



# FORMA, FUERZAS Y MATERIAL

## La aventura de la ingeniería, fabricación e instalación del Parasol Metropol, en Sevilla

Desde marzo de este año, Sevilla dispone de su 'guggenheim' particular, una obra emblemática por su tamaño y por su originalidad. Al margen de su valor arquitectónico y urbano, que es claramente discutible, se trata de una estructura espectacular y una de las más importantes realizadas en madera en España que muestra las posibilidades del LVL en estructuras. Se trata de un parasol que alberga algunos servicios. La construcción consiste en 6 parasoles de forma fúngica, de 150 x 70 m y de una altura aproximada de 30 m. Los parasoles 1,2 4 y 5 tienen forma abierta por arriba para permitir un paseo con vistas a través de una pasarela culebreante mientras que los 3 y 4 se cierran sobre sí mismos para albergar un restaurante. Es obra del arquitecto alemán Jürgen Mayer.

De los 5 niveles, el superior al que se accede por un ascensor, sustenta la citada pasarela panorámica. Debajo, en el interior de los parasoles centrales, hay una rotonda con un restaurante. La plaza mayor a la que se accede por una gran escalinata o por escaleras mecánicas es el suelo de la plaza. Por debajo se encuentra el Mercado de la Encarnación, y, finalmente, en el subsuelo, se encuentra el Museo Antiquarium con restos arqueológicos de un importante asentamiento romano hallado en este mismo lugar. A continuación recogemos los aspectos de ingeniería del proyecto, redatado por sus autores.



Vista aérea del edificio, en su fase final, insertado en la trama urbana

Jan-Peter Koppitz, Ing. Arup  
 Prof. Dr. Volker Schmid, Ing. Arup  
 Anja Thurik, Ing. Finnforest

La oportunidad de trabajar en el desarrollo de una estructura compleja como la del Metropool Parasol ha sido fascinante. Desde los primeros bocetos hasta el apriete del último tornillo in situ, el equipo de diseño, formado por arquitectos, ingenieros estructurales, especialistas en madera, y empresas de montaje, se encontró como una expedición en terreno desconocido y solamente la preparación técnica, la experiencia, la creatividad y la valentía de todo el equipo lo hizo posible.

## 1 CONCEPTOS

El concepto estructural original se desarrolló en la fase de concurso bajo grandes limitaciones de tiempo y es deudor de la clásica separación entre elemento soportado y estructura portante oculta.

Insatisfechos con esta solución, el equipo de diseño de JMH y Arup, ya en la fase post-concurso, estudió varias opciones para eliminar esta dicotomía. La complejidad de la estructuras portantes inicialmente desarrolladas a base de membranas perforadas de acero de doble pared (Figura 1) dió paso a un estudio genérico a base de 'espumas', hasta que finalmente se encontró la solución a base de 'platos' formados por costillas verticales (Figura 2).

### Principales consideraciones sobre el diseño estructural

El efecto claramente mejorado de la estructura vertical en comparación con la horizontal se puede visualizar fácilmente con una hoja de papel. Cuando se coloca horizon-

talmente, la hoja se dobla hacia abajo por efecto de su propio peso, mientras que cuando se coloca verticalmente, es capaz de llevar soportar su propia carga sin ningún problema (Figura 3).

Este principio básico de la estática fue explotado en el Metropool Parasol. La única dificultad importante fue cómo se unían las costillas. Había fundamentalmente dos posibilidades: la forma radial, desde el perímetro hacia el soporte (Figura 4 arriba) o la malla ortogonal (Figura 4 abajo), que es estáticamente más eficiente y ahorra material. Esta ventaja es, sin embargo, cuestionada por los problemas de producción física debidos a su geometría variable y las conexiones entre las diferentes piezas.

La disposición ortogonal de las vigas o costillas (o discos completos en el caso de los parasoles 3 y 4) paralelos se juzgó también la más apropiada desde su percepción urbana.

