



Universidad de Navarra

TESIS DOCTORAL

# Nuevas propuestas para el diseño de pórticos y uniones semirrígidas de acero

José Manuel Cabrero Ballarín





**Universidad de Navarra**  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura  
**Departamento de Estructuras**

TESIS DOCTORAL

# Nuevas propuestas para el diseño de pórticos y uniones semirrígidas de acero

José Manuel Cabrero Ballarín  
Director: Eduardo Bayo Pérez

Pamplona, mayo de 2006

■ Te uniste a mi vida al comienzo de esta aventura, y juntos la compartimos. Quedan atrás ya estos años, y comienza una nueva etapa, continuación de nuestro camino juntos. Por las lágrimas ante mis silencios y derrotas, por las sonrisas compartidas, en justo y escaso *pago* por todo ello. . .  
Gracias.

*Encuadernación*  
Cisenarte Encuadernación Artesana

*Fotografía y diseño de cubierta*  
Javier Laforet Dorda

En Arquitectura, la aparición de un nuevo material, un gran perfil laminado, un vidrio de grandes dimensiones, ha introducido la Naturaleza en nuestras construcciones.

*Alejandro de la Sota*



# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>i</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>VII</b>
Letras griegas . . . . .	VII
Letras mayúsculas . . . . .	X
Letras minúsculas . . . . .	XVI
Subíndices . . . . .	XX
<b>Agradecimientos</b>	<b>XXIII</b>
<b>Reflexiones sobre Arquitectura y estructura</b>	<b>XXV</b>
Referencias . . . . .	XXVIII
<b>Introducción</b>	<b>XXXI</b>
<b>I    Diseño de pórticos de acero con uniones semirrígidas</b>	<b>1</b>
<b>1    Introducción al concepto semirrígido</b>	<b>3</b>
1.1. Tipos de uniones semirrígidas . . . . .	4
1.2. Ventajas de las uniones semirrígidas . . . . .	10
1.3. Las uniones semirrígidas en los códigos estructurales . . . . .	19
1.4. Algunas aclaraciones útiles . . . . .	22
1.5. Referencias . . . . .	24

<b>2</b>	<b>Clasificación y comportamiento de pórticos semirrígidos</b>	<b>27</b>
2.1.	Clasificación de uniones semirrígidas . . . . .	28
2.2.	Influencia de la flexibilidad de la unión en las condiciones de servicio . . . . .	46
2.3.	Influencia de la flexibilidad de la unión en la resistencia . . . . .	50
2.4.	Referencias . . . . .	54
<b>3</b>	<b>Modelado y predicción del comportamiento de las uniones semirrígidas</b>	<b>59</b>
3.1.	Modelos predictivos del comportamiento de la unión . . . . .	60
3.2.	El modelo predictivo del Eurocódigo: el método de los componentes . . . . .	68
3.3.	Consideraciones prácticas para el modelado de la unión semirrígida . . . . .	75
3.4.	Referencias . . . . .	89
<b>4</b>	<b>Desarrollo de un método de diseño práctico para pórticos con uniones semirrígidas</b>	<b>93</b>
4.1.	Propuestas previas de métodos de diseño . . . . .	96
4.2.	Filosofía de diseño y metodología . . . . .	107
4.3.	Procedimiento general de diseño . . . . .	114
4.4.	Aplicación del método de diseño propuesto . . . . .	121
4.5.	Conclusiones . . . . .	127
4.6.	Referencias . . . . .	127
<b>II</b>	<b>Diseño y análisis de uniones semirrígidas: uniones con chapa de testa extendida</b>	<b>131</b>
<b>5</b>	<b>Análisis de uniones de chapa de testa extendida mediante el método de los componentes</b>	<b>133</b>
5.1.	Identificación de los componentes . . . . .	136
5.2.	T-stub equivalente . . . . .	137
5.3.	Alma del pilar a cortante . . . . .	143
5.4.	Alma del pilar a compresión . . . . .	147
5.5.	Alma del pilar a tracción transversal . . . . .	149
5.6.	Ala del pilar a flexión transversal . . . . .	150
5.7.	Chapa de testa a flexión . . . . .	151
5.8.	Alma de la viga a tracción . . . . .	151
5.9.	Ala y alma de la viga a compresión . . . . .	152
5.10.	Tornillos a tracción . . . . .	153
5.11.	Ensamblaje de los componentes . . . . .	154
5.12.	Resistencia a cortante . . . . .	155
5.13.	Referencias . . . . .	156



<b>6</b>	<b>Análisis paramétrico de uniones de chapa de testa extendida</b>	<b>159</b>
6.1.	Análisis paramétricos previos . . . . .	160
6.2.	Descripción de los especímenes . . . . .	163
6.3.	Modos de rotura observados . . . . .	164
6.4.	Influencia del espesor de la chapa de testa . . . . .	165
6.5.	Influencia de parámetros relacionados con los tornillos . . . . .	168
6.6.	Influencia de los esfuerzos internos: el parámetro $\beta$ . . . . .	172
6.7.	Resumen y conclusiones . . . . .	175
6.8.	Referencias . . . . .	176
<b>7</b>	<b>Desarrollo de un modelo numérico para el análisis de uniones de chapa de testa extendida</b>	<b>177</b>
7.1.	Modelos numéricos previos . . . . .	178
7.2.	Consideraciones generales sobre el modelado con el método de los elementos finitos de uniones de chapa de testa extendida . . . . .	182
7.3.	Modelo numérico realizado para la simulación de uniones semirrígidas de chapa de testa extendida . . . . .	195
7.4.	Referencias . . . . .	200
<b>8</b>	<b>Modelos simplificados para la estimación del comportamiento de la unión de chapa de testa extendida</b>	<b>203</b>
8.1.	Modelos predictivos sencillos existentes . . . . .	204
8.2.	Requerimientos de un método simplificado para el diseño de uniones . . . . .	208
8.3.	Descripción del modelo simplificado propuesto . . . . .	210
8.4.	Comparativa de los modelos predictivos . . . . .	213
8.5.	Referencias . . . . .	215
<b>III</b>	<b>Un paso más: uniones semirrígidas tridimensionales</b>	<b>217</b>
<b>9</b>	<b>Comportamiento tridimensional</b>	<b>219</b>
9.1.	Mecanismo resistente lateral . . . . .	220
9.2.	Uniones tridimensionales . . . . .	221
9.3.	Otras necesidades de la estructura tridimensional . . . . .	227
9.4.	Referencias . . . . .	228
<b>10</b>	<b>Ensayos de uniones semirrígidas tridimensionales</b>	<b>231</b>
10.1.	Descripción del programa experimental . . . . .	232
10.2.	Resultados generales . . . . .	245
10.3.	Comportamiento de las uniones en los ensayos tridimensionales . . . . .	254

