

Funcionamiento estructural de las armaduras de par y nudillo. Metodología de análisis

Angel L. Candelas Gutiérrez
Iñigo Ariza López

Hemos podido constatar el gran número de armaduras de pares que continuamente son desmontadas y a las que se les adjudica la imposibilidad de soportar las cargas que, por otra parte, vienen manteniendo desde hace siglos. A este hecho contribuyen diversos factores, entre los que se debe mencionar la escasa —por no decir nula— formación que reciben los arquitectos relativas al funcionamiento estructural de estos sistemas tradicionales y al propio comportamiento estructural de la madera; y, más recientemente, la actuación de los organismos de control técnico de proyectos, responsables en muchas ocasiones de la actitud «defensiva» de los arquitectos ante la más mínima duda. En este artículo se quiere esbozar una metodología de trabajo, que dará lugar a un desarrollo de mayor envergadura, en la que se conjugan los conocimientos y procedimientos utilizados en la carpintería tradicional con el análisis estructural contemporáneo, al objeto de dar una visión del comportamiento estructural y acercarnos al coeficiente de seguridad de las armaduras de pares construidas según las reglas de la carpintería de lo blanco.

Podremos observar como, en muchos casos, las armaduras están dimensionadas para soportar acciones muy superiores a las reales. A este respecto, téngase en cuenta la propia evolución de las armaduras que las fue llevando progresivamente —a partir del siglo XVII aproximadamente— a un mayor distanciamiento entre los pares, pero conservando para su dimensionado las mismas escuadrías con lo que, paradójicamente, se puede comprobar que las armaduras más

antiguas, que siguen estrictamente el criterio de «a calle y cuerda», pueden presentar un mayor coeficiente de seguridad. En esta comunicación nos centraremos exclusivamente en la aproximación a tres aspectos. En primer lugar la definición de las características geométricas «canónicas» que formarán la base de datos del trabajo, en segundo lugar se presenta una introducción al análisis de los vínculos entre barras y, por último se aporta la comprobación estructural de dos armaduras reales, de tres y cinco paños, respectivamente. En la primera, para estudiar las alteraciones que impone la introducción de lacería. En la segunda, como modelo más complejo, para evaluar su índice de seguridad.

CONFIGURACIÓN DE LAS ARMADURAS TRADICIONALES DE PAR Y NUDILLO. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Como se podrá suponer, las armaduras de pares existentes en nuestro país presentan una variada casuística, sin embargo, la mayoría de ellas se ejecutaron siguiendo las «recetas» transmitidas oralmente dentro del gremio de los carpinteros, y que quedaron recogidas en los manuscritos de Diego López de Arenas (1619), Fray Andrés de San Miguel (h. 1640) y Rodrigo Álvarez (h. 1650?). Resumiremos muy brevemente dichas características, que son las que servirán para plantear el modelo geométrico base del análisis estructural. Por razones de espacio, debemos remitir

a los tratados y, en general, a la bibliografía de referencia para un mayor detalle o explicación sobre lo que se expone a continuación.

Inclinación de la cubierta

Para obtener la inclinación de los pares, y para muchas otras cuestiones, los carpinteros utilizaban cartabones cuyos ángulos obedecían, fundamentalmente, a divisiones de la semicircunferencia. Para las armaduras el más frecuente era el cartabón de 5 (36°), y más raramente los cartabones de 4 (45°), 4 y medio (40°) o 6 (30°).

Ubicación del nudillo

En general el nudillo se sitúa a una altura equivalente a 2/3 de la altura medida desde la base. Excepcionalmente, debido a determinadas imposiciones de la geometría del lazo, toma otras posiciones, en cualquier caso muy cercanas.

Separación entre conjuntos de pares y nudillo

La regla más habitual era utilizar separaciones iguales a dos veces el grueso de los maderos —*a calle* y

cuerta—. Esta separación se cumple estrictamente en la mayoría de las armaduras ejecutadas hasta el siglo XVII, posteriormente se detecta un incremento llegando hasta separaciones equivalentes a 4 o 5 veces el grueso.

