



## LA MADERA ESTRUCTURAL EN GEOMETRIAS COMPLEJAS

### Dos viviendas en Murcia diseñadas por el arquitecto Javier Peña

La irregularidad más o menos aleatoria de las geometrías en todas las direcciones del espacio ha sido un tema recurrente en el discurso de la arquitectura contemporánea, ya desde las primeras vanguardias: determinadas propuestas expresionistas, el Le Corbusier de Ronchamp... Recurrente, pero nunca muy extendido, entre otras razones, por la complejidad intrínseca de materializar constructivamente una geometría irregular (“Nuestros perfiles nacen rectos, y cuesta mucha energía curvarles” respondía Mies al serle preguntado por qué todos sus edificios eran rectilíneos). El espectacular abaratamiento/eficacia de las aplicaciones de diseño asistido por ordenador que comienza hacia finales de los 80, y no cesa de crecer geoméricamente, ha permitido a los arquitectos incorporar la irregularidad como una herramienta de diseño relativamente manejable. Nos toca ahora ver cómo se construye.

Las dos colaboraciones con el estudio de arquitectura de Javier Peña que presento en este artículo fueron una ocasión para poner a prueba hasta qué punto la madera estructural es un material idóneo para la solución de geometrías complejas. Surgieron ambas en el marco de mi colaboración con Amatex, en los años 2007-2009.

#### Casa introvertida

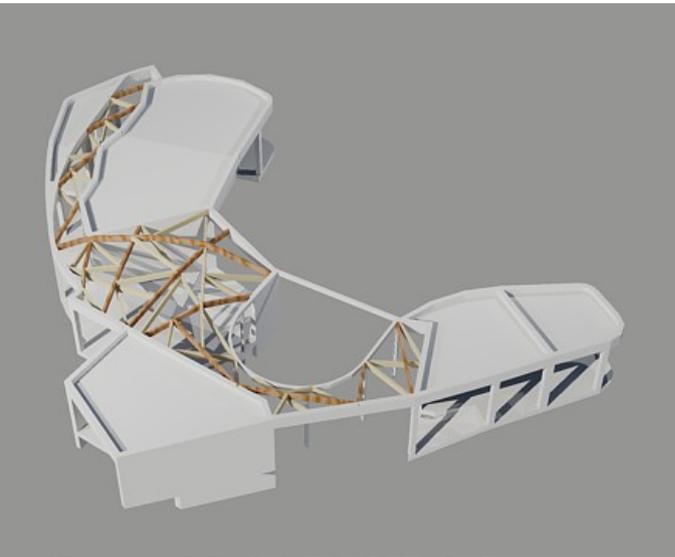
La cubierta del ámbito interior Casa Introvertida es un entramado estructural en el que todas y cada una de las 61 barras que configuran las aristas tienen diferentes rumbo y pendiente, a menudo cruzándose en el espacio tocándose pero sin maclarse. Asimismo, los dos ángulos de incidencia de todas y cada una de las barras contra su zuncho de estribo de hormigón, son diferentes. La última hipótesis de trabajo, era que todos los herrajes debían quedar tan ocultos como fuese posible.

El planteamiento de los nudos se simplificó drásticamente merced a la utilización de tirafondos autotaladrantes. Dado que la carga era pequeña, bastaba con simples angulares de pequeña entidad alojados en un ranura practicada perpendicularmente a la interfaz del encuentro madera/zuncho que era un plano vertical (esta vez sí) para la totalidad de las entregas. Estos angulares eran posteriormente fijados con dos pasadores autotaladrantes embutidos.

La idea inicial era llevar todas las piezas cortadas con control numérico a partir de un cuidadoso levantamiento del zuncho de apoyo. No obstante, después de considerar varios supuestos, estimé que (por preciso que fuese el levantamiento) pequeños, e inevitables, errores de posicionamiento de los apoyos derivaría en desajustes apreciables en los encuentros de las barras en el espacio. De modo que utilizamos el modelo 3D disponible para preparar un listado de piezas cortadas a una longitud prudentemente aproximada. El plano de planta incorporaba un dato de pendientes y rumbos con una aproximación del 2 por mil, de forma que los ángulos de corte (frecuentemente en baivel) de cada barra podía sistematizarse: bastaba con regular un ángulo de corte en motosierra de carpintería, y desplazarla con otro ángulo determinado. Algunos de los cálculos



# casa introvertida





de dichos ángulos se hacían de forma inmediata por calculadora de mano, y en otros casos era más simple (e intuitiva) la realización de cálculo gráfico “en tablero”. En definitiva, una versión del procedimiento de elaboración de cortes que utilicé en la cubierta del Palacio de Botines (ver Boletín 218, de 2002). Resultó una solución muy operativa (si bien, como es lógico, requirió personal experimentado en carpintería de armar in situ).