10.4. Comportamiento de las uniones tridimensionales del eje menor en los ensayos con carga bidimensional . . . . .	256
10.5. Comportamiento de las uniones tridimensionales del eje mayor en los ensayos con carga bidimensional . . . . .	264
10.6. Conclusiones . . . . .	268
10.7. Referencias . . . . .	271
<b>11 Análisis paramétrico de la unión tridimensional mediante un modelo numérico</b>	<b>273</b>
11.1. Modelo numérico realizado . . . . .	274
11.2. Influencia de la tridimensionalidad en el comportamiento de las uniones	277
11.3. Variación del comportamiento elástico de las uniones según las cargas tridimensionales . . . . .	280
11.4. Referencias . . . . .	286
<b>12 Aplicación del método de los componentes</b>	<b>287</b>
12.1. Modelado de la rigidez de la chapa adicional a flexión . . . . .	288
12.2. Modelo de componentes de la unión tridimensional del eje menor . . . . .	306
12.3. Modelo de componentes de la unión tridimensional del eje mayor . . . . .	311
12.4. Conclusiones . . . . .	314
12.5. Referencias . . . . .	316
Anexos . . . . .	319
12.A. Modelado de la resistencia del alma a flexión . . . . .	319
<b>IV Conclusiones</b>	<b>329</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>331</b>
Diseño de pórticos de acero con uniones semirrígidas . . . . .	332
Diseño y análisis de uniones semirrígidas: uniones con chapa de testa extendida . . . . .	332
Un paso más: uniones semirrígidas tridimensionales . . . . .	333
Futuras líneas de investigación . . . . .	334
<b>Anexos</b>	<b>337</b>
<b>A Publicaciones generadas por esta Tesis Doctoral</b>	<b>339</b>
A.1. Relacionadas directamente con la Tesis . . . . .	339
A.2. Relacionadas indirectamente con la Tesis . . . . .	340
<b>Índice de figuras</b>	<b>341</b>

**Índice de cuadros** **351**

**Referencias** **355**



# Nomenclatura

## Letras griegas

$\alpha$	coeficiente del modelo predictivo de Krishnamurthy (1978a)
$\alpha$	parámetro que relaciona el ancho de la zona rígida con la longitud del modelo equivalente (Costa Neves, 2004)
$\alpha$	relación entre la rigidez secante de la unión y la de la viga
$\alpha$	ángulo de dispersión
$\alpha$	ángulo de la espiral logarítmica (Gomes, 1990)
$\alpha_B$	rigidez lateral del arriostramiento del pórtico
$\alpha_j$	coeficientes de ajuste de curva en el modelo de Azizinamini, Bradburn y Radziminski (1985)
$\alpha_u$	factor de carga última de la estructura
$\alpha_{cr,\infty}$	factor de carga elástica crítica del pórtico con uniones rígidas
$\alpha_{cr,R}$	factor de carga elástica crítica del pórtico con uniones rígidas
$\alpha_{cr}$	factor de carga elástica crítica del pórtico
$\alpha_{EC}$	rigidez adimensional de la unión en función de la rigidez de la viga adyacente
$\alpha_{u,\infty}$	factor de carga última del pórtico con uniones rígidas
$\alpha_{u,R}$	factor de carga última del pórtico con uniones rígidas
$\beta$	coeficiente del modelo predictivo de Krishnamurthy (1978a)
$\beta$	coeficiente relacionado con la resistencia relativa de la unión
$\beta$	factor de interacción del cortante en el alma del pilar (CEN, 2005b)

---

$\beta$	parámetro para la deformación a cortante
$\beta$	parámetro que relaciona el ancho de la tira equivalente y su longitud en el alma del pilar a flexión (Costa Neves, 2004)
$\beta^0$	precio de la unión correspondiente con rigidez al giro nula
$\beta^l$	parámetro de costo dependiente de la rigidez de la unión
$\beta_i$	factor de interacción del cortante correspondiente a la unión en el lado $i$
$\beta_{Rd}$	parámetro que relaciona la resistencia a flexión de las alas y la axial del tornillo en un <i>T-stub</i> atornillado
$\Delta$	desplazamiento lateral
$\delta$	deflexión lateral máxima del pórtico
$\Delta_a$	deformación a axial
$\delta_b$	deflexión vertical máxima de la viga
$\delta_b$	desplazamiento vertical debido a la deformación elástica de la viga
$\delta_c$	desplazamiento vertical debido al giro de la unión
$\Delta_f$	deformación a flexión
$\Delta_i$	deformación axial del muelle $i$
$\delta_i$	desplazamiento resultante en el grado de libertad $i$ del sistema
$\delta_s$	deformación de cortante
$\delta_v$	desplazamiento vertical debido a la deformación a cortante de la viga
$\delta_\infty$	deflexión lateral máxima del pórtico con uniones rígidas
$\delta_{c,i}$	deformación medida por el sensor en la zona de compresión de la chapa de testa
$\delta_c$	flecha debida a las concargas
$\delta_{f+s}$	deformación resultante al considerar la deformación a cortante
$\delta_{h,i}$	desplazamiento vertical del punto $i$
$\delta_{max}$	flecha máxima
$\Delta_r$	desplazamiento del pórtico rígido
$\Delta_{sr}$	desplazamiento del pórtico semirrígido
$\delta_{t,i}$	deformación medida por el sensor en la zona de tracción de la chapa de testa
$\epsilon$	factor de esbeltez
$\epsilon_u$	deformación última
$\epsilon_y$	deformación resistente
$\eta$	expresión adimensional de la rigidez de la unión (Faella, Piluso y Rizzano, 2000)
$\eta$	factor de minoración de la rigidez inicial de la unión para obtener la rigidez secante

$\eta_{sec_i}$	expresión adimensional de la rigidez secante de la unión (Faella y otros, 2000)
$\gamma$	deformación a cortante
$\gamma$	factor de seguridad
$\gamma_0$	factor de mayoración
$\lambda$	relación entre $n$ y $m$
$\lambda_l$	factor de carga aplicada
$\mu$	coeficiente de fricción
$\mu$	parámetro que relaciona longitud y espesor de la tira equivalente del alma del pilar a flexión (Costa Neves, 2004)
$\mu$	relación de rigidez viga-pilar
$\nu$	coeficiente de Poisson
$\omega$	factor de reducción que considera los posibles efectos de interacción con el cortante en el panel del alma del pilar
$\bar{\phi}$	giro adimensional de la unión
$\bar{\lambda}_p$	esbeltez de la chapa
$\phi$	giro de la unión
$\phi_i$	giro resultante en el grado de libertad $i$ del sistema
$\phi_{Cd}$	giro de cedencia
$\phi_{inf_{K-R}}$	giro correspondiente al límite inferior resistente de la zona <i>knee-range</i> de la curva momento-giro de la unión
$\phi_{M_{max}}$	giro correspondiente al nivel máximo de carga
$\phi_{M_{Rd}}$	giro correspondiente al momento resistente de la unión
$\phi_{sup_{K-R}}$	giro correspondiente al límite superior resistente de la zona <i>knee-range</i> de la curva momento-giro de la unión
$\psi$	coeficiente para expresar el comportamiento rotacional de la unión
$\Psi_j$	índice de ductilidad de la unión
$\Psi_{inf_{K-R}}$	índice de ductilidad correspondiente al límite inferior de la zona <i>knee-range</i>
$\Psi_{sup_{K-R}}$	índice de ductilidad correspondiente al límite superior de la zona <i>knee-range</i>
$\rho$	factor de minoración de la resistencia a cortante de la sección
$\rho$	factor de reducción por pandeo (alma del pilar a compresión)
$\sigma_y$	tensión de fluencia
$\sigma_{com,Ed}$	tensión longitudinal máxima de compresión
$\tau$	factor de relación de espesores de la chapa de testa y el ala del pilar
$\tau_{crit}$	tensión de cortante crítica para la que se inicia el deslizamiento