Determinación de la escuadría de pares y nudillos

El dato de partida en la construcción de una armadura era la definición del grueso de los maderos. De hecho, este grueso se convertía en el módulo o unidad de medida utilizado en toda la construcción. La forma canónica de obtener el grueso era la división del ancho de la estancia a cubrir por un número múltiplo de 9 y del número de peinazos transversales. Una vez determinado el grueso (g), la forma canónica de obtener el alto o canto de los maderos (h) depende exclusivamente de dicho grueso y del cartabón cuadrado, mediante una sencilla construcción geométrica que puede expresarse como

$$h = g\sqrt{2}$$

Con las anteriores definiciones se puede ya establecer una base de datos geométricos de partida que se puede considerar un conjunto muestral estadísticamente representativo de las armaduras existentes en nuestro país. Este conjunto queda

Escuadrías de pares en función de la luz y del número de peinazos transversales											
Luz a cubrir	Número de peinazos en almizate										
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
400	11,1	8,9	7,4	6,3	5,6	4,9	4,4	4,0	3,7	3,4	3,2
450	12,5	10,0	8,3	7,1	6,3	5,6	5,0	4,5	4,2	3,8	3,6
500	13,9	11,1	9,3	7,9	6,9	6,2	5,6	5,1	4,6	4,3	4,0
550	15,3	12,2	10,2	8,7	7,6	6,8	6,1	5,6	5,1	4,7	4,4
600	16,7	13,3	11,1	9,5	8,3	7,4	6,7	6,1	5,6	5,1	4,8
650	18,1	14,4	12,0	10,3	9,0	8,0	7,2	6,6	6,0	5,6	5,2
700	19,4	15,6	13,0	11,1	9,7	8,6	7,8	7,1	6,5	6,0	5,6
750	20,8	16,7	13,9	11,9	10,4	9,3	8,3	7,6	6,9	6,4	6,0
800	22,2	17,8	14,8	12,7	11,1	9,9	8,9	8,1	7,4	6,8	6,3
850	23,6	18,9	15,7	13,5	11,8	10,5	9,4	8,6	7,9	7,3	6,7
900	25,0	20,0	16,7	14,3	12,5	11,1	10,0	9,1	8,3	7,7	7,1

acotado mediante la combinación de los siguientes sucesos:

- a) Inclinación de la cubierta: $A = [30^\circ, 36^\circ, 40^\circ, 45^\circ]$
- b) Luz de la armadura: Se estudiarán luces entre 400 a 900 cm con intervalos de 50 cm.
- c) Escudrías: Se estudiarán armaduras construidas con maderos cuyo grueso es función del número de peinazos transversales en el almizate, considerándose desde 4 hasta 14 posibles peinazos. De todas las soluciones posibles, que quedan expresadas en la tabla adjunta, muchos valores no son válidos por quedar fuera del rango de uso habitual en las armaduras, serían los gruesos inferiores a 6 cm o superiores a 11,5 cm. En negrilla se indican los valores que consideramos posibles.
- d) Separación entre pares: $S = [2g, 3g, 4g, 5g]$

La combinación de los anteriores sucesos da lugar a un total de 944 posibles combinaciones, que podrán ser calculadas para obtener así tanto tabulaciones de dimensionado, como para extraer las conclusiones correspondientes.

ANÁLISIS DE VÍNCULOS. SIMPLIFICACIONES ESTRUCTURALES

Quizá el principal problema a resolver en el desarrollo de un modelo para análisis estructural es la adecuación al funcionamiento real de la estructura de las simplificaciones que se efectúan en los vínculos entre barras.

La observación de la propia geometría del vínculo nos dará, en general, criterios suficientes para su idealización. Sin embargo, en algunas uniones se nos pueden plantear serias dudas sobre su funcionamiento. En estos casos, los síntomas de deterioro en los enlaces y las deformaciones de las cubiertas, se pueden utilizar como medios determinar los grados de libertad de los vínculos.

Utilizaremos para esta exposición un sistema cartesiano de ejes, en el que el eje «X» lo situamos en el plano del conjunto pares-nudillo, y puede quedar representado por la dirección de los tirantes, eje «Y» vertical, siendo el eje «Z» el que marca la dirección del estribo (fig. 1).

