soporte, el momento derivado de la excentricidad de la reacción, desde los centros de los tornillos al centro del soporte, deberá asignarse a la sección de éste, o repartirse, caso de tener continuidad, entre las secciones inferior y superior del mismo.

Si la unión se realiza con un grupo de tornillos pretensados con capacidad fiable para transmitir momentos flectores, cabe adoptar como punto de aplicación de la reacción la cara del soporte. En consecuencia el grupo de tornillos se dimensionará considerando el momento flector derivado de la excentricidad en la dirección longitudinal de la viga, liberando a las soldaduras de la misma y reduciendo en consecuencia la del soporte

Desde el punto de vista geométrico, hay que tener presente que este tipo de unión no es realizable si el plano del alma de la viga no es perpendicular al paramento vertical del soporte; además éste debe ser de ancho suficiente para alojar los casquillos de angulares incluidos en la unión.

Ciertas tolerancias constructivas son factibles mediante taladros alargados adecuadamente diseñados y considerados en el cálculo, aunque luego se utilicen tornillos pretensados si la unión debe tener la consideración de «articulación fija». Por el contrario la utilización de tornillos pretensados estaría contraindicada en el caso de uniones articuladas deslizantes (tipo «EB» considerado en otro capítulo posterior).

En este tipo de uniones las condiciones de apriete de tornillos y rozamiento de superficies en contacto no suelen resultar críticas, lo cual no quiere decir que no se controlen adecuadamente en función de las características supuestas en el cálculo.

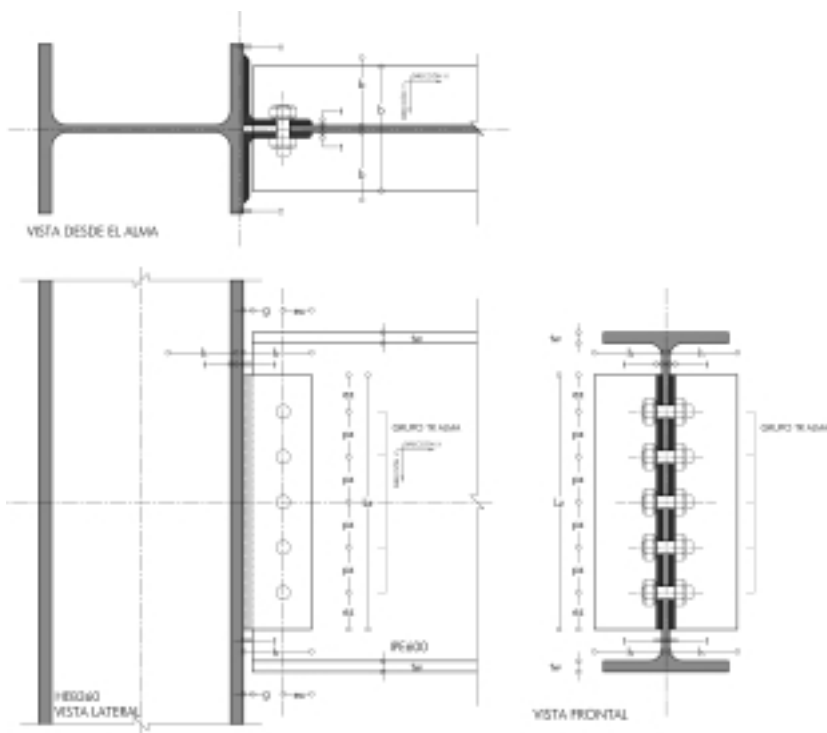


FIGURA 25: UNIÓN ATORNILLADA LATERAL ARTICULADA. DISEÑO P00B.

## 5.2. EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión particular que se describe a continuación. La mayoría de los comentarios a estos cálculos, comunes al resto de uniones que se estudian en otros capítulos, pueden encontrarse en el apartado 2.2.

**F00B IPE 600 (S355)**

La unión se emplea para equilibrar el cortante de extremo de una viga que no tiene impedida la rotación en el extremo enlazado

<b>TORNILLOS</b>			
<p>A 10.9 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1)            Superficies preparadas y/o tratadas para <math>\mu \geq 0,5</math>            (EN 1993-1-8:2005 3.9.1, tabla 3.7, prEN 1090-2:2006-10 8.4,            tabla 14 y anejo G)</p>			
<p>El par de apriete para tornillos de alta resistencia (CTE, EAE, prEN 1090-2:2006-10 y antigua EA95) tiene mero valor orientativo para tornillos medianamente engrasados. El fabricante metálico deberá aportar certificación de la homologación del procedimiento.</p>			
Valores característicos (N/mm <sup>2</sup> )		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 1000$	$f_{yb} = 900$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1,25$

<b>Definición de la Unión:</b> <b>F00B IPE 600 (S355)</b>			
<b>Angulares S275JR</b>		<b>Tornillos alma</b>	
L 120·10 (450 mm)		Tornillos A10-9 ( $\mu = 0,5$ )	Distancias (mm)
Gap (mm) 4M27 (taladros $\phi$ 30)	Soldadura al soporte del borde vertical de cada angular, rebordeando el punto superior pero dejando SIN SOLDAR el lado horizontal	5M22 (taladros $\phi$ 24)	$e_x = 50$ $e_z = 65$ $p_z = 80$
$g = 10$	Garganta (no cateto) $a = 7$ mm		

**Capacidad resistente del perfil base en flexión simple (IPE600):**

$V_{pl,Rd} = 8378 \cdot 355 / 1,0 / \sqrt{3} \text{ N} = 1717 \text{ kN}$ , $M_{pl,Rd} = 3512000 \cdot 355 / 1,0 \text{ Nmm} = 1247 \text{ kNm}$				
$V_{Rd} =$ $V_{pl,Rd} (1 + \sqrt{\rho}) / 2$ EN 1993-1-8:2005 6.2.8(3)	$\rho = 0$	$\rho = (1/3)^2$	$\rho = (2/3)^2$	$\rho = 1$
	$(1/2)V_{pl,Rd}$	$(2/3)V_{pl,Rd}$	$(5/6)V_{pl,Rd}$	$V_{pl,Rd}$
	859	1145	1431	1717
$M_{V,Rd} = M_{pl,Rd} -$ $\rho / 4 A_v^2 f_{yd} / t_w$ EN 1993-1-8:2005 6.2.8(5)	$M_{pl,Rd}$	$M_{pl,Rd} -$ 58	$M_{pl,Rd} -$ 231	$M_{pl,Rd} -$ 519
	1247	1189	1016	728

**Solicitaciones nominales de la unión:**

Distancia de los tornillos a la cara del soporte:  $x = 70 \text{ mm}$

$$\begin{array}{llll}
 V_{Ed} = (1/2)V_{pl,Rd} & 859 \text{ kN} & M_{Ed} = xV_{Ed} & -60,1 \text{ kNm} \\
 \gamma_f = 1,40 & & & \\
 V_{E,ser} & 613 \text{ kN} & M_{E,ser} & -42,9 \text{ kNm}
 \end{array}$$

EN 1993-1-8:2005 no impone ninguna restricción específica a la «forma» en que se distribuyen los esfuerzos en los TR para la unión que se estudia: la unión puede calcularse siguiendo criterios plásticos (artículo 3.12). En la práctica, se debe tener en cuenta el carácter finito de la ductilidad de los materiales reales, que limita la aplicación del cálculo plástico a distribuciones de esfuerzos no incompatibles con dicha ductilidad real, siempre más o menos limitada. En el diseño de uniones metálicas de edificación, bajo cargas predominantemente estáticas, y con tipologías de uniones apropiadas, basta en general para cumplir lo anterior con que los diseños y criterios aplicados sean coherentes con aquellos que la experimentación y la buena práctica constructiva dictan como válidos a dicho efecto.

**ELU según EN 1993-1-8:2005***Cálculos preliminares:*

- Resistencias de cálculo de cada tornillo. Tabla 3.4

$$M22: \quad F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 380 \cdot 1000 / 1,25 \text{ N} \quad 182 \text{ kN}$$

- Resistencia a aplastamiento del alma del perfil base ( $F_{b,Rd}$ ).

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$M22: \quad L_j = 320,0 \quad \beta_{Lj} = 1 - (320,0 - 15 \cdot 22) / (200 \cdot 22) < 1 \quad \beta_{Lj} = 1,00$$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

$$M22 \text{ ext: } \alpha = \min \{ 140 / (3 \cdot 24); 80 / (3 \cdot 24) - 1/4; 1000 / 510, 1 \} \quad 0,861$$

$$M22 \text{ int: } \alpha = \min \{ 80 / (3 \cdot 24) - 1/4; 1000 / 510; 1 \} \quad 0,861$$

$$\alpha = \quad 0,861$$

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 2,5 \cdot 0,861 \cdot 22 \cdot 12 \cdot 510 / 1,25 \text{ N} \quad 231,9 \text{ kN}$$

- Resistencia a aplastamiento de los angulares ( $F_{b,Rd}$ ).

Los cálculos que siguen son superfluos salvo en situaciones de diseño extremas (óptimas) o patológicas: El alma del perfil está recubierta por dos angulares que, con la única precaución de que la suma de sus espesores supere la del perfil base y las distancias a los bordes de los agujeros sean iguales o mayores que las del perfil base tendrán un valor de  $F_{b,Rd}$  mayor que el del perfil base.

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$M22: \quad L_j = 320,0 \quad \beta_{Lj} = 1 - (320,0 - 15 \cdot 22) / (200 \cdot 22) < 1 \quad \beta_{Lj} = 1,00$$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

$$M22 \text{ ext: } \alpha = \min \{ 65 / (3 \cdot 24); 100 / (3 \cdot 24) - 1/4; 1000 / 430; 1 \} \quad 0,861$$

$$M22 \text{ int: } \alpha = \min \{ 100 / (3 \cdot 24) - 1/4; 1000 / 430; 1 \} \quad 0,861$$

$$\alpha = \quad 0,861$$

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 2,5 \cdot 0,861 \cdot 22 \cdot 10 \cdot 430 / 1,25 \text{ N} \quad 162,9 \text{ kN}$$

- Valores de cálculo

$$M20: \quad F_{Rd} = \min \{ 2 \cdot 182; 231,9; 2 \cdot 162,9 \} \quad 231,9 \text{ kN}$$

Nótese que con objeto de comparar la resistencia a aplastamiento de cálculo por tornillo del perfil base,  $F_{b,Rd}$ , con la resistencia a cortante de cálculo por tornillo,  $F_{v,Ed}$ , debe

considerarse el número de planos de corte de estos. Por lo mismo, para comparar la resistencia a aplastamiento de cálculo por tornillo del perfil base con la resistencia a aplastamiento de los dos angulares deben sumarse la resistencia de estos dos.

*Conjunto de la unión:*

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
TR fila 1ª	163,9↓	164,2→	-0,160↑	232,0
TR fila 2ª	207,9↓	98,5→	-0,080↑	230,1
TR fila 3ª	232,0↓	0→	-0,0↑	232,0
TR fila 4ª	207,9↓	-98,5←	0,080↓	230,1
TR fila 5ª	163,9↓	-164,2←	0,160↓	232,0

$$V_{Rd} = \Sigma F_z = 975$$

$$N_{Rd} = \Sigma F_x = 0$$

$$M_{Rd} = \Sigma F_x \cdot z = -68,3 \text{ kNm}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = \underline{\underline{0,881 \leq 1}}$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = \underline{\underline{0,880 \leq 1}}$$

La distribución de «fuerzas internas» ( $F_x, F_z$ ) adoptada, no es la única posible que cumple todas las condiciones de equilibrio ( $\Sigma F_x = N_{Ed} = 0, \Sigma F_z = V_{Ed}, \Sigma F_x \cdot z = M_{Ed}$ ) y de resistencia ( $(F_{x,Ed}/F_{Rd})^2 + (F_{z,Ed}/F_{Rd})^2 \leq 1, F_{x,Ed}/F_{Rd} \leq 1$ , etc.); pero uno de los teoremas fundamentales de la teoría de la plasticidad («teorema estático») permite validar la seguridad en ELU tan sólo con encontrar una solución completamente equilibrada que verifique todos los límites resistentes de los elementos, con las limitaciones relativas a la ductilidad de la unión ya comentadas. La siguiente es, por tanto, una comprobación alternativa de la unión igual de válida que la anterior:

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
TR fila 1ª	171,8↓	150,2→	-0,160↑	228,2
TR fila 2ª	171,8↓	75,2→	-0,080↑	187,5
TR fila 3ª	171,8↓	0→	-0,0↑	171,8
TR fila 4ª	171,8↓	-75,2←	0,080↓	187,5
TR fila 5ª	171,8↓	-150,2←	0,160↓	228,2

$$V_{Rd} = \Sigma F_z = 859,0$$

$$N_{Rd} = \Sigma F_x = 0$$

$$M_{Rd} = \Sigma F_x z = -60,1 \text{ kNm}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

Donde se ha supuesto una distribución proporcional a la distancia, aunque de acuerdo con EN 1993-1-8:2005, 3.12 (2) y el artículo 8.8.4 de CTE DB SE-A esto no es necesario al producirse el aplastamiento de la chapa antes que el agotamiento de los tornillos:  $F_{v,Rd} < F_{b,Rd}$ . Nótese que para esta última distribución de fuerzas el factor de utilización es  $\sqrt{F_z^2 + F_x^2} / F_{v,Rd} = 228,2 / 231,9 = 0,988$ . Resultado que garantiza la seguridad del diseño de la unión propuesto, pero que es sustancialmente mayor que factor obtenido para la distribución primera. De hecho, la primera propuesta se acerca al óptimo en el supuesto de poder asignar las fuerzas a los tornillos sin más limitaciones que asegurar el equilibrio del conjunto y la resistencia de cada elemento. En una lectura rápida puede sorprender que en el óptimo una fracción considerable de la capacidad de los tornillos extremos se destine a resistir el esfuerzo cortante, sin embargo esto tiene una sencilla interpretación cualitativa. Supóngase que en los tornillos extremos  $F_x = F_{v,Rd}$  y que se produce una pequeña inclinación de la fuerza manteniéndose su módulo. En primera aproximación su componente horizontal no variará, mientras que aparecerá una componente vertical de valor  $F_{v,Rd} \theta$ , también en primera aproximación. Resultado que muestra que en cualquier caso resultará ventajoso «invertir» una parte de la capacidad de todos los tornillos en resistir el esfuerzo cortante.

### **ELS (categoría B) según EN 1993-1-8:2005**

#### *Cálculos preliminares:*

Para este cálculo se asume una distribución de esfuerzos en los tornillos proporcional a la distancia desde su CDG.



- Pretensado y resistencia a deslizamiento. Artículos 3.6.1 y 3.9.1:

$$M22: \quad F_{p,C} = 0,7 \cdot 303 \cdot 1000 \text{ N} \quad 212 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd,ser} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot 303 \cdot 1000 / 1,1 \quad 96,4 \text{ kN}$$

Conjunto de la unión:

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$z$ (m)	$\sqrt{F_z^2 + F_x^2}$
TR fila 1ª	2·61,3↓	2·53,6→	-0,160↑	2·81,5
TR fila 2ª	2·61,3↓	2·26,8→	-0,080↑	2·66,9
TR fila 3ª	2·61,3↓	0→	0↑	2·61,3
TR fila 4ª	2·61,3↓	-2·26,8←	0,080↓	2·66,9
TR fila 5ª	2·61,3↓	-2·53,6←	0,160↓	2·81,5

$$V_{R,ser} = \quad \Sigma F_z = 613$$

$$N_{R,ser} = \quad \Sigma F_x = 0$$

$$M_{R,ser} = \quad \Sigma F_x z = -42,9 \text{ kNm}$$

$$|V_{E,ser} / V_{R,ser}| = \quad \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

$$|M_{E,ser} / M_{R,ser}| = \quad \underline{\underline{1,000 \leq 1}}$$

**RESISTENCIA DE LA SECCION NETA según EC3 (UNE-ENV-1993-1-1: 1992):**

**art. 5.4.5.3 (3), 5.4.6 (8)**

- Alma

$$V_{Ed} = (1/2)V_{pl,Rd} \quad 859 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = A_{V,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (8378 - 5 \cdot 24 \cdot 12) 510 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 1634 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = \quad \underline{\underline{0,525 < 1}}$$

- Angulares

$$V_{Ed} = 0,5(1/2)V_{pl,Rd} \quad 429 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = A_{V,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (450 - 5 \cdot 24) 10 \cdot 430 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 655 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = \quad \underline{\underline{0,655 < 1}}$$

**RESISTENCIA A DESGARRO DEL ALMA según EC3 (UNE-ENV-1993-1-1: 1992):  
art. 3.10.2**

• Alma

— Área neta en tracción

$$A_{nt} = (60 - 0,5 \cdot 24)12 \quad 576,0 \text{ mm}^2$$

— Área neta solicitada a cortante

$$A_{v,f} = (8378 - 600 \cdot 12)/2 \quad 589,0 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = (600 - 140 - 4,5 \cdot 24)12 + 589 \quad 4813 \text{ mm}^2$$

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot 510 \cdot 576/1,25 + 1/\sqrt{3} \cdot 355 \cdot 4813/1,0 = 117,5 + 896,4 \quad 1104 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = 859/1104 \quad \underline{\underline{0,778 < 1}}$$

• Angulares

— Área neta en tracción

$$A_{nt} = (50 - 0,5 \cdot 24)10 \quad 380,0 \text{ mm}^2$$

— Área neta solicitada a cortante

$$A_{nv} = (450 - 65 - 4,5 \cdot 24)10 \quad 2770 \text{ mm}^2$$

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot 430 \cdot 380/1,25 + 1/\sqrt{3} \cdot 275 \cdot 2770/1,0 = 65,4 + 439,8 \quad 505,2 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = (859/2)/505,2 \quad \underline{\underline{0,850 < 1}}$$

**RESISTENCIA A DESGARRO DEL ALMA SEGÚN CTE DB SE A: art. 8.5.2**

• Alma

$$\text{— } V_{Rd} = A_v f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 8378 \cdot 355 / \sqrt{3} / 1,05 = 1717 / 1,05 \quad 1635 \text{ kN}$$

$$\text{— } V_{Rd} = A_{v,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (8378 - 5 \cdot 24 \cdot 12) 510 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 1634 \text{ kN}$$

$$\text{— } V_{Rd} = A_{v,eff} f_y / \sqrt{3} / 1,05 = ((600 - 140) 12 + 589 + 576 \cdot f_u / f_y) f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 1422 / 1,05 = 1354 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = 859/1354 \quad \underline{\underline{0,634 < 1}}$$

• Angulares

$$\text{— } V_{Rd} = A_v f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 4500 \cdot 275 / \sqrt{3} / 1,05 = 714,4 / 1,05 \quad 680,4 \text{ kN}$$

$$\text{— } V_{Rd} = A_{v,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (4500 - 5 \cdot 24 \cdot 10) 430 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 655,4 \text{ kN}$$

$$\text{— } V_{Rd} = A_{v,eff} f_y / \sqrt{3} / 1,05 = ((450 - 65) 10 + 380 \cdot f_u / f_y) f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 705,6 / 1,05 = 672,0 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = (859/2)/672 \quad \underline{\underline{0,639 < 1}}$$

**RESISTENCIA DE LA SOLDADURA:**

- Solicitaciones de cálculo sobre cada una de las dos soldaduras:

$$\begin{aligned}
 V_{w,Ed} &= 780/2 && 390 \text{ kN} \\
 y &= 120 + (12/2) + 4 && 130 \text{ mm} \\
 M_{w,Ed} &= 390 \cdot 130/1000 && 50,7 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

- Tensión tangencial de cálculo de la soldadura según el artículo 4.5.3.3

$$f_{vw,d} = 430/(\sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 1,25) \quad 233,7 \text{ N/mm}^2$$

- Resistencia de la soldadura. Interacción momento y cortante

$$\begin{aligned}
 L &= 450 - 8 && 442 \text{ mm} \\
 V_{w,Rd} &= 8 \cdot 442 \cdot 233,7/1000 && 826,2 \text{ kN} \\
 v &= 390/826,21 && \underline{\underline{0,472 < 1}} \\
 M_{w,Rd} &= 8 \cdot 442^2/4 \cdot 233,7/1000000 && 91,3 \text{ kNm} \\
 m &= 50,7/91,3 && \underline{\underline{0,555 < 1}} \\
 M_{w\sqrt{Rd}} &= 91,3(1 - 0,472^2) && 70,95 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Interacción  $M/V$ : Las dos comprobaciones que siguen son equivalentes (interacción  $M/V$  en una sección rectangular).

