

La cubierta del Mercado de Santa Caterina en Barcelona. 1997-2005

The roof to the Santa Caterina Market in Barcelona. 1997-2005

José M^o Velasco Rivas. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director Amatria Ingeniería. velasco@amatria.com

Resumen: La estructura del mercado de Santa Caterina está formada por un conjunto de bóvedas de madera irregulares, unas biarticuladas otras triarticuladas, que se apoyan en vigas de acero de sección y directriz variable sustentadas, a su vez, en vigas y pilares de hormigón. Un conjunto de tres grandes arcos de 42 metros de luz sujetan centralmente las vigas de acero para evitar su descenso. El diseño arquitectónico es de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue. El mercado forma parte del conjunto de rehabilitaciones que realiza el Instituto de Mercados de Barcelona, dependiente del Ayuntamiento. El diseño de la estructura se basa en la tradición constructiva y en el empleo de metodologías de cálculo actuales.

Palabras Clave: Cubiertas, Santa Caterina, Madera, Acero, Hormigón, Miralles, Tagliabue

ABSTRACT: The structure of the Santa Caterina Market is formed by a combination of irregular wood vaults, some in two-way arrangements and others in three-way arrangements, which are supported on steel beams of variable plan and section which are, in turn, supported on concrete beams and columns. An arrangement of three large 42 m span arches centrally hold the steel beams in position. Enric Miralles and Benedetta Tagliabue were responsible for the architectural design of the building which forms part of a number of renovations being carried out by the Association of Markets in Barcelona pertaining to the City Council. The design of the structure is based on traditional construction and on the employment of modern design calculation methods.

Keywords: Roofs, Santa Caterina, Wood, Steel, Concrete, Miralles, Tagliabue

1. Introducción

El Instituto de Mercados de Barcelona, dependiente del Ayuntamiento, realiza desde hace años un proceso de remodelación de los antiguos mercados de la ciudad. Entre ellos se encuentra el mercado de Santa Caterina, situado en el barrio del mismo nombre, cerca de la Catedral, y sólo superado en antigüedad por el de La Boquería en las Ramblas.

El diseño arquitectónico es obra del arquitecto Enric Miralles, fallecido en Julio de 2000, junto con la también arquitecta Benedetta Tagliabue. Inicialmente Miralles concibió la cubierta como una superficie ondulante, ligera, que se sustentara sobre un mar de cables. Su superficie exterior debía estar formada por un mosaico cerámico cuyo origen se encuentra en el "trencadís" de Gaudí. Esa idea inicial fue materializándose mientras se procedía a concebir la estructura y se iniciaban los cálculos a finales de 1997.

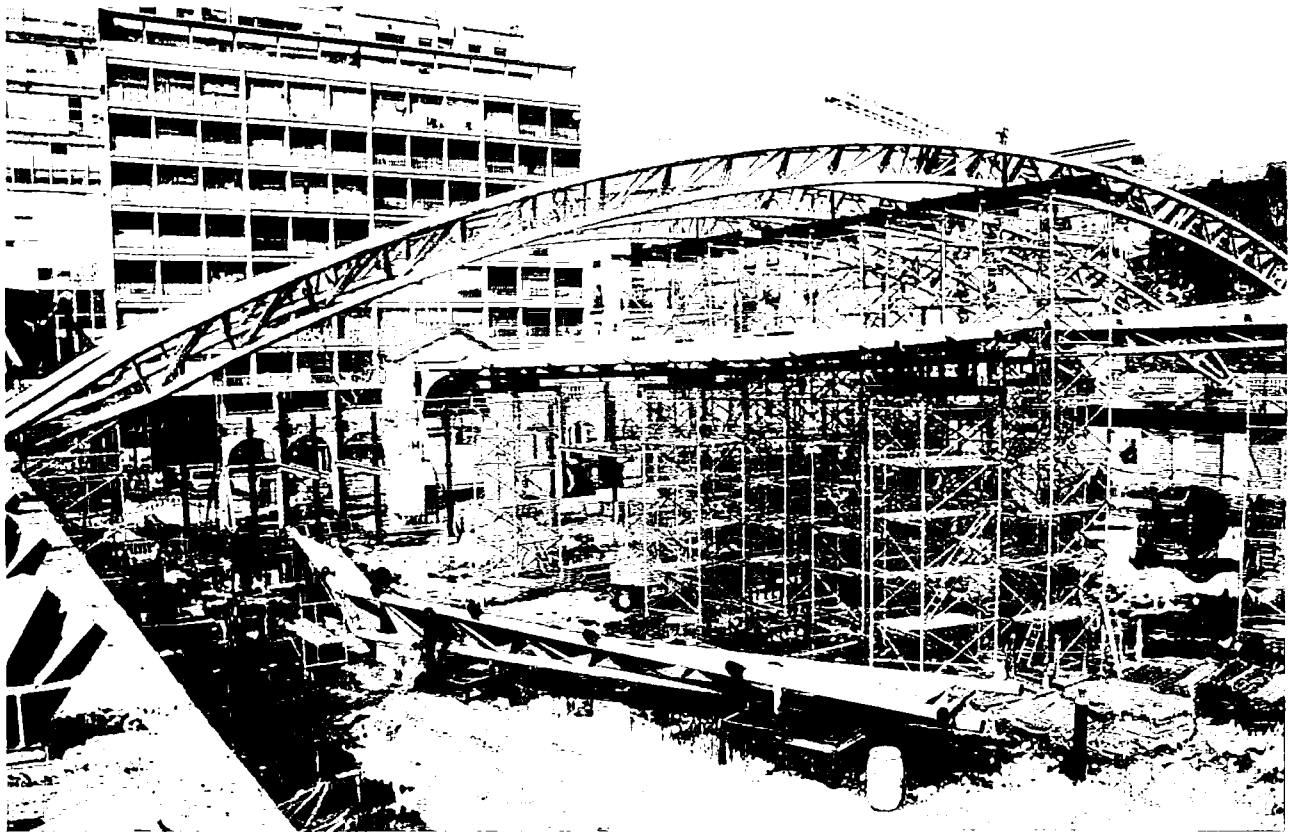
El diseño arquitectónico y el estructural fueron evolucionando de forma paralela e independiente. Cada