Ahora sólo quedaba por resolver el problema del material. A la vista de las numerosas conexiones resultantes, se pensó en principio que la estructura debía resolverse con chapas de acero soldado. Sin embargo, su alta resistencia no sería útil en esta estructura debido a la facilidad de alabeo de las chapas de acero (Figura 5b). Los paneles de madera que se escogieron finalmente se comportarían de manera muy diferente. Más gruesos por razones de estabilidad, pero con un peso menor que el acero y sin problemas de alabeo (5a). Teniendo en cuenta las enormes dimensiones de la estructura la solución con madera también mejoraba el aspecto visual del conjunto.



Figura 1. Concorso. Tubos metálicos formando el cerramiento superior



Figura 3. Capacidad portante de la placa vertical y horizontal

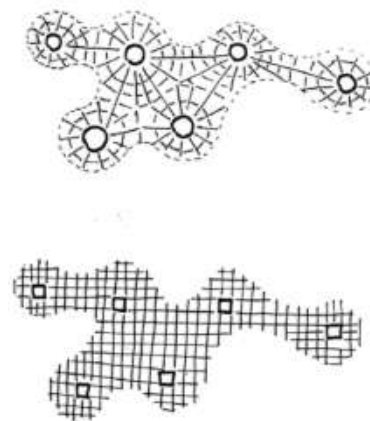


Figura 4. Planta radial y ortogonal

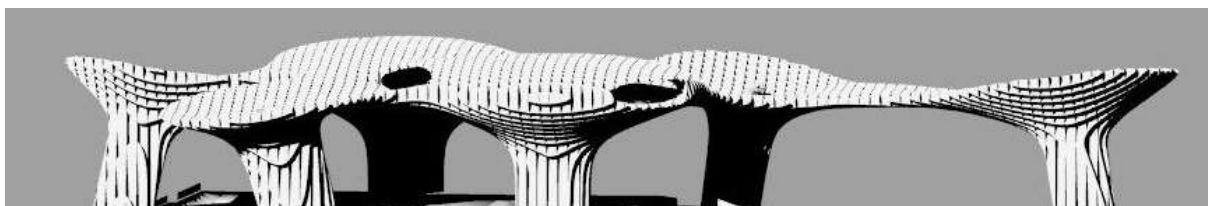


Figura 2. Concepción final para la estructura portante a base de paneles verticales

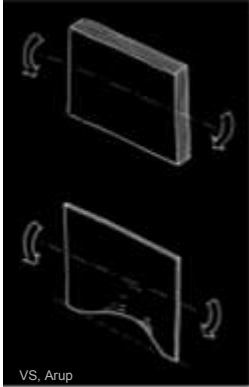


Figura 5A Tablero de madera, sin pandeo

Figura 5B Panel metálico arrugado en la zona de presión

## 2 El diseño de la estructura portante

### 2.1 ESTRUCTURA PORTANTE GENERAL

Todos los materiales tienen sus ventajas e inconvenientes. Por ello en esta estructura, se utilizaron diversos materiales de acuerdo con las diferentes exigencias arquitectónicas y estructurales: así la cimentación y las torres cilíndricas de los ascensores que soportan el restaurante, son de hormigón, la zona de los museos dispone de grandes entramados de acero y hormigón reforzados con jабalcones. Una estructura de acero situada a 21,50 m de altura forma la plataforma de apoyo del restaurante en los parasoles 3 y 4. Esta plataforma está apoyada con perfiles metálicos huecos, inclinados siguiendo la silueta de las escaleras exteriores. Para conectar estas diagonales con el núcleo de hormigón, de 40 cm de espesor, se diseñó un detalle especial en cremallera, ya que se transmitía una carga muy grande a través de una superficie muy pequeña (Figura 6).