$$\begin{aligned}
 M_{w,Ed}/M_{w,V,Rd} &= && \underline{\underline{0,715 < 1}} \\
 m + v^2 &= && \underline{\underline{0,778 < 1}}
 \end{aligned}$$

**RESISTENCIA DE CADA CASQUILLO DE ANGULAR. EFECTO DEL GIRO EN SERVICIO:**

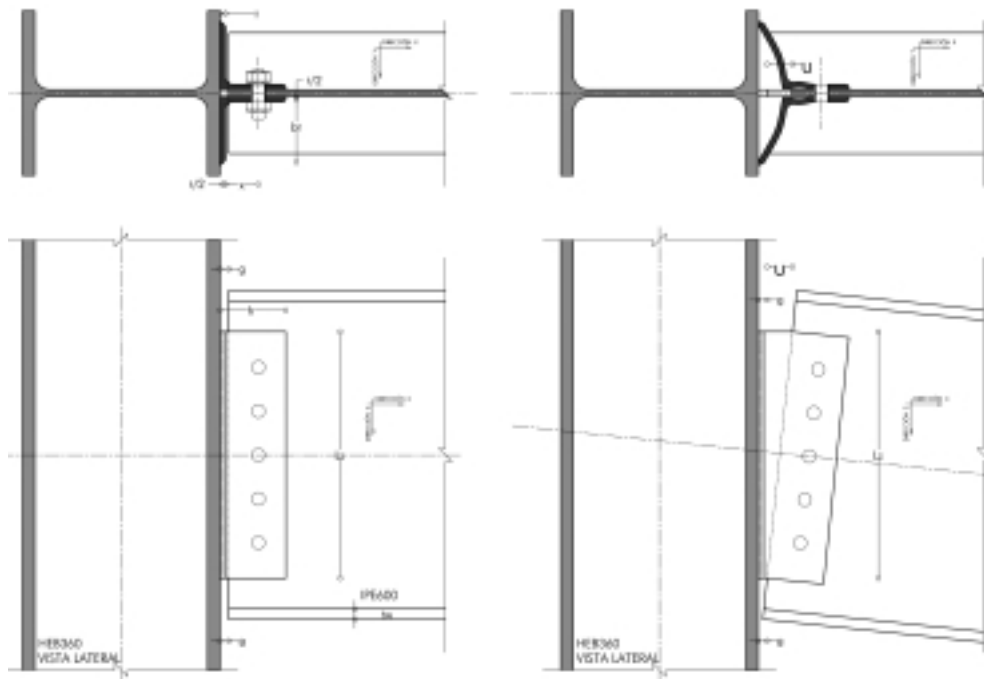


FIGURA 26: RESISTENCIA DEL CASQUILLO DE ANGULAR. EFECTO DE GIRO EN SERVICIO.

Las distancias  $x$  e  $y$  tomadas en el cálculo de las uniones permiten suponer una sollicitación de corte puro en la arista del diedro, y por lo tanto la correspondiente distribución equilibrada de sollicitaciones en cada uno de sus planos consiste en un esfuerzo cortante y un momento contenidos en el plano respectivo, frente a los cuales su resistencia es mayor que la de la unión correspondiente, debido a las restricciones impuestas por aplastamiento, separaciones de tornillos, etc., así como por la limitación de  $a/t$  para la soldadura, siendo  $t$  el espesor del angular. Asegurado el equilibrio resta verificar que las deformaciones impuestas por el giro de la unión, que producen flexiones perpendiculares al plano frontal del angular, no exigen la formación rótulas plásticas en servicio que originaría la acumulación de deformaciones plásticas irreversibles. A continuación se estima el valor máximo del giro de la unión para que en servicio no se alcance el estado antedicho.

- Solicitación en el ala del angular:

— Datos preliminares

$$\begin{aligned}
 b_t &= 120 - 10/2 && 115,0 \text{ mm} \\
 x_t &= 70 - 10/2 && 65,0 \text{ mm} \\
 r &= && 13,0 \text{ mm} \\
 I &= 1/12 \cdot 10^3 && 83,333 \text{ mm}^3 \\
 EI &= 210000 \cdot 83,333 && 17500000
 \end{aligned}$$

— Momento en la arista del diedro por unidad de longitud

$$\begin{aligned}
 M_{E,ser} &\approx 12EI/(b_t(3x_t + 4b_t)) u_x \approx 24EI/(11b_t)u_x \\
 M_{E,ser} &= 12 \cdot 17500000 / (115(3 \cdot 65 + 4 \cdot 115)) u_x && 2788 u_x
 \end{aligned}$$

— Momento en el extremo del radio de acuerdo

$$M_{E,ser} = 2788 \cdot (115 - 13 - 10/2) / 115 u_x && 2352 u_x$$



- Resistencia del angular

$$\begin{aligned}
 W_{pl} &= 10^2/4 && 25,00 \\
 M_{pl,R} &= 25 \cdot 275 && 6875
 \end{aligned}$$



- Movimiento horizontal y giro máximos de la unión

$$\begin{aligned}
 u_{max} &= 6875/2353 && 2,924 \text{ mm} \\
 \theta_{max} &= 2,924/450 && 0,00650 \text{ rad}
 \end{aligned}$$



En la siguiente tabla se indican los límites de flecha para distintas cargas y condiciones de apoyo para los cuales el giro  $\theta_{max}$  en el nudo es inferior al calculado  $\theta_{max}$ :

$v_{max}$	$q$	$P (L/2)$
	$L/493$	$L/462$
	$L/616$	$L/528$

Los límites anteriores se pueden relajar bien aumentando la calidad del acero de los angulares, bien disminuyendo la longitud de los mismos. Alterando únicamente la calidad del acero de los angulares de S275 a S355 la tabla anterior se escribe como sigue:

$v_{max}$	$q$	$P (L/2)$
	$L/382$	$L/358$
	$L/477$	$L/409$

Si se conserva la calidad del acero de los angulares y se modifica su geometría según se indica posteriormente se satisfacen todos los ELU y los ELS, reduciéndose los límites de la flecha máxima como se indica a continuación

$v_{max}$	$q$	$P (L/2)$
	$L/419$	$L/392$
	$L/523$	$L/449$

<b>Definición de la Unión:</b> <b>F00B IPE 600 (S355)</b>			
<b>Angulares S275JR</b>		<b>Tornillos alma</b>	
L 120·10 (450 mm)		Tornillos A10-9 ( $\mu = 0,5$ )	Distancias (mm)
Gap (mm) 4M27 (taladros $\phi$ 30)	Soldadura al soporte del borde vertical de cada angular, rebordeando el punto superior pero dejando SIN SOLDAR el lado horizontal	5M22 (taladros $\phi$ 24)	$e_x = 40$ $e_z = 55$ $p_z = 72,5$
$g = 10$	Garganta (no cateto) $a = 7$ mm		

### 5.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN <http://catedracero.ee.upm.es>, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR

#### 5.3.1 Consideraciones generales

Las notas generales del apartado 2.3 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten. A continuación realizan algunas aclaraciones particulares sobre el libro que permite comprobar la unión tipo PB.

#### 5.3.2 Datos

La unión, siguiendo los criterios generales, se define en la hoja DATOS. Se caracteriza definiendo los angulares junto con sus soldaduras y los tornillos del alma (TR alma). El número de filas de tornillos puede variar sólo de 1 hasta 8 pero el número de tornillos en cada fila no está limitado, lo que hace pertinente de nuevo la observación sobre el peligro de extender los diseños más allá de los límites validados experimentalmente o sancionados por la práctica.

Los datos con los que se ha cumplimentado la hoja DATOS del fichero que se distribuye en [www://catedracero.ee.upm.es](http://www://catedracero.ee.upm.es) corresponden al cálculo realizado previamente.

#### 5.3.3 Resultados

##### *Comprobaciones del estado límite último:*


Las comprobaciones para los tornillos se realizan en la hoja PB y son las habituales: Además del equilibrio de la unión se verifican las dos condiciones  $F_{v,Ed}/F_{v,Rd} \leq 1$  y  $F_{v,Ed}/F_{b,Rd} \leq 1$  (resistencia de cálculo a cortante de los tornillos y resistencia a aplastamiento de las chapas). En la hoja CHAPA se comprueban las secciones netas y el desgarro del alma del perfil y de los angulares y en la hoja NUDO se comprueba la soldadura.

##### *Comprobaciones del estado límite de servicio*

Igual que en los cálculos del ELU las comprobaciones de los tornillos se encuentran en la hoja PB, donde se verifica  $F_{ser}/F_{s,Rd,ser} < 1$ . La distribución de esfuerzos en los tornillos

( $F_{ser}$ ) es lineal de acuerdo con los criterios establecidos en EN 1993-1-8:2005 y CTE DB SE A. Las comprobaciones en servicio del efecto del giro de la unión sobre el angular se encuentran en la hoja NUDO.

Las figuras que siguen son varias hojas de libro de cálculo P00B, particularizadas para el diseño 5.2.



CatedraAcero

**CÁLCULO DE UNIONES ARTICULADAS P00B**

TÍTULO CÓDIGO 080801

06/17/08 hoja 2/6

Solicitaciones de primer orden:				Segundo orden:			
$N_{Ed}$	$V_{Ed}$	$M_{y,Ed}$		X	100-1	(100-1)W/A	$M_z$
0	780,0	54,6		1	0,00	0	0

Solicitaciones totales:							
$N_{Ed}$	$V_{Ed}$	$M_{y,Ed}$		$Y_{red}$	$N_{Ed,ser}$	$V_{Ed,ser}$	$M_{y,Ed,ser}$
0	780,0	54,6		1,1	0	557,1	38,0

Perfiles:				
Acero:				
id	$f_y$	$f_t$	$Y_M$	$f_{yd}$
S355	355	510	1	355

Perfil base:											
id	h	b	A	$A_{vc}$	$W_{pl,y}$	$t_f$	$t_w$	r	$h_f$	$h_w$	g
IPE600	600	220	156	83,78	3512,0	19	12	24	992	698,17	16

Acero:					Soldaduras:		
id	$f_y$	$f_t$	$Y_M$	$f_{yd}$	a	$Y_{sd}$	$\beta_w$
S355	355	510	1	355	0	1,25	0,9

Angular:								
id	$L_x$	h	b	A	t	$r_1$	$r_2$	$\mu$
L120x120x10	430	120	120	23,18	10	13	6,5	0,5

Acero TR:				
id	$f_y$	$f_t$	$Y_{sd}$	$Y_{M0,ser}$
A10.9	900	1000	1,25	1,1

TR alma:										
id	d	$d_0$	$A_b$	A	$F_{t,Rd}$	$F_{v,Rd}$	$F_{o,Rd}$	$F_{t,Rd,max}$	$F_{o,Rd,max}$	$F_{o,b,Rd,max}$
M22	22	24	303	380	218	182	212	96,4	224	269

Distancias:											
TR alma:											
id	$n_x$	$e_x$	$p_x$	x	$m_x$	$e_{0x}$	$n_z$	$e_z$	$m_z$	$p_z$	$e_{0z}$
M22	1	50	0	70,0	60,0	54,0	5	65	121,0	80,0	140,0

FIGURA 27: HOJA DATOS PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 5.2.1.





CÁLCULO DE UNIONES ARTICULADAS P03B

TÍTULO CÓDIGO 866001

05/17/05 hoja 5/8

ELU según EN 1993-1-8: 2005

Resistencia de cada TR:

TR alma:								
<b>TR alma 1:</b>								
$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_x$	$\Sigma F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
182	131,1	131,3	85,5	85,6	92,7	0,91	< 1	VÁLIDO
<b>TR alma 2:</b>								
$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_x$	$\Sigma F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
182	166,2	78,7	83,1	39,4	92,0	0,91	< 1	VÁLIDO
<b>TR alma 3:</b>								
$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_x$	$\Sigma F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
182	185,5	0,0	92,7	0,0	92,7	0,91	< 1	VÁLIDO
<b>TR alma 4:</b>								
$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_x$	$\Sigma F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
182	166,2	-78,7	83,1	-39,4	92,0	0,91	< 1	VÁLIDO
<b>TR alma 5:</b>								
$F_{t,Rd}$	$\Sigma F_x$	$\Sigma F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$		
182	131,1	-131,3	85,5	-85,6	92,7	0,91	< 1	VÁLIDO

Esfuerzos en los TR:

TR alma:	$F_x$	$F_y$	$z$	$M_x$
TR alma 1:	131,05	131,26	0,160	21,00
TR alma 2:	166,21	78,73	0,080	6,30
TR alma 3:	185,47	0,00	0,000	0,00
TR alma 4:	166,21	-78,73	-0,080	6,30
TR alma 5:	131,05	-131,26	-0,160	21,00

Equilibrio

			$\Sigma F, \Sigma M$	0.01-E	
$V_{Ed} = \Sigma F_y$	786,98		$V_{Ed}$	0,00	< 7,80
$N_{Ed} = \Sigma F_x$		0,00	$N_{Ed}$	0,00	< 7,80
$M_{Ed} = \Sigma M$			$M_{Ed}$	0,00	< 0,55


Ajustamiento de la chapa

TR alma:	Distribución plástica de esfuerzos							CTE
TR alma 1:								1
<b>Perfil base:</b>								
$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	$\alpha_0$	$\beta_0$	$F_{t,Rd}$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	
269,28	0,98	1,00	231,88	131,3	131,1	185,5	0,8	< 1
<b>TR alma 2:</b>								
<b>Perfil base:</b>								
$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	$\alpha_0$	$\beta_0$	$F_{t,Rd}$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	
269,28	0,98	1,00	231,88	78,7	166,2	183,9	0,79	< 1
<b>TR alma 3:</b>								
<b>Perfil base:</b>								
$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	$\alpha_0$	$\beta_0$	$F_{t,Rd}$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	
269,28	0,98	1,00	231,88	0,0	185,5	185,5	0,8	< 1
<b>TR alma 4:</b>								
<b>Perfil base:</b>								
$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	$\alpha_0$	$\beta_0$	$F_{t,Rd}$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	
269,28	0,98	1,00	231,88	-78,7	166,2	183,9	0,79	< 1
<b>TR alma 5:</b>								
<b>Perfil base:</b>								
$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	$\alpha_0$	$\beta_0$	$F_{t,Rd}$	$F_x$	$F_y$	$F_{t,Rd}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Rd}$	
269,28	0,98	1,00	231,88	-131,3	131,1	185,5	0,8	< 1

FIGURA 28: HOJA PB PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 5.2.1. E.L.U.

ELS (categoría B) según EN 1993-1-3: 2005							
					$N_{Ed}$	$V_{Ed}$	$M_{Ed}$
					0	557,1	39
	n	$A_s$	z	A	S	I	
<b>TR alma:</b>							
TR alma 1:	2	363	160	606	9090		15513000
TR alma 2:	2	363	80	606	4040		3079400
TR alma 3:	2	363	0	606	0		0
TR alma 4:	2	363	-80	606	-4040		3079400
TR alma 5:	2	363	-160	606	-9090		15513000
				3030	0		3878
<b>Posición del cdg del conjunto de TR:</b>						0,0	
<b>Solicitaciones <math>F_{s,Rd,Ed}</math> sobre cada TR. Rozamiento</b>							
<b>TR alma:</b>							
<b>TR alma 1:</b>							
$F_{s,Rd,Ed}$	$A_s$	z	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}/F_{s,Rd,Ed}$	
96,4	303	160	48,8	55,7	74,0	0,768	< 1
0,5 (233,1)			303091,488-0,303-0,3030000	307,876100	4873,4873		VÁLIDO
<b>TR alma 2:</b>							
$F_{s,Rd,Ed}$	$A_s$	z	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}/F_{s,Rd,Ed}$	
96,4	303	80	24,4	55,7	60,8	0,631	< 1
0,5 (233,1)			303091,488-0,303-0,3030000	307,876100	4273,4873		VÁLIDO
<b>TR alma 3:</b>							
$F_{s,Rd,Ed}$	$A_s$	z	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}/F_{s,Rd,Ed}$	
96,4	303	0	0,0	55,7	55,7	0,578	< 1
0,5 (233,1)			303091,488-0,303-0,3030000	307,876100	4873,4873		VÁLIDO
<b>TR alma 4:</b>							
$F_{s,Rd,Ed}$	$A_s$	z	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}/F_{s,Rd,Ed}$	
96,4	303	-80	-24,4	55,7	60,8	0,631	< 1
0,5 (233,1)			303091,488-0,303-0,3030000	307,876100	4273,4873		VÁLIDO
<b>TR alma 5:</b>							
$F_{s,Rd,Ed}$	$A_s$	z	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}$	$F_{s,Ed}/F_{s,Rd,Ed}$	
96,4	303	-160	-48,8	55,7	74,0	0,768	< 1
0,5 (233,1)			303091,488-0,303-0,3030000	307,876100	4873,4873		VÁLIDO
<b>Esfuerzos en los TR:</b>							
TR alma:	$F_x$	$F_y$	z	$M_y$			
TR alma 1:	111,42	97,51	0,160	15,60			
TR alma 2:	111,42	48,76	0,080	3,90			
TR alma 3:	111,42	0,00	0,000	0,00			
TR alma 4:	111,42	-48,76	-0,080	3,90			
TR alma 5:	111,42	-97,51	-0,160	15,60			
<b>Equilibrio</b>							
$V_{Ed} = \Sigma F_y$	557,10				$\Sigma F, EM$	0,01 E	
$N_{Ed} = \Sigma F_x$		0,00			$V_{s,Ed} =$	0,04	< 5,57
$M_{y,Ed} = \Sigma M$			39,00		$N_{Ed} =$	0,00	< 5,57
					$M_{y,Ed} =$	0,00	< 0,39

FIGURA 29: HOJA PB PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 5.2.1. E.L.S.



CÁLCULO DE UNIONES ARTICULADAS P30E

09/TT08 Hoja 6/6

---

**Resistencia de la sección neta**

**Perfil base**

Alma:

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
793,00	1634,31	1634,31	0,48	< 1	VÁLIDO

Angulares

Alma:

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
393,00	777,34	777,34	0,50	< 1	VÁLIDO

---

**Resistencia a desgarro del alma** EN 1993-1-8:2005

**Perfil base**

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Rd3}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
793,00	605,47	182,82	1069,29	0,72	< 1	VÁLIDO

Angulares

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Rd3}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
393,00	567,74	77,52	645,26	0,6	< 1	VÁLIDO

---

**Resistencia a desgarro del alma** CTE DB SE A

**Perfil base**

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
793,00	1717,15	1717,15	0,45	< 1	VÁLIDO

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
793,00	1634,31	1634,31	0,48	< 1	VÁLIDO

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
793,00	1400,50	1400,50	0,56	< 1	VÁLIDO

Angulares

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
393,00	922,32	922,32	0,42	< 1	VÁLIDO

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
393,00	777,34	777,34	0,50	< 1	VÁLIDO

$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
393,00	936,95	936,95	0,43	< 1	VÁLIDO

FIGURA 30: HOJA CHAPA PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 5.2.1.

#### 5.3.4 Variaciones sobre el diseño P00B

En la figura 31 se incluyen los diseños P20B y P10B, en los que se sustituyen los casquillos de angular por una o dos cartelas. Se han desarrollado los libros de cálculo correspondientes accesibles en <http://catedracero.ee.upm.es>. En la figura 32 se muestran las variaciones P11B, P12B y P13B del diseño P11B, en las que se han realizado distintos cortes del perfil base. De éstos, y las mismas tres variaciones de P00B y P20B se puede encontrar los correspondiente libro de cálculo en la web de CátedrAcero.

Entre el diseño P00B y las variaciones antedichas del mismo existe una diferencia conceptual primordial que debe comprenderse para su correcto cálculo y uso: Si en el diseño P00B el giro del extremo de la viga lo aportaba la deformación de las alas de los angulares respecto de la cara del soporte, que al menos efectos de cálculo permanecía inmóvil, en las uniones P10B y P20B la rotación debe permitirle el elemento (viga) sustentante. Una primera consecuencia es que, al igual que en el diseño P00B, la magnitud de los giros de la pieza apoyada deben de ser moderados.