uno se encuadró en su propio sistema de referencia. La concepción de la estructura ha intentado seguir los pasos de las formas y de las intuiciones que el diseño arquitectónico planteaba, amoldándose a las mismas y a las ideas y objetivos que se pretendían, unos explícitos, otros implícitos.

Cada determinación dio lugar a múltiples posibilidades, siendo cada configuración el punto de partida de otra nueva.

La base de la concepción estructural reside en la tradición constructiva. La estructura se ha diseñado pensando en que aparecerían las personas adecuadas para ejecutarla. Estas personas son los Encargados Generales o Maestros de Obra, puestos hoy en día prácticamente desaparecidos; personas con oficio, con conocimientos de geometría, de materiales, de proceso constructivos, organizadores del tajo y gente, sobre todo, con capacidad para encontrar la solución adecuada a un problema constructivo; capaces de resolver en obra, por ellos mismos, los problemas con que se encuentran.

Fig. 1. Montaje de los grandes arcos metálicos y de las vigas en uve.



En el año 2002, se conmemoró el 150 aniversario del nacimiento de Antoni Gaudí. Se pudo leer una cita suya: "el arquitecto debe utilizar la habilidad de los artesanos para, a través de sus manos, hacer arquitectura", en este caso se trataba de emplear esa habilidad para hacer ingeniería.

La aparición de programas de cálculo, con garantías de verificación de sus procesos, que además añadían la capacidad de realizar cambios de geometría con agilidad, y asimismo la aparición en el mercado de la barra perforada con amplitud de diámetros y espesores, junto a metodologías avaladas para el cálculo de uniones tubulares permitieron iniciar los trabajos.

La aparición de los borradores de los Eurocódigos, esa labor encomiable de la Unión Europea, sirvió de base para la elección de acciones y la metodología de análisis.

Posteriormente, a finales de 1999, se introdujo la madera en sustitución del metal en correas y arcos de bóvedas analizándose según el Eurocódigo nº 5. El proyecto quedó fijado en esas fechas.

El diseño partía de unas premisas que el arquitecto era capaz, con el paso del tiempo, de prescindir para basar el diseño en otras distintas. Dentro de este proceso la estructura fue apareciendo y fijando la forma.

La premisa inicial de apoyo de toda la cubierta sobre un mar de cables en una solución de costillas y correas

de acero tubulares, fue evolucionando para dar relevancia a los pilares extremos; los pliegues de las cubiertas se transforman en vigas metálicas, los arcos fajones pasaron a ser de madera y, una vez precisado el sistema general, aparecen los lucernarios. También aparecieron los grandes arcos metálicos centrales para sustentar las vigas metálicas.

Si la forma adoptaba un diseño intuitivo se pretendió que el diseño estructural la siguiera sin contraponerse en ningún caso, pues así lo permite la técnica y la tradición constructiva.

La alineación de la antigua fachada en arquería marcó superiormente una línea horizontal a la que ajustarse y los ejes de los machones la alineación de los pórticos.