### 2.2 Una innovadora estructura de madera

El punto de partida para la geometría de la estructura es la forma de la copa de un árbol o el sombrero de una seta. Esta copa se formaría con una malla de tableros LVL de 1,5 m de canto. Puesto que la estructura no posee un cerramiento superior arriostrante



Figura 6. Plataforma de acero del restaurante. Conectores de compresión diagonales ayudados por cremallera dentada

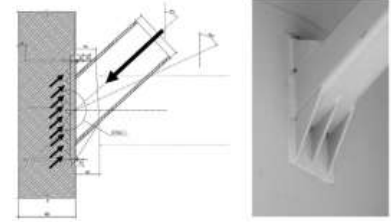
(es una malla abierta), hubo que recurrir a diagonales de acero que se colocaran de forma discreta teniendo en cuenta su vista inferior.

### La fuerza sigue a la forma

Llegados a este punto, con los principios básicos del diseño estructural definidos, el siguiente paso fue la optimización de su geometría. Con pequeñas modificaciones se mejoró el efecto de apoyo reduciendo el número de costillas o discos, economizando material y simplificando la forma (Figura 7).

### De cómo los árboles se transformaron en parasoles

El siguiente paso consistió en determinar la longitud de apoyo individual de los tableros. Para ello se hizo necesario considerar el peculiar trabajo de la madera en cuanto a la inclinación de la fuerza respecto a la dirección de las fibras de la madera. En efecto, dentro del tronco, las fibras de la madera están orientadas verticalmente, en la dirección de la mayor resistencia del árbol. En la naturaleza, las fuerzas transversales al eje del tronco casi nunca se producen, por lo que éste dispone de muy poca estabilidad en esa dirección (se reduce aproximadamente a 1/8 respecto a la resistencia vertical). Hubo que asegurar que la inclinación del esfuerzo no se desviara mucho de la dirección principal de fibra en los elementos de madera. Por esta razón, la empresa suministradora, Finnforest, y los ingenieros de Arup acordaron que el ángulo respecto a la dirección



de la fibra no excediera nunca de  $7^\circ$  (Figura 8).

La longitud de estos elementos varía entre 1,50 m y 16,5 m y el grueso entre 68 y 311 mm. La altura de las piezas alcanza un máximo de 3,0 m: el elemento más grande se encuentra en el *tronco* principal y mide 16,5 x 3,5 x 0,14 m.

### Los tableros

Aproximadamente existen 3.400 tableros LVL distintos, con un volumen de 3.500 m<sup>3</sup>.

Los tableros LVL Kerto-Q utilizados están formados por chapas de desenrollado de 3 mm de espesor encoladas en el mismo sentido. Algunas de estas capas se giran a 90 grados y la estabilidad en esa dirección se reduce sólo en 3, en lugar de 10 (Figura 8 arriba) lo que hace que Kerto-Q sea especialmente eficaz en este tipo de estructuras. El tablero Kerto posee un alto grado de rigidez en la dirección de las fibras y es muy estable dimensionalmente debido al efecto de bloqueo de las secciones transversales, permitiendo por ello su uso al exterior.

### El poliuretano protege la madera

Uno de los problemas centrales de esta estructura fue encontrar una solución eficaz y duradera a la protección de la madera contra el sol, la lluvia y el viento. Por esta razón, se aplicó un innovador proceso, que ya los arquitectos de JMH habían utilizado en una cafetería de estudiantes en Karlsruhe, Alemania. El LVL fue protegido por impregnación en autoclave y se acabó con una barbiz de poliuretano de dos

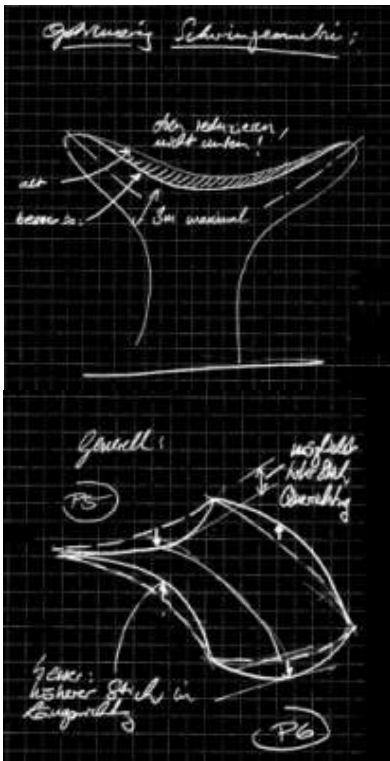


Figura 7. Esquemas a mano empleados durante el desarrollo del diseño explican cómo el comportamiento estructural de la estructura del parasol puede mejorarse con pequeños cambios en la geometría.