$\theta$	giro de la unión
$\theta$	ángulo de dispersión
$\theta_u$	giro último de la unión
$\varphi$	giro
$\varphi_0$	giro de referencia de la unión
$\xi$	coeficiente para el alma del pilar a compresión
$\xi$	coeficiente para obtener la rigidez de la unión (Steenhuis, 1999)
$\zeta$	coeficiente para obtener la resistencia de la unión (Steenhuis, 1999)
$\zeta$	relación de rigidez entre las vigas y los pilares

### Letras mayúsculas

$A$	esfuerzo axial
$A$	área total de la sección
$A_1$ y $A_2$	constantes de ajuste para el modelo simplificado de rigidez de la unión
$A_b$	área de la viga
$A_b$	área neta de la zona no roscada del tornillo (Agerskov, 1976)
$A_c$	viga equivalente $A$ en la zona de compresión del alma del pilar a flexión
$A_s$	sección efectiva de la zona roscada del tornillo (Agerskov, 1976)
$A_s$	área de cortante de la sección
$A_t$	viga equivalente $A$ en la zona de tracción del alma del pilar a flexión
$A_v$	área a cortante
$A_{v,b}$	área a cortante de la viga
$A_{v,c}$	área a cortante del pilar
$B$	fuerza axial en los tornillos
$B_1$ y $B_2$	constante de ajuste para el modelo simplificado de rigidez de la unión
$B_c$	viga equivalente $B$ en la zona de compresión del alma del pilar a flexión
$B_t$	viga equivalente $B$ en la zona de tracción del alma del pilar a flexión
$B_{Rd}$	resistencia axial de diseño de los tornillos
$C$	coeficiente del modelo predictivo de Krishnamurthy (1978a)
$C$	costo de la unión
$C$	esfuerzo de compresión correspondiente al par de fuerzas del momento flector
$C_i$	constantes de ajuste de la curva en el modelo de Frye y Morris (1975)



---

$C_j$	constantes numéricas obtenidas mediante un análisis de regresión
$D$	distancia entre los rigidizadores (De Lima, De Andrade, Da S.Velasco y Da Silva, 2002)
$E$	módulo de elasticidad (Young) del material
$E_h$	módulo de endurecimiento plástico del material
$F$	esfuerzo correspondiente al par de fuerzas del momento flector
$F_i$	fuerza correspondiente al muelle $i$
$F_{bf.c.Rd}$	resistencia de diseño del ala y alma de la viga a compresión
$F_{bw.t.Rd}$	resistencia de diseño del alma de la viga a tracción
$F_{cf.b.Rd}$	resistencia de diseño del ala del pilar a flexión
$F_{cwb.mi}$	resistencia de diseño para el modo de rotura $i$ del alma del pilar a flexión
$F_{cwc.Rd}$	resistencia de diseño del alma del pilar a compresión
$F_{cws.Rd}$	resistencia de diseño del alma del pilar a cortante
$F_{cwt.Rd}$	resistencia de diseño del alma del pilar a tracción
$F_{ep.b.Rd}$	resistencia de la chapa de testa a flexión
$F_{global}$	fuerza plástica para el mecanismo de rotura global del alma
$F_{i,m}$	esfuerzo correspondiente al par de fuerzas del momento flector del eje mayor en el lado $i$
$F_{i,n}$	esfuerzo correspondiente al par de fuerzas del momento flector del eje menor en el lado $i$
$F_{i.Rd}$	esfuerzo resistente axial para la $i$ -ésima fila de tornillos
$F_{local}$	fuerza plástica correspondiente al mecanismo de rotura local del alma
$F_{Q1}$	fuerza del mecanismo de rotura por punzonamiento del alma
$F_{Q2}$	fuerza del mecanismo de rotura mixto del alma
$F_{T,i.Rd}$	resistencia de diseño de un mecanismo de rotura de tipo $i$ de un $T-stub$ atornillado
$F_{T.Rd}$	resistencia de diseño de un $T-stub$ atornillado
$F_{t.Rd}$	resistencia de la fila de tornillos
$F_{ti.Rd}$	resistencia de la fila de tornillos
$FF$	factor de flexibilidad del pórtico
$H$	altura total del pórtico
$H_{c.low}$	distancia a la parte inferior del pilar desde la parte inferior de la chapa de testa
$H_{c.mid}$	distancia entre las chapas adicionales para la unión en el eje menor del pilar
$H_{c.up}$	distancia al final del pilar desde la parte superior de la chapa de testa

---

$I$	momento de inercia de la sección
$I_1$	momento de inercia de la zona rígida en el modelo del alma a flexión (Costa Neves, 2004)
$I_2$	momento de inercia de la zona flexible en el modelo del alma a flexión (Costa Neves, 2004)
$I_b$	momento de inercia de la viga
$I_c$	momento de inercia del pilar
$I_{eq}$	momento de inercia del elemento viga equivalente
$I_{fc}$	momento de inercia de las alas del pilar
$I_{min}$	momento de inercia mínimo requerido
$I_{ta}$	momento de inercia del angular superior
$I_{wa}$	momento de inercia del angular de alma
$K$	parámetro en función de las propiedades mecánicas y geométricas (Frye y Morris, 1975)
$K_1$	parámetro del modelo de tornillo de Agerskov (1976)
$K_4$	parámetro del modelo de tornillo de Agerskov (1976)
$K_b$	rigidez de las vigas
$K_c$	rigidez de los pilares
$K_{\varphi,p}$	rigidez rotacional plástica de la unión
$K_{\varphi,sec}$	rigidez secante de la unión
$K_{\varphi}$	rigidez de la unión
$K_{c,i}$	rigidez de los pilares
$K_{conn,i}$	rigidez de las uniones
$K_{g,i}$	rigidez de las vigas
$K_{secmax}$	rigidez secante máxima admitida para la unión
$K_{secmin}$	rigidez secante mínima requerida para la unión
$L$	longitud de la tira equivalente del alma del pilar a flexión (Costa Neves, 2004)
$L$	longitud de la viga
$L$	longitud equivalente del componente
$L_b$	longitud de elongación de los tornillos
$L_b$	longitud de la viga
$L_b^*$	longitud de elongación de comparación de los tornillos
$L_j$	distancia de la cara de la chapa de testa al punto $i$