No sé si la obtención de una nube de puntos 3D con escáner laser del zuncho con todas las escuadras fijadas me habría dado suficiente confianza para cambiar de idea, posiblemente sí. Pero en aquel momento (“solo” hace cuatro años) era algo prohibitivo, a la escala del presupuesto disponible.

Como es lógico, el montaje estructuras de este tipo, consume tiempos que multiplican por enteros (entre dos y cinco) los valores habituales de estructuras de madera de luces medias por unidad de volumen material colocado; y, además, son tiempos de montajes de operarios especializados (o bien dirigidos prácticamente “de la mano”). Sin embargo, resultan costes finales competitivos frente a otras alternativas.

## Torreagüera

En la obra de Torreagüera, se trataba de conformar una superficie de doble curvatura, si bien con una de las curvaturas principales de la superficie de un radio muy elevado, lo que permitía asimilarla a una superficie básicamente cilíndrica suavemente “modificada”. Una dificultad añadida era el hecho de que las costillas principales presentaban radios de curvatura interiores muy pequeños, de unos 2.2 m.

Para resolver la conformación de la superficie, y eliminar de paso la presencia de arriostamientos metálicos, sugerí movilizarla mecánicamente. De este modo, la estructura pasó de ser una sucesión de pórticos más o menos diferentes cada uno, a una lámina de osb nervado, curvado en la medida requerida (en dos capas en la zona de menor curvatura). Al ir densamente cosido a los nervios, estos pudieron optimizarse en espesores, que pasaron a ser de 8 cm. Para la cuestión del radio reducido propuse tres opciones a los arquitectos: paneles de madera contralaminada, paneles de madera microlaminada, y arcos de madera laminada fabricada en radios de curvatura mínimos económicos (4 m); en los tres casos, se recortaría a posteriori el elemento requerido. Por criterio estético, los arquitectos se decidieron por esta última opción. Era la más costosa, pero no de forma relevante. Sin embargo, desde luego resultó la más laboriosa de verificación, dada la complicada distribución de tensiones perpendiculares a la fibra que se generaban (y para las que no es posible encontrar en la normativa una solución de aplicación estrictamente inmediata, por las peculiaridades del elemento ya descritas).

Las uniones se resolvieron de forma muy simple, mediante palastros vinculados a la madera con tirafondos autotaladrantes del mismo tipo que los utilizados para la Introvertida.

miguel.nevado@enmadera.info

## REFERENCIAS.

Arquitectura: Xpiral (Javier Peña, Malte Eglinger, Jesús Galera)

Estructura: Miguel Nevado.

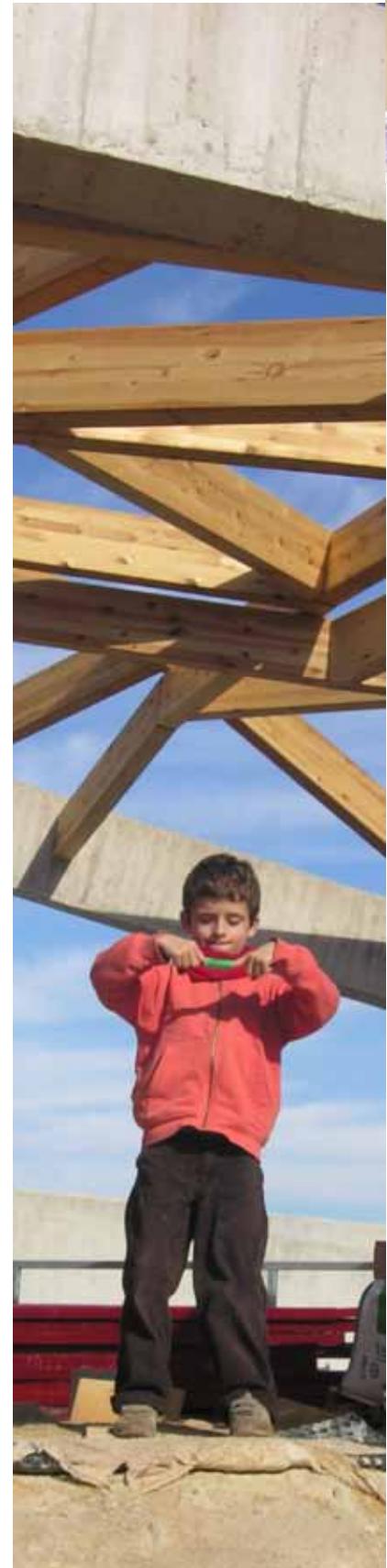
Montaje Introvertida: Amatex SA (2007)