2. La forma y la estructura. Concepción estructural

Cuesta exponer cual es la concepción estructural, pues es el resultado de ir encontrando la estructura en la forma. Sí se puede hablar, sin embargo, de intuiciones estructurales o de reglas de juego aceptadas:

- Proponer el uso de rectas y curvas circulares como formas básicas de diseño. Elementos que formaban parte de la forma tradicional de dibujo del arquitecto.

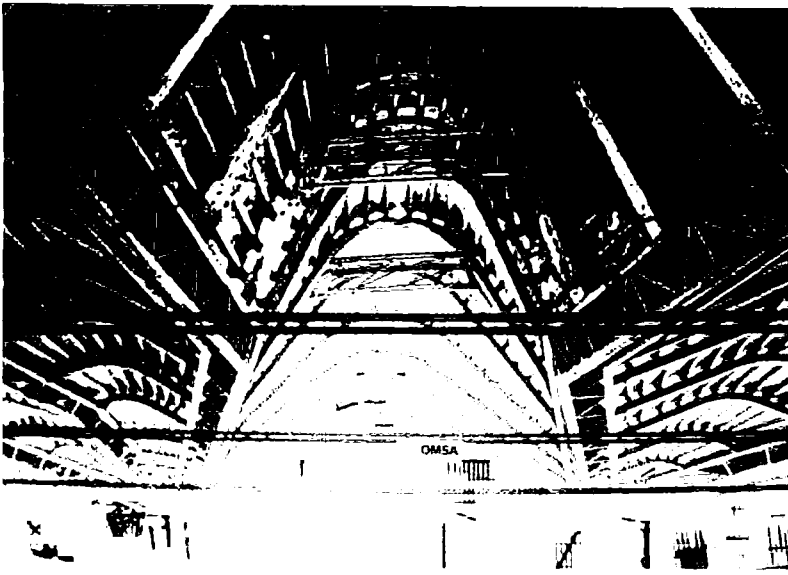


Fig. 2. Vista interior de la cubierta.

- Desechar soluciones demasiado racionales, como paraboloides hiperbólicos, que es la primera intuición para la bóveda central. Lo contrario de lo que haría Gaudí.
- El uso, a propuesta del arquitecto, de materiales tradicionales: Hormigón, Acero y Madera.
- Proponer al arquitecto el uso de las aristas de las formas onduladas como vigas en uve estructurales. La idea proviene de la forma de uve que adopta la hoja del palmito para alcanzar vuelo, y que tantas veces representaba Gaudí.
- Aceptar la complejidad geométrica sin modificarla.
- Confiar secretamente en que se pudieran encontrar los profesionales capaces de realizarlo.

En resumen, la estructura de hormigón, acero y madera es la siguiente:

El apoyo sobre cota nivel cero se realiza mediante un conjunto de 13 pilares:

Pilares metálicos:

- Cuatro pilares formados por haces de tubos metálicos doblados en la fachada principal (Avda.Cambó).
- 2 pilares, mitad inferior de hormigón, mitad superior haz de tubos de acero doblados sin arriostramiento en la fachada posterior (plaza Joan Capri).

Pilares y viga de hormigón:

- Lateralmente, en sentido perpendicular a la fachada, se ejecutan 2 jácenas de hormigón postensadas. Una de 69 m sustentada por 4 pilares de hormigón y otra de 30 m sustentada por 3 pilares todos ellos de sección 0,90x0,90 m

Vigas en uve:

- Aprovechando la forma en uve de la zona de las aristas inferiores de la cubierta se generaron 6 vigas metálicas desde la fachada hasta el extremo opuesto. Su distribución es la siguiente: Las vigas extremas (2) son aproximadamente paralelas al mercado y a las vigas de hormigón. Las 4 centrales se quiebran en su recorrido y forma una pareja de 2 rombos. De los pilares centrales de fachada nacen 2 vigas de cada uno, y a los pilares del patio interior llegan 2 vigas a uno y 3 a otro. La sexta viga queda flotando sujeta por un conjunto de tornapuntas laterales (Fig. 2).

Tornapuntas:

- Son el conjunto de barras que sujetan lateralmente la cubierta uniendo las vigas metálicas extremas con las jácenas de hormigón laterales. Su misión es soportar verticalmente una parte de la cubierta y, sobre todo, absorber los esfuerzos horizontales del conjunto de bóvedas.

Arcos de madera:

- El espacio entre vigas metálicas se completa con arcos de madera, triarticulados los más peraltados y biarticulados los arcos rebajados.