En el análisis de los grados de libertad de los vínculos se pueden distinguir dos tipos fundamentales de enlaces: aquellos cuya disposición constructiva

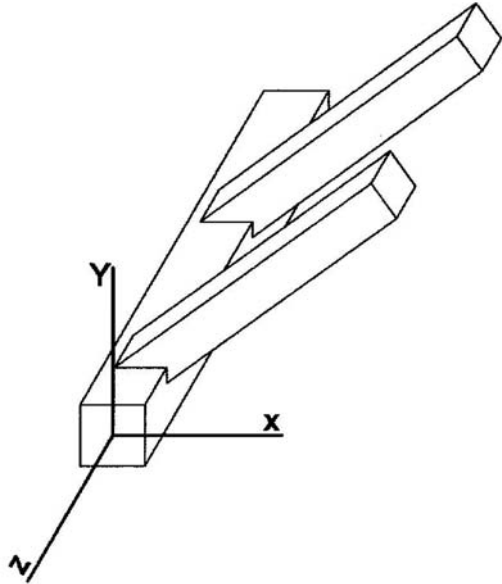


Figura 1

define el vínculo y es independiente del estado de carga, y aquellos que aúnan una disposición constructiva con un estado tensional, de forma que una modificación de éste provocaría la inoperancia de la disposición constructiva.

La incorporación en este artículo de las disposiciones constructivas comúnmente utilizadas ocuparía la limitada extensión por lo que, de nuevo, remitimos a la bibliografía de referencia (Nuere 2000; Candelas 2001).

Enlace del par con el estribo

La construcción del enlace no impide directamente ninguno de los posibles movimientos, en este caso es la conjunción de la geometría del enlace, con las cargas que va a sufrir lo que provoca la estabilidad del

conjunto. Entendemos que se impiden los movimientos según X, Y y Z: los movimientos X e Y se impiden por la oposición directa a ellos que provocan el conjunto de barbilla y patilla, siempre que las alfaradas estén continuamente comprimidas. En el desarrollo del cálculo veremos cómo, ni en la hipótesis más desfavorable, la acción del viento provoca un estado de tracción en las alfaradas.

Según Z tan sólo se opondría al movimiento el rozamiento entre par y estribo y los clavos, no siempre existentes, que atravesando la barbilla penetran en el estribo. En este caso hay que considerar elementos no directamente estructurales como es la tablazón, siempre existente, y los peñazos que solidarizan los pares contiguos, que dan solidaridad al conjunto. La acción que debe soportar la unión en esta dirección provendrán del viento o del sismo. No parece necesario efectuar una demostración numérica de la imposibilidad de movilizar la base de las alfaradas. En el caso de armaduras sin limas, el viento tendría que provocar primero la traslación horizontal del hastial, en otros casos se provocaría antes el giro en la base, que el desplazamiento. El sismo introduciría en cada par una acción proporcional a la carga del mismo y, dado que el centro de gravedad de esta carga se sitúa muy por encima del punto de apoyo, es obvio que se provocaría antes el vuelco que la traslación.

No hay tampoco disposición constructiva que impida el giro del par en su encuentro con el estribo, ni se dan situaciones de carga que puedan impedir estos movimientos.

Enlace del tirante con el estribo

En este caso es la construcción del enlace y la posición de los elementos lo que impide las tres traslaciones. El diseño está efectivamente concebido para garantizar la imposibilidad de movimiento relativo según X. La muesca que habitualmente se produce en el tirante para encajar el estribo solidariza ambos elementos. En la dirección del estribo la inmovilidad queda garantizada por el rozamiento. La imposibilidad de movimiento en sentido vertical es evidente.

No hay disposición constructiva que impida el giro según OZ, sin embargo, para que éste se produzca sería necesario que el peso propio del tirante fuera capaz de generar un par de fuerzas con módulo superior a la compresión que los pares introducen en el

estribo. En principio tomaremos como impedido este giro y efectuaremos la comprobación anterior con los datos de la estructura calculada. No existen acciones que puedan provocar giros según los ejes OZ u OY por lo que resulta indiferente la consideración que se tome para los mismos.

Por su parte, consideramos el estribo como una barra continua, con desplazamientos coaccionados exclusivamente en su unión con el tirante. Aunque en la mayoría de las armaduras el estribo descansa sobre la obra de fábrica, en realidad la disposición constructiva original es la ausencia de apoyo bajo este elemento.