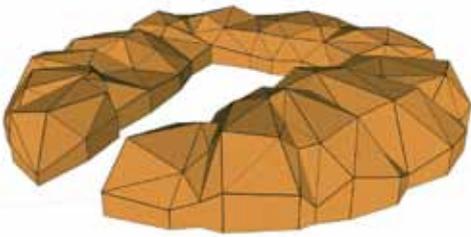
Montaje \*: Marquisa (2010)

Herrajes especiales: SFS WS-T

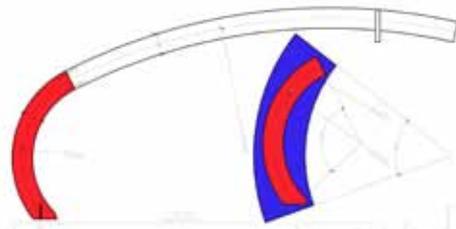
## EXCURSUS.

Un interesante ejercicio de la misma época de colaboración con Amatex, fue la sugerencia de materialización en madera contralaminada para resolver una de las cúpulas irregulares propuestas por Forest+Partners para el Campus de la Justicia de Madrid. Igualmente, todos y cada uno de los elementos triangulares son de pendiente distinta, y geometría de encuentro distinta. La propuesta contemplaba un procedimiento de ejecución similar al de la cubierta del Claustro del Monasterio de San Pedro Regalado (ver Boletín 257). El vano máximo a cubrir eran 24 m, y los espesores de contralaminado que se barajaron eran de 12 a 18 cm, en cinco capas, para un estabilidad a incendio de una hora. Esto llevaría a p.e.m. del orden de 300 a 400 €/m<sup>2</sup> de paramento: algo extremadamente competitivo, dado el tipo de estructura 





Campus de la Justicia (Excursus)



Despiece



casa en Torreagüera





## PASARELA SOBRE EL GUADALQUIVIR EN MONTORO

Tratábase de un proyecto que llevaba tiempo en algún despacho, hasta ser recuperado por Egmasa para una más amplia intervención en los márgenes del Guadalquivir a su paso por Montoro. La propuesta original era una celosía homogénea en las cuatro caras del cajón, muy densa y con potentes escuadrías, con uniones planteadas mediante palastros exteriores unidos con pasadores. Además de consumir unos volúmenes de madera desproporcionados para una luz continua entre pilas máxima de 47.5 m, el proyecto adolecía de dos problemas más. Por un lado, era previsiblemente claustrofóbica la sensación interior del recorrido (la longitud total del mismo es de 126 m). Por otro, la profusión de herrajes vistos planteados (con un presupuesto extremadamente limitado, lo que llevaría a soluciones “toscas”), hacía prever un alzado muy poco atractivo, para un entorno, por lo demás, muy interesante desde el punto de vista paisajístico.

Fui

requerido a principio de 2010 por la empresa constructora de la estructura, Maderarq, para hacer una revisión de la propuesta que resolviera los tres problemas indicados (manteniendo un criterio de mínima modificación del proyecto inicial en cuanto a luces, geometría, tipo estructural y apariencia general: el sistema de apoyo debía ser igualmente el mismo inicial). La solución que planteé se basó en la utilización de pasadores autotaladrantes (pasadores autotaladrantes (SFS WS-T) entrando en un único palastro interior. Este sistema permite realizar nudos estructurales de prestaciones mecánicas extremas de forma totalmente oculta, y utilizando, prácticamente, herramientas convencionales de carpintería de armar actual. Al quedar totalmente ocultos, los nudos pierden presencia visual. De otro modo, ésta sería sin duda excesiva, ya que para esfuerzos de tal