Arcos metálicos:

- La longitud entre apoyos da lugar a una flecha considerable en el centro que es preciso compensar. Para ello se han diseñado un conjunto de 3 arcos que a través de 12 péndolas sostienen las 4 vigas centrales. Los puntos de apoyo de cada arco se unen a un conjunto de cables centrados en su base. El tesado de dichos cables pone en carga los arcos, izando las vigas a su posición y permitiendo a su vez disminuir los esfuerzos en viga y pilares metálicos. Estos arcos tienen la particularidad de que salen y entran de la cubierta entremezclándose con ella (Fig. 1).

La modelización numérica se ha realizado en detalle.

La forma fascina cuando no se tiene ya la fuerza de comprender la fuerza en su interior. Es decir, crear. J.Derrida.

3. Los materiales

Los materiales empleados son:

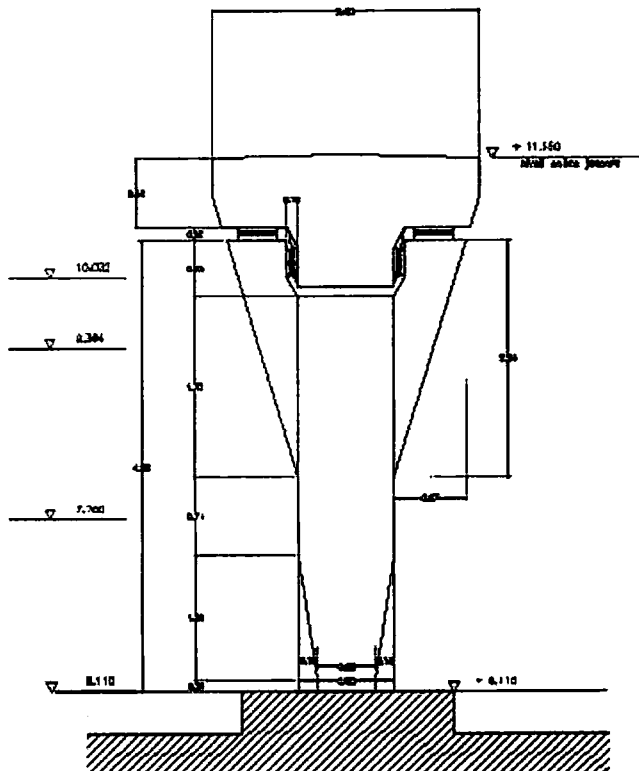
- Acero estructural S355J2GR en barra perforada y placas.



Fig. 3. Apoyo de los grandes arcos de acero y atriantamiento.

- En péndolas aceros S460J2GR
- Hormigón C45/55 en la terminología de Eurocódigo.
- Acero de armar B500
- Madera tipo MC-30, abeto rojo, en correas y cerramiento y MC-24, pino silvestre, en arcos de madera.

Fig. 4. Detalle de apoyo de vigas de hormigón en pilares.



4. Pilares y vigas de hormigón

Su misión es soportar la carga vertical de los arcos centrales, servir de base al conjunto de tornapuntas que sujetan las vigas metálicas extremas y el entramado de cerchas antiguas y contener los esfuerzos horizontales que generan las bóvedas y la acción del viento.

Un conjunto de 7 pilares cuadrados de hormigón de 90 cm de lado soportan 2 vigas relativamente paralelas a las fachadas laterales.

En el lado de la plazoleta de Santa Caterina, tres pilares soportan una viga de 42.70 m de largo con vanos de 4.90 m (voladizo)-18.80 m-15.25 m-3.75 m (voladizo).

En el lado del pasaje de Sant Domènech cuatro pilares soportan otra viga de la misma sección pero de 69.39 m de longitud total con vanos de 5.40 m (voladizo)-18.80 m-22.86 m-11.93 m-10.40 m (voladizo).

Las vigas tienen forma de T y conceptualmente son la superposición de dos. Para absorber las deformaciones y esfuerzos verticales, y en particular de los grandes arcos metálicos centrales, es necesaria inercia vertical a lo que correspondería a una viga rectangular postensada de 1,2 m de canto y 0,90 m de base. Por su parte y para absorber los esfuerzos y las deformaciones horizontales debidos a la acción del viento y de los empujes de las bóvedas sería preciso inercia horizontal que correspondería a una viga rectangular de 2,5 m de anchura y 30 cm de canto. (Fig. 4).

Los apoyos de las vigas sobre los pilares se realiza por las alas de la T y no por la base y son deslizantes, salvo el segundo contando desde la fachada principal que es empotrado. De esta forma las deformaciones longitudinales por dilatación de la cubierta, o por el postensado se independizan de los pilares, que son proporcionalmente cortos. (4,30 m de altura).