componentes, de 2-3 mm de espesor. Gracias a su gran flexibilidad y a su calidad adhesiva sobre la madera, esta capa es capaz de cubrir las posibles fisuras o fendas que se produzcan en la madera. Este recubrimiento es además suficientemente permeable al vapor. Esto, combinado con su tinte de color crema, que añade una protección UV suplementaria a los rayos UVA, proporciona una superficie muy resistente al exterior. Esta protección mejora la estabilidad dimensional, en cuanto que no tiene que ser reducida en el cálculo, y la deformación de fluencia se limitó a casi a la mitad.

### 3 LAS CONEXIONES

#### 3.1 Un reto especial para esta estructura de madera

Un aspecto decisivo en el diseño de estructuras de madera es cómo

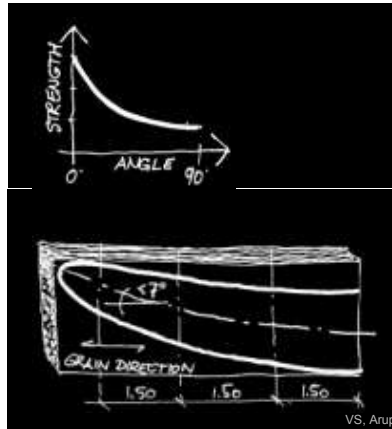


Figura 8 Decreciente resistencia de la madera cuando el ángulo entre la dirección de la fuerza y de la fibra se incrementa y el límite de inclinación entre la línea central y la fibra de la madera a 7°

conectar los elementos entre sí, de modo que todos los esfuerzos puedan ser transferidos de una pieza a otra sin dificultad. A menudo ocurre que las secciones de la madera de las estructuras se terminan especificando por el tamaño de la conexión, más que por la propia resistencia de la madera. En el Parasol se dió este caso, los esfuerzos debían ser transferidos a través de las uniones con el problema de que en la dirección perpendicular sólo posee una resistencia a tracción de 1:8 de la longitudinal y que tan sólo el 50% de la tracción está disponible para las fuerzas laterales. Por ello una conexión directa de los cuatro componentes de madera en un solo punto de intersección inevitablemente fallaría (Figura 9). Además de este problema fundamental, que es común a otras estructuras de madera, en el proyecto Metropol se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones especiales:

- La conexión de la madera tendría que ser capaz de transferir fuerzas de hasta 130 toneladas
- Ya que el espacio de la cimentación entre las ruinas romanas es limitado, la capacidad portante es, por lo tanto, limitada, debiendo los conectores ser lo más ligeros posible.
- Ya que la geometría de cada una de las aproximadamente 2.700

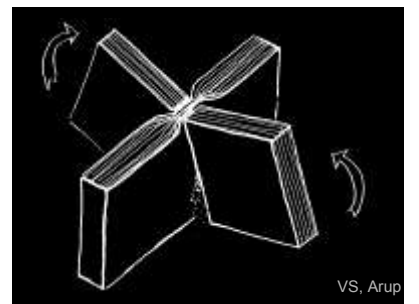
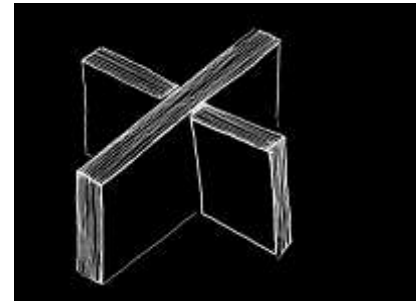


Figura 9 El problema de las conexiones: desde arriba la viga cruzada es aplastada y por abajo se desgarran.