entidad (algunas barras alcanzan compresiones factorizadas de 30 tm) las soluciones “tradicionales” de pasadores con palastros exteriores llevan a elementos muy aparatosos. Otro ajuste de diseño consistió en revisar la disposición de diagonales, haciéndola algo más densa en las zonas más próximas a los apoyos. Permitiendo una lectura estética del funcionamiento del sistema elegido, este ajuste crea una fachada con un ritmo algo más rico (para un sistema de por sí un tanto insulso, por lo obvio). Además, permite una optimización del consumo de madera, al llegarse a barras con estados de tensión bastante similares independientemente de su posición en la celosía.

Por otra parte, la estabilidad lateral se organizó con un sistema de marcos transversales suficientemente rígidos, que



entregan los empujes en el tablero de paso. Éste, merced a una densa sucesión de diagonales de madera intensamente tirafondeadas a la propia tablazón de paso, resulta suficientemente rígido en su plano como para que no se perciba ningún tipo de sensación de desplazamiento en viento. En suma, el tablero es un ejemplo de madera contralaminada clavada. De hecho, está previsto que incluso pueda llegar a soportar, dentro de ciertos límites, una riada que alcanzase su nivel (la de 2009 no le anduvo muy lejos). Así resuelta la estabilidad, se consiguieron dos objetivos. Por un lado, se redujo de modo apreciable la sensación de espacio cerrado que una celosía densa de techo provoca. Por otro, prácticamente se eliminó la presencia de elementos metálicos vistos,

lo que da un

carácter visual muy particular a la obra.

El paseo por la pasarela, de hecho, transmite una sensación de rigidez extraordinaria. Un aspecto interesante de la prueba de carga completa realizada (se siguieron los protocolos de la Instrucción de Acciones en Puentes de Carretera vigentes) fue la pequeña entidad de las deformaciones. La previsión inicial del cálculo de descensos era de  $L/900$ , para el descenso instantáneo del punto medio del vano central con los laterales. El resultado medido fue del orden de  $L/1500$ : la divergencia se debía a la realización del cálculo con una hipótesis extremadamente simplificada y conservadora del comportamiento deformacional de las uniones planteadas. Al estar éstas dimensionadas a rotura en caso de esfuerzos laterales extremos, resulta una apreciable

reserva de rigidez

en el comportamiento ante el uso normal. Por otra parte, la simplificación también tenía en cuenta el hecho de que la ejecución de los nudos se realizaba sin medios de precisión para la introducción de pasadores. En estas condiciones, es de prever un potencialmente importante margen de desviaciones geométricas. Esto, unido al hecho de que los palastros utilizados (10 mm) están en el límite máximo de lo que pueden soportar los pasadores prescritos, me hizo ser extremadamente prudente en el nivel de exigencia asumible para cada unión, sobre todo a efectos de estados límites de uso. La prueba mostró que mi prudencia fue del todo excesiva: este tipo de uniones resultan extraordinariamente robustas, incluso hechas en condiciones muy básicas. La deformación remanente se mantuvo asimismo en valores totalmente insignificantes, del orden del 5% de la instantánea ▲

[miguel.nevado@enmadera.info](mailto:miguel.nevado@enmadera.info)



# arquitectura



# conectores autotaladrantes **SFS** intec

Los conectores autotaladrantes SFS WS-T son una opción idónea para resolver uniones ocultas, tanto si se trata de nudos complejos geoméricamente, como si se trata de transmitir esfuerzos de grandes órdenes de magnitud. En la pasarela de Montoro, se transmitían esfuerzos axiales en el entorno de los 300 kN con el aspecto exterior que se aprecia en la imagen. En la Casa Introvertida, una simple L estándar se fijó con un taco convencional al hormigón y, una vez enhebrada en su ranura, el otro lado de la L se aseguraba a la madera con sendos WS-T, introducidos con equipo electroportátil convencional. En el Claustro de La Aguilera (boletín de Aitim nº 257), los WS-T fueron claves para organizar la transmisión de esfuerzos a los palastros centrales en cruz, de modo que la distribución de tensiones en la madera fuese lo más homogénea posible. El primer puente de luces importantes a realizarse en madera contralaminada en España (Chulilla, Murcia, invierno 2011-2012), basa su estética en la versatilidad de los WS.