Prácticamente esto limita el uso de este tipo de unión al caso de que el elemento sustentante es una viga de débil rigidez torsional, que la vigueta se apoye no excesivamente cerca del extremo de la viga sustentante, y que no exista al otro lado de ésta otra vigueta o viguetas que traten de provocar al elemento sustentante un giro torsor de sentido contrario. En el último caso las uniones no funcionarían como «articuladas»; se estaría más bien en un diseño similar al de las uniones L03B de la figura 15. No se pueden aplicar las uniones P10B o P20B si la vigueta, supuestamente articulada, se une, sola o con otras, a una viga de gran rigidez, o a un soporte.

Respetando lo antedicho, está claro que en este caso, a diferencia del P00B, se debe adoptar como punto de aplicación de la reacción el eje de la viga sustentante, y que por lo tanto el grupo de tornillos deberá calcularse para canalizar no sólo la reacción vertical, sino además el momento producto de la misma por la excentricidad de su punto de aplicación (el eje de la viga sustentante) respecto al centro del grupo de tornillos.

Otra diferencia importante respecto de la unión P00B, ahora de índole geométrico, es que la vigueta puede presentar en planta desviaciones moderadas respecto de la dirección perpendicular a la viga sustentante, y que normalmente no deberían existir dificultades de espacio en ésta para alojar las cartelas de unión.

Ciertas tolerancias constructivas son factibles mediante taladros alargados adecuadamente diseñados y considerados en el cálculo, siempre que se utilicen tornillos adecuadamente pretensados.

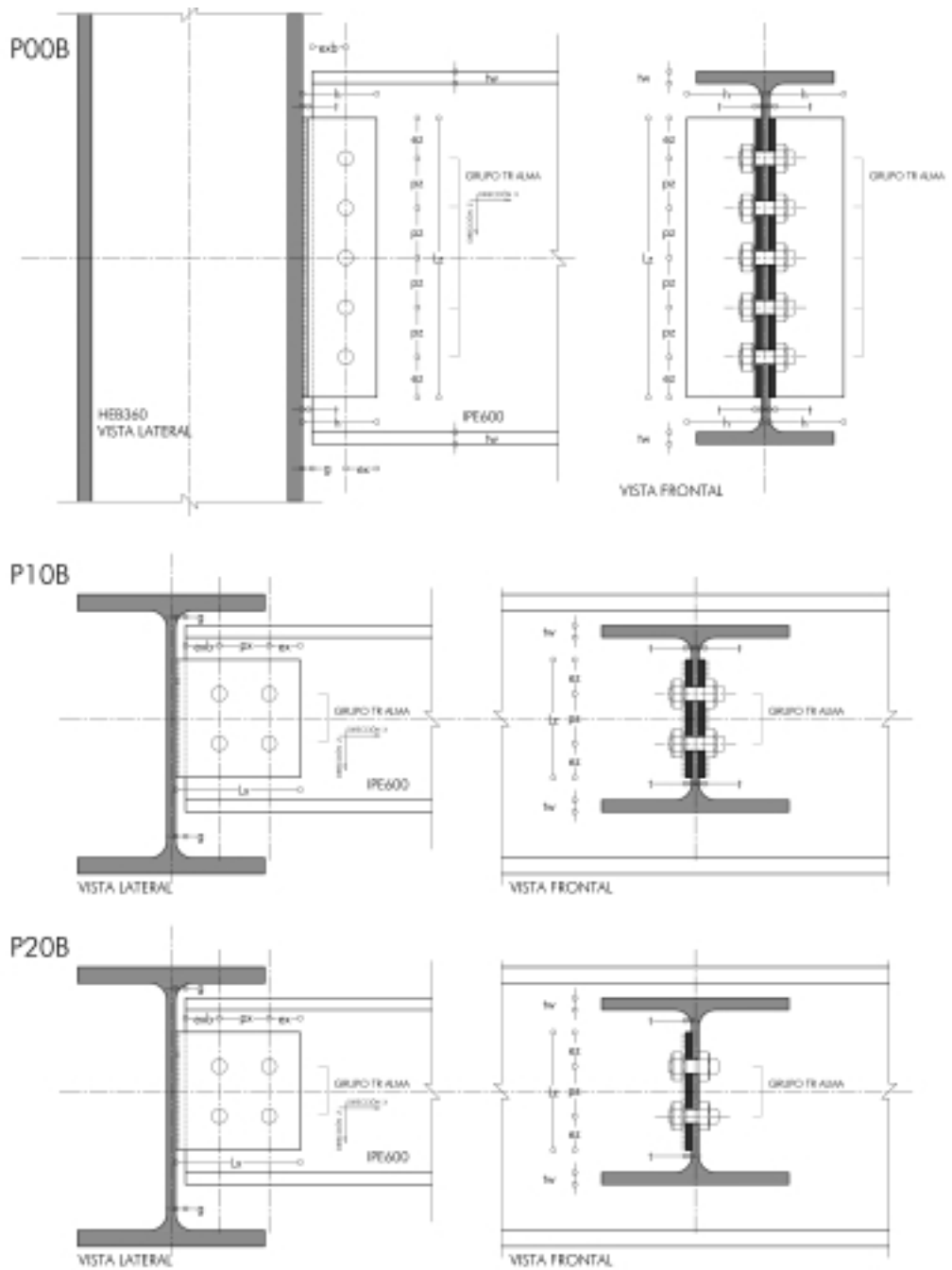


FIGURA 31: VARIACIONES P10B (DOS CARTELAS) Y P02B (UNA CARTELA) DEL DISEÑO P00B.

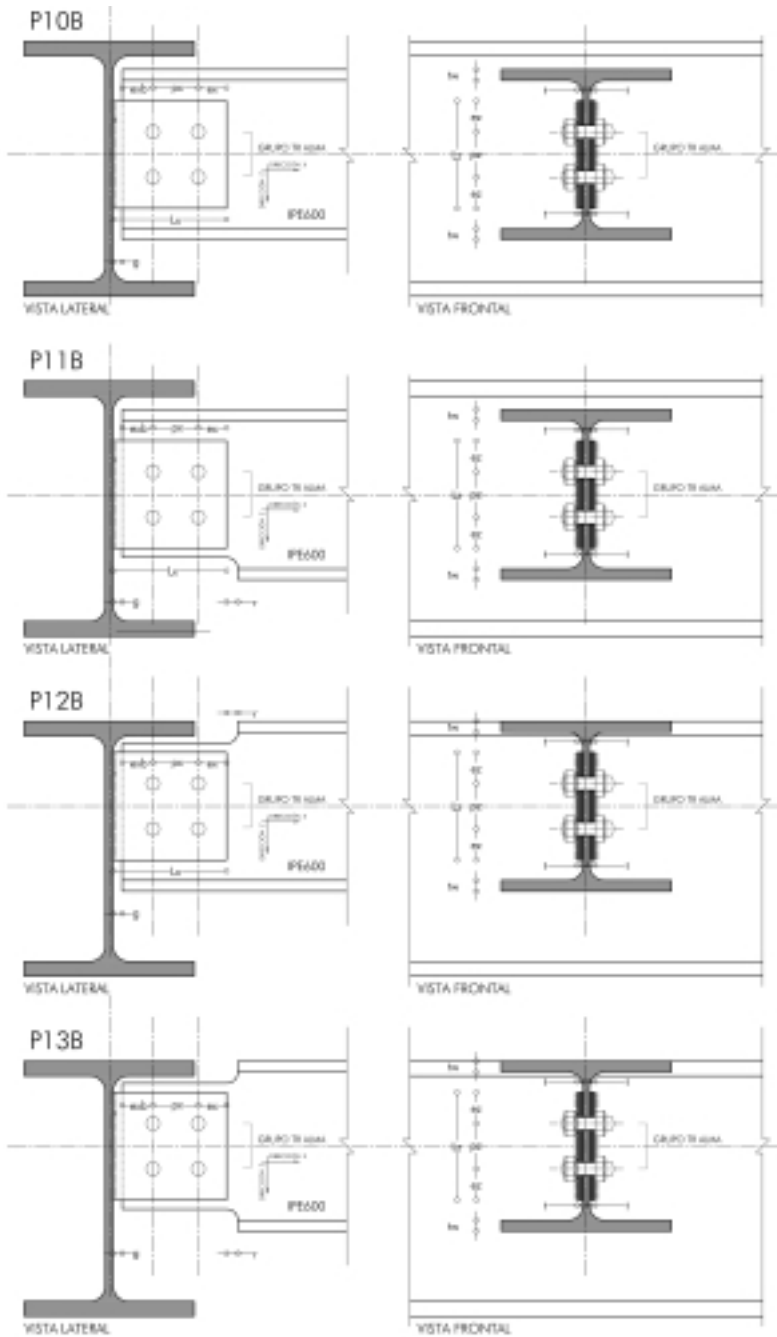


FIGURA 32: VARIACIONES DEL DISEÑO P10B. DISTINTOS CORTES DEL PERFIL BASE.

El despalmillado de las alas de la vigueta tiene como misión facilitar su montaje. Debe notarse que el alma del perfil además de por el esfuerzo cortante estará solicitada por un pequeño momento flector y por tanto la sección neta del perfil deberá comprobarse para la interacción de ambos esfuerzos.

En el caso P20B la vigueta y la cartela quedarían teóricamente solicitadas por el pequeño momento torsor derivado de la excentricidad de la cartela con respecto al plano del alma de la vigueta, pero dicha torsión quedará normalmente coaccionada por la unión del ala superior al forjado. Éste será el caso si, por ejemplo, el forjado es de chapa grecada colaborante y está unido a la vigueta mediante conectores.

#### **5.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD**

De acuerdo con la concepción de la unión expuesta en 3.1, en este tipo de uniones las condiciones de apriete de tornillos y rozamiento de superficies en contacto no suelen resultar críticas, lo cual no quiere decir que no se controlen adecuadamente siguiendo las especificaciones del Proyecto.

Como aspecto principal a controlar, se debe efectuar una inspección visual de que las soldaduras de los angulares al soporte permiten el giro de la viga, según lo indicado en dicho apartado 5.1.

# 6. Uniones extremas en dilatación, tipo E00B

## 6.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN

El tipo de unión del presente apartado tiene la consideración de un «apoyo en dilatación», capaz de transmitir reacciones verticales de una viga metálica a un soporte del mismo material, permitiendo giros moderados del extremo de la viga, a la vez que determinados desplazamientos longitudinales de la misma.

En este caso ambos tipos de movimientos se consiguen simplemente permitiendo el desplazamiento horizontal de todos los elementos de unión dentro de respectivos taladros alargados («colisos»). No se requiere pues la flexibilidad de los casquillos o cartelas de unión al soporte, que pueden y deben estar rígidamente soldados a éste.

La longitud de los taladros debe calcularse de manera que permita las tolerancias constructivas más los movimientos teóricos, con un cierto coeficiente de seguridad.

Evidentemente la utilización de tornillos pretensados está completamente contraindicada en este caso, ya que se impedirían los desplazamientos mencionados, debiendo utilizarse bulones o pasadores no pretensados.

En este caso, por lo tanto, la reacción de la viga pasa obligatoriamente por la línea de unión de los centros de los tornillos en su posición de cálculo, que debe incluir las tolerancias constructivas y movimientos de la unión en su configuración pésima. Es importante tener en cuenta la correspondiente excentricidad en los cálculos, tanto de la unión como del soporte, ya que su incidencia puede llegar a ser bastante considerable.

Las cartelas soldadas al soporte no tienen que ser ortogonales al mismo, siempre que concurren en la línea teórica de intersección de los planos del alma y ala del soporte (de lo contrario el momento transmitido por las cartelas producirá flexiones en la cara del soporte que habrá que comprobar y/o coaccionar adecuadamente). Pero es factible la no ortogonalidad del eje de la viga a la sección del soporte, lo que les confiere mayor libertad de orientación en planta.

Por lo tanto, este tipo de unión («EB») y la considerada en el apartado anterior («PB»), aunque aparentemente presentan ciertas similitudes formales, en realidad encierran profundas diferencias conceptuales y constructivas.



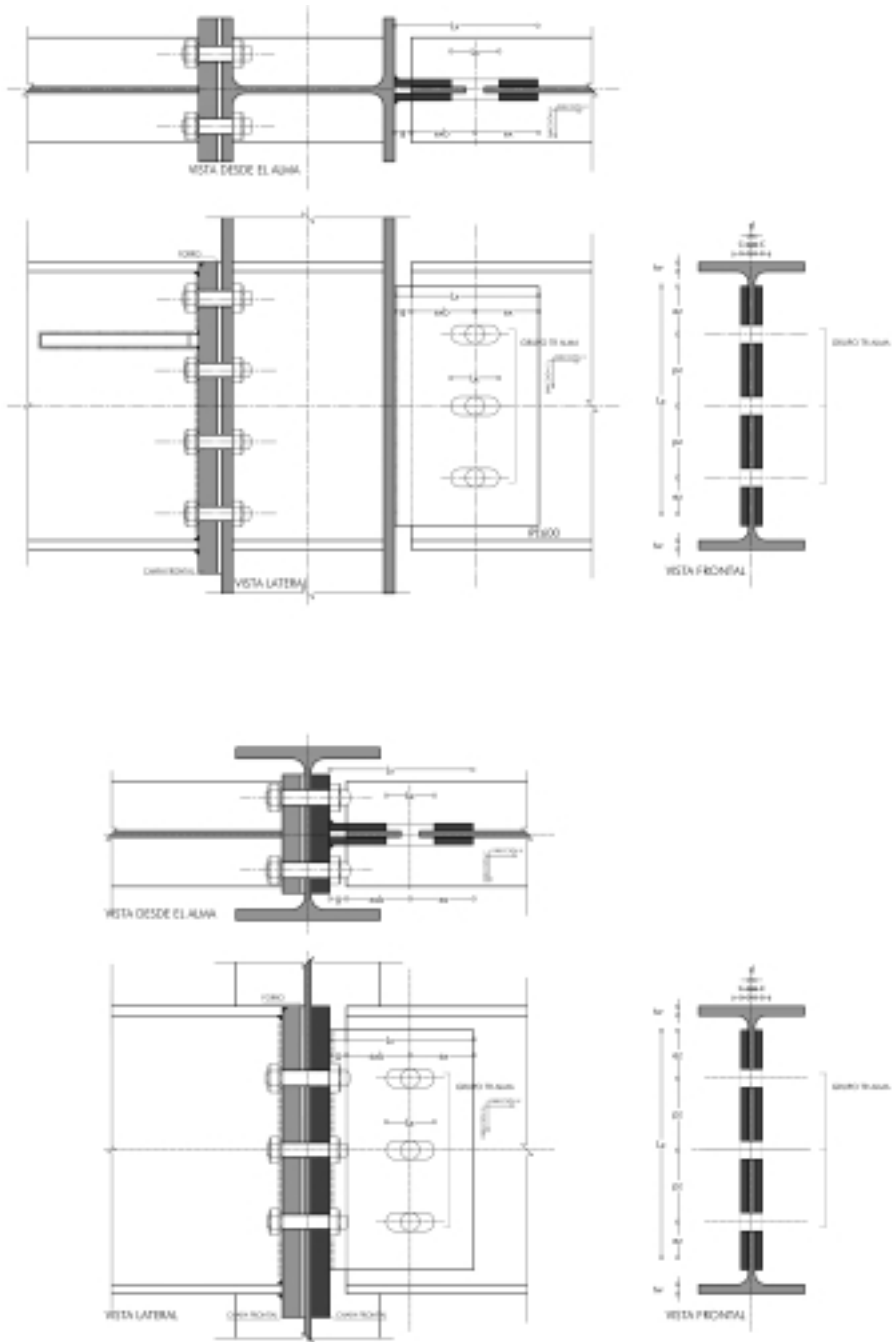


FIGURA 33: UNIÓN ATORNILLADA LATERAL CON APOYO DESLIZANTE. E00B.

## 6.2 EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO.

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión particular que se describe a continuación. La mayoría de los comentarios a estos cálculos, comunes al resto de uniones que se estudian en otros capítulos, pueden encontrarse en el apartado 2.2.

### E00B IPE 600 (S355).

La unión se emplea para equilibrar el cortante de extremo de una viga que no tiene impedida ni la rotación ni el deslizamiento en el extremo enlazado

<b>BULONES</b>			
A 4.6 (EN 1993-1-8:2005 tabla 3.1)			
Valores característicos (N/mm <sup>2</sup> )		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 400$	$f_{yb} = 240$	Intenso	$\gamma_{M2} = 1,25$

Definición de la Unión: E00B IPE 180 (S275)			
<b>Cartelas S275JR</b>		<b>Bulones</b>	
2 # 500:30-15		Bulones A 4.6	Distancias (mm)
Superficies deslizantes en contacto tratadas con bisulfuro de molibdeno			
Holguras de montaje	Soldadura de cada cartela al soporte	3 $\phi$ 36	$e_x = 132,5$ $e_z = 100$ $p_z = 150$
Entre viga y soporte	Garganta (no cateto) $a = 8$ mm	taladros (mm)	
$g = 35$		Alma de viga $\phi$ 39	
Entre alma de la viga y cada cartela		Cartelas $L_x = 100$	
$c = 1$			

**Capacidad resistente del perfil base en flexión simple (IPE600):**

$V_{pl,Rd} = 8378 \cdot 275 / 1.0 / \sqrt{3} \text{ N} = 1330 \text{ kN}$ , $M_{pl,Rd} = 3512000 \cdot 275 / 1.0 \text{ Nmm} = 966 \text{ kNm}$				
	$\rho = 0$	$\rho = (1/3)^2$	$\rho = (2/3)^2$	$\rho = 1$
$V_{Rd} =$ $V_{pl,Rd} (1 + \sqrt{\rho}) / 2$ EN 1993-1-8 6.2.8(3)	$(1/2)V_{pl,Rd}$	$(2/3)V_{pl,Rd}$	$(5/6)V_{pl,Rd}$	$V_{pl,Rd}$
	665	887	1108	1330
$M_{V,Rd} = M_{pl,Rd} -$ $\rho / 4 A_v^2 f_{yd} / t_w$ EN 1993-1-8: 6.2.8(5)	$M_{pl,Rd}$	$M_{pl,Rd} -$ 58	$M_{pl,Rd} -$ 231	$M_{pl,Rd} -$ 519
	966	921	787	564

**Solicitaciones nominales de la unión:**

$$V_{Ed} = (1/3)V_{pl,Rd} \quad 443,4 \text{ kN}$$

$$\gamma_f = 1,40$$

La aplicación del artículo 3.13 de EN 1993-1-8:2005 puede considerarse conservadora, tanto por no tratarse de un bulón único como por el carácter limitado de los giros locales y generales.

**ELU según EN 1993-1-8:2005****Cálculos preliminares:**

- Resistencia de cálculo a cortante de cada bulón o tornillo. Tablas 3.4 y 3.10

$$M36: \quad F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 1018 \cdot 400 / 1,25 \text{ N} \quad 195 \text{ kN}$$

- Resistencia de cálculo a flexión de cada bulón. Tabla 3.10

$$M36: \quad 1,5(\pi \cdot 36^3 / 32) 240 / 1 \quad 1649 \text{ kNm}$$

- Resistencia a aplastamiento del alma del perfil base ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como unión atornillada clase C. Tabla 3.4

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$M36: L_j = 300,0 \quad \beta_{L_f} = 1 - (300,0 - 15 \cdot 36)/(200 \cdot 36) < 1 \quad \beta_{L_f} = 1,00$$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

$$M36 \text{ ext: } \alpha = \min \{150/(3 \cdot 39); 150/(3 \cdot 39) - 1/4; 1\} \quad 1,00$$

$$M36 \text{ int: } \alpha = \min \{150/(3 \cdot 39) - 1/4; 1\} \quad 1,00$$

$$\alpha = \quad 1,00$$

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 2,5 \cdot 1,00 \cdot 36 \cdot 12 \cdot 400/1,25 \text{ N} \quad 346 \text{ kN}$$

Donde, de acuerdo con la tabla 3.4, se ha tomado el  $f_u$  de los tornillos (400N/mm<sup>2</sup>), inferior al del perfil base (430N/mm<sup>2</sup>)

- Resistencia a aplastamiento del alma del perfil base ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como bulón. Tabla 3.10

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 1,5 \cdot 1,00 \cdot 36 \cdot 12 \cdot 240/1,00 \text{ N} \quad 156 \text{ kN}$$

Donde, de acuerdo con la tabla 3.10, se ha tomado el  $f_y$  de los tornillos (240N/mm<sup>2</sup>), inferior al del perfil base (275N/mm<sup>2</sup>). Conservadoramente se aplican los factores de reducción  $\beta_{L_f}$  calculados previamente.