$L_r$	longitud de referencia
$L_{b,i}$	distancia entre el punto de apoyo y la cara de la chapa de testa
$L_{beam}$	longitud de la viga
$L_{c-t}$	distancia entre los sensores situados en la chapa de testa
$L_{eff}$	longitud efectiva para el modelo del tornillo de Agerskov (1976)
$L_{eq}$	longitud de modelado del elemento viga equivalente
$L_{load}$	distancia entre el punto de aplicación de la carga y la cara de la chapa de testa
$L_{sa}$	longitud del angular inferior de asiento
$M$	momento flector
$M^+$	recta que expresa los valores del momento máximo en el vano de la viga con carga uniformemente distribuida
$M^-$	recta que expresa los valores del momento máximo en los apoyos de la viga con carga uniformemente distribuida
$M_0$	momento flector de referencia de la unión
$M_0$	momento flector total para el Estado Límite Último
$M_a$	momento en los apoyos de la viga
$M_i$	momento flector en el punto $i$
$M_u$	capacidad última al momento de la unión
$M_u$	resistencia última de la chapa
$M_v$	momento máximo en el vano de la viga
$M_{b.pl.Rd}$	resistencia plástica de la viga
$M_{b.Rd}$	momento resistente de diseño de la sección transversal de la viga
$M_{bi}$	momento flector actuante en la unión del lado $i$
$M_{c.pl.Rd}$	resistencia plástica del pilar
$M_{f.Rd}$	resistencia a flexión de diseño del ala de un $T-stub$ atornillado
$M_{i,m}$	momento flector en el lado $i$ del eje mayor
$M_{i,n}$	momento flector en el lado $i$ del eje menor
$M_{i,bj.Ed}$	momento en el lado $i$
$M_{inf_{K-R}}$	límite inferior resistente de la zona $knee-range$ de la curva momento-giro de la unión
$M_{j,bj.Ed}$	momento en el lado $j$
$M_{j,cws}$	momento resistente del alma del pilar a cortante
$M_{j.Pred.i}$	resistencia de la unión obtenida con el método de prediseño para un espesor de chapa de testa $i$

---

$M_{j,p}$	resistencia de la unión
$M_{j,Rd, pred}$	resistencia a flexión de la unión obtenida mediante un método simplificado
$M_{j,Rd}$	momento resistente de la unión
$M_{j,Req}$	resistencia requerida para la unión
$M_{j,Sd}$	esfuerzo de cálculo de la unión
$M_{j,u}$	momento resistente de la unión
$M_{max}$	momento máximo
$M_{p,b}$	momento plástico de diseño de la viga
$M_{pl,i,Rd}$	resistencia a flexión de diseño del ala de un <i>T-stub</i> atornillado para el mecanismo de rotura de tipo <i>i</i>
$M_{pl,Rd}$	momento plástico resistente de diseño
$M_{supK-R}$	límite superior resistente de la zona <i>knee-range</i> de la curva momento-giro de la unión
$P$	presión de contacto
$P_i$	parámetro geométrico de la unión
$Q$	carga puntual
$Q$	carga total aplicada en el ensayo
$Q$	esfuerzo de palanca
$Q_M$	carga en el eje mayor
$Q_n$	carga en el eje menor
$R$	reacción en el apoyo
$R_i$	reacción en el apoyo <i>i</i>
$S_i$	rigidez inicial
$S_j$	rigidez de la unión
$S_{cfb}$	rigidez axial simplificada para el ala del pilar a flexión
$S_{cws}$	rigidez axial simplificada para el alma del pilar a cortante
$S_{epb}$	rigidez axial simplificada para la chapa de testa a flexión
$S_{j,hilo}$	rigidez inicial de la unión obtenida a partir de los desplazamientos verticales del ensayo
$S_{j,ni,pred}$	rigidez inicial obtenida mediante un método simplificado
$S_{j,ni}$	rigidez inicial de la unión
$S_{j,lvdt}$	rigidez inicial de la unión obtenida a partir de la deformación de la chapa de testa
$S_{j,opt}$	rigidez rotacional óptima para una viga con carga uniformemente distribuida

---

$S_{j,p-l}$	rigidez post-límite de la unión
$S_{j,Pre.d.i}$	valor de rigidez de la unión obtenido con el método de prediseño para un espesor de chapa de testa $i$
$S_{j,Rd}$	rigidez rotacional de diseño de la unión
$S_{j,Req}$	rigidez requerida para la unión
$S_{s,j}$	rigidez secante de la unión
$T$	esfuerzo de tracción correspondiente al par de fuerzas del momento flector
$T_k$	periodo de vibración del pórtico semirrígido
$T_\infty$	periodo de vibración del pórtico rígido
$V_i$	cortante en el punto $i$
$V_p$	esfuerzo cortante de plastificación del alma
$V_y$	esfuerzo cortante para la primera plastificación del alma
$V_{ci}$	esfuerzos internos de cortante en el pilar
$V_{cr,R}$	valor crítico de colapso elástico del pórtico rígido
$V_{cws.Rd}$	resistencia del panel del alma del pilar a cortante
$V_{cw}$	cortante en el alma del pilar
$V_{Ed}$	esfuerzo cortante de diseño
$V_i$	cortante en la planta $i$
$V_{pl.Rd}$	resistencia a cortante
$V_{Sd}$	valor de diseño de la carga vertical total
$W$	módulo resistente
$W_b$	módulo resistente de la viga
$W_{b.pl}$	módulo resistente plástico de la viga
$W_{pl.eq}$	módulo resistente plástico del elemento viga equivalente
$W_{pl}$	módulo resistente plástico de la sección
$W_{req}$	módulo resistente requerido
$Y_i$	factor geométrico para obtener la resistencia del componente $i$ (Murray y Sumner, 2004)
<b>D</b>	vector de desplazamientos del sistema
<b>F</b>	matriz de flexibilidad
<b>F</b>	vector de cargas del sistema
<b>K</b>	matriz de rigidez
<b>K<sub>T</sub></b>	matriz de rigidez

$\bar{K}$	factor adimensional de rigidez
$\bar{K}^*$	valor adimensional de clasificación de la rigidez de la unión
$\bar{S}$	rigidez adimensional de la unión según la resistencia de la viga
<b>T</b>	matriz de transformación