Enlace de los pares con el nudillo

Existen diferentes formas de ejecutar este enlace. Nos centraremos en la más común, coincidente con la descrita en los tratados, y presente en la mayoría de las armaduras, que consiste en la formación de un rebaje en el par —garganta— y quijeras en el nudillo.

El enlace está claramente concebido para el funcionamiento del nudillo a compresión, de forma que la inexistencia de ésta provocaría el desmembramiento del enlace. Por tanto, la consideración de movimiento impedido en sentido X e Y sólo tiene validez en el caso de existencia permanente de compresión en el nudillo, en cualquier hipótesis de carga. La traslación en dirección perpendicular al plano de pares-nudillo, o sea según Z, queda impedida por efecto de las quijeras. En el caso de almizates sin peñazos, no existe carga que pueda movilizar movimientos según Z, y ello puede hacer innecesaria la presencia de quijeras, como ocurre en armaduras secundarias sin peñazos en el almizate.

La disposición constructiva no impide el giro en este enlace, dado que, aunque se produce un acoplamiento teóricamente perfecto, las diferencias de escuadrías, y las holguras siempre existentes, permitirán un cierto giro que, aunque mínimo, es suficiente para disipar un posible momento flector.

Enlace entre pares

El sistema de unión, que se basa en la presión entre las caras verticales de los pares y la clavazón, a tra-

vés de la hilera, no es suficiente para impedir el giro de los pares. Supondré, pues, este enlace, como una articulación, con posibilidad de giro de cada alfarda y capacidad de traslación del conjunto en las tres direcciones.

Enlaces entre peinaos, y pares o nudillos

En general estos enlaces se ejecutan con la introducción de una espiga del peinao en el hueco practicado al efecto en el elemento a enlazar. Este enlace provoca la imposibilidad de movimiento en cualquiera de los ejes, manteniéndose esta unión en sentido vertical y normal al peinao para cualquier estado de cargas, sin embargo no será capaz de absorber tracciones. En general, este sistema de ejecución no permite considerar la coacción de giros. Ahora bien, en armaduras con lazo se introduce una gran profusión de elementos como halibas, prismas triangulares o tajeles en general, que rigidizan el enlace, y dificultan la interpretación de su funcionamiento estructural. El análisis de estas circunstancias podría dar lugar a un importante apartado dentro del trabajo general.

PROPIEDADES DEL MATERIAL, ACCIONES CONSIDERADAS Y MÉTODO DE ANÁLISIS

Es conocido que la madera no pierde de forma significativa sus características resistentes por efectos del paso del tiempo (Rubio de hita 1997), (Argüelles y Arriaga 2000), siempre que se trate de madera sana. Ello nos permite utilizar los conceptos de la normativa actual para caracterizar el comportamiento resistente. Las clases resistentes de madera (UNE EN-338) constituyen una eficaz herramienta pudiendo adscribir la madera a las clases de coníferas C18 a C24. Las acciones a considerar se obtienen a partir de la NBE-AE-88 y el análisis se efectúa de acuerdo con lo dispuesto en el Eurocódigo 5 y en el desarrollo que de él se hace en la norma no publicada NBE-EM.

ESTUDIO DE DOS ARMADURAS EXISTENTES

En el estudio que se pretende llevar a cabo se introducirá el análisis de estructuras existentes para utili-

zarlas como contraste a los datos que se derivan de las construcciones hipotéticamente canónicas. En estas estructuras se tendrá en cuenta la configuración estructural real con las alteraciones que supone la existencia de lazo y a cuya aproximación obedecen los ejemplos presentados a continuación. Se trata de dos modelos que se pueden considerar arquetípicos de un gran conjunto de armaduras: la armadura del Convento de San Juan Bautista de Villalba del Alcor y la armadura del presbiterio de la Iglesia de San Francisco de Ayamonte.

La iglesia del convento de Villalba es de nave única y en ella encontramos una armadura de tres paños, con una luz de 7,10 metros, siendo de cinco el cartabón de armadura. Efectuaremos el análisis estructural de un módulo de armadura coincidente con la zona de lacería, conformado por un total de ocho pares de alfardas, existiendo en el primero y en el último sendos tirantes.