En los apoyos la carga de la viga se transmite al pilar a través de cuatro apoyos deslizantes: dos horizontales en las alas recrecidas de la viga, y otros dos verticales en los laterales del alma. El apoyo en las alas permite estabilizar el giro de la viga y absorber las deformaciones debidas a momento torsor de la misma.

Por tanto el nudo libera la transmisión del esfuerzos cortante en la dirección de la viga sobre el pilar, permite la transmisión del esfuerzo torsor de la viga que se transforma en flector sobre el pilar, y libera de esfuerzos torsores y flectores en el plano viga-pilar.

Por su parte, los apoyos verticales transmiten el esfuerzo horizontal al pilar (en forma de cortante).

Desde las jácenas de hormigón nacen un conjunto de tornapuntas metálicos que soportan las vigas extremas y fijan las deformaciones laterales de la cubierta transmitiendo las cargas a la viga.



Fig. 5. Péndolas y unión a arcos y vigas en uve.



Fig. 6. Una de las vigas de hormigón. La viga apoya en los pilares por las alas.

5. Los pilares metálicos

Los apoyos están formados por un ramillete de tubos metálicos independientes. Cada uno de ellos trabaja de forma distinta para las diferentes hipótesis de carga. Sobre todo en la base. Por ello, se ha discretizado la misma con el propio modelo. La base se ha constituido por una placa de 100 mm de espesor y dimensiones 2000x1500 mm apernada en todo su perímetro sobre una losa de hormigón de mismas dimensiones y 1,5 m de canto.

El estudio de la estabilidad global del conjunto se ha realizado mediante análisis no lineal. Se han adoptado longitudes de pandeo conservadoras. Gracias a ello, los pilares inicialmente diseñados inicialmente como arriostros permiten la resistencia sin los mismos. (Fig. 3).

6. Las vigas en uve

Sirven de base del conjunto superior de arcos de madera y cerramiento.

Su longitud es variable, desde los 56 a los 90 m en desarrollo, con una luz promedio en línea recta del orden de los 50 m.

La sección es triangular y está formada por 3 tubos de 219,1 mm de diámetro y 25 mm de espesor. En el diseño final el arriostramiento entre tubos se consigue con una alternancia de tubos de 80 mm de diámetro y 12 mm de espesor y láminas de acero en forma de triángulos escalenos todos ellos diferentes entre sí. El espesor de dichas láminas, o deltas, es de 20 mm.

Tanto los tubos como las deltas están en muchos casos comprimidos. El estudio a pandeo de las láminas metálicas apoyadas, en 3 puntos y básicamente comprimidas en su plano, se ha realizado mediante análisis numérico no lineal mediante elementos finitos (Figs. 11, 12 y 13).

7. Las péndolas

Realizan la transmisión de esfuerzos entre vigas metálicas en uve y los arcos. Constan de dos rótulas semiesféricas, diseñadas ex profeso, en sus extremos para liberar la transmisión de esfuerzos distintos a los axiales.

Las rótulas están configuradas por casquetes de apertura ligeramente superior a la semiesfera de acero S355 perforados en su eje para dar paso a barras de acero S460.

Las barras se dimensionan para absorber los esfuerzos totales en caso de fallo de dos arcos y minimizar las deformaciones verticales por alargamiento de barras. Estas barras se solidarizan mediante tuercas al casquete semiesférico.