## Letras minúsculas

$a$	distancia de la zona rígida equivalente al lateral sujeto
$a$	garganta de soldadura
$b$	ancho de la zona rígida cargada equivalente
$b$	ancho real del elemento
$b'_{eff}$	ancho efectivo según el modelo de Faella y otros (2000)
$b_c$	ancho de la zona rígida del componente en la zona de compresión
$b_i$	ancho del elemento $i$
$b_t$	ancho de la zona rígida del componente en la zona de tracción
$b_{ap}$	ancho de la chapa adicional
$b_{cf}$	ancho del ala del pilar
$b_{eff.bwt}$	ancho efectivo para el componente del alma de la viga a tracción
$b_{eff}$	ancho efectivo
$b_{ep}$	anchura de la chapa de testa
$c$	alto de la zona rígida cargada equivalente
$c$	distancia vertical entre las filas de tornillos a tracción
$c_c$	altura de la zona rígida del componente en la zona de compresión
$c_t$	altura de la zona rígida del componente en la zona de tracción
$c_{st}$	precio del material
$d$	altura libre del alma del perfil
$d$	distancia del eje del tornillo a la cara del alma
$d_1$ y $d_2$	dimensiones de la cabeza del tornillo
$d_b$	diámetro nominal del tornillo
$d_h$	diámetro de la cabeza del tornillo
$d_i$	altura de la correspondiente fila $i$ de tornillos de la unión
$d_m$	diámetro medio de la cabeza del tornillo

$d_w$	longitud del alma de la viga, diámetro de la arandela, tuerca o cabeza del tornillo, según sea apropiado
$d_{fc}$	altura libre del ala a compresión
$d_{inf_{K-R}}$	giro abarcado a partir del límite inferior de la zona <i>knee-range</i>
$d_{sup_{K-R}}$	giro abarcado a partir del límite superior de la zona <i>knee-range</i>
$e$	distancia horizontal del taladro al extremo de la chapa
$e_w$	distancia horizontal al borde
$e_x$	distancia vertical del taladro al extremo de la chapa de testa
$f$	condición de flecha relativa
$f_i$	condición de flecha máxima relativa
$f_i$	frecuencia de resonancia
$f_y$	tensión elástica del material
$f_{y,bw}$	tensión elástica resistente del alma de la viga
$f_{yb}$	tensión elástica del material de la viga
$g$	distancia horizontal entre los tornillos pertenecientes a la misma fila
$g_b$	distancia horizontal entre los tornillos de la unión
$g_c$	distancia horizontal del tornillo al alma de la viga
$g_i$	distancia horizontal de los tornillos de la fila $i$ al alma del pilar
$h$	altura
$h_0$	altura respecto al centro de compresión de la primera fila de tornillos a tracción
$h_1$	altura respecto al centro de compresión de la segunda fila de tornillos a tracción
$h_b$	canto de la viga
$h_c$	canto del pilar
$h_i$	altura de la planta $i$
$h_r$	brazo de palanca correspondiente a la fila de tornillos
$h_t$	brazo de palanca de la unión
$h_{ap}$	altura de la chapa adicional
$h_{i,m}$	canto de la viga en el eje mayor del lado $i$
$h_{i,n}$	canto de la viga en el eje menor del lado $i$
$k$	distancia del punto de comienzo del chaflán del angular y la esquina del mismo
$k$	factor de corrección para ajustar al criterio de von Mises (Gomes, 1990)
$k$	rigidez axial
$k'_{cwt}$	factor de reducción para la resistencia del alma del pilar a tracción

---

$k'_{wc}$	factor de reducción según la tensión longitudinal máxima de compresión
$k_1$ y $k_2$	factores de corrección para el modelo del alma a flexión de Costa Neves (2004)
$k_i$	rigidez axial del muelle $i$
$k_M$	resistencia relativa del pórtico
$k_S$	rigidez relativa del pórtico
$k_{apb,art}$	rigidez axial para la chapa adicional a flexión biarticulada
$k_{apb,emp}$	rigidez axial para la chapa adicional a flexión biempotrada
$k_{apb,c}$	rigidez axial de la chapa adicional en la zona de compresión
$k_{apb,t}$	rigidez axial de la chapa adicional en la zona de tracción
$k_{cfb}$	rigidez axial del ala del pilar a flexión
$k_{cfc}$	rigidez axial del ala del pilar a compresión
$k_{cft}$	rigidez axial del ala del pilar a tracción
$k_{cwb,art}$	rigidez axial del elemento placa biarticulado
$k_{cwb,emp}$	rigidez axial del elemento placa biempotrado
$k_{cwc}$	rigidez axial del alma del pilar a compresión
$k_{cws}$	rigidez axial del alma del pilar a cortante
$k_{cwt}$	rigidez axial del alma del pilar a tracción
$k_{eff,r}$	rigidez axial efectiva de la fila de tornillos
$k_{eq}$	rigidez axial equivalente de las filas de tornillos a tracción
$m$	distancia entre el rigidizador superior y el punto de aplicación de la carga (De Lima y otros, 2002)
$m$	distancia entre rótulas en un <i>T-stub</i> atornillado
$m_{pl}$	momento correspondiente a la rótula plástica de la chapa
$n$	distancia entre el eje del tornillo y el esfuerzo de palanca
$n$	factor de forma
$n$	múltiplo
$n_b$	número de tornillos por angular en el ala del pilar
$n_r$	número de filas de tornillos de la unión
$p$	distancia vertical entre las filas de tornillos a tracción
$p_2$	distancia vertical entre la segunda fila de tornillos a tracción y la fila de tornillos a compresión
$p_f$	distancia de la fila de tornillos exterior al ala de la viga
$p_{2-3}$	distancia entre la segunda fila de tornillos a tracción y la fila de tornillos a compresión



---

$p_{f0}$	distancia de la primera fila de tornillos a tracción al ala de la viga
$p_{f1}$	distancia de la segunda fila de tornillos a tracción al ala de la viga
$q$	carga lineal uniformemente distribuida
$q_w$	cargas de viento
$q_{il}$	sobrecargas
$q_{sw}$	concargas
$r$	brazo de palanca simplificado de la unión
$r$	factor de fijación <i>end-fixity factor</i>
$r$	radio de acuerdo entre ala y alma del perfil
$r_i$	factor de fijación de la unión con espesor de chapa de testa $i$
$r_m$	parámetro que relaciona los esfuerzos en ambos ejes del pilar
$r_{ini}$	factor de fijación correspondiente a la rigidez inicial de la unión
$r_{sec}$	factor de fijación correspondiente a la rigidez secante de la unión
$s$	distancia vertical de la fila de tornillos a la línea de rotura plástica teórica
$s_p$	longitud obtenida según una dispersión de 45°
$t_a$	espesor del angular
$t_f$	espesor del ala
$t_h$	espesor de la cabeza del tornillo
$t_i$	espesor del elemento $i$
$t_n$	espesor de la tuerca
$t_t$	espesor del angular superior
$t_w$	espesor del alma
$t_{ap}$	espesor de la chapa adicional
$t_{bw}$	espesor del alma de la viga
$t_{cf}$	espesor del ala del pilar
$t_{cw}$	espesor del alma del pilar
$t_{ep}$	espesor de la chapa de testa
$t_{eq}$	espesor equivalente a la chapa de testa y el ala del pilar
$t_{fb}$	espesor del ala de la viga
$t_{fc}$	espesor del ala del pilar
$t_{fl}$	espesor del ala del elemento inferior
$t_{fu}$	espesor del ala del elemento superior