- Resistencia a aplastamiento de las cartelas ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como unión atornillada clase C. Tabla 3.4

Los cálculos que siguen son superfluos salvo en situaciones de diseño extremas (óptimas) o patológicas: El alma del perfil está recubierta por dos cartelas que, con la única precaución de que la suma de sus espesores supere 1,67 veces la del perfil base —debido a la reducción de la resistencia a aplastamiento por agujero alargado— y las distancias a los bordes de los agujeros sean iguales o mayores que las del perfil base tendrán un valor de  $F_{b,Rd}$  mayor que el del perfil base.

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$M36: L_j = 300,0 \quad \beta_{L_f} = 1 - (300,0 - 15 \cdot 36)/(200 \cdot 36) < 1 \quad \beta_{L_f} = 1,00$$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

$$M36 \text{ ext: } \alpha = \min \{100/(3 \cdot 39); 150/(3 \cdot 39) - 1/4; 1\} \quad 0,85$$

$$M36 \text{ int: } \alpha = \min \{150/(3 \cdot 39) - 1/4; 1\} \quad 1,00$$

$$\alpha = (0,85 \cdot 2 + 1 \cdot 1)/3 \quad 0,90$$

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 0,6 \cdot 2,5 \cdot 0,90 \cdot 36 \cdot 15 \cdot 400/1,25 \text{ N} \quad 234,1 \text{ kN}$$

Donde, de acuerdo con la tabla 3.4, se ha tomado el  $f_u$  de los tornillos (400N/mm<sup>2</sup>), inferior al del perfil base (430N/mm<sup>2</sup>) y el factor de reducción 0,6 que se aplica a los agujeros alargados.

- Resistencia a aplastamiento de las cartelas ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como bulón. Tabla 3.10

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 1,5 \cdot 0,90 \cdot 36 \cdot 15 \cdot 240 / 1,00 \text{ N} = 175,6 \text{ kN}$$

Donde, de acuerdo con la tabla 3.10, se ha tomado el  $f_y$  de los tornillos (240N/mm<sup>2</sup>), inferior al del perfil base (275N/mm<sup>2</sup>). Conservadoramente se aplican los factores de reducción  $\beta_{lf}$  y  $\alpha$  calculados previamente.

*Conjunto de la unión:*

- Solicitaciones de cálculo en cada bulón

$$V_{Ed} = 443,4/3 \quad 148 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = 148/2 \quad 73,9 \text{ kN}$$

$$|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}| = 73,9/195 \quad \underline{\underline{0,379 < 1}}$$

$$M_{Ed} = 148/8(12 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 15) \quad 849,8 \text{ kNm}$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = 849,8/1649 \quad \underline{\underline{0,515 < 1}}$$

- Comprobación de cada bulón

$$|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}|^2 + |M_{Ed}/M_{Rd}|^2 = \underline{\underline{0,409 < 1}}$$

- Comprobación del aplastamiento del alma del perfil base

$$148/156 \quad \underline{\underline{0,949 < 1}}$$

- Comprobación del aplastamiento de las cartelas

$$(148/2)/175,6 \quad \underline{\underline{0,421 < 1}}$$

*Conjunto de la unión. Comprobación como unión atornillada de clase C:*

- Solicitaciones de cálculo en cada tornillo

$$|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}| = 73,9/195 \quad \underline{\underline{0,379 < 1}}$$

- Comprobación del aplastamiento del alma del perfil base

$$148/346 \quad \underline{\underline{0,428 < 1}}$$

- Comprobación del aplastamiento de las cartelas

$$(148/2)/234,1 \quad \underline{\underline{0,316 < 1}}$$

Admitiendo este criterio de comprobación podría reducirse la calidad del acero de los tornillos e incluso su diámetro. Se repiten los cálculos para bulones de diámetro 27 mm.

*Cálculos preliminares para bulones de 27 mm:*

- Resistencia de cálculo a cortante de cada bulón o tornillo. Tablas 3.4 y 3.10

$$M36: \quad F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 573 \cdot 400 / 1,25 \text{ N} \quad 110 \text{ kN}$$

- Resistencia de cálculo a flexión de cada bulón. Tabla 3.10

$$M36: \quad 1,5(\pi \cdot 27^3 / 32) 240 / 1 \quad 696 \text{ kNm}$$

- Resistencia a aplastamiento del alma del perfil base ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como unión atornillada clase C. Tabla 3.4

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$M36: \quad L_j = 300,0 \quad \beta_{Lj} = 1 - (300,0 - 15 \cdot 27) / (200 \cdot 27) < 1 \quad \beta_{Lj} = 1,00$$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

$$M36 \text{ ext: } \alpha = \min \{ 150 / (3 \cdot 30); 150 / (3 \cdot 30) - 1/4; 1 \} \quad 1,00$$

$$M36 \text{ int: } \alpha = \min \{ 150 / (3 \cdot 30) - 1/4; 1 \} \quad 1,00$$

$$\alpha = \quad 1,00$$

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 2,5 \cdot 1,00 \cdot 27 \cdot 12 \cdot 400 / 1,25 \text{ N} \quad 259 \text{ kN}$$

- Resistencia a aplastamiento del alma del perfil base ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como bulón. Tabla 3.10

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 1,5 \cdot 1,00 \cdot 27 \cdot 12 \cdot 240 / 1,00 \text{ N} \quad 117 \text{ kN}$$

- Resistencia a aplastamiento de las cartelas ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como unión atornillada clase C. Tabla 3.4

Reducción de  $F_{b,Rd}$  por «unión larga» según el artículo 3.8:

$$M36: \quad L_j = 300,0 \quad \beta_{Lj} = 1 - (300,0 - 15 \cdot 27) / (200 \cdot 27) < 1 \quad \beta_{Lj} = 1,00$$

Cálculo de  $F_{b,Rd}$  según tabla 3.4 suponiendo  $k_1 = 2,5$ :

$$M36 \text{ ext: } \alpha = \min \{ 100 / (3 \cdot 27); 150 / (3 \cdot 27) - 1/4; 1 \} \quad 1,00$$

$$M36 \text{ int: } \alpha = \min \{ 150 / (3 \cdot 27) - 1/4; 1 \} \quad 1,00$$

$$\alpha = \quad 1,00$$

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 0,6 \cdot 2,5 \cdot 1,00 \cdot 27 \cdot 15 \cdot 400 / 1,25 \text{ N} \quad 194 \text{ kN}$$

- Resistencia a aplastamiento de las cartelas ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como bulón. Tabla 3.10

$$F_{b,Rd} = 1,00 \cdot 1,5 \cdot 1,00 \cdot 27 \cdot 15 \cdot 240 / 1,00 \text{ N} \quad 146 \text{ kN}$$

*Conjunto de la unión:*

- Solicitaciones de cálculo en cada bulón

$$V_{Ed} = 443,4/3 \quad 148 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = 148/2 \quad 73,9 \text{ kN}$$

$$|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}| = 73,9/110 \quad \underline{\underline{0,672 < 1}}$$

$$M_{Ed} = 148/8(12 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 15) \quad 849,8 \text{ kNm}$$

$$|M_{Ed}/M_{Rd}| = 849,8/695,7 \quad \underline{\underline{1,221 > 1}}$$

NO VÁLIDO

- Comprobación de cada bulón

$$|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}|^2 + |M_{Ed}/M_{Rd}|^2 = \quad \underline{\underline{1,942 > 1}}$$

NO VÁLIDO

- Comprobación del aplastamiento del alma del perfil base

$$148/117 \quad \underline{\underline{1,267 > 1}}$$

NO VÁLIDO

- Comprobación del aplastamiento de las cartelas

$$(148/2)/ 145,8 \quad \underline{\underline{0,507 < 1}}$$

*Conjunto de la unión. Comprobación como unión atornillada de clase C:*

- Solicitaciones de cálculo en cada tornillo

$$|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}| = 73,9/110 \quad \underline{\underline{0,672 < 1}}$$

- Comprobación del aplastamiento del alma del perfil base

$$148/259 \quad \underline{\underline{0,570 < 1}}$$

- Comprobación del aplastamiento de las cartelas

$$(148/2)/ 194 \quad \underline{\underline{0,380 < 1}}$$

**RESISTENCIA DE LA SECCION NETA según EC3 (UNE-ENV-1993-1-1: 1992):****art. 5.4.5.3 (3), 5.4.6 (8)**

## • Alma

$$V_{Ed} = (1/3)V_{pl,Rd} \quad 443 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = A_{V,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (8378 - 3 \cdot 39 \cdot 12) 430 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 1385 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = \quad \underline{\underline{0,320 < 1}}$$

## • Descontando el corte del ala

$$A_{v,f} = (8378 - 600 \cdot 12) / 2 \quad 589,0 \text{ mm}^2$$

$$A_{V,net} f_u = (600 - 20 - 19 - 3 \cdot 39) 12 + 589 \quad 5917 \text{ mm}^2$$

$$V_{Rd} = A_{V,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = 5917 \cdot 430 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 1175 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = \quad \underline{\underline{0,377 < 1}}$$

## • Cartelas

$$V_{Ed} = 0,5(1/3)V_{pl,Rd} \quad 222 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = A_{V,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (500 - 3 \cdot 39) 10 \cdot 430 / \sqrt{3} / 1,25 \quad 1141 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = \quad \underline{\underline{0,195 < 1}}$$

**RESISTENCIA A DESGARRO DEL ALMA según EC3 (UNE-ENV-1993-1-1: 1992):****art. 3.10.2**

## • Alma

— Área neta en tracción

$$A_{nt} = (132,5 - 0,5 \cdot 39) 12 \quad 1356,0 \text{ mm}^2$$

— Área neta solicitada a cortante

$$A_{v,f} = (8378 - 600 \cdot 12) / 2 \quad 589,0 \text{ mm}^2$$

$$A_{mv} = (600 - 150 - 2,5 \cdot 39) 12 + 589 \quad 4819 \text{ mm}^2$$

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot 430 \cdot 1356 / 1,25 + 1 / \sqrt{3} \cdot 275 \cdot 4819 / 1,0 = 233,2 + 765,1 \quad 998 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed} / V_{Rd}| = 443 / 998 \quad \underline{\underline{0,444 < 1}}$$



- Cartelas

— Área neta en tracción

$$A_{nt} = (132,5 - 0,5 \cdot 100)15 \quad 1237,5 \text{ mm}^2$$

— Área neta solicitada a cortante

$$A_{nv} = (500 - 100 - 2,5 \cdot 39)15 \quad 4537 \text{ mm}^2$$

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot 430 \cdot 1237,5/1,25 + 1/\sqrt{3} \cdot 275 \cdot 4537/1,0 = 212,9 + 720,4 \quad 933,3 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = (443/2)/933,3 \quad \underline{\underline{0,237 < 1}}$$

### RESISTENCIA A DESGARRO DEL ALMA según CTE DB SE A: art.8.5.2

- Alma

$$— V_{Rd} = A_v f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 8378 \cdot 275 / \sqrt{3} / 1,05 = 1330 / 1,05 \quad 1267 \text{ kN}$$

$$— V_{Rd} = A_{v,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (8378 - 3 \cdot 39 \cdot 12)510 / \sqrt{3} / 1,25 = \quad 1385 \text{ kN}$$

$$— V_{Rd} = A_{v,eff} f_y / \sqrt{3} / 1,05 = ((600 - 150)12 + 589 + 1356 f_u / f_y) f_y / \sqrt{3} / 1,05 = \quad 1278 / 1,05 = \quad 1226 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = 443/1226 \quad \underline{\underline{0,361 < 1}}$$

- Cartelas

$$— V_{Rd} = A_v f_y / \sqrt{3} / 1,05 = 7500 \cdot 275 / \sqrt{3} / 1,05 = 1191 / 1,05 \quad 1134 \text{ kN}$$

$$— V_{Rd} = A_{v,net} f_u / \sqrt{3} / 1,25 = (7500 - 3 \cdot 39 \cdot 15)430 / \sqrt{3} / 1,25 = \quad 1141 \text{ kN}$$

$$— V_{Rd} = A_{v,eff} f_y / \sqrt{3} / 1,05 = ((500 - 100)15 + 1237,5 f_u / f_y) f_y / \sqrt{3} / 1,05 = \quad 1260 / 1,05 = \quad 1200 \text{ kN}$$

$$|V_{Ed}/V_{Rd}| = (443/2)/1134 \quad \underline{\underline{0,195 < 1}}$$

### RESISTENCIA DE LA SOLDADURA:

- Solicitaciones de cálculo sobre cada una de las dos soldaduras:

$$V_{w,Ed} = 443,4/2 \quad 221,7 \text{ kN}$$

$$x = \quad 167,5 \text{ mm}$$

$$x_{max} = 167,5 + (100/2) - 39/2 \quad 198,0 \text{ mm}$$

$$M_{w,Ed} = 198,0 \cdot 221,7 / 1000 \quad 43,9 \text{ kNm}$$

- Tensión tangencial de cálculo de la soldadura según el artículo 4.5.3.3

$$f_{vw,d} = 430/(\sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 1,25) \quad 233,7 \text{ N/mm}^2$$

- Resistencia de la soldadura. Interacción momento y cortante

$$L = 500 - 2 \cdot 8 \quad 484 \text{ mm}$$

$$V_{w,Rd} = 8 \cdot 484 \cdot 233,7 / 1000 \quad 904,7 \text{ kN}$$

$$v = 221,7 / 904,7 \quad \underline{\underline{0,245 < 1}}$$

$$M_{w,Rd} = 8 \cdot 484^2 / 4 \cdot 233,7 / 1000000 \quad 109,5 \text{ kNm}$$

$$m = 43,9 / 109,5 \quad \underline{\underline{0,401 < 1}}$$

$$M_{w,V,Rd} = 109,5(1 - 0,245^2) \quad 102,9 \text{ kNm}$$

Interacción  $M/V$ : Las dos comprobaciones que siguen son equivalentes (interacción  $M/V$  en una sección rectangular).

$$M_{w,Ed} / M_{w,V,Rd} = \quad \underline{\underline{0,427 < 1}}$$

$$m + v^2 = \quad \underline{\underline{0,461 < 1}}$$

### **RESISTENCIA DE LAS CARTELAS:**

- Interacción momento y cortante

$$V_{pl,Rd} = 15 \cdot 500 \cdot 275 / 1 / \sqrt{3} / 1000 \quad 1190,8 \text{ kN}$$

$$v = 221,7 / 1190,8 \quad \underline{\underline{0,186 < 1}}$$

$$M_{pl,Rd} = 15 \cdot 500^2 / 4 \cdot 275 / 1000000 \quad 257,8 \text{ kNm}$$

$$m = 43,9 / 257,8 \quad \underline{\underline{0,170 < 1}}$$

$$M_{pl,V,Rd} = 257,8(1 - 0,186^2) \quad 248,9 \text{ kNm}$$

Interacción  $M/V$ : Las dos comprobaciones que siguen son equivalentes (interacción  $M/V$  en una sección rectangular).

$$M_{Ed} / M_{pl,V,Rd} = \quad \underline{\underline{0,176 < 1}}$$

$$m + v^2 = \quad \underline{\underline{0,205 < 1}}$$

- Abolladura zona comprimida

Sólo se comprueba si  $\lambda > 20$

$$L_k = 0,7 \cdot 198,0 \quad 138,6$$

$$I = 1/12 \cdot 1 \cdot 15^3 \quad 281,3$$

$\lambda = 1 \cdot 15$	15,0
$I = \sqrt{281,3/15}$	4,3
$\lambda = 176,5/4,3$	<b><u>32,0 &gt; 20</u></b>

NO SE CUMPLE

De forma muy conservadora se hace la siguiente comprobación para no chequear expresamente la abolladura

$t(\lambda = 20) = 15 \cdot 32,0/20$	24,0
$M_{V,Rd} = 248,9(15/24,0)^2$	97,2 kNm
$M_{Ed}/M_{V,Rd} = 43,9/97,2$	<b><u>0,452 &lt; 1</u></b>

Segunda comprobación de la abolladura. Como este chequeo es menos conservador que el primero es necesario ajustar con más precisión el valor de la longitud de pandeo. Se asume para una banda de ancho unidad el modo de pandeo de un elemento empotrado-articulado traslacional de axil variable para el cual

$L_k = 1,25 \cdot 252,2$	247,5
$\frac{N_{cr}}{\bar{\lambda}}$	9516,1
$\bar{\lambda}$	0,658
$\alpha$ (curva c)	0,490
$\chi$	0,750
$M_{V,Rd} = 248,9 \cdot 0,75$	186,7 kNm
$M_{Ed}/M_{V,Rd} = 43,9/186,7$	<b><u>0,235 &lt; 1</u></b>

### 6.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN <http://catedracero.ee.upm.es>, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR

#### 6.3.1 Consideraciones generales

Las notas generales del apartado 2.3 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten. A continuación realizan algunas aclaraciones particulares sobre el libro que permite comprobar la unión tipo EB.

### 6.3.2 Datos

La unión, siguiendo los criterios generales, se define en la hoja DATOS. Como es habitual aquí se definen tanto las calidades de los materiales de los distintos elementos que constituyen la unión, como la geometría de los mismos: perfil base, cartelas y bulones. El número pasadores se limita a ocho filas y una sola columna.

Los datos con los que se ha cumplimentado la hoja DATOS del fichero que se distribuye en <http://catedracero.ee.upm.es> corresponden al cálculo realizado previamente.


### 6.3.3 Resultados

*Comprobaciones del estado límite último:*

En la hoja PP se realizan las comprobaciones  $|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}| \leq 1$ ,  $|M_{Ed}/M_{Rd}| \leq 1$  y  $|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}|^2 + |M_{Ed}/M_{Rd}|^2 \leq 1$  para el bulón según la tabla 3.10 de EN 1993-1-8:2005, y también la comprobación  $|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}| \leq 1$  como unión atornillada según la tabla 3.4 de EN 1993-1-8:2005. Del mismo modo, la comprobación del aplastamiento de la chapa,  $|F_{v,Ed}/F_{b,Rd}| \leq 1$ , se hace como unión atornillada y como pasador de acuerdo con las dos tablas anteriores.

Las comprobaciones de la sección neta y del desgarro del alma del perfil base y las cartelas se realiza como es también habitual en la hoja CHAPA y en la hoja NUDO se comprueban tanto las soldaduras como el aplastamiento de las cartelas.

Las figuras que siguen son varias hojas de libro de cálculo LB, particularizadas para el diseño 6.2.