En la iglesia de San Francisco de Ayamonte se estudia la armadura ochavada del presbiterio de base rectangular y con desarrollo de cinco paños, Es un tipo menos utilizado, pero representativo de la variedad tipológica que puede alcanzar el sistema. En el texto (Candelas, 2001) se puede consultar la descripción detallada de ambas armaduras.

Armadura de la Iglesia del Convento de Villalba

En la figura 2 se visualiza la geometría del módulo de estructura analizado, a la que se ha añadido la de-

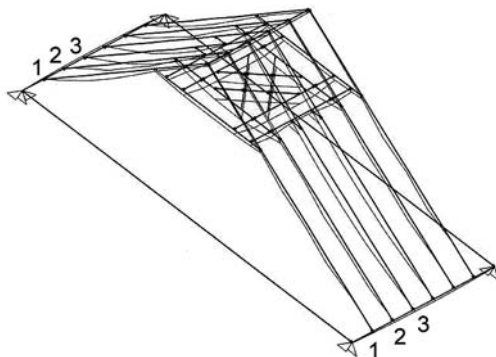
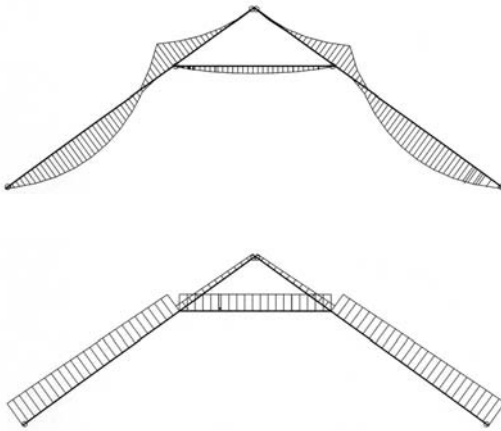


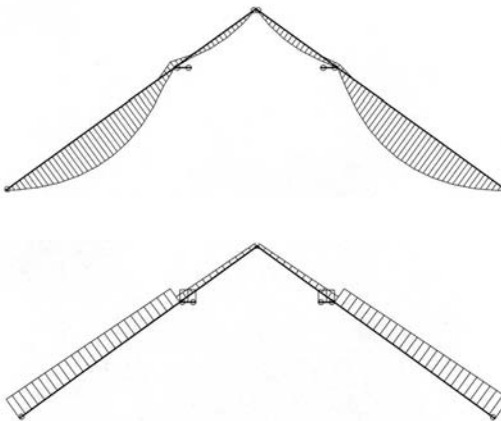
Figura 2

formada de las barras. Cabe señalar que los desplazamientos obtenidos son mínimos, inferiores a 5 mm en el punto de mayor desplazamiento.

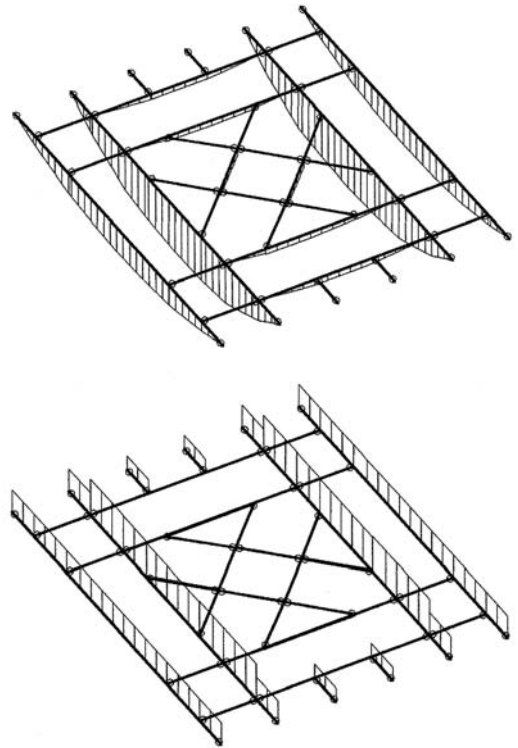
En las siguientes figuras podemos visualizar las gráficas de momentos flectores y axiales que solicitan a los elementos del módulo analizado. Se representan las solicitaciones en un conjunto de par-nudillo completo (figs. 3 y 4), las que se producen en un plano donde el almizate queda interrumpido por el lazo (figs. 5 y 6) y las del almizate (figs. 7 y 8).