$t_{pz}$	espesor de la zona del panel del alma
$t_{sa}$	espesor del angular inferior de asiento
$t_{ta}$	espesor del angular superior
$t_{wb}$	espesor del alma de la viga
$t_{wc}$	espesor del alma del pilar
$t_{wh}$	espesor de la arandela
$t_w$	espesor del alma
$w$	distancia horizontal entre los tornillos correspondientes a la misma fila
$z$	brazo de palanca
$l_a$	longitud del angular
$l_n$	longitud del tornillo para el modelo de Agerskov (1976) (Figura 7.12)
$l_s$	longitud del tornillo para el modelo de Agerskov (1976) (Figura 7.12)
$l_w$	longitud del tornillo para el modelo de Agerskov (1976) (Figura 7.12)
$l_{eff}$	ancho efectivo
$\bar{m}$	factor adimensional de resistencia de la unión

## Subíndices

$3D$	componente en el que se incluyen los efectos tridimensionales entre ambos ejes
$apb$	chapa adicional a flexión
$b$	viga
$bfc$	alma y ala de la viga a compresión
$bt$	tornillos a tracción
$bwt$	alma de la viga a tracción
$c$	pilar
$c$	zona de compresión
$cfb$	ala del pilar a flexión
$cfc$	ala del pilar a compresión
$cft$	ala del pilar a tracción
$cwb$	alma del pilar a flexión
$cwc$	alma del pilar a compresión
$cws$	alma del pilar a cortante
$cwt$	alma del pilar a tracción

<i>eff</i>	efectivo
<i>epb</i>	chapa de testa a flexión
<i>eq</i>	equivalente
<i>M</i>	eje mayor
<i>Mn</i>	en ambos ejes, tridimensional
<i>n</i>	eje menor
<i>Pred</i>	prediseño
<i>Rd</i>	valor de diseño
<i>Req</i>	valor requerido
<i>Sd</i>	acción de diseño
<i>t</i>	zona de tracción
<i>w</i>	alma



Tal vez no lo puedes ver  
y lo tienes ante ti (. . .)  
esa luz te hará volver  
a sonreír.

Nada más, *Nacho Béjar*

## Agradecimientos

Agradezco el apoyo recibido para la realización de esta Tesis Doctoral por parte de la *Cátedra Arcelor-Universidad de Navarra*. También las ayudas económicas proporcionadas a lo largo de este período tanto por la *Asociación de Amigos de la Universidad de Navarra* como por el *Ministerio de Educación y Ciencia* a través de sus programas de becas doctorales.

Puede describirse la historia de una Tesis Doctoral como un camino en soledad poblado de compañías. Sirvan los siguientes párrafos como justo agradecimiento a todos aquellos que han compartido estos años. Seguro que no están todos los que son, pero *son* todos los que están. En toda enumeración se incurre siempre en omisiones que espero sean comprendidas.

He de agradecer muy especialmente el ejemplo, dedicación y saber investigador y docente del que ha sido el Director de este trabajo, el Profesor Eduardo Bayo. No puedo tampoco olvidarme de la cercanía y apoyo del resto de miembros del Departamento de Estructuras, y de la eficaz y puntual colaboración del personal del Laboratorio de Edificación.

En estos cinco años, muchos han sido los “cafés” y cenas compartidos con mis otros compañeros doctorandos, muchas las llamadas perdidas y mails recordatorios. Gracias, Bea, Izaskun y Javi.

No querría olvidarme de la contagiosa juventud, ilusión y curiosidad del Profesor (con merecida mayúscula) Lizarraga, del que he tenido la suerte de poder aprender este último año. Tampoco podría omitir la invisible espera y paciente compañía de Teresa (*de profundis*).

Como sé que os buscaréis (como hiciéramos en la del Dr. Portal-Nuñez), y es merecida vuestra presencia aquí, agradeceros, como *iranzutarra* que soy (y que sois todos vosotros, aunque uno lo sea de adopción), a los miembros de la identidad nacional Pío XII 13 y terrenos boscosos anexionados: Jorge, Jesús (compañeros de trapoleo, pululeo. . .) y Sergio (a fe mía que el vuestro tesón atestigua la grandeza y fidalguía

de la vuestra cuna burgalesa).

Muchas otras personas, cercanas a pesar de la lejanía, merecen también aquí su lugar: mis padres, y todos aquellos que se han interesado sobre el tedioso discurrir de estos años (si estás leyendo esto, probablemente tú).

Y por último, a dos muy especiales presencias: a la vivificadora luz enmarcada desde la que ha sido *mi* mesa 3006 de la Biblioteca de Humanidades, y a la música creada por Antonio, Nacho, y muchos otros.

Es profundamente lamentable que un alumno oficial de último año de piano, al estudiar prácticamente sobre el teclado la ejecución de una fuga o de una sonata, desconozca la estructura de éstas como de todas las demás formas musicales, y que este desconocimiento le haga descender a la categoría de una simple pianola si se exceptúa alguna que otra invención expresiva servilmente imitada de los ejemplos prácticos de su profesor.

*Manuel de Falla*

## Reflexiones sobre Arquitectura y estructura

Todo Edificio debe constar de tres cosas: *Solidez, Comodidad y Belleza*; circunstancias que le da la Arquitectura por medio de la *Ordenación* y *Disposición* de las partes que le componen, las que regla con aquella justa proporción que piden el *Decoro* y *Economía*. De aquí resulta que la Arquitectura tiene ocho partes, que son *Solidez, Comodidad, Belleza, Ordenación, Disposición, Proporción, Decoro* y *Economía*.

*Castañeda (1761)*

Desde que se enunciara la tríada vitruviana *Firmitas-Venustas-Utilitas* ha sido considerada la base de la Arquitectura. Las tres son condiciones efectivamente necesarias para obtener una obra de arquitectura. Como indica Quaroni (1977), ha de evitarse *reducir la arquitectura a una parte sola de ella misma*.

Consciente de ello, no pretende este proemio defender para la estructura un papel arquitectónico preponderante que no tiene. Busca, al contrario, desentrañar *su* papel, a menudo ignorado o marginado.

\* \* \*

El Panteón (Figura 1), espacio paradigmático, no sería sin su cúpula, sin sus arcos de descarga internos y su *caementa* que lo configura. Sólo así el Panteón es. La Arquitectura es imposible sin estructura: presencia necesaria, callada a veces, que puntualiza y acompaña al *todo*.