Catedra Acero

**CÁLCULO DE UNIONES ARTICULADAS E008**

**TÍTULO CÓDIGO 080801**

09/17/08 hoja 2/6

Solicitaciones de primer orden:				Segundo orden:			
$N_{Ed}$	$V_{Ed}$	$M_{Ed}$		X	1/X-1	(1/X-1)/N/A	$M_0$
0	443,4	0		1	0,00	0	0

Solicitaciones totales:							
$N_{Ed}$	$V_{Ed}$	$M_{Ed}$		$Y_{red}$	$N_{E,ver}$	$V_{E,ver}$	$M_{E,ver}$
0	443,4	0,0		1,4	0	316,7	0,0

**Perfiles:**

**Acero:**

id	$f_y$	$f_t$	$Y_M$	$f_{Ed}$
S275	275	430	1	275

**Perfil base:**

id	h	b	A	$A_{vc}$	$W_{pl,y}$	$t_f$	$t_w$	r	$h_f$	$h_b$	g
IPE600	600	220	156	83,78	3512,0	19	12	24	562	698,17	35

**Acero:**

id	$f_y$	$f_t$	$Y_M$	$f_{Ed}$
S275	275	430	1	275

**Soldaduras:**

a	$Y_{M2}$	$\beta_w$
8	1,25	0,85

**Cartelas:**

id	$L_x$	$L_y$	t	$L_z$	c
2P500-300-15	500	300	15	100	1

**TR**

**Acero TR:**

id	$f_y$	$f_t$	$Y_{M2}$	$Y_M$
A4.6	240	400	1,25	1

**TR alma:**

id	d	$d_0$	$A_0$	A	$F_{V,Rd}$	$M_{0d}$	$F_{t0,0,Rd,max}$	$F_{t0,1,Rd,max}$	$F_{t0,2,Rd,max}$	$F_{t0,3,Rd,max}$
M36	36	39	855	1018	195	1649	194	156	259	346

08-099-001-21 1.00-3P12322001  
 1.0.200.38.101 1.0.200.38.101 1.0.1.0.00.38.101.2 2.0.0.00.38.101.2

**Distancias:**

**TR alma:**

id	$n_x$	$e_x$	$e_y$	$\rho_x$	x	$e_{xb}$	$n_y$	$e_y$	$m_y$	$p_y$	$e_{yb}$
M36	1	132,5	102	0	167,5	132,5	3	100	131,0	150,0	150,0

FIGURA 34: HOJA DATOS PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 6.2.1

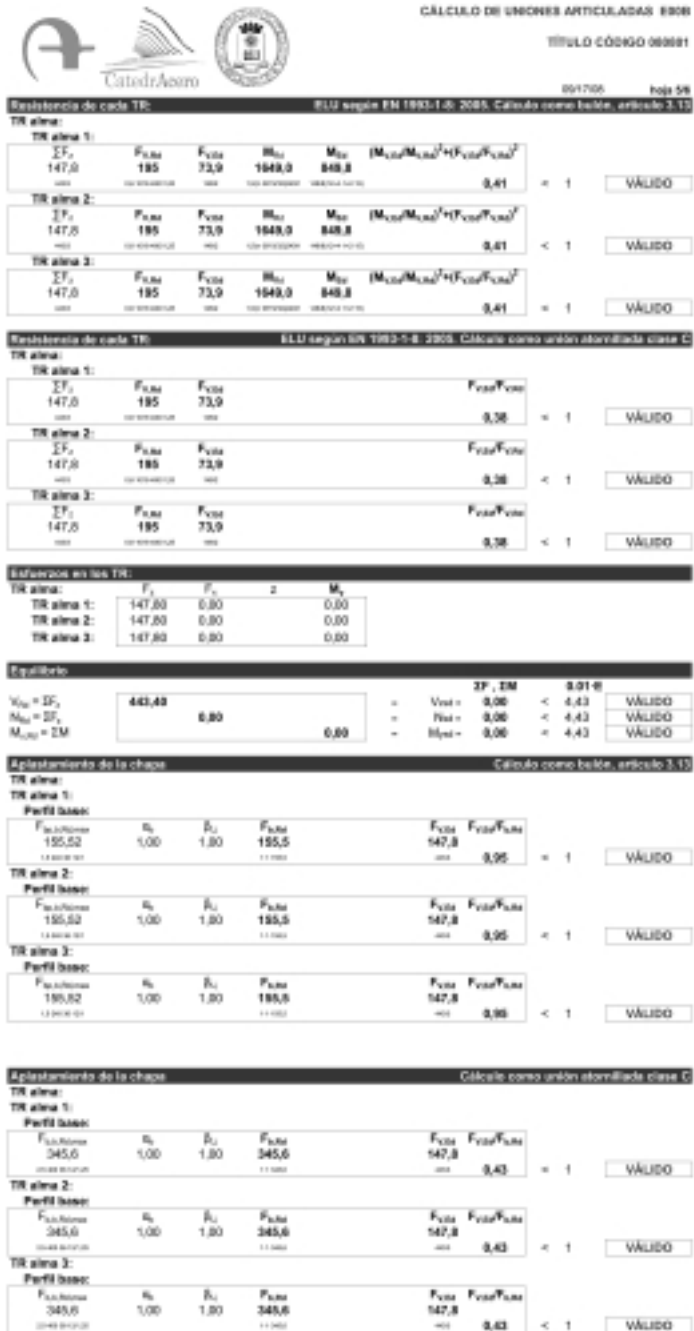


FIGURA 35: HOJA EB PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 6.2.1



Catedra Acero



CÁLCULO DE UNIONES ARTICULADAS E33E

05/17/2018 Hoja 6/6

Resistencia de la sección neta						
<b>Perfil base</b>						
<b>Alma:</b>						
$V_{Ed}$	$V_{Ed}$	$V_{Ed}/V_{Ed}$				
443,40	1385,19	0,32	<	1	VÁLIDO	
<b>Cartelas</b>						
<b>Alma:</b>						
$V_{Ed}$	$V_{Ed}$	$V_{Ed}/V_{Ed}$				
221,70	1141,81	0,19	<	1	VÁLIDO	
Resistencia a desgarro del alma						EN 1993-1-3:2005
<b>Perfil base</b>						
$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$		
443,40	795,12	233,23	996,35	0,44	<	1
<b>Cartelas</b>						
$V_{Ed}$	$V_{Rd1}$	$V_{Rd2}$	$V_{Ed}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$	<	1
221,70	728,42	212,89	933,27	0,24		
Resistencia a desgarro del alma						CTE DB SE A
<b>Perfil base</b>						
$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$				
443,40	1330,19	0,33	<	1	VÁLIDO	
$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$				
443,40	1385,19	0,32	<	1	VÁLIDO	
$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$				
443,40	1287,52	0,34	<	1	VÁLIDO	
<b>Cartelas</b>						
$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$				
221,70	1190,78	0,19	<	1	VÁLIDO	
$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$				
221,70	1141,81	0,19	<	1	VÁLIDO	
$V_{Ed}$	$V_{Rd}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$				
221,70	1256,85	0,18	<	1	VÁLIDO	

FIGURA 36: HOJA CHAPA PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 6.2.1.

### 6.3.4 Variaciones sobre el diseño E00B

En las figuras 36 se incluyen algunas variaciones de la unión estudiada. Los cálculos no difieren de los realizados en este capítulo por lo que no se repiten. Sin embargo, si se han desarrollado los libros de cálculo correspondientes accesibles en <http://catedracero.ee.upm.es>. Las observaciones realizadas en el apartado 5.3.4 referidas al despalmillado son directamente aplicables aquí.

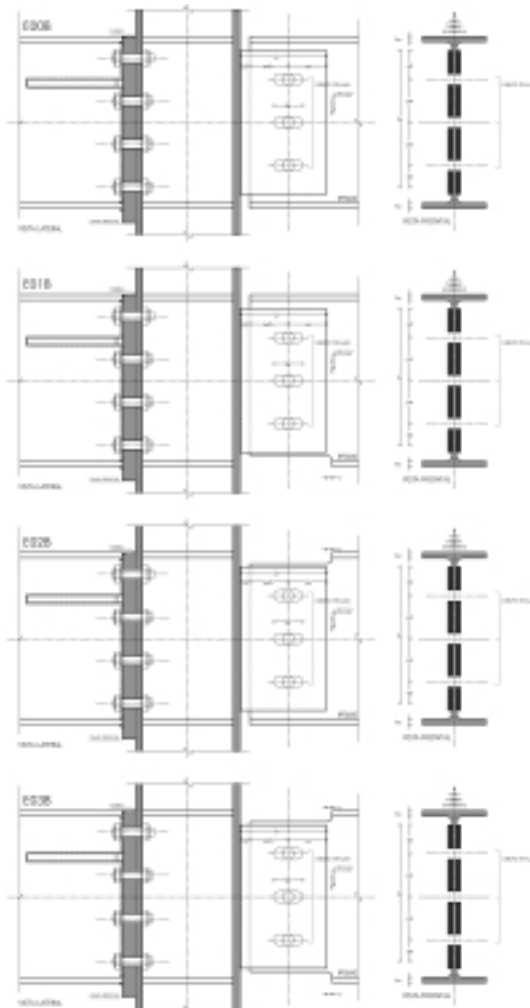


FIGURA 36: VARIACIONES DEL DISEÑO E00B.



#### **6.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD**

En este tipo de unión la principal cuestión a verificar debería ser el cumplimiento de requisitos para la durabilidad: condiciones de protección frente a la corrosión, ubicación en un ambiente protegido, e inaccesibilidad de humedades exteriores o interiores de la edificación. De otro modo las prestaciones cinemáticas, e incluso estáticas, de la unión pueden quedar seriamente comprometidas durante la vida útil del edificio.

# 7. Uniones articuladas de grandes prestaciones, tipo P00P

## 7.1 DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN

La noción de «nudo articulado» está muy desvirtuada por el uso de dicha denominación en teoría de estructuras para referirse a enlaces entre piezas de mallas trianguladas que, en la práctica, se materializan casi siempre como auténticos nudos rígidos. Gracias a la forma de estas estructuras las solicitaciones de cortante y flexión son «secundarias», es decir, de pequeño valor y carácter exclusivamente hiperestático, y por lo tanto «no necesarias» para establecer el equilibrio general y local de la estructura. Basta que en los nudos se transfieran únicamente los esfuerzos axiales de las barras para garantizar dicho equilibrio. Se trata en tal caso de uniones que en absoluto permiten giros relativos de los ejes de las barras concurrentes, pero que se calculan como si así fuera, siempre con las limitaciones impuestas por la normativa y las reglas buena práctica de proyecto y construcción. Dichas uniones «rígidas pero estáticamente articuladas», pueden ser indistintamente soldadas o atornilladas, y a su vez éstas pueden corresponder a las categorías «FB» o «LB» de estos Manuales, según convenga en cada caso.

En los dos capítulos precedentes de este Manual, se han considerado dos clases de uniones articuladas «no rígidas», es decir, uniones que realmente permiten ciertos grados de libertad de movimientos relativos entre las piezas unidas, los cuales se cuantifican numéricamente como parte de las «prestaciones» de la unión, que incluyen por lo tanto no sólo aspectos «estáticos» (capacidad resistente ante ciertas clases de solicitaciones), sino, además, «cinemáticos» (capacidad para permitir ciertos movimientos relativos de las piezas concurrentes, dentro de unos márgenes preestablecidos).

Otros tipos de enlaces que ocasionalmente pueden aportar prestaciones tanto «cinemáticas» como «estáticas», son los de la estructura metálica con su cimentación o infraestructura. Ahí son factibles uniones «empotradas»: por ejemplo, las clásicas basas ancladas, proyectadas y construidas debidamente (adverbio este último que apunta a la gran mayoría de entre las diversas incidencias constructivas en edificación metálica). También existen una diversidad de aparatos de apoyo que permiten rotaciones y/o desplazamientos: apoyos de neopreno zunchado, libres o anclados; apoyos de elastómero y teflón, fijos, libres o guiados; etc., que

permiten materializar con bastante fidelidad los apoyos teóricos articulados deslizantes o fijos (aunque nunca con absoluta ausencia de componentes de reacción parásitas no deseadas). Los apoyos articulados fijos pueden también materializarse fácilmente con «bulones» que permiten rotaciones entre el soporte y la placa de apoyo, pero no desplazamientos.

Ese último enlace indicado en el párrafo anterior pertenece a la categoría de articulaciones «auténticas», entendiéndose por tales aquéllas en las que existe un eje de giro materializado físicamente con un único bulón o «pasador», y éste es el tipo de unión al que se dedica este último capítulo del Manual. Naturalmente cada categoría de uniones es un pequeño microcosmos en el que existe siempre una gran diversidad de opciones, que no puede agotarse con un caso práctico y un conjunto de reglas de diseño, quedando siempre abierta a las exigencias de cada caso concreto y a la creatividad y buen oficio del proyectista. Se ha elegido una unión de este tipo sometida a un esfuerzo muy considerable, la carga compresora de un soporte singular y muy solicitado.

No es frecuente en edificación realizar uniones articuladas «auténticas» entre elementos estructurales, que no sean tensores o arriostramientos de reducida sollicitación. Incluso en éstos, la utilización de dicho tipo de uniones queda generalmente reservada a elementos vistos, con relevancia arquitectónica, que se unen al entramado metálico principal mediante horquillas y orejetas homologadas por diversos fabricantes. Las prestaciones resistentes, generalmente reducidas, de dicho tipo de uniones son relativamente fáciles de reproducir empleando materiales genéricos (pasadores, varillas roscadas, manguitos, tensores de rosca, pasadores, etc.), con diseños y procedimientos de uso abierto (no sujetos a patente), manteniendo sus ventajas constructivas (facilidad de puesta en obra, tolerancias dimensionales y, en su caso, de orientación, etc.). Sin embargo, no puede decirse lo mismo de su aspecto terminado, que difícilmente podrá competir con el de marcas especializadas en este tipo de productos, a las que se recomienda acudir en caso de tratarse de elementos cuyas cualidades estéticas sean determinantes por encima de su coste. En cualquier caso, este tipo de uniones no se contemplan en el presente Manual.

Los aceros empleados en los bulones, siempre que las sollicitaciones sean reducidas, son habitualmente los 4.6 y 5.6 (EN 1993-1-8; UNE-EN-ISO-898-1:2000; C.T.E.), adoptados ya en el capítulo anterior de este Manual. Se emplean también pasadores de acero templado según DIN 6325, hasta diámetros de 20 o 30 mm. Los pasadores hasta  $\phi 100$  mm pueden especificarse según DIN 1433, que permite indicar calidades de material similares, a efectos del cálculo, a las de los aceros estructurales usuales, por ejemplo las del S355. Los bulones de mayor diámetro están regulados por la norma UNE 36-012, con calidades superiores, por ejemplo F1262-32 NiCrMo 12, con  $f_y = 735$  N/mm<sup>2</sup> y  $f_u = 930$  N/mm<sup>2</sup>. Los extremos de los bulones

deben sujetarse con elementos apropiados, que para el caso de grandes diámetros pueden ser una «tapa» de mayor diámetro en cada extremo de espesor #20 a #25 mm, atornillada en el eje del bulón con un tornillo pretensado (típicamente  $M24$  a  $M30$  de calidad  $A10.9$ , con arandela de presión: véase la figura 44.

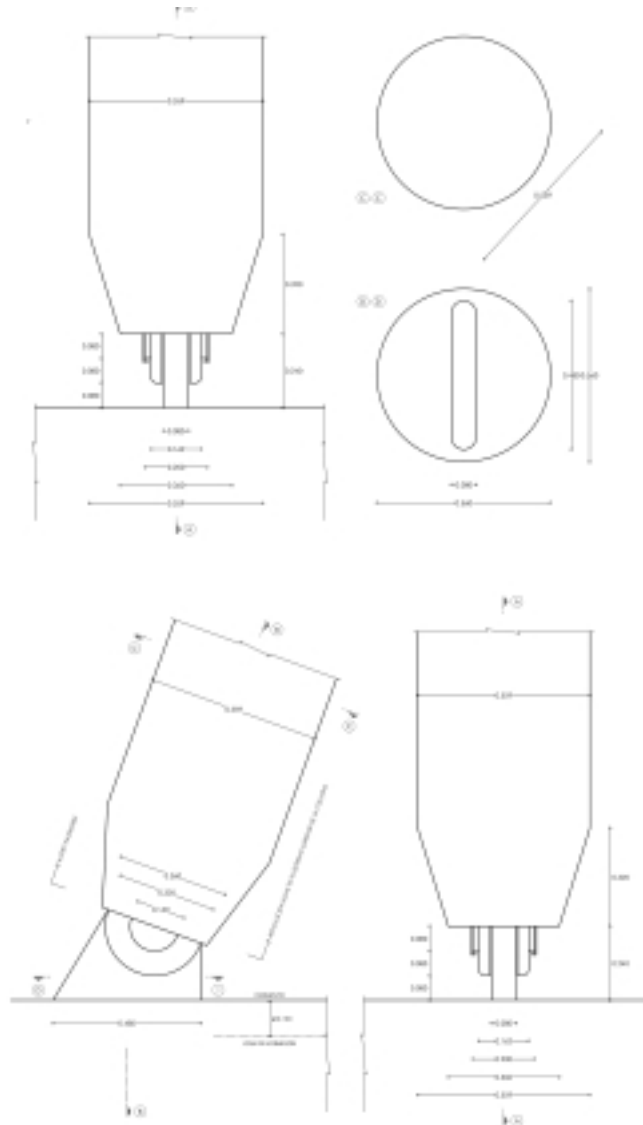


FIGURA 37: APOYO ARTICULADO.



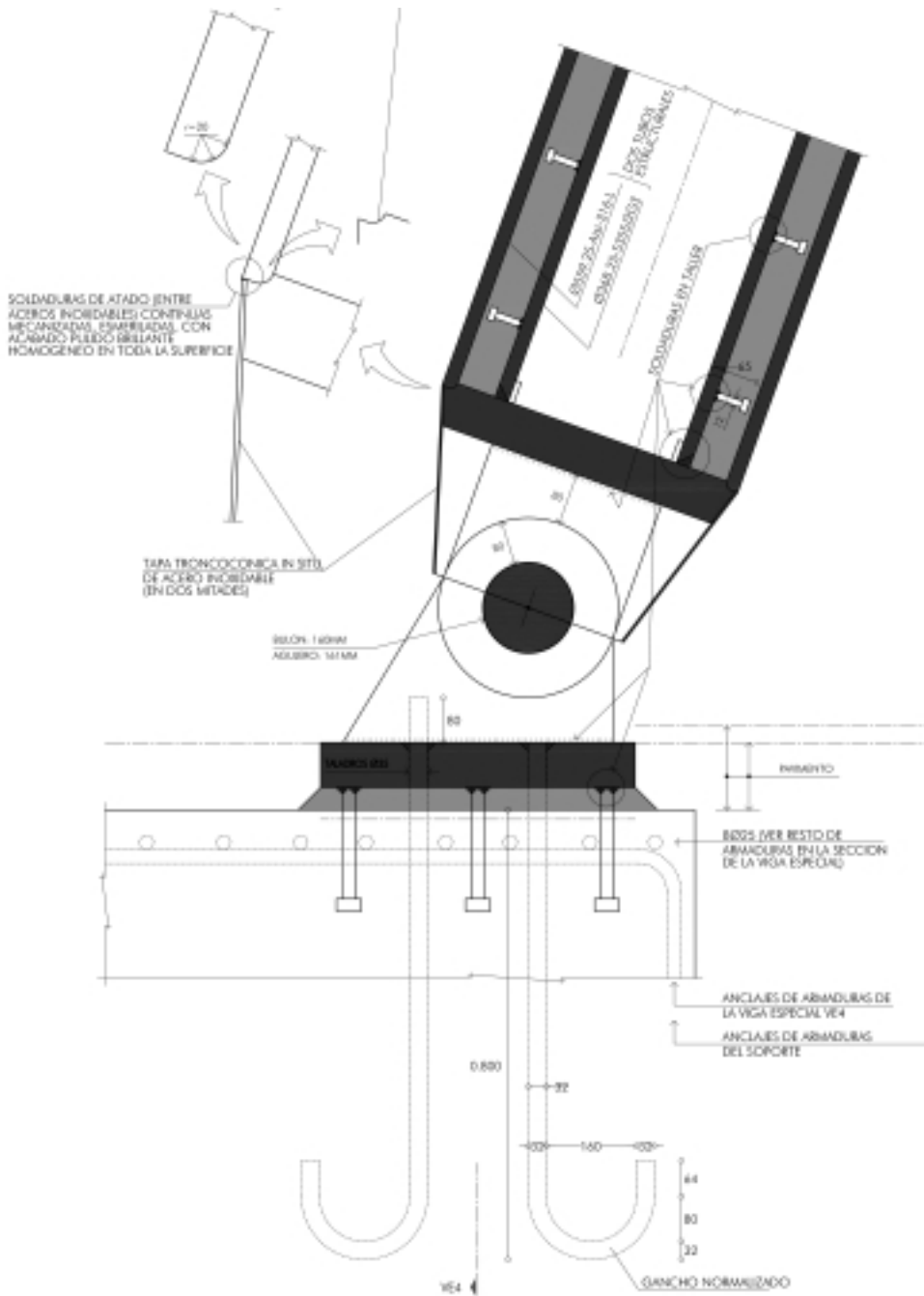


FIGURA 39: APOYO ARTICULADO.