Figuras 3 y 4



Figuras 5 y 6



Figuras 7 y 8

Para analizar las solicitaciones se pueden considerar tres secciones significativas, en las que se producen la solicitaciones más desfavorables, éstas son:

- Sección 1: Sección con mayor solicitación en el par, entre su base y el encuentro con el nudillo.
- Sección 2: Sección en el par, en el punto de encuentro con el nudillo.
- Sección 3: Sección del nudillo con mayor solicitación.

En la tabla siguiente se evalúa el índice de seguridad de estas secciones, entendido como la relación entre la tensión resultante y la admisible por el material, considerando clase resistente C18. Los planos 1, 2 y 3 son los marcados en la figura 2.

Plano nº	Sección	Ic	If	Ifc
1	1 (par)	0,19	0,23	0,42
1	2 (par)	0,15	0,23	0,38
1	3 (nud.)	0,20	0,22	0,41
2	1 (par)	0,17	0,05	0,22
2	2 (par)	0,14	0,07	0,21
2	3 (nud.)	0,36	0,49	0,85
3	1 (par)	0,15	0,31	0,45
3	2 (par)	0,13	0,18	0,31

Como se puede observar encontramos índices de seguridad elevados, que se incrementarían si utilizáramos clases resistentes superiores, más cercanas quizá a la realidad. Se debe destacar, entre otras cuestiones, por una parte, el incremento de tensiones en el plano 2, adyacente a la zona de lazo al tener que soportar las consecuencias de la desaparición de los nudillos y, por otra parte, la gran similitud entre los índices de seguridad del par y del nudillo.

Armadura de la Iglesia de San Francisco (Ayamonte)

En la figura 9 se puede observar la discretización de la estructura, una cúpula facetada de cinco paños sobre base ochavada, con unas dimensiones en planta de unos 9,00 m. de ancho por 11,30 de largo.

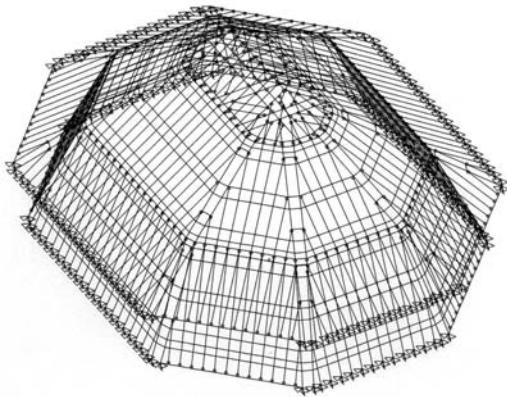
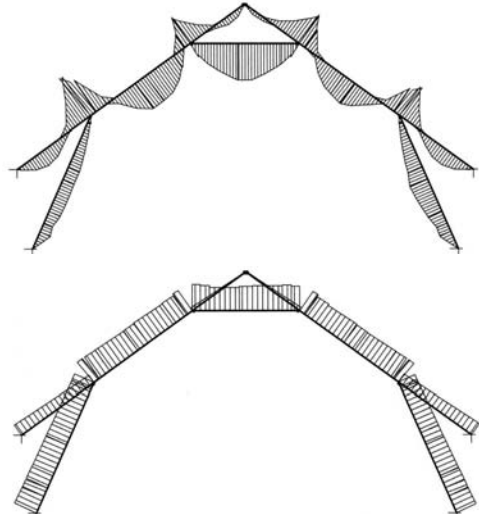
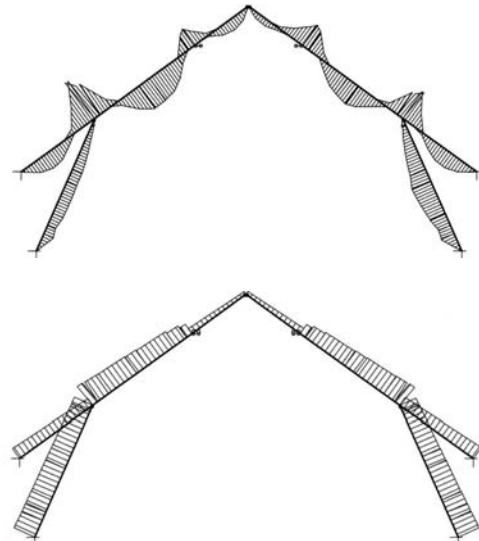


Figura 9

En esta estructura se da una gran variedad de situaciones de solicitaciones a los elementos. Hemos escogido para su presentación las que consideramos más representativas y que corresponden a un plano en cuyo almizate existe nudillo (figs. 10 y 11) y otro en zona con lazo donde el nudillo ha desaparecido (figs. 12 y 13).