conexiones y los esfuerzos que se transfieren varían, se desarrolló un sistema modular de conexión que pudiera combinarse según fuera necesario

- las conexiones debían ser capaces de aceptar ciertas tolerancias dimensionales, por lo que estas tenían que ser ajustables y poder montarse fácilmente.
- Ya que cada conexión queda visible, las dimensiones de las conexiones debían minimizarse

#### 3.2 LA SOLUCIÓN:

Los conectores empleados en la malla del Metropol son de tres tipos:

1. bielas que se colocan en dos cajeados (uno superior y otro inferior) de cada pieza. Se cambia de sentido cada cierto número de piezas, según determina el cálculo.
2. Un angular que cubre toda la altura de la junta (pieza de catálogo).
3. Un tensor que arriostra determinados nudos.

Independientemente de la malla existen conexiones de testa de las vigas principales que son de mayor tamaño y son articuladas.



## Desarrollo del nudo (biela)

Tras amplios estudios, cálculos e intensos debates, los ingenieros de Arup y Finnforest llegaron finalmente a un sistema de conexión anclado con varillas roscadas encoladas, un concepto moderno de conexión con una capacidad de carga muy alta y un peso relativamente reducido (Figura 10).

Los nudos se encuentran en ángulo recto pero las conexiones tienen inclinaciones variables. Finnforest desarrolló las conexiones para ser sometidas a esfuerzos de torsión y axiales por lo que se diseñó una biela que fuera capaz de girar y ser acoplada al perfil siguiente por medio de un perno o eje de giro. Para transferir el cortante a la conexión de los cruces de la malla, se utilizaron angulares de acero clavados in situ.

## 3.3 CALENTAMIENTO DE LOS CONECTORES

El calor del verano en Sevilla puede llegar a más de 40 °C a la sombra, lo cual presentaba problemas no sólo a los trabajadores durante la obra, sino en otro orden más complejo, a los ingenieros proyectistas. En efecto, el problema era grave: la resina epoxi utilizada para pegar las varillas roscadas sólo estaba probada en la práctica hasta una temperatura de 60 °C. La temperatura que alcanzan los objetos en su superficie puede ser superior a la del aire (40° C en el caso de Sevilla (este efecto es bien conocido por cualquier persona que se quema los pies en la arena de la playa), con lo que el problema planteado era grave. Las simulaciones térmicas llevadas a cabo indicaron que en el interior de la estructura de madera se podía llegar fácilmente en Sevilla a los 60 °C e incluso más. Por esta razón, se decidió aumentar la temperatura de transición vítrea de la resina epoxi por medio de un recocido. La aplicación de calor logra ampliar el espacio entre las moléculas del adhesivo, y también da una mayor resistencia a la temperatura. Finnforest, Chemie WEVO y Radovic Borimir como técnico particular colaboraron para desarrollar un calentamiento retroactivo de la

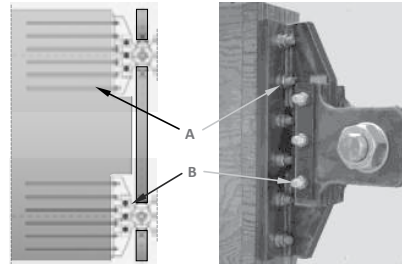


Figura 10 Esquema de la conexión en biela mostrando las barras encoladas (A) y los tornillos preajustados (B).

madera y de las uniones encoladas de las bielas de hasta aproximadamente 55 °C, lo que permitió a la temperatura de transición vítrea superara los 80 °C de forma que la unión ya resultaba segura y controlada. Este valor también fue confirmado en los ensayos subsiguientes que se realizaron.