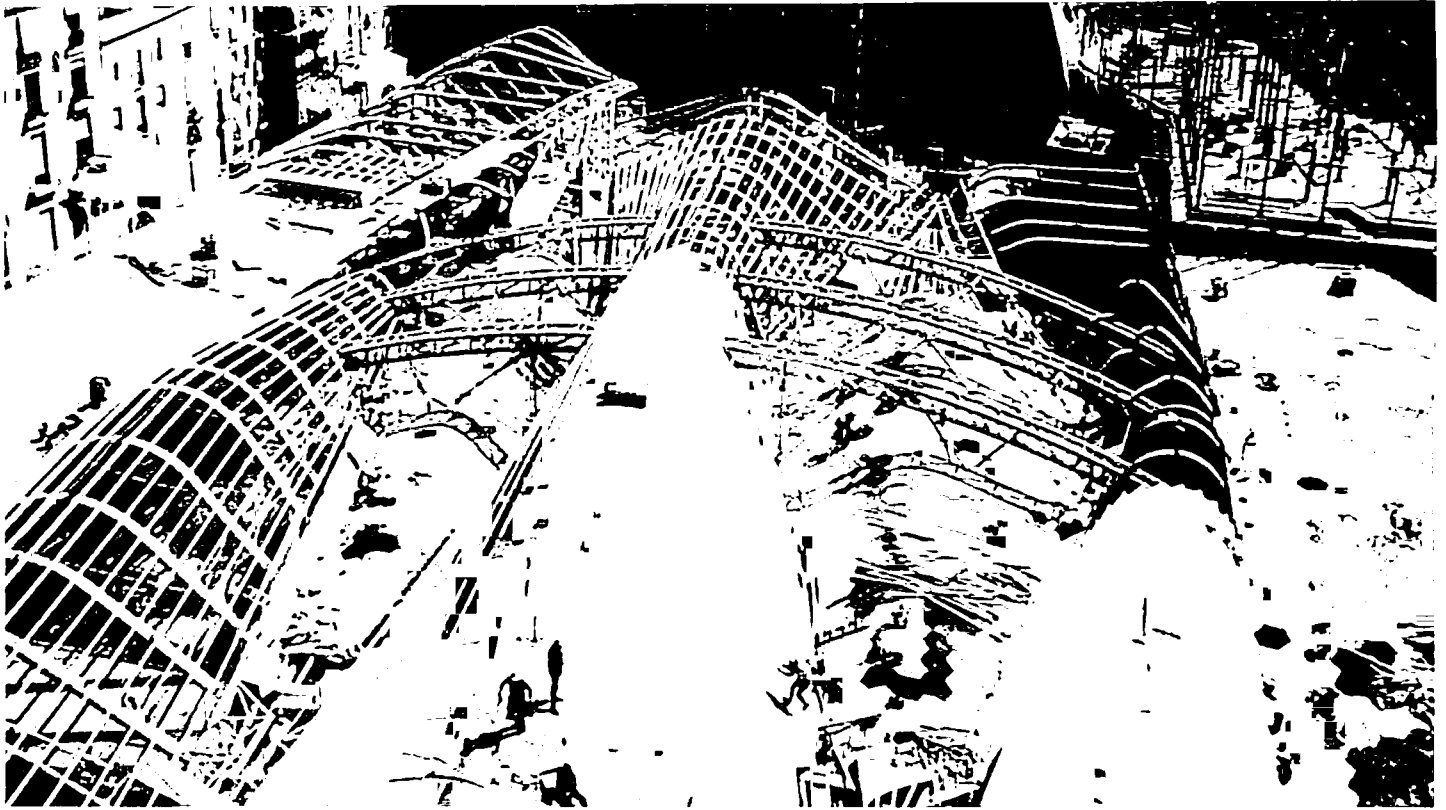


Fig. 7. Aspecto general durante la construcción.

8. Los arcos metálicos centrales

Su misión es contener las deformaciones verticales de las vigas metálicas garantizando el mantenimiento de una pendiente que permita evacuar el agua de lluvia (Fig. 1).

Los 3 arcos salvan una longitud de 42,78 metros entre apoyos, con una altura de clave respecto a su base de 6,02 m (relación 1/7) y radio por su eje de 41,44 m (abertura cercana a los 60°). Del conjunto descienden 12 péndolas (cuatro por arco) que soportan las vigas metálicas constituyendo, así, un conjunto de apoyos elásticos verticales. La situación de las péndolas en cada arco es distinta en cada caso, así como su longitud, debido a las variaciones en planta y alzado de las vigas en uve.

La sección del arco está compuesta por 3 tubos de 219,1 mm de diámetro y 25 mm de espesor en disposición de triángulo equilátero con la base situada en la parte superior. Los tubos se unen entre sí mediante una disposición de barras y pletinas tipo Howe, en que las barras inclinadas (tubos de 80 mm de diámetro y 12 mm de espesor) trabajan a compresión y las "verticales", en este caso pletinas de 15 mm de espesor, a tracción.

Los arcos descansan sobre las vigas de hormigón mediante apoyos puntuales tipo "pot". Uno de ellos es un apoyo guiado en el plano del arco y el otro fijo con liber-