Figuras 10 y 11



Figuras 12 y 13

En esta armadura se ha efectuado la comprobación para cada plano de las siguientes secciones, cuya posición se presenta en la figura 14.

- Sección 1: Sección con mayor sollicitación en pares del paño inferior
- Sección 2: Sección con mayor sollicitación en el pares del paño intermedio, entre el estribo y el encuentro con el paño inferior.
- Sección 3: Sección del par del paño intermedio en el punto de encuentro con el par del paño inferior.
- Sección 4: Sección con mayor sollicitación en el par correspondiente al paño intermedio, entre el encuentro con el quinto paño y con el nudillo.
- Sección 5: Sección del par del paño intermedio en el punto de encuentro con el nudillo.
- Sección 6: Sección con mayor sollicitación en el nudillo.

Se hace inviable, en este caso, la presentación de los índices de seguridad, que quedarán para su expo-

sición en el congreso, aunque sí nos permitimos adjuntar las conclusiones que pueden extraerse de su análisis.

CONCLUSIONES

De las distintas apreciaciones que se pueden extraer del análisis de ambas armaduras nos ha parecido oportuno resaltar las que se exponen a continuación, si bien deben entenderse como provisionales, pues deberán confirmarse o matizarse a partir del análisis del espacio muestral antes establecido.

Relación entre tensiones en pares y nudillo

Se observa una cierta uniformidad de tensiones en ambos elementos en el caso de la armadura simple de tres paños. La escuadría del nudillo que se obtiene mediante la aplicación de una regla geométrica tendente a hacer coincidir los vértices del cornezuelo con la cara superior del par, resulta ser la sección ne-