## 7.2 EJEMPLO NUMÉRICO DESARROLLADO

En este apartado se desarrollan los cálculos para la unión particular que se describe a continuación. La mayoría de los comentarios a estos cálculos, comunes al resto de uniones que se estudian en otros capítulos, pueden encontrarse en el apartado 2.2.

### P00P (S355)

La unión se emplea para materializar el apoyo articulado fijo de un soporte singular, ligeramente inclinado, y considerablemente solicitado.

<b>BULÓN</b>			
S355J2G3 (EN 1993-1-1:2005 tabla 3.1)			
Valores característicos (N/mm <sup>2</sup> )		Nivel de control	Coeficientes de ponderación
Tensión de rotura	Límite elástico		
$f_{ub} = 490$ 40mm < t < 80mm	$f_{yb} = 335$ 40mm < t < 80mm	Intenso	$\gamma_{M2} = 1,25$
Diámetro (d) 160 mm			
Ensayos adicionales a nivel «Total» (100%), tanto en la dirección de laminación como en la dirección perpendicular de: características mecánicas, resiliencia, control ultrasónico, composición química. Control radiográfico y/o ultrasónico equivalente de todas las soldaduras al 100%			

<b>Definición de la Unión: E00B IPE 600 (S275)</b>			
<b>Cartelas Exteriores S355J2G3</b>		<b>Cartela Interior S355J2G3</b>	
Valores característicos (N/mm <sup>2</sup> )		Valores característicos (N/mm <sup>2</sup> )	
Tensión de rotura $f_{ub} = 490$ 40mm < t < 80mm	Tensión de rotura $f_{ub} = 490$ 40mm < t < 80mm	Límite elástico $f_{yb} = 335$ 40mm < t < 80mm	Tensión de rotura $f_{ub} = 490$ 40mm < t < 80mm
2 # 320·400·45		Según plano	
Holguras de montaje $c = 1$ mm EN 1993-1-8:2005 figura 3.11		Holguras de montaje $c = 1$ mm EN 1993-1-8:2005 figura 3.11	
Distancia del taladro al borde de la cartela en la dirección $x$ , $a = 80$ mm EN 1993-1-8:2005 figura 3.11		Distancia del taladro al borde de la cartela en la dirección $x$ , $a = 80$ mm EN 1993-1-8:2005 figura 3.11	
Distancia del taladro al borde de la cartela en la dirección $y$ , $c = 80$ mm EN 1993-1-8:2005 figura 3.11		Distancia del taladro al borde de la cartela en la dirección $y$ , $c = 80$ mm EN 1993-1-8:2005 figura 3.11	
$e_x = 160$ mm $e_y = 160$ mm $d_0 = 163$ mm		$e_x = 160$ mm $e_y = 160$ mm $d_0 = 163$ mm	
Ensayos adicionales a nivel «Total» (100%), tanto en la dirección de laminación como en la dirección perpendicular de: características mecánicas, resiliencia, control ultrasónico, composición química. Control radiográfico y/o ultrasónico equivalente de todas las soldaduras al 100%			

**Solicitaciones nominales de la unión:**

$$N_{Ed} =$$

$$-4620,0 \text{ kN}$$

$$\gamma_f = 1,40$$



**ELU según EN 1993-1-8:2005***Cálculos preliminares:*

- Resistencia de cálculo a cortante de cada bulón. Tablas 3.10

$$\begin{aligned} \phi 160: \quad A &= \pi \cdot 16,0^2/4 && 20100 \text{ mm}^2 \\ F_{v,Rd} &= 0,6 \cdot 20100 \cdot 490/1,25 \text{ N} && 4730 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Resistencia de cálculo a flexión de cada bulón. Tabla 3.10

$$\begin{aligned} \phi 160: \quad W_{el} &= \pi \cdot 160^3/32 && 402125 \text{ mm}^3 \\ M_{Rd} &= 1,5(\pi \cdot 160^3/32)335/1\text{N} \cdot \text{mm} && 202 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Resistencia a aplastamiento del alma de la cartela interior ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como bulón. Tabla 3.10

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot 335 \cdot 160 \cdot 80/1,00 \text{ N} \quad 6432 \text{ kN}$$

Donde, de acuerdo con la tabla 3.10, en el cálculo debe tomarse el menor  $f_y$  de entre los límites elásticos del bulón y la cartela.

- Resistencia a aplastamiento de las cartelas exteriores ( $F_{b,Rd}$ ). Cálculo como bulón. Tabla 3.10

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot 335 \cdot 160 \cdot 45/1,00 \text{ N} \quad 3618 \text{ kN}$$

- Distancia mínima desde el borde del taladro al borde exterior de la cartela interior en la dirección de transmisión del esfuerzo

$$a > F_{Ed}/(2 \cdot t \cdot f_{yd}) + 2 \cdot d_0/3 = 4620 \cdot 1000/(2 \cdot 80 \cdot 335) + 2 \cdot 163/3 \quad 195 \text{ mm}$$

- Distancia mínima desde el borde del taladro al borde exterior de la cartela interior en la dirección perpendicular a la de transmisión del esfuerzo

$$c > F_{Ed}/(2 \cdot t \cdot f_{yd}) + d_0/3 = 4620 \cdot 1000/(2 \cdot 80 \cdot 335) + 163/3 \quad 141 \text{ mm}$$

- Distancia mínima desde el borde del taladro al borde exterior de la cartela interior en la dirección de transmisión del esfuerzo

$$a > F_{Ed}/(2 \cdot t \cdot f_{yd}) + 2 \cdot d_0/3 = (4620/2) \cdot 1000/(2 \cdot 45 \cdot 335) + 2 \cdot 163/3 \quad 186 \text{ mm}$$

- Distancia mínima desde el borde del taladro al borde exterior de la cartela interior en la dirección perpendicular a la de transmisión del esfuerzo

$$c > F_{Ed}/(2 \cdot t \cdot f_{yd}) + d_0/3 = (4620/2)1000/(2 \cdot 45 \cdot 335) + 163/3 \quad 131\text{mm}$$

Estas distancias sólo se aplican en uniones traccionadas. Evidentemente en este caso el soporte no tira de la cartela por lo que no existe posibilidad de desgarro de ésta.

### Conjunto de la unión:

- Solicitaciones de cálculo en cada bulón

$$\begin{aligned} N_{Ed} &= & 4620 \text{ kN} \\ F_{v,Ed} &= 4620/2 & 2310 \text{ kN} \\ M_{Ed} &= 4620/8(80 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 45) & 100, 5 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Comprobación del bulón

$$\begin{aligned} |F_{v,Ed}/F_{v,Rd}| &= 2310/4730 & \mathbf{0,488 < 1} \\ |M_{Ed}/M_{Rd}| &= 100,5/200 & \mathbf{0,497 < 1} \\ |F_{v,Ed}/F_{v,Rd}|^2 + |M_{Ed}/M_{Rd}|^2 &= & \mathbf{0,486 < 1} \end{aligned}$$

- Comprobación del aplastamiento de la cartela interior

$$4620/6432 \quad \mathbf{0,718 < 1}$$

- Comprobación del aplastamiento de las cartelas

$$(4620/2)/3618 \quad \mathbf{0,638 < 1}$$

## RESISTENCIA DE LAS CARTELA EXTERIORES

- Solicitaciones

$$N_{Ed} = 4620/2 \quad 2310 \text{ kN}$$

De acuerdo con la tabla 5.1 y la figura 5.4 del artículo 5.3.2 de EN 1993-1-1:2005

$$e_0/L = 1/200$$

$$V_{Ed} = 4 \cdot 2310/200 \quad 46,2 \text{ kN}$$

$$x = l_x - a - d_0 = 400 - 78,5 - 163 \quad 158,5 \text{ mm}$$

$$M_{Ed} = 46,2 \cdot 158,5 \quad 7,32 \text{ kNm}$$

Cálculo alternativo. Partiendo del valor de  $\chi$  del soporte se determina  $e_0 = (1/\chi - 1)$

W/A. Asumiendo las mismas condiciones de apoyo en el otro extremo del soporte y

una deformada senoidal, la tangente de la deformada en el origen vale  $z' = e_0/(L/\Pi)$  y  $V = N \cdot z'$  o  $M = N \cdot z' \cdot x$ . Partiendo de  $\bar{\lambda} = L/(i \cdot \lambda_1)$  se escribe  $L/\Pi = \bar{\lambda} \cdot i \cdot \sqrt{(E/f_y)}$ , donde se han tomado las expresiones 6.51 y las siguientes de EN 1993-1-1:2005. Sólo queda calcular  $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}(\chi)$  siguiendo el proceso inverso al descrito en el apartado 6.3.1.2 de EN 1993-1-1:2005.

- Resistencia de cada cartelas # 320·400·45:

$$\begin{aligned} N_{pl,Rd} &= 320 \cdot 45 \cdot 335 // 1000 && 4824 \text{ kN} \\ V_{pl,Rd} &= 320 \cdot 45 \cdot 335 / 1 / \sqrt{3} // 1000 && 2785 \text{ kN} \\ M_{pl,Rd} &= (320 \cdot 45^2 / 4) 335 / 1000000 && 54,3 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Comprobación de resistencia

$$\begin{aligned} n &= N_{Ed} / N_{pl,Rd} = 2310 / 4824 && \underline{\underline{0,479 < 1}} \\ v &= V_{Ed} / V_{pl,Rd} = 46,2 / 2785,14 && \underline{\underline{0,017 < 1}} \\ m &= M_{Ed} / M_{pl,Rd} = 7,32 / 54,27 && \underline{\underline{0,135 < 1}} \end{aligned}$$

- Interacción momento y axil

$$m + n^2 = \underline{\underline{0,364 < 1}}$$

Comprobación del pandeo de la chapa

En primer lugar se verifica si  $\lambda > 20$

$$\begin{aligned} L_k &= 2 \cdot 158,5 && 317,0 \\ I &= 1 / 12 \cdot 1 \cdot 45^3 && 7594 \\ A &= 1 \cdot 45 && 45,0 \\ i &= \sqrt{7594 / 45} && 13,0 \\ \lambda &= 317,0 / 13,0 && \underline{\underline{24,4 > 20}} \end{aligned}$$

NO SE CUMPLE

De forma muy conservadora se hace la siguiente comprobación para no chequear expresamente el pandeo del elemento

$$\begin{aligned} t(\lambda = 20) &= 45 \cdot 24,4 / 20 && 54,9 \text{ mm} \\ M_{Rd} &= 54,3 (45 / 54,9)^2 && 36,5 \text{ kNm} \\ m &= M_{Ed} / M_{pl,Rd} = 7,32 / 36,45 && \underline{\underline{0,201 < 1}} \\ m + n^2 &= && \underline{\underline{0,430 < 1}} \end{aligned}$$

Aunque no es normativamente exigible se considera una excentricidad adicional mínima de 10mm

- Solicitaciones

$$M_{Ed} = 7,3 + 10(4620/2)/1000 \quad 30,4 \text{ kNm}$$

- Comprobación de resistencia

$$m = M_{Ed}/M_{pl,Rd} = 30,4/54,27 \quad \underline{\underline{0,561 < 1}}$$

- Interacción momento y axil

$$m + n^2 = \quad \underline{\underline{0,790 < 1}}$$

- Comprobación del pandeo de la chapa

$$M_{Rd} = 54,3(45/54,9)^2 \quad 36,5 \text{ kNm}$$

$$m = M_{Ed}/M_{pl,Rd} = 30,4/36,45 \quad \underline{\underline{0,835 < 1}}$$

$$m + n^2 = \quad \underline{\underline{1,064 \approx 1}}$$

- Comprobación alternativa del pandeo de la chapa

$$N_{cr} = \quad 156,6 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \quad 0,310$$

$$\alpha \text{ (curva c)} = \quad 0,490$$

$$\chi = \quad 0,994$$

$$n/\chi + m = \quad \underline{\underline{1,068 \approx 1}}$$

### **RESISTENCIA DE LA CARTELA INTERIOR:**

- Solicitaciones

$$N_{Ed} = \quad 4620 \text{ kN}$$

De acuerdo con la tabla 5.1 y la figura 5.4 del artículo 5.3.2 de EN 1993-1-1:2005

$$e_0/L = \quad 1/200$$

$$V_{Ed} = 4 \cdot 4620/200 \quad 92,4 \text{ kN}$$

$$x = 540 - 78,5 - 163 \quad 298,5 \text{ mm}$$

$$M_{Ed} = 92,4 \cdot 300 \quad 35,1 \text{ kNm}$$

- Resistencia de cada cartelas.

Se comprueba la sección más solicitada de dimensiones 480·80:

$$\begin{aligned} N_{pl,Rd} &= 480 \cdot 80 \cdot 335 // 1000 && 12864 \text{ kN} \\ V_{pl,Rd} &= 480 \cdot 80 \cdot 335 / 1 / \sqrt{3} / 1000 && 7427 \text{ kN} \\ M_{pl,Rd} &= (480 \cdot 80^2 / 4) 335 / 1000000 && 257,3 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Comprobación de resistencia

$$\begin{aligned} n &= N_{Ed} / N_{pl,Rd} = 4620 / 12864 && \underline{\underline{0,359 < 1}} \\ v &= V_{Ed} / V_{pl,Rd} = 92,4 / 7427 && \underline{\underline{0,012 < 1}} \\ m &= M_{Ed} / M_{pl,Rd} = 35,11 / 257,3 && \underline{\underline{0,136 < 1}} \end{aligned}$$

- Interacción momento y axil

$$m + n^2 = \underline{\underline{0,265 < 1}}$$

- Comprobación del pandeo de la chapa

En primer lugar se verifica si  $\lambda > 20$

$$\begin{aligned} L_k &= 2 \cdot 298,5 && 597,0 \\ I &= 1 / 12 \cdot 1 \cdot 80^3 && 42667 \\ A &= 1 \cdot 80 && 80,0 \end{aligned}$$

$$i = \sqrt{42667 / 80} \quad 23,1$$

$$\lambda = 597,0 / 23,1 \quad \underline{\underline{25,9 > 20}}$$

NO SE CUMPLE

De forma muy conservadora se hace la siguiente comprobación para no chequear expresamente el pandeo del elemento

$$\begin{aligned} t(\lambda = 20) &= 80 \cdot 25,9 / 20 && 103,4 \text{ mm} \\ M_{Rd} &= 257,3 (80 / 103,4)^2 && 154,0 \text{ kNm} \\ m &= M_{Ed} / M_{pl,Rd} = 35,11 / 154,0 && \underline{\underline{0,228 < 1}} \\ m + n^2 &= && \underline{\underline{0,357 < 1}} \end{aligned}$$

Cálculo con una excentricidad mínima  $e_{\min} = 20 \text{ mm}$ .

- Solicitaciones

$$M_{Ed} = 35,11 + 20 \cdot 4620 / 1000 \quad 127,5 \text{ kNm}$$

- Comprobación de resistencia

$$m = M_{Ed}/M_{pl,Rd} = 127,5/257,3 \quad \mathbf{0,496 < 1}$$

- Interacción momento y axil

$$m + n^2 = \quad \mathbf{0,625 < 1}$$

- Comprobación del pandeo de la chapa

$$M_{Rd} = 257,3(80/103,4)^2 \quad 154,0 \text{ kNm}$$

$$m = M_{Ed}/M_{pl,Rd} = 127,5 / 154,0 \quad \mathbf{0,828 < 1}$$

$$m + n^2 = \quad \mathbf{0,957 < 1}$$

- Comprobación alternativa del pandeo de la chapa

$$N_{cr} = \quad 248,1 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \quad 0,329$$

$$\alpha \text{ (curva c)} = \quad 0,490$$

$$\chi = \quad 0,934$$

$$n/\chi + m = \quad \mathbf{0,880 < 1}$$

### 7.3 EXPLICACIÓN DEL USO DEL LIBRO DE CÁLCULO DISPONIBLE EN <http://catedracero.ee.upm.es>, CON REFERENCIA AL MISMO EJEMPLO ANTERIOR

#### 7.3.1 Consideraciones generales

Las notas generales del apartado 2.3 son directamente aplicables a esta unión por lo que no se repiten. A continuación realizan algunas aclaraciones particulares sobre el libro que permite comprobar la unión tipo P00P.

#### 7.3.2 Datos

La unión, siguiendo los criterios generales, se define en la hoja DATOS. Debe introducirse el diámetro del bulón y la geometría de las cartelas de la unión, además de la clase de sus respectivos aceros. Debe indicarse además el perfil base para hacer los cálculos alternativos

de  $V_{Ed}$  someramente descritos en el apartado anterior en el cual se comprobaron las cartelas exteriores. Los anchos de la garganta de soldadura permite comprobar éstas en uniones menores que la del apartado anterior, en las cuales que pueden realizarse mediante soldaduras de ángulo.

Los datos con los que se ha cumplimentado la hoja DATOS del fichero que se distribuye en [www://catedracero.ee.upm.es](http://www://catedracero.ee.upm.es) corresponden al cálculo realizado previamente. La figura siguiente es una imagen de dicha hoja de cálculo.

### 7.3.3 Resultados

*Comprobaciones del estado límite último:*

En la hoja PP se realizan las comprobaciones  $|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}| \leq 1$ ,  $|M_{Ed}/M_{Rd}| \leq 1$  y  $|F_{v,Ed}/F_{v,Rd}|^2 + |M_{Ed}/M_{Rd}|^2 \leq 1$  para el bulón según la tabla 3.10 de EN 1993-1-8:2005. Finalmente se comprueba el aplastamiento de la chapa según la misma tabla y de acuerdo con la tabla 3.1 (cálculo como TR en lugar de cómo bulón), si bien, debe advertirse que esta comprobación normalmente será mucho mas desfavorable si se ajustan las distancias «a» y «c» a las de la tabla 3.9 del eurocódigo. En la hoja NUDO se comprueban como es habitual las chapas de la unión, incluyendo los efectos del pandeo descritos previamente.

Las figuras que siguen son varias hojas de libro de cálculo PP, particularizadas para el diseño 7.2.



CÁLCULO DE UNIONES ARTICULADAS P00P

TÍTULO CÓDIGO 080891

09/17/08 hoja 2/8

Solicitaciones de primer orden:			Segundo orden:			
$N_{Ed}$	$V_{Ed}$	$M_{y,Ed}$	X	1/X-1	(10X-1)800A	$M_z$
-4620,0	0	0	0,9	0,11	1,302801	-84,3474

Solicitaciones totales:			$Y_{red}$	$N_{Ed,ref}$	$V_{Ed,ref}$	$M_{Ed,ref}$
$N_{Ed}$	$V_{Ed,Ed}$	$M_{y,Ed}$	1,4	-3300	0,0	46,0

Perfiles:

Acero:

id	$t_w$	$t_f$	$Y_{pl}$	$t_{pl}$
S355	335	490	1	335

Cartela interior:

id	$L_x$	$L_y$	t	c
#480-540-80	480	540	80	1

Acero:

id	$t_w$	$t_f$	$Y_{pl}$	$t_{pl}$
S355	335	490	1	335

Cartelas exteriores:

id	$L_x$	$L_y$	t
2#320-400-45	320	400	45

Acero:

id	$t_w$	$t_f$	$Y_{pl}$	$t_{pl}$	a	$e_f/L$	$e_{min}$
S355	355	510	1	355	0,48	0,005	10

Perfil base:

id	h	b	A	$A_{pl}$	$W_{pl,y}$	$t_w$	$t_f$	r	$h_1$	$h_2$	lz
HE310B	300	300	149,1	47,43	1869	19	11	27	262	59,29	8583

TR

Acero TR:

id	$t_w$	$t_f$	$Y_{pl}$	$Y_{tr}$
S355	335	490	1,25	1

TR:

id	d	$d_0$	$A_0$	A	$F_{y,TR}$	$M_{pl,TR}$	$F_{t0,TR,max}$	$F_{t0,TR,min}$	$F_{t1,TR,max}$	$F_{t1,TR,min}$
M160	160	163	19400	20100	4730	202068	3618	6432	7066	12544

Distancias:

Cartela interior:

id	$m_x$	$a_x$	a	$m_y$	$m_z$	$a_z$	c
M160	1	160	79	300,0		1	240,0

Cartelas exteriores:

id	$m_x$	$a_x$	a	$m_y$	$m_z$	$a_z$	c
M160	1	160	79	240,0		1	160,0

FIGURA 40: HOJA DATOS PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 7.2.1.