En la antigüedad, la estructura portante no podía separarse de los paramentos que configuraban el espacio. Estructura y cerramientos eran obligatoriamente una misma cosa. La aparición del hormigón y el acero permiten a la arquitectura contemporánea diferenciar estructura portante y cerramiento. La estructura ya no configura necesariamente el espacio, mas sigue presente. Aparecen ritmos, distancias, proporciones



**Figura 1:** El Panteón

estructurales: su misión resistente configura y ordena el espacio. La estructura no es una pieza más que se añade al edificio terminado. Moneo (1976) afirma explícitamente que *a la estructura van confiados los parámetros clásicos como la proporción, la medida; al cerramiento, la decoración.*

\* \* \*

Los números y los complejos modelos matemáticos no son estructura. Lo es saberse habitante de un mundo grávido. Lo es desear habitar el aire. Lo es controlar a la Naturaleza para hacerla espacio habitable por el hombre. Estructura es un conjunto de conceptos, profundamente arquitectónicos todos ellos, pues es Arquitectura la lucha cotidiana contra la Gravedad para delimitar el espacio *a medida del hombre*. El edificio ha de nacer desde el conocimiento del mecanismo resistente de las estructuras, de los requerimientos funcionales, desde la necesidad de unas instalaciones, de unas técnicas constructivas... para acabar, mágicamente, con un diseño en el que todo cristaliza en un único todo, en el que todo está y nada sobra.

Deseo que esta simplicidad sea, por el contrario, la concentración, la cristalización de una multitud de pensamientos y de medios.

*Corbusier (1924)*

\* \* \*

La arquitectura es respuesta a la necesidad primitiva de proporcionar abrigo. Pero el espíritu humano no sólo requiere de protección. El hombre posee su entorno a través de la geometría, del orden, de la belleza. La Arquitectura es la forma del hombre de *habitar* la tierra, y expresión de todo su mundo, técnico y espiritual. La fría técnica se humaniza al adquirir conciencia espacial.

Crear se dice en griego  $\tau\epsilon\chi\tau\omega$ . A la raíz "tec" de este verbo pertenece la



palabra τεχνη, técnica. (...) Los griegos piensan la τεχνη, el crear, desde el punto de vista del permitir aparecer. La τεχνη pensada así se cubre desde antaño en lo tectónico de la arquitectura.

*Heiddegger (1951)*

La arquitectura, desde sus primigenios esbozos, nace necesitada de realidad. Alberga en su bidimensionalidad el germen espacial. Ha de hacerse estructura y construcción para ser espacio y luz, acogida y protección. Sólo entonces es: Arquitectura.

Para mí, el núcleo propio de toda tarea arquitectónica reside en el acto de construir, pues es aquí, cuando se levantan y ensamblan los materiales concretos, donde la arquitectura pensada se convierte en parte del mundo real.

*Zumthor (1988)*

\* \* \*

Para que la arquitectura sea, se requiere de unos materiales y una tecnología. *Cada material posee sus propias características, que hay que conocer para trabajar con él. (...) En realidad no esperamos nada de los materiales, sino únicamente de su empleo correcto* (van der Rohe, 1938). Conocer los materiales existentes y sus técnicas es básico. Es de este modo como se establecen los verdaderos cambios en arquitectura.

La arquitectura no se hubiera formulado hace quince o veinte años, porque no disponíamos de manera indiscutible de ese medio que es el hormigón armado.

*Corbusier (1924)*

\* \* \*

Con la aparición de las modernas tecnologías, materiales y normativas, la antigua ambición generalista resulta poco menos que imposible. Para llevar a buen término la ardua empresa de construir un edificio, ya no se requiere simplemente de un arquitecto, un constructor y un cliente. Las tareas se han atomizado y diversificado. Se necesita de especialistas para desarrollar los complejos análisis requeridos por cada componente de la construcción: especialistas en eficiencia energética, especialistas en sistemas constructivos, especialistas en estructuras, especialistas en instalaciones... ¿especialistas en *estética arquitectónica*?

Quizá la respuesta sea la creación de equipos de técnicos multidisciplinares, en los que todos los requerimientos sean considerados y analizados desde un principio. La idea arquitectónica resultante del auténtico *trabajo en equipo* condensará en un resultado único y unitario. Dará respuesta, desde su *singular unidad*, a la pluralidad de condiciones.

Un propósito firme: que no salga un proyecto de nuestras manos sin que haya nacido en el seno de equipos de técnicos de muchas clases. No pueden ponerse las instalaciones después de haber proyectado un edificio. No se puede proyectar una estructura después de haber pensado el edificio.

*de la Sota (1969)*



(a) Frontón de Recoletos



(b) Hipódromo de la Zarzuela

**Figura 2:** Ejemplos de la colaboración entre técnicos

Renunciar al romanticismo tras la imagen del *yo-arquitecto* para configurar un nuevo *nosotros* cimentado en una activa colaboración entre los diversos técnicos responsables. Expresión máxima del arte en sociedad que es la arquitectura: un arte *con-otros* y *para-otros*.

Dos edificios españoles de los años treinta muestran los excelentes resultados de tal colaboración: el frontón de Recoletos (Figura 0.2(a)) y el hipódromo de la Zarzuela (Figura 0.2(b)). En ellos los arquitectos Arniches, Domínguez y Zuazo *contaron* con la presencia del ingeniero Eduardo Torroja<sup>1</sup>. La forma arquitectónica nació sabiendo de su estructura. La estructura ya estaba allí, en la Idea arquitectónica generadora. Después vendrían los cálculos, las ecuaciones diferenciales, los planos de armado...

\* \* \*

La Historia de la Arquitectura es una Historia de Ideas, de ideas construidas, de formas que materializan y ponen en pie esas ideas.

*Campo Baeza (1995)*

Las músicas de Bach no es sólo contrapunto; las pinturas de los maestros renacentistas no son simplemente un tratado de perspectiva; las tablas flamencas no son un manual de técnica al óleo. No son sólo técnica, aunque la dominan y aplican excepcionalmente. Son algo más. Son muestra de una técnica sublimada en un todo del que, aunque a veces imperceptible, ella también forma parte indispensable.

## Referencias

Campo Baeza, A. (1995). *La idea construida*. Capítulo Idea, luz y gravedad, bien temperadas. Sobre las bases de la Arquitectura. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1996.

<sup>1</sup>Merece la pena conocer la génesis del diseño de estos edificios. El propio Torroja la explica en su libro Torroja (1999). Surge el diseño de la colaboración de técnicos competentes esforzándose por conseguir el mejor y más coherente resultado posible. No hay imposición de una idea espacial o estructural, sino confrontación y crítica surgida del trabajo *mano a mano* entre los técnicos.