## 4 Cálculo de los esfuerzos y predimensionado de la estructura de madera

### 4.1 Definición y variación de esfuerzos

Los ingenieros de Finnforest estuvieron entonces en condiciones de crear una matriz con un tipo de conector variable para cada inclinación de los perfiles, cada espesor posible de tablero, cada inclinación de la fibra, y todos los esfuerzos, incluyendo el peso propio de los conectores. Fueron entonces capaces de aplicar el valor inicial a su modelo de elementos finitos para el canto de las vigas de madera y los pesos de las conexiones. Todas las cargas adicionales, como el peso de los visitantes, el viento, los movimientos debidos a la temperatura y la humedad, pudieron también ser introducidos en el ordenador. A continuación se determinaron las variables internas en los elementos portantes.

Paralelamente fue puesta a prueba la capacidad resistente de los tableros de madera, resultando un canto mayor del necesario. Los conectores con una capacidad de carga inferior fueron cambiados por conectores mayores. Sin embargo, el peso de la estructura aumentó de



Figura 11. Varillas encoladas, colocación de los conectores y montaje en obra

nuevo, y ahora se hubo de repetir la secuencia de cálculo. Dado que el equipo requiere varias horas para el cálculo, Arup escribió una rutina parcialmente automatizada, lo que permitió secuencias iterativas de cálculo independientes.

## 5 PLANIFICACIÓN INTEGRAL Y PRODUCCIÓN

El equipo de arquitectos, ingenieros estructurales, ingenieros de instalaciones y especialistas en protección contra incendios comenzaron a colaborar en fase temprana del diseño. La geometría propuesta por los arquitectos se procesó directamente por los ingenieros y se ajustó a los resultados de cálculo. Estos datos se enviaron por vía electrónica a la empresa fabricante de los tableros de madera, pasando a formar parte de la base de datos para las pruebas de los detalles y la planificación de taller.

### PROCESO DE PRODUCCIÓN

La materia prima, tableros de espesor de 24 mm y 33 mm, fueron en primer lugar tratados en autoclave y a continuación pasaron al encolado cuando se necesitaban piezas de mayor grueso (entre 68 y 311 mm). Cuando los tamaños de las piezas fueron muy grandes en longitud se realizan juntas empalmadas, paralelas a la capa superior formando una estructura solapada.

A continuación se mecanizaron los elementos.

Estos tableros, Kerto fabricados por Finnforest, fueron una producción especial, fuera de la certificación de calidad estándar de la empresa, por lo que se requirió una evaluación técnica de calidad específica.

Un equipo de CAD diseñó los cerca de 3.400 elementos de madera a través de procesos semi-automatizados y con la ayuda de una programa macro.

Después de la orden de fabricación, las piezas del mismo espesor se encajaron en los tableros-base de modo que los recortes se redujeran al mínimo y siempre con la capa exterior en la misma dirección de las fibras.

Un robot gobernado por CNC realizó

los cortes con exactitud milimétrica, realizando simultáneamente el lijado del canto. Las 35.000 perforaciones de testa de los perfiles donde se introducirían las varillas rosca-

das, se realizaron manualmente. Junto al proceso de recocido del adhesivo para las varillas rosca-

das, los elementos de LVL se calentaron también en cámara. Una vez que la temperatura en la junta encolada llegaba a 55 ° C, se comenzaba un tiempo de recocido de dos horas.

El proceso completo, incluido el enfriamiento, fue de 2-3 días. Los conectores de acero pudieron entonces atornillarse. El reto para Südahl, que entregó las piezas de acero en más de 600 formatos diferentes, fue producir todos al mismo tiempo. El elevadísimo número de piezas en relación al tamaño relativamente pequeño de ellas requirió una precisión absoluta. A estas piezas se les aplicó también un recubrimiento especial para exterior.

### MONTAJE

El ensamblaje de la estructura de Parasol Metropol se basó en una secuencia que permitiera colocar los elementos de madera de la forma más flexible posible de forma que el conector compensara las tolerancias propias de construcción.

Primeramente se montaron los troncos de la estructura hasta las articulaciones de acero que forman la división con la zona de parasol. Las conexiones de acero se soldaron in situ. A continuación, se elevaron los andamios para proceder al montaje del parasol.

Para la conexión de la malla se utilizaron andamios torre colgados, formando microcabinas de 70 x 70 cm, lo que permitió el montaje de la elementos desde arriba.