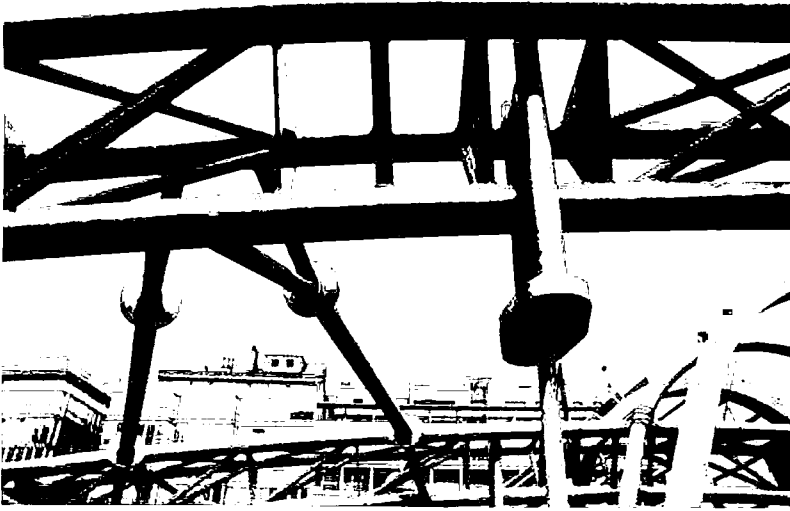
dad de giros. De esta forma los desplazamientos de los apoyos no transmiten esfuerzos horizontales en el plano del arco sobre las vigas de hormigón. Estos apoyos son inestables frente a esfuerzos horizontales perpendiculares al plano del arco. La base de los pots es de 30 cm de diámetro.

El arriostramiento entre los arcos se ha resuelto mediante barras de inercia que a una cierta distancia de los arcos se abren en 2 tornapuntas, uno dirigido a un tubo superior y el otro al inferior. La disposición de las riostras constituyen espacialmente un entramado en cruz que favorece la rigidización (Figs. 7 y 8).

En la base de los arcos los esfuerzos horizontales se absorben mediante un par de tendones en cada uno de ellos, formados por 19 cables de 0,6" cada uno. Estos tendones, prácticamente horizontales (7mm de flecha en el centro en 42 m de luz) es lo que permaneció de la idea inicial del mar de cables (Fig. 3).

Los cables presentan una resistencia adicional para que, si fallando aleatoriamente dos de los grandes arcos, (las péndolas o los cables), el tercero sujete la cubierta.

Asimismo, se ha estudiado que en caso de que fallen los tres pares de los cables de los arcos, por dilatación excesiva por incendio, por ejemplo. El apoyo guiado de los arcos puede sufrir un desplazamiento horizontal de 40 cm sin afectar a la estabilidad del conjunto.



El pandeo lateral

El problema principal ha sido el cálculo del pandeo global del conjunto por acciones fuera de su plano, sobre todo debido a que los apoyos están diseñados para liberar la transmisión de momentos a su base y a que las rótulas de las péndolas se encuentran a un metro por debajo del centro de gravedad de la sección correspondiente del arco (Fig 5).

Si la cubierta sufre desplazamientos horizontales, bien por montaje, por dilataciones o por el motivo que fuere la aplicación de la carga a los arcos a través de las péndolas queda fuera de la verticalidad. Ello quiere decir que al desplazarse horizontalmente el extremo inferior de las péndolas su eje abandona el centro de gravedad de la sección del arco; y, por tanto, se genera un esfuerzo torsor sobre el mismo.

Dado que los apoyos son incapaces de absorber esos esfuerzos, hay que confiar al arriostamiento de los arcos la contención de las deformaciones. O dicho de otra manera, la rigidez de los arriostamientos debe absorber, preferentemente, el trabajo que pudieran realizar sobre el arco la carga de las péndolas al desplazarse en su base (Fig. 8).

La acción de la péndola fuera de la vertical es equivalente a la acción sobre la rótula superior de la péndola de una carga vertical y otra horizontal.

Analizando distintas hipótesis de carga se observa enseguida que las cargas verticales son fuertemente estabilizantes, lo contrario que las horizontales. También se observa que hay que prescindir de análisis por envolvente de cargas pues, por ejemplo, cargas puntuales de 300 kN en vertical y 30 kN en horizontal situadas en cada una de las rótulas superiores de la péndolas son estables, mientras que cargas de 200 kN en vertical y 25 kN en horizontal son

inestables. Es más, se necesita una acción vertical expresa para que los arcos sean estables a acciones de tiro horizontales apreciables.

Por ello se analizó la matriz de casos posibles, o probables, individualmente, estudiando cuales eran los coeficientes de mayoración de carga a considerar. Finalmente se calibraron las acciones reales en función básicamente de las deformaciones horizontales que pudieran darse en las rótulas inferiores de las péndolas.

Todo ello se tradujo en una casuística de cargas y diseños en que se encontraron casos anómalos, que indicaban la importancia del estudio del proceso de carga y de la falta de linealidad.

Si se aplican la cargas verticales y horizontales al mismo tiempo, en análisis no lineal, se obtienen resultados diferentes a si se aplican primero las verticales y después las horizontales, y resultando que se produce el agotamiento si se aplican antes las fuerzas horizontales que las verticales.