El sistema de conectores SFS WS-T permite tanto un dimensionado seguro utilizando la documentación del fabricante, como una posterior verificación detallada conforme CTE vigente. Desarrollado a finales del s. XX por SFS en colaboración con el ETH-Zürich, esta forma de resolver uniones marca un hito de referencia para las estructuras de madera del s. XXI.

SFS INTEC E Y P, S.A.U. Avda. de Quitapesares, 31 Nave 15 28670 Vilaviciosa de Odón (Madrid) Tfno. 916 14 25 14 [www.sfsintec.biz](http://www.sfsintec.biz) es





## BOVEDA EN MONZON DE CAMPOS (PALENCIA) CON CONTRALAMIANDO

La utilización de madera contralaminada en la generación de superficies curvas ha sido relativamente poco explorada hasta la fecha, con la excepción de algún fabricante que produce las formas específicamente conformadas a directrices cilíndricas. No obstante, este camino resulta económicamente prohibitivo, y restringido, en consecuencia, a aplicaciones totalmente exclusivas. Otras soluciones pasan por facetar la superficie descomponiéndola en planos más o menos manejables (lo que lleva a una multiplicación de las juntas).

El problema a resolver en Monzón era la configuración de una cubierta cilíndrica de muy bajo coste. Una ecuación difícil, puesto que los apoyos eran muros de tapial preexistentes, bastante degradados y necesitados de estabilización. Es decir, la estructura (además de costar poco) debía aportar un importante efecto de rigidización y atado de los muros, sin recurso a aparatosos zunchos perimetrales. Por supuesto, también debía ser extremadamente ligera.

El concepto estructural subyacente es el de una lámina estructural de 30 mm, curvada a un radio mínimo de 8.8 m. Las capas transversales resuelven el problema del pandeo lateral de un elemento tan delgado fundamentalmente comprimido. La relativa isotropía del elemento facilita un comportamiento bastante independiente de la irregularidad de prestaciones de los apoyos. Un antecedente de la propuesta es la bóveda del gimnasio de Sarnen, de 1995 (ver Diseño Estructural en Madera, Aitim 1999, pág 4-107).

El procedimiento consistió en el tensado directo de la placa por

sus extremos, obligándola a asumir una directriz parabólica. Esta “pre-tensión” provoca unos estados de sollicitación de pequeña entidad en la lámina (que, con los años, por la readaptación del material, se irán viendo levemente relajadas). En esencia, es el mismo procedimiento del encordado de un arco... sólo que nuestro arco no lo desencordamos. El precio estético para alcanzar la solución en costes muy bajos, es aceptar que la directriz no puede elegirse, es decir, tiene que ser la deformada de respuesta de la lámina.

El espesor total elegido fue de 94 mm, en tres capas iguales, para un vano libre de 8.5 m. Estrictamente, habrían sido suficientes 57 mm, pero esto conduciría a una respuesta excesivamente poco robusta al proceso posterior de acabado, así como potenciales operaciones de mantenimiento descontrolado. La estructura se acabó con un aislamiento revestido de membrana

vapor-permeable; la cubrición se organizó con una chapa de acero corten, anclada en los aleros inferiores y en un mínimo número de puntos intermedios para evitar el riesgo de pérdida de estanqueidad.

Como es habitual en la construcción con el material, incluso en casos complejos, los tiempos de montaje fueron extraordinariamente cortos: los 170 m<sup>2</sup> de la cubierta se construyeron (a partir de la llegada de camión) en poco más de tres jornadas, por una cuadrilla de tres albañiles dirigidos por la arquitecto (con la supervisión inicial de un técnico experimentado en KLH). Como punto de partida se apeaba cada sección de lámina en su centro, con lo cual la deformación a peso propio facilita el cómodo alojamiento de los tensores, no siendo necesario el recurso a Telémaco para el encordado del arco de su progenitor 

miguel.nevado@enmadera.info





### REFERENCIAS:

Arquitecto: Pilar Diez Rodriguez  
Madera contralaminada: KLH  
Ingeniería: Miguel Nevado  
Supervisión de montaje: Alterma-  
teria