- Castañeda, Joseph (1761). *Compendio de los diez libros de Arquitectura de Vitruvio por Claudio Perrault*. Comisión de Cultura del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, Galería-librería Yebra, Consejería de Cultura del Consejo Regional, 1981.
- Corbusier, Le (1924). *El espíritu nuevo en arquitectura ; En defensa de la arquitectura*. Capítulo El espíritu nuevo en arquitectura. Comisión de Cultura del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1983.
- de la Sota, Alejandro (1969). *Alejandro de la Sota : escritos, conversaciones, conferencias*. Capítulo Conferencia en Pamplona. Gustavo Gili, Fundación Alejandro de la Sota, 2002.
- Heiddegger, Martin (1951). *Chillida-Heiddegger-Husserl. El concepto de espacio en la filosofía y la plástica del siglo XX*. Capítulo Bauen-Wohnen-Denken (Construir-Habitar-Pensar). Universidad del País Vasco, 1990.
- Moneo, Rafael (1976). *La llegada de una nueva técnica a la arquitectura (conferencia)*. ETSAB.
- Quaroni, L. (1977). *Proyectar un edificio. Ocho lecciones de arquitectura*. Xarait, 1987.
- Torroja, Eduardo (1999). *Las estructuras de Eduardo Torroja vistas por Eduardo Torroja*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento.
- van der Rohe, Mies (1938). *Mies van der Rohe : la palabra sin artificio : reflexiones sobre arquitectura, 1922-1968*. Capítulo Discurso de ingreso como director del Departamento de Arquitectura de Armour Institute of Technology (AIT). El Croquis Editorial, 1995.
- Zumthor, Peter (1988). *Pensar la arquitectura*. Capítulo Una intuición de las cosas. Gustavo Gili, 2004.



Entréme donde no supe,  
Y quedéme no sabiendo  
Toda ciencia trascendiendo.

*San Juan de la Cruz*

## Introducción

Aunque el concepto semirrígido es conocido desde antiguo, las estructuras de acero suelen diseñarse bajo la suposición de que las uniones viga-pilar son articuladas o rígidas. Se consigue con ello una gran simplificación en el diseño, pero se omite el comportamiento real de las uniones. La consideración del comportamiento rotacional de las uniones complica el análisis y el diseño. Por eso, a pesar de que los ahorros obtenidos con su empleo han sido ampliamente publicados y difundidos, no se emplean.

Además, hasta hace poco, las normativas estructurales tampoco las recogían. El actual Eurocódigo las incluye y regula su aplicación. El documento normativo del Eurocódigo 3 en su parte de Uniones, la parte 1.8, es un texto fundamental para el conocimiento de las uniones semirrígidas. En él se recoge gran parte del *estado de la cuestión* actual, el principal sistema de clasificación de uniones, y el método más avanzado para su análisis, el método de los componentes.

Al existir ya un *corpus* teórico y normativo, esta Tesis plantea analizar posibilidades prácticas de aplicación de este tipo de uniones. La mayoría de los trabajos realizados hasta el momento tratan temas diversos (predicción del comportamiento de la unión, análisis avanzado de la estructura...), casi siempre desde un punto de vista teórico. La propia norma del Eurocódigo es una sólida base teórica, pero su aplicación práctica resulta muy compleja.

La primera y segunda partes parten de este enfoque primordialmente práctico, mientras la tercera tiene un carácter más propositivo.

La Parte I, *Diseño de pórticos de acero con uniones semirrígidas*, analiza el problema del diseño de los pórticos con uniones semirrígidas. El Capítulo 1, *Introducción al concepto semirrígido*, sirve de introducción general a la morfología estructural semirrígida. En él se exponen las ventajas derivadas de su aplicación, desde el punto de vista morfológico, de ejecución y de precio (se presenta un análisis comparativo del costo de estas uniones en España). Se analizan las características de los diversos tipos de uniones viga-pilar de acero. Se resume también brevemente el marco normativo para

estas uniones, tanto en Europa como en los Estados Unidos.

El Capítulo 2, *Clasificación y comportamiento de pórticos semirrígidos*, profundiza en el comportamiento de las uniones semirrígidas. Se realiza un repaso a los estudios existentes sobre su influencia tanto en las condiciones globales de servicio como resistentes de las estructuras semirrígidas. Esta influencia es el criterio principal adoptado para la clasificación de las uniones. Las principales propuestas se exponen también en ese mismo capítulo, dando especial importancia al del Eurocódigo.

Un último paso previo al diseño de pórticos con uniones semirrígidas es el desarrollo de un modelo matemático que exprese adecuadamente su comportamiento rotacional y resistente. Las propuestas desarrolladas hasta ahora, junto con una serie de aclaraciones prácticas, se incluyen en el Capítulo 3.

El Capítulo 4 trata explícitamente el problema del diseño del pórtico semirrígido. Se propone en él un nuevo método de diseño, de sencilla aplicación. Los ejemplos de diseño desarrollados en el Capítulo permiten demostrar también las ventajas económicas de este tipo de uniones.

La Parte II desarrolla un método sencillo de diseño para un tipo concreto de uniones semirrígidas: las uniones de chapa de testa extendida.

El Capítulo 5 estudia la aplicación del método de cálculo de uniones propuesto en la Parte 1.8 del Eurocódigo 3 para el caso concreto de este tipo de uniones. Este *método de los componentes* es muy completo y versátil, pero resulta de difícil aplicación. Como se verá, es un método de análisis, no de diseño de la unión.

Los siguientes capítulos profundizan en la comprensión del mecanismo resistente de estas uniones. El Capítulo 6 realiza un análisis paramétrico de diversos factores geométricos y su influencia en el comportamiento global de la unión. En el Capítulo 7 se proponen y analizan las características de un modelo numérico de elementos finitos que modele adecuadamente esta unión semirrígida.

Del estudio previo sobre el comportamiento de las uniones de chapa de testa extendida se obtiene un modelo simplificado de comportamiento, presentado en el Capítulo 8. El modelo propuesto permite estimar de modo sencillo la rigidez y resistencia de la unión. Es una propuesta muy práctica y sencilla. Usada junto con el método de diseño propuesto en el Capítulo 4 simplifica el diseño de estructuras semirrígidas.

La tercera y última parte propone avanzar un paso más allá en la morfología semirrígida. En el Capítulo 9 se presenta una nueva morfología estructural, en la que el comportamiento semirrígido se extiende a ambos ejes. Para la consecución de esta estructura semirrígida tridimensional, se diseña un nudo semirrígido tridimensional, que es ensayado en el Laboratorio de Edificación de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Navarra. La información sobre los experimentos realizados y sus resultados se expone en el Capítulo 10. El Capítulo 11 profundiza en los efectos tridimensionales observados por medio de los resultados complementarios obtenidos con un modelo virtual de elementos finitos.

Finalmente, el Capítulo 12 aplica el método de los componentes al nudo tridimensional propuesto para obtener una estimación teórica de su rigidez y resistencia. La propuesta actual del método de los componentes carece de todos los elementos para poder analizarlo. En este capítulo se desarrolla la formulación adicional necesaria.