Finnforest desarrolló un proceso de nivelación que permitió a los inspectores locales nivelar cada componente de forma continua. Los puntos de medición proporcionaron una verificación geométrica de la deformación a lo largo de los ejes x, y, z. durante el montaje. Las deformaciones iniciales fueron menores de lo que se había calcula-



Figura 12. Mecanización de los tableros

do, lo que significa que la estructura era más rígida de lo esperado. Los trabajadores de montaje preparaban los componentes en el suelo, junto con las piezas de conexión ya instaladas. Un equipo se dedicó a la organización de las piezas preparadas para el pre-ensamblado: fueron decenas de miles. Una vez levantados, los tableros de madera se ajustaron in situ quedando entonces definitivamente conectados. Cada día, cerca de 50 hombres del equipo de montaje era capaz de producir



hasta 50 componentes, en dos turnos de trabajo. El trabajo se prolongó durante un año, incluso con turnos de noche. Desafíos especiales fueron los aspectos de seguridad (sobre todo al calor ambiente de Sevilla). El trabajo se llevó a cabo con el mayor cuidado de las superficies, para no dañar las piezas, lo que comprometería la durabilidad.

### 5.3 CONTROL DE CALIDAD

Durante el montaje in situ, el correcto pretensado de tornillos de sujeción en las testas de las piezas sometidas a esfuerzos axial y de torsión, jugó un papel importante, junto al exacto posicionamiento de los elementos de madera. Un grupo de trabajadores especial fue el único responsable de apretar los tornillos de acuerdo con los pares de apriete definidos. Como los nudos se encuentran tensionados mientras se retiraba el andamio los conectores podían deformarse por lo que la operación de desmontaje hubo de realizarse con sumo cuidado.


### Algunos datos. El proyecto en cifras

- 3.500 m<sup>3</sup> de Kerto LVL-Q (volumen bruto)
- 3.400 diferentes componentes
- 700 t de acero y 70.000 piezas

### Situación

Plaza de la Encarnación  
Superficie construida: 11.000 m<sup>2</sup>  
Ancho: 70 m  
Largo: 150 m  
Alto: 28 m

### Calendario

Julio 2005: fase de consulta a Finnforest y primeras estimaciones.  
Agosto 2007: firma del contrato y 6 meses de estudios y cálculos más planning de producción  
Julio 2008: inicio del montaje de los troncos  
2009-2010: interrupción de las obras de montaje  
Mayo 2010: Inicio del montaje de los parasoles  
Mayo 2011: inauguración 



# Decora

tus espacios de forma

- ✓ Moderna y elegante.
- ✓ Natural y ecológica.
- ✓ Segura (versión ignífuga de acuerdo con el CTE).
- ✓ Con las ventajas térmicas y acústicas de la madera.



## Espacios Molduras

Anuncio panel autoportante.qxd 14/12/07 10:06 Página 1

### Panel Kerto-Ripa

### kerto® un panel revolucionario



El Panel Kerto-Ripa es un producto desarrollado por **Finnforest** basado en la madera microlaminada KERTO. Este tipo de panel de grandes dimensiones, está formado por vigas de Kerto-S a las que se les ha encolado por una o dos caras un panel de Kerto-Q.

Es un sistema de gran inercia, que permite cubrir grandes luces con cantos reducidos, así como soportar cargas elevadas.

Es un panel prefabricado de grandes dimensiones, que permite cubrir luces de hasta 12 m, con lo que no se precisa de estructura secundaria. Puede utilizarse tanto en forjados como en cubiertas.

Su espacio interior permite la instalación de todo tipo de aislantes así como el paso de conducciones. Pueden aplicarse todo tipo de acabados.

**Finnforest** es una multinacional Finlandesa especializada en la industria mecánica de la madera. Fabrica una amplia gama de productos: KERTO, madera laminada, vigas FJI, panel Leno, Thermowood, tablero contrachapado, frisos y tarimas.