CÁLCULO DE UNIONES ARTICULADAS P00P

TÍTULO CÓDIGO 080891

001708 hoja 5/6

Resistencia de cada TR: ELU según EN 1993-1-8: 2005. Cálculo como bulón, artículo 3.13

TR alma:

TR alma 1:

$\Sigma F_x$	$F_{V,Rd}$	$F_{V,Ed}$	$M_{Ed}$	$M_{Ed}$	$(M_{V,Ed}/M_{x,Rd})^2 + (F_{V,Ed}/F_{V,Rd})^2$	
-4620,0	4730	-2310,0	202067,7	-100485,0	0,49	< 1
<small>EN 1993-1-8:2005</small>	<small>EN 1993-1-8:2005</small>	<small>EN 1993-1-8:2005</small>	<small>EN 1993-1-8:2005</small>	<small>EN 1993-1-8:2005</small>	<small>EN 1993-1-8:2005</small>	<b>VÁLIDO</b>

Resistencia de cada TR: ELU según EN 1993-1-8: 2005. Cálculo como unión atornillada clase C

TR:

TR alma 1:

$\Sigma F_x$	$F_{V,Rd}$	$F_{V,Ed}$	$F_{V,Ed}/F_{V,Rd}$	
-4620,0	4730	-2310,0	-0,49	< 1
<small>EN 1993-1-8:2005</small>	<small>EN 1993-1-8:2005</small>	<small>EN 1993-1-8:2005</small>		<b>VÁLIDO</b>

Esfuerzos en los TR:

TR alma:

TR alma 1:

$F_z$	$F_x$	$z$	$M_y$
0,00	-4620,00		0,00

Equilibrio

$V_{Ed} = \Sigma F_z$	0,00	-	$V_{Ed} = 0,00$	< 45,20	<b>VÁLIDO</b>
$N_{Ed} = \Sigma F_x$	-4620,00	-	$N_{Ed} = 0,00$	< 45,20	<b>VÁLIDO</b>
$M_{y,Ed} = \Sigma M$			$M_{y,Ed} = 0,00$	< 0,64	<b>VÁLIDO</b>

Aplastamiento de la chapa Cálculo como bulón, artículo 3.13

TR:

TR alma 1:

Cartelas exteriores:

$F_{t,Rd,max}$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Ed}$	$F_{V,Ed}/F_{t,Rd}$	
3616	3616,0	-2310,0	0,64	< 1
<small>EN 1993-1-8:2005</small>				<b>VÁLIDO</b>

Cartela interior:

$F_{t,Rd,max}$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Ed}$	$F_{V,Ed}/F_{t,Rd}$	
6432	6432,0	-4620,0	0,72	< 1
<small>EN 1993-1-8:2005</small>				<b>VÁLIDO</b>

Aplastamiento de la chapa Cálculo como unión atornillada clase C

TR alma:

TR alma 1:

Cartelas exteriores:

$F_{t,Rd,max}$	$\alpha_L$	$\beta_L$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Ed}$	$F_{V,Ed}/F_{t,Rd}$	
7056	1,00	1,00	7056,0	-2310,0	0,33	< 1
<small>EN 1993-1-8:2005</small>						<b>VÁLIDO</b>

Cartela interior:

$F_{t,Rd,max}$	$\alpha_L$	$\beta_L$	$F_{t,Rd}$	$F_{V,Ed}$	$F_{V,Ed}/F_{t,Rd}$	
12544	1,00	1,00	12544,0	-4620,0	0,37	< 1
<small>EN 1993-1-8:2005</small>						<b>VÁLIDO</b>

FIGURA 41: HOJA PP PARTICULARIZADA PARA EL DISEÑO 7.2.1.



Resistencia de la cartela interior:

Solicitaciones de la cartela

$N_{Ed}$		-4620,0
$V_{Ed}$	1420,000	92,4
$e_a$	1,00-100%	0,014
		-0,450
		-2,205
		0,941
$\delta = \delta(x)$		0,395
$i = i(EI_x)$		1,843
$L/m = \delta + i = i(EI_y)$		0,728
$z' = e_{a0}(L/m)$		0,019
$V_{Ed} + N \cdot z'$		88,4
$V_{Ed}$	1420,000	92,4
$X$	140,702-100	298,5
$N_{Ed}$	4020,10000-100,4-280,1000	81,3

Resistencia

$V_{d,Rd}$	480,80-2000+2,1000	7427,0		
$v$	50,42721,00	0,012	< 1	VÁLIDO
$M_{d,Rd}$	100,80-2000+1000000	257,3		
$m$	10,21421,28	0,316	< 1	VÁLIDO
$N_{d,Rd}$	400,80-1000+1000	12864,0		
$n$	4000,0000	0,359	< 1	VÁLIDO
$m+n^2$	0,0070-0,00	0,445	< 1	VÁLIDO

Abolladura/pandeo

$L_k$	1,000,0	597,0		
$I$	113,14072	42666,7		
$A$	1,90	80,0		
$I$	14088,1760	23,1		
$\lambda$	8920,1	25,9	< 20	NO VÁLIDO
$t(\lambda=20)$	80,20000	103,4		
$M_{d,Rd}$	207,2000+10,470	154,0		
$m$	10,21424	0,528	< 1	VÁLIDO
$m+n^2$	0,0070-0,00	0,657	< 1	VÁLIDO
$N_{d}$	10000,0+10000+4000,0	248118,5		
$\delta$	100,80000+0,00	0,329		
$c$		0,490		
$\phi$		0,586		
$X$		0,934		
$M_{d,Rd}$	100,4-107,0	240,4		
$m$	10,21000,40	0,338	< 1	VÁLIDO
$m+n^2$	0,0070-0,00	0,467	< 1	VÁLIDO
$m+n/\chi$	0,20+0,0000000	0,700	< 1	VÁLIDO

FIGURA 42: HOJA NUDOS. COMPROBACIÓN DE CARTELA INTERIOR ( $e_{min} = 10$ ).



## CÁLCULO DE UNIONES ARTICULADAS P00P

TÍTULO CÓDIGO 080801

09/17/08 Hoja 4/6

## Resistencia de las cartelas exteriores:

## Solicitaciones de la cartela

$N_{Ed}$		-2310,0
$V_{Ed}$		46,2
$x$	400-115-100	158,5
$M_{Ed}$	2500-10-1000-0,412-100,0-1000	30,4

## Resistencia

$V_{pl,Rd}$	220-41-200-1/0,1000	2785,1		
$v$	41,2/2785,1	0,017	< 1	VÁLIDO
$M_{pl,Rd}$	220-41-200-1/0,1000	54,3		
$m$	31,4/54,3	0,561	< 1	VÁLIDO
$N_{pl,Rd}$	220-41-200-1/0,1000	4824,0		
$n$	2310/4824	0,479	< 1	VÁLIDO
$m+n^2$	0,479+0,561	0,790	< 1	VÁLIDO

## Abolladura/pandeo

$L_b$	3-000	317,0		
$l$	510-1-673	7593,8		
$A$	1-0	45,0		
$l$	47000-0-0	13,0		
$\lambda$	317,0	24,4	< 20	NO VÁLIDO
$\psi(A=20)$	40,18-0,0	54,9		
$M_{pl,Rd}$	54,3/54,9	36,5		
$m$	31,4/36,5	0,835	< 1	VÁLIDO
$m+n^2$	0,479+0,835	1,064	< 1	NO VÁLIDO
$N_{Ed}$	-2310-2-0000-7593,8	156623,5		
$\Delta$	-0,0000000000000000	0,310		
$\sigma$		0,490		
$\phi$		0,575		
$X$		0,944		
$M_{pl,Rd}$	0,364-0,1	51,2		
$m$	31,4/51,2	0,594	< 1	VÁLIDO
$m+n^2$	0,479+0,594	0,823	< 1	VÁLIDO
$m+n/\chi$	0,823+0,7593,8	1,068	< 1	NO VÁLIDO

FIGURA 43: HOJA NUDOS. COMPROBACIÓN DE CARTELA EXTERIOR ( $e_{min} = 10$ ).

### 7.4 RECOMENDACIONES SOBRE CONTROL DE CALIDAD

Es evidente la necesidad de un control especialmente riguroso tanto de los certificados de calidad de todos los materiales empleados, como de los diversos ensayos especificados del material base, soldaduras, etc.

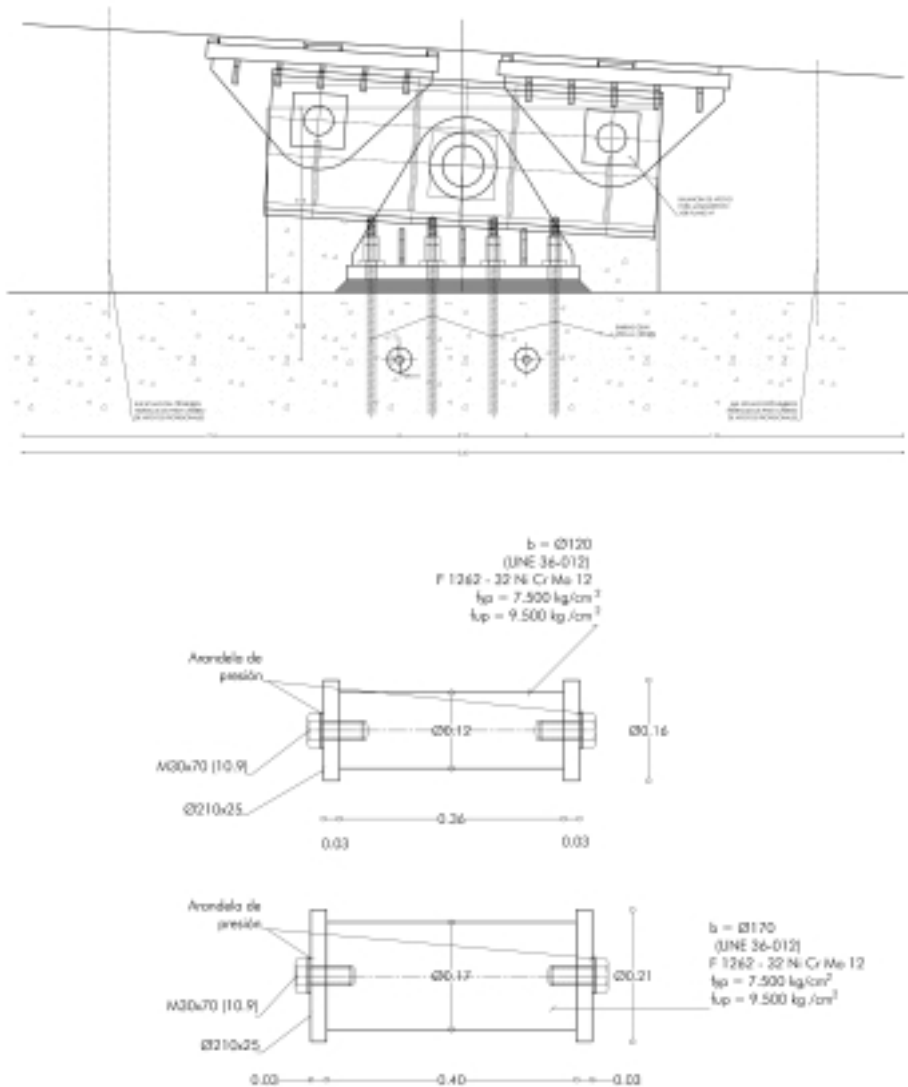


FIGURA 44: BALANCÍN APOYO DE LANZAMIENTO DE PUENTE EMPUJADO.

Pero, en una unión atípica de uso infrecuente, lo esencial es la inspección visual y geométrica por parte de un inspector que entienda bien los planos del proyecto y el cometido concreto de la unión.

Con la mejor intención, simplemente por el hecho de construir por primera vez un tipo de unión relativamente infrecuente, pueden cometerse errores, como por ejemplo el de soldar los bulones, impidiendo así los giros de la unión terminada (no es un ejemplo hipotético, sino un caso real), interpretando de buena fe que dichas soldaduras se han omitido en los planos por un error del proyecto. Por cierto, dichas soldaduras pueden llegar a existir si la capacidad de rotación se pretende que sea sólo temporal durante una cierta fase constructiva (tampoco éste es un ejemplo teórico).

No estará pues de más algún tipo de indicación en los Planos acerca de estas cuestiones conceptuales concretas, para que todos, tanto el Fabricante metálico, como el Constructor de obra civil, y el Inspector de calidad, puedan aportar lo mejor de su trabajo sin necesidad de acudir a la lectura de Memorias y Pliegos que frecuentemente no llegan a quedar a disposición de todos sus destinatarios.



FIGURA 45: LANZAMIENTO DEL VIADUCTO DE CAÑIZARES (2008). PROYECTO MCA. CONSTRUCTOR METÁLICO Y DE OBRA CIVIL: ACCIONA. EN PRIMER PLANO SOBRE LA PILA: APOYO BULONADO.



FIGURA 46: APOYO BULONADO CON «DOBLE BALANCÍN» PARA REPARTO DE LA REACCIÓN A LAS ALMOHADILLAS DESLIZANTES DE NEOPRENO-TEFLÓN SUPERIORES.



FIGURA 47: UNIÓN ATORNILLADA DEL AMARRE DE RETENIDA DEL MISMO PUENTE.



## **8. Anejo: Especificaciones para el control de apriete de los tornillos de alta resistencia**

### **ESTADO ACTUAL (NOVIEMBRE 2008) DE LA CUESTIÓN**

En el momento de publicarse el presente manual, la antigua Instrucción EA95, con su insuficiente y generalmente mal aplicada indicación sobre el par de apriete de los tornillos, ha quedado definitivamente derogada, mientras que el Código Técnico de la Edificación no incluye especificaciones sobre esta importantísima materia. La instrucción EAE no existe todavía como norma vigente, y por lo tanto las especificaciones de los Pliegos de Condiciones de los Proyectos deben referirse a los siguientes documentos, que se extractan en este anejo:

- Ejecución de estructuras de acero. UNE ENV 1090 1:1997 parte 1: reglas generales y reglas para edificación.
- Ejecución de estructuras de acero. UNE ENV 1090 5:1999 parte 5: reglas suplementarias para puentes.

Estas normas editadas por AENOR proceden de códigos europeos en revisión. En particular la versión actualizada de las partes indicadas se encuentra en la euronorma:

prEN 1090-2:2008 (E)

de la cual se reproduce el título de los epígrafes en los cuales se indican las especificaciones para el control de apriete de los tornillos de alta resistencia. Entre las novedades respecto de UNE ENV 1090 sobresalen las relacionadas con las condiciones para el uso de los DTI (IDT = indicadores directos de tensión), cuyo empleo empieza a divulgarse en nuestro país, pero que no están exentos de requisitos para su buena utilización y control.



(5) El apriete debe realizarse empleando uno de los métodos siguientes, salvo que se indique otra cosa en el Pliego de Condiciones:

- a) Método de control del par torsor, de acuerdo con 8.7.2
- b) Método de girar-la-tuerca, de acuerdo con 8.7.3
- c) Método de indicador directo de tensión, de acuerdo con 8.7.4
- d) Método combinado, según el apartado 8.7.5, que combina los métodos de control del par torsor y del giro de la tuerca.

NOTA – El método del giro de la tuerca se designa frecuentemente como el método de "giro-de-parte" ("part-tan").

(6) El método de apriete debe estar calibrado por medio de ensayos de procedimiento realizados de acuerdo con 8.7.6.

(7) Para facilitar el apriete puede emplearse lubricante entre las tuercas y sus tornillos respectivos y entre las arandelas y los componentes girados adyacentes, siempre que la utilización sea consistente con el ensayo de procedimiento y no esté prohibida por el Pliego de Condiciones. Los lubricantes no deben emplearse de una manera que amenace con contaminar a las superficies de contacto. No deben emplearse aceites penetrantes.

NOTA – El empleo de elementos de fijación con recubrimientos metálicos, particularmente la galvanización centrifugada, puede requerir a menudo el uso de lubricantes para alcanzar un apretado consistente. Pueden utilizarse el bisulfuro de molibdeno, el sebo o la cera de abejas. Algunos fabricantes producen conjuntos (de tornillo-tuerca-arandela) completos con la lubricación apropiada.

(8) Cuando un conjunto de tornillo-tuerca-arandela(s) que haya sido bien apretado hasta el pretensado mínimo, sea aflojado posteriormente, debe ser retinado y todo el conjunto (incluidos tornillos, tuercas y arandelas) debe ser descartado de forma permanente, excepto cuando esté permitida la reutilización de dichos conjuntos por el Pliego de Condiciones.

NOTA – Los conjuntos de tornillo-tuerca-arandela(s) empleados para alcanzar el ajuste final, normalmente, no deberían necesitar ser apretados hasta el pretensado mínimo o desapretados, y por tanto deberían seguir siendo utilizables en posición en el proceso de atornillamiento final. El reapriete también puede ser aceptable para los tornillos apretados por control del momento torsor si puede demostrarse que los tornillos no han alcanzado su límite elástico bajo el apriete inicial.

(9) Las inspecciones y ensayos deben cumplir lo indicado en 12.5.2.

### 8.7.2 Método de control del par torsor

(1) Los tornillos deben apretarse utilizando una llave dinamométrica de acuerdo con los ensayos de procedimiento de 8.7.6. La llave debe estar ajustada a un valor torsor que no sea inferior al par mínimo requerido para alcanzar el pretensado mínimo de acuerdo con 8.7.1.

NOTA – Pueden emplearse llaves manuales o mecánicas. Para garantizar que se cumplen los requisitos de inspección puede ser necesario un par un 5% superior al mínimo determinado por los ensayos de procedimiento.

### 8.7.3 Método del giro de la tuerca

(1) La posición de la tuerca con relación a los filetes de rosca del tornillo debe estar marcada permanentemente después de que el apriete alcance la condición de "apretado-a tope" uniforme y antes de comenzar el apriete final, empleando un lápiz marcador o una pequeña marca de pintura, de forma que pueda determinarse fácilmente el giro final de la tuerca con relación al tornillo.

FIGURA 48: ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL DE APRIETE DE LOS TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA.  
ENV 1090-1:1996.

(2) Todos los tornillos deben estar apretados finalmente mediante la aplicación del giro requerido determinado a partir de los ensayos de procedimiento (o de calibración), véase 8.7.6.

NOTA - En la tabla 5 se dan valores indicativos para utilizar con tornillos 8.8. Para los tornillos 10.9 véase la nota 2 en la tabla.

Tabla 5 - Método del giro de la tuerca: Valores indicativos del giro requerido para el apriete final de tornillos tipo 8.8

Espesor nominal total de las partes de la unión (incluidos todos los buros y arandelas)	Ángulo total de giro a aplicar, más allá de la condición de "apretado a tope"
Grados	
< 2d	120
≥ 2d pero < 4d	150
≥ 4d pero < 6d	180
≥ 6d pero < 8d	210
≥ 8d pero ≤ 10d	240
> 10d	Sin indicación

NOTAS de la tabla 5:

NOTA 1 - Cuando las superficies situadas debajo de la cabeza del tornillo o de la tuerca (teniendo en cuenta las arandelas de espesor variable, si se emplean) no están perpendiculares al eje del tornillo, el ángulo de giro requerido debería determinarse por medio de ensayos.

NOTA 2 - Los valores para los tornillos 10.9 deberían determinarse mediante ensayos.

**8.7.4 Método del indicador directo de tensión**

(1) Este apartado es aplicable a los dispositivos, tales como las arandelas indicadoras de tensión, que indican cuándo se ha alcanzado el pretensado mínimo, mediante el control de la tensión en el tornillo; pero no contempla los indicadores que se fijan en la torsión. No es aplicable a la medición directa de tornillos pretensados mediante el uso de instrumentos hidráulicos.