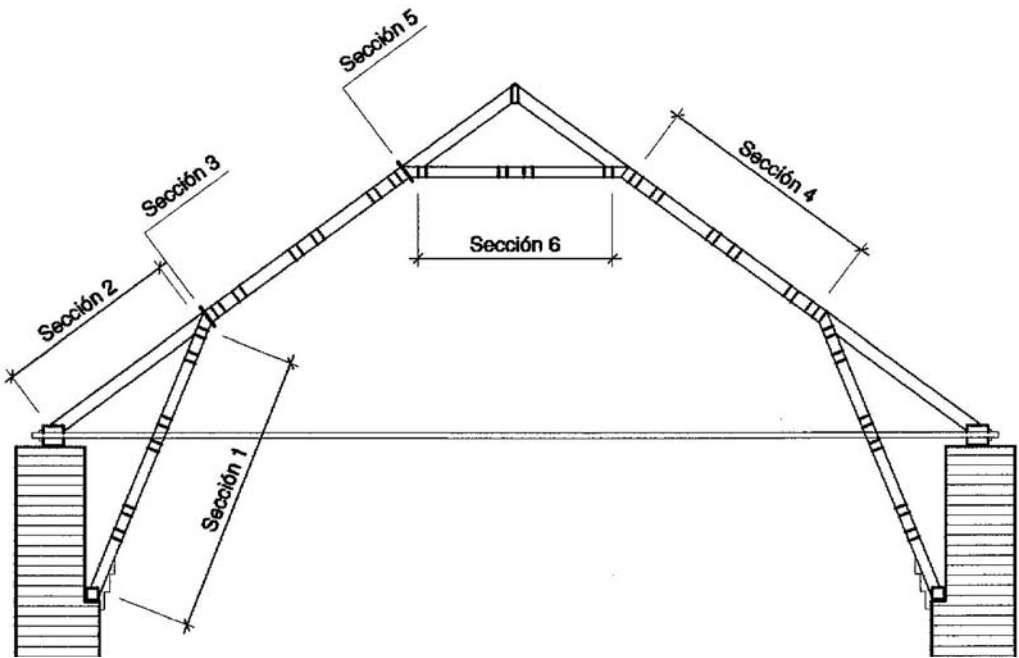


Figura 14

cesaria para que tanto el nudillo como el par trabajen a tensiones máximas aproximadamente similares. El valor que queda fuera de esta uniformidad, correspondiente al nudillo del plano número 2, se debe a que este elemento debe absorber la compresión inducida por el par adyacente cuyo nudillo ha desaparecido, por lo que no es representativo del comportamiento genérico del sistema. En la armadura de cinco paños, sin embargo, se aprecia una menor uniformidad tensional, destacando la sección central del tercer paño con un índice muy superior al existente en el resto de los elementos.

Relación entre tensiones producidas por axil y por momento

En la armadura de Villalba, observando por separado los índices a lo largo de las piezas y en la unión par-nudillo, se comprueba que el esfuerzo axil y el momento flector contribuyen de forma relativamente similar al estado tensional final de la pieza; lo mismo sucede en el nudillo de la armadura de cinco paños. En la armadura de cinco paños, se produce en el par del tercer paño una significativa mayor influencia de la compresión que del flector, coincidiendo prácticamente en el nudillo ambos índices.

Aprovechamiento del material

En la armadura de tres paños la tensión máxima la encontramos en el nudillo del plano número 2, por la misma causa señalada anteriormente: la ausencia de nudillos en los planos adyacentes. Salvo en este elemento, se aprecia que las tensiones están muy por debajo de la tensión admisible del material. En la armadura de cinco paños se aprecian índices de aprovechamiento en general por debajo del valor 0,5, salvo en la zona de mayor sollicitación del par del tercer paño, donde incluso se supera la tensión admisible de la hipotética madera.

Influencia de los trazados de lazo

La disposición constructiva de los trazados de lazo, en armaduras apeinazadas, modifica sustancial-

mente los valores de las sollicitaciones en los elementos. Se comprueba que los elementos adyacentes a las zonas con lazo son los que presentan mayores sollicitaciones, y dado que en una armadura se utiliza siempre la misma escuadría con independencia de la posición de la lacería, se desprende la existencia de un menor índice de seguridad de estos elementos.

Para una actuación de rehabilitación se hace imprescindible, por tanto, analizar las alteraciones que el lazo introduce en el sistema estructural (Candelas 2001, 108), siendo muy probable que, aun en el caso de ciertos deterioros en los elementos, sólo sea necesario recurrir al refuerzo de dicha zona.

LISTA DE REFERENCIAS

- Álvarez, Rodrigo. 16???. *Breve compendio de la carpintería y tratado de lo blanco, con algunas cosas tocantes a la lometría y puntas del compás*. Salamanca. Manuscrito nº 557 de la biblioteca de la fundación Lázaro Galdeano de Madrid. (Facsímil en la tesis doctoral del autor.)
- Arquéllles Álvarez, F. y R. Arriaga Martitegui. 2000. *Estructuras de madera: diseño y cálculo*. Madrid: AITIM.
- Candelas Gutiérrez, A. L. 2001. *Carpintería de lo blanco onubense*. Huelva: Diputación Provincial.
- Nuere Matauco, E. 2000. *La carpintería de armar española*. Madrid: Munilla-Lería.
- Nuere Matauco, E. 2001. *Nuevo tratado de la carpintería de lo blanco y la verdadera historia de Enrique Garavato*. Madrid: Munilla-Lería.
- López de Arenas, Diego. [1619] 1966. *Primera y segunda parte de las reglas de carpintería, fecho por Diego López de Arenas en este año de MDCXVIII*. Edición facsímil del primer manuscrito con introducción y glosario técnico por Manuel Gómez Moreno. Madrid: Instituto de Valencia de Don Juan.
- Rubio de Hita, P. 1997. Evaluación del estado de la madera mediante la técnica de ultrasonidos. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla.
- Segura de la Alcuña, Andrés. (Fray Andrés de San Miguel) ca. 1640. Manuscrito sin título.
- UNE-EN 338. 1995. *Madera estructural. Clases resistentes*.
- UNE-ENV 1995-1-1.1997. *Eurocódigo 5: proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: reglas generales y reglas para edificación*.
- UNE-EN 1912. 1999. *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de especies y calidad visuales*.