(2) Después de que el apriete alcance la condición uniforme de "apretado a tope", todos los tornillos se apretarán hasta obtener, al menos, el pretensado mínimo especificado según se ha determinado por los ensayos de procedimiento o de calibración. Las separaciones medidas en las arandelas indicadoras pueden promediarse para establecer la aceptabilidad del conjunto del tornillo (incluidas tuercas y arandelas)

NOTA - Este método requiere una atención especial con respecto a la planitud y a las tolerancias de espesor de las chapas en las uniones.

**8.7.5 Método combinado**

(1) El apriete inicial debe realizarse de acuerdo con 8.7.2. La llave debe estar ajustada a un valor del par torsor requerido para alcanzar el 75% del pretensado mínimo de acuerdo con 8.7.1.

(2) A continuación, debe marcarse la posición de la tuerca, de acuerdo con 8.7.3.

FIGURA 49: ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL DE APRIETE DE LOS TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA. ENV 1090-1:1996.

(3) La segunda fase del apriete final, en la que se aplica un nuevo giro, debe realizarse como se haya determinado de los ensayos de procedimientos que figuran en 8.7.6.

NOTA – En la tabla 6 se dan valores orientativos

**Tabla 6**  
Método combinado: Valores orientativos de un giro adicional para el apriete posterior

Espesor total nominal de las partes a unir (incluidas todas las ferrus y arandelas)	Ángulo de giro adicional posterior a aplicar durante el apriete ulterior
	Grados
< 2d	60
≥ 2d pero < 6d	90
≥ 6d pero ≤ 10d	120
> 10d	Sin indicación

NOTA de la tabla 6:

NOTA – Cuando la superficie situada debajo de la tuerca o de la cabeza del tornillo (considerando las arandelas de espesor variable, si las hubiera) no está perpendicular al eje del tornillo, el ángulo de giro requerido se determinará mediante ensayos.

### 8.7.6 Ensayos de procedimiento

(1) El Pliego de Condiciones debe especificar los requisitos para los ensayos de procedimiento de acuerdo con el Anexo A, a partir de las opciones siguientes:

- Ensayo de un conjunto de tornillo de acuerdo con A.1
- Ensayo de un coeficiente de deslizamiento de acuerdo con A.2
- Ensayo de un grupo de tornillos en un armado de unión de acuerdo con A.3.
- Ensayo de un método de apriete de acuerdo con A.4
- Ensayo de una metodología en obra de acuerdo con A.5

FIGURA 50: ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL DE APRIETE DE LOS TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA.

ENV 1090-1:1996.

#### A.4 Ensayo de un método de apriete

##### A.4.1 Generalidades

(1) El método de apriete debe estar calibrado mediante procedimientos de ensayo para garantizar que se alcanza el pretensado mínimo especificado, de acuerdo con lo indicado en 8.7.1(4).

NOTA – El ensayo de procedimiento puede realizarse de acuerdo con A.1.

(2) Deben realizarse calibraciones aparte para cada combinación de tipo de tornillo y tuerca utilizada.

NOTA – Algunos fabricantes producen tornillos y tuercas lubricadas apropiadas sin diferencia significativa de rozamiento entre lotes distintos.

(3) La calibración del método de apriete debe volverse a comprobar siempre que se introduzcan tornillos de un lote diferente o con una diferencia significativa en la condición de la superficie o en la lubricación de las roscas del tornillo, tuercas o arandelas.

(4) Los montajes o conjuntos de tornillo-tuerca-arandela(s) utilizados para la calibración no volverán a utilizarse ni para calibración ni en la estructura.

(5) Para los ensayos de calibración de los métodos de apriete especificados se empleará un dispositivo medidor de la tensión.

(6) El dispositivo medidor de la tensión debe tener una precisión de  $\pm 1\%$  y él mismo debe calibrarse, como mínimo, una vez al año (o más frecuentemente si así está recomendado por el fabricante) por una autoridad de ensayos reconocida.

(7) Los conjuntos de atornillado representativos constarán de seis tornillos y tuercas de cada tipo y de cada diámetro de tornillo que vayan a utilizarse, cada uno con una arandela debajo de la cabeza del tornillo o de la tuerca, según sea el que se gira para el apriete.

##### A.4.2 Método de control del par de apriete

(1) El par de apriete requerido para alcanzar el pretensado mínimo especificado se determinará apretando una muestra representativa de conjuntos de atornillado (tornillo-tuerca-arandela(s)) en un dispositivo medidor de la tensión.

FIGURA 51: ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL DE APRIETE DE LOS TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA.

ENV 1090-1:1996.

#### A.4.3 Método de girar-la-tuerca

(1) La rotación o giro final de la tuerca, con relación al tornillo, desde la condición uniforme de "apretado-a-tope" ("snug-tight"), requerida para alcanzar, al menos, el pretensado mínimo especificado, se verificará apretando una muestra representativa de los conjuntos de atornillado (tornillo-tuerca-arandela(s)) en un dispositivo medidor de tensión.

#### A.4.4 Método del indicador directo de tensión

(1) El pretensado mínimo producido usando un indicador directo de tensión se verificará mediante ensayos de calibración, por el apretado de una muestra representativa de conjuntos de atornillado en un dispositivo medidor de la tensión.

(2) Los indicadores directos de tensión y las arandelas deben estar dispuestos en la misma forma que se propone para usar en las uniones reales.

#### A.4.5 Método combinado

(1) Para calibrar el método combinado, debe determinarse inicialmente, como se indica en A.4.2, el par de apriete requerido para alcanzar el 75% del pretensado mínimo especificado.

(2) Después de aplicar dicho par, el giro posterior de la tuerca, con relación al tornillo, requerido para alcanzar, al menos el pretensado mínimo especificado, deberá comprobarse como se indica en A.4.3.

#### A.5 Ensayo del equipamiento y de la metodología a pie de obra

(1) Se comprobará a pie de obra que se puede emplear con éxito el método de apriete elegido.

(2) Antes de la instalación de los tornillos pretensados (véase el apartado 9.5), debe asegurarse un ajuste y una alineación adecuados (mediante el uso de pasadores de unión y/o de tornillos de montaje).

(3) Adicionalmente a los requisitos sobre manipulación y almacenamiento a pie de obra (9.5.3), los productos lubricados se comprobarán regularmente mediante examen visual, especialmente cuando hayan quedado expuestos durante un cierto período de tiempo.

Las medidas correctoras en la forma de lubricación en obra de tornillos o de tuercas secos u oxidados, solamente se admitirán cuando estén indicadas en el ensayo de procedimiento (8.7.6) y en el Pliego de Condiciones.

NOTA - Eso es especialmente importante cuando se utiliza el método de control del par de apriete.

(4) Las llaves dinamométricas empleadas deben ser capaces de lograr una precisión de  $\pm 5\%$ . Debe comprobarse la precisión de cada llave, al menos, una vez por cada día de trabajo, y en el caso de llaves neumáticas, cada vez que se cambien las longitudes de manguera.

FIGURA 52: ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL DE APRIETE DE LOS TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA.

ENV 1090-1:1996.

Los apartados de prEN 1090-2:2008 (E) relativos las especificaciones para el control de apriete de los tornillos de alta resistencia a que actualizan a los reproducidos en las figuras anteriores de UNE 1090-1:1996 son los siguientes:

- 8.5 Tightening of preloaded bolts
  - 8.5.1 General
  - 8.5.2 Determination of the torque values
  - 8.5.3 Torque method
  - 8.5.4 Combined method
  
- Annex H (normative). Test to determine torque moments for preloaded bolts under working conditions
  - H.1 General
  - H.2 Test assemblies
  - H.3 Test apparatus
  - H.4 Test set up
  - H.5 Test procedure
  - H.6 Evaluation of test results
  - H.7 Test report
  
- Annex J (normative). Use of compressible washer-type direct tension indicators
  - J.1 General
  - J.2 Fitting
  - J.3 Checking



## 8. Bibliografía para consulta

### **CÓDIGOS europeos de carácter general sobre estructuras de acero**

EN 1993-1-8:2005 y 1-1/A1: Eurocódigo núm. 3, «Proyecto de Estructuras de Acero».

UNE-ENV 1994-1-1: Eurocódigo núm. 4, «Proyecto de Estructuras Mixtas de Hormigón y Acero», AENOR, Madrid, 1995.

### **CÓDIGOS españoles de carácter general sobre estructuras de acero**

EAE: «Instrucción de Acero Estructural», Documento 1, Ministerio de Fomento, Madrid, 2006.

Instrucción e.m.62 para estructuras de acero. Normas y Manuales del Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1976.

NBE EA-95. Estructuras de acero en edificación. Real Decreto 1829/1995, de 10 de noviembre. Ministerio de Obras Públicas, T. y M. A., Madrid, 1996.

CTE. Código técnico de la edificación. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. Ministerio de Vivienda, Madrid, 2006.

Normas UNE: «Ejecución de estructuras de acero», tomo 2, Bellisco, Madrid, 2000.

PG-3: «Pliego de prescripciones técnicas generales: Parte 6, Capítulo III: Estructuras metálicas», LI-TEAM, Madrid, 2002.

RPM-95: «Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras», Ministerio de Fomento, Madrid, 1996.

RPX-95: «Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras», Ministerio de Fomento, Madrid, 1996.

### **Manuales sobre DETALLES constructivos en acero**

O. W. Blodgett: «Design of welded structures», J. F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, 1976.

A. Hayward, F. Weare: «Steel Detailers' Manual», Blackwell, London, 2002.



**PRONTUARIOS**

F. Cobb: «Structural Engineer's Pocket Book», Elsevier, Amsterdam, 2004.

Ensidesa: «Manual para cálculo de estructuras metálicas», tomo II\*\*, 1975.

K. Thomas (ed.): «El acero en la construcción», trad. de Stahl im Hochbau, Reverté, Barcelona, 1972.

**Textos CLÁSICOS sobre estructuras metálicas**

L. S. Beedle (ed.): «Structural Steel Design», Ronald Press, N.Y., 1964.

F. S. Merrit (ed.): «Structural Steel Designers' Handbook», McGraw-Hill, 1972.

B. Sahling, K. Latzin, K. Reimers: «La técnica de la soldadura en la ingeniería de construcción», Blume, Barcelona, 1970.

V. Zignoli: «Costruzioni metalliche», UTET, Torino, 1967.

**Textos MODERNOS sobre estructuras de acero**

R. Argüelles Álvarez, R. Argüelles Bustillo, F. Arriaga, J. R. Atienza: «Estructuras de acero», 2 tomos, Bellisco, Madrid, 1999 y 2001.

J. Ortiz, J. I. Hernando, J. Cervera: «Manual de uniones atornilladas frontales pretensadas», publicaciones APTA, Madrid, 2007.

**Textos recientes de ANÁLISIS con aplicaciones a estructuras metálicas**

J. Ortiz, J. I. Hernando: «Estructuras de edificación: análisis lineal y no lineal», Ariel, Barcelona, 2002.

*Diversas herramientas que pueden localizarse en internet con aplicaciones a estructuras metálicas*

**AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación

área de clientes  
ACCESO CLIENTES | REGÍSTRATE

**INFO AENOR**  
902 102 201  
actualidad AENOR

Normas

Buscador de normas  
Catálogo de normas  
Suscripción a normas UNE

→ Ediciones AENOR  
→ Publicaciones extranjeras  
→ Revistas

búsqueda en...

**normalización**

Buscador de Normas UNEP

Vigente  Anuladas  Proyecto

Número  (ej. 9001 -sin indicar el tipo de norma)

Palabra clave/título

ICS

CTN

Edición Desde  Hasta

Anulada

Equivalencia: Número

Sustituye a: Número

Buscador de Normas (Texto Libre)

Texto Libre

Todos los derechos reservados: © AENOR, 2002.  
Información de Aenor - Aviso Legal

FIGURA 53: EJEMPLO DE USO DE UN BUSCADOR DE NORMAS UNE SOBRE CONSTRUCCIÓN METÁLICA.

**AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación

Área de clientes

búsqueda en...

**normalización**

Normas

¿Qué es? CTNs

Código	Estado	Núm. Páginas	Precio (€)	Pdf	Cesta
<b>UNE 100102:1985</b>	Actualizado	52	30,7€		<input type="checkbox"/>
CONDUCTOS DE CHAPA METALICA. ESPESORES, UNIONES, REFUERZOS					
<b>UNE 100102:1988 ERRATUM</b>	Actualizado	2	0€		<input type="checkbox"/>
CONDUCTOS DE CHAPA METALICA. ESPESORES, UNIONES, REFUERZOS					
<b>UNE 100104:1984</b>	Actualizado	12	13,65€		<input type="checkbox"/>
CONDUCTOS DE CHAPA METALICA. PRUEBAS DE RECEPCION					
<b>UNE 20655:1974</b>	Actualizado	10	24,65€		<input type="checkbox"/>
APARATURA DE ALTA TENSION BAJO ENVOLVENTE METALICA					
<b>UNE 20655:1990</b>	Actualizado	44	30,7€		<input type="checkbox"/>
APARATURA BAJO ENVOLVENTE METALICA PARA CORRIENTE ALTERNA DE TENSIONES ASIGNADAS SUPERIORES A 1 KV E INFERIORES O IGUALES A 72,5 KV					
<b>UNE 20101:1978</b>	Actualizado	34	28,49€		<input type="checkbox"/>
APARATURA DE ALTA TENSION BAJO ENVOLVENTE METALICA PARA TENSIONES NOMINALES DE 72,5 KV Y SUPERIORES					
<b>UNE 20101:1990</b>	Actualizado	52	30,7€		<input type="checkbox"/>
APARATURA DE ALTA TENSION BAJO ENVOLVENTE METALICA CON AISLAMIENTO GASEOSO PARA TENSIONES ASIGNADAS IGUALES O SUPERIORES A 72,5 KV					
<b>UNE 20682:1984</b>	Actualizado	14	19,37€		<input type="checkbox"/>
ACEROS PARA CONSTRUCCION METALICA CON RESISTENCIA MEJORADA A LA CORROSION ATMOSFERICA					

Nota: Precios sin IVA ni gastos de envío.

[Licencia de uso de los documentos normativos](#) [Condiciones de venta](#)

[nuevas búsquedas](#)

Todos los derechos reservados. © AENOR, 2002  
Información de Aenor - Aviso Legal

FIGURA 54: EJEMPLO DE USO DE UN BUSCADOR DE NORMAS UNE SOBRE CONSTRUCCIÓN METÁLICA.



FIGURA 55: EJEMPLO DE USO DE «ACCESS-STEEL».



FIGURA 56: EJEMPLO DE USO DE «ACCESS-STEEL».



FIGURA 57: EJEMPLO DE USO DE «ACCESS-STEEL».

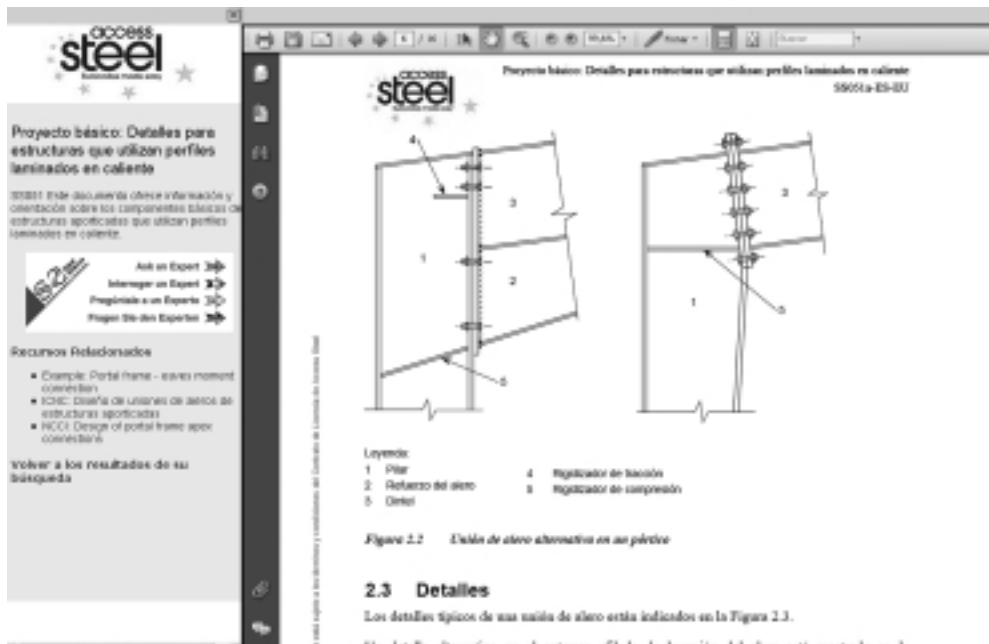


FIGURA 58: EJEMPLO DE USO DE «ACCESS-STEEL».

**CatedrAcero**

Inicio | Noticias | Boletines | Noticias | Opinión | Mapa del sitio

¿Qué es la CATEDRACERO? | Inicio | 3 días de vida

---

**Bienvenido a la CATEDRACERO**

CATEDRACERO se ha constituido durante el primer semestre del año 2005 mediante un convenio de colaboración entre **AFSA** (Asociación para la Promoción Técnica del Acero) y la **AFSA**. Su objetivo es potenciar el conocimiento y el empleo del acero en sus diversos campos de aplicación como material estructural y construcción de arquitectura e ingeniería civil, desde una perspectiva consciente de los requisitos derivados de las concepciones de la construcción sostenible.

Para fomentar el conocimiento y el empleo del acero CATEDRACERO desarrollará varios tipos de actividades:

- De formación, entre las que se incluye el creación del **curso anual de CATEDRACERO**.
- De fomento de la investigación, prestando apoyo para la realización de tesis doctorales y trabajos de investigación focalizados en **el acero en la construcción**.
- De divulgación, desarrollando documentación e herramientas informáticas destinadas a profesionales, docentes o estudiantes orientados a temas de interés en la construcción metálica.

**AFSA** es una asociación independiente, sin ánimo de lucro, con la intención de divulgar el uso del acero en la construcción, buscando participación y consenso de todos los actores que integran esta sector. AFSA se dirige tanto a los profesionales como a los estudiantes.

**AFSA** nació a iniciativa de empresas siderúrgicas, de empresas distribuidoras y de constructoras metálicas.

Creado por **afsa@afsa.es**  
Última modificación: 2005-02-24 09:04:09

---

**Últimas noticias:**

- Conferencia IBERE 2009-12-15
- Jornada del jurado Premio IFC Acero 2009 2009-11-30
- Primeros Premios IFC Acero 2009 2009-12-30
- 42 de Jóvenes Sordos Tercera + Feria Pruebas de Puntuación (Madrid) 2009-12-18
- Fecha para el 1ºº del jurado 2009-12-15

**El calendario 2009**

Sa.	Do.	Jue.	Vi.	Sa.	Do.
1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31					

FIGURA 59: PÁGINA PRINCIPAL DE CATEDRACERO.

**APTA** Inicio - Buscar

- Inicio
- Presentación
- Recursos en línea
- Curiosidades sobre el acero
- Realizaciones
- Proyectar con acero
- Temas monográficos
- Formación y ampliación de conocimientos
- Publicaciones
- Actualidad

**Inicio**

**Conferencia IABSE**

**INNOVACIÓN** El Grupo Español de IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) organizará la conferencia "La vigencia de los tipos estructurales", que será impartida por Miguel Aguilo, catedrático de la ETSICCP de Madrid, el 16 de diciembre de 2008 a las 19:30 h, en el Salón de Actos del Instituto de la Ingeniería de España (General Arrando, nº 38, 28010 Madrid). La entrada es gratuita, previa inscripción a través del e-mail: [galabse@ceii.es](mailto:galabse@ceii.es)

**APTA Informa-Newsletter** es la hoja informativa que le hará llegar las últimas novedades en nuestra página web sobre "CONSTRUCCIÓN EN ACERO". Si desea recibirla, suscríbese a través de:

escriba su email

**Jornada Técnica + Visita Piscinas de Valdesanchuela (Valdemoro)**

**INNOVACIÓN** El día 12 de diciembre de

2008 APTA realizará una Jornada Técnica + Visita a las piscinas de Valdesanchuela, Valdemoro. El horario de la Jornada será de 11:00-13:45.

**Revista Europa # 9 2008**

**INNOVACIÓN** Número #9 de la revista Europa

FIGURA 60: PÁGINA PRINCIPAL DE APTA.