En versiones previas del esquema sustentante se pudo observar la aparición de pequeñas trampas. Dadas unas cargas puntuales verticales puede ocurrir que el conjunto sea estable hasta una determinada carga horizontal para ser inestable durante un intervalo y posteriormente volver a la estabilidad hasta alcanzar el límite máximo de carga horizontal. La explicación dada es que en análisis no lineal las dos cargas se introducen paulatinamente y puede haber ventanas de inestabilidad antes de llegar a los valores más extremos. Es por ello que el análisis se hizo para un conjunto de unos 30 casos diferentes de cargas sin suponer en ningún caso que valores mayores envolvían combinaciones de menor magnitud. Hay que señalar que por agotamiento se entendía el del pandeo del conjunto o el agotamiento de una de las barras de los arcos.

En general la carga máxima horizontal que producía el agotamiento del sistema era el 10% de la carga vertical. Dicha carga horizontal básicamente sólo puede estar originada por desplazamiento del peso de la cubierta. Es decir, el valor de control de la inestabilidad es el desplazamiento horizontal de las rótulas inferiores de las péndolas. Así para las péndolas de mayor longitud, las centrales, que corresponde con las de mayor carga el desplazamiento debiera ser superior a los 30 cm.

9. Los arcos de madera: Tabla, tablón y tabloncillo

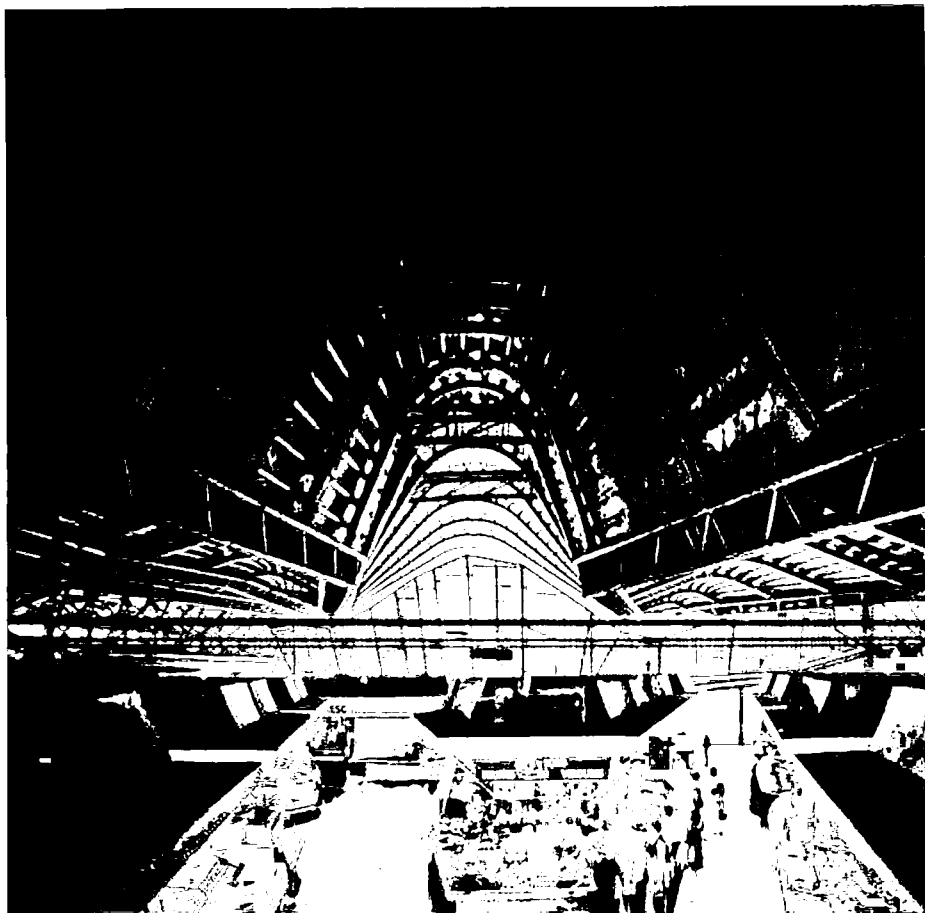
Los arcos de madera aparecieron en un momento tardío del proyecto, sustituyendo al diseño inicial de arcos metálicos. Acompañan a la recuperación de las cerchas antiguas del mercado, siendo más del 50% los originales (Figs. 7 y 14).

La idea partía de la recuperación de un material utilizado en antiguas construcciones en Barcelona, y en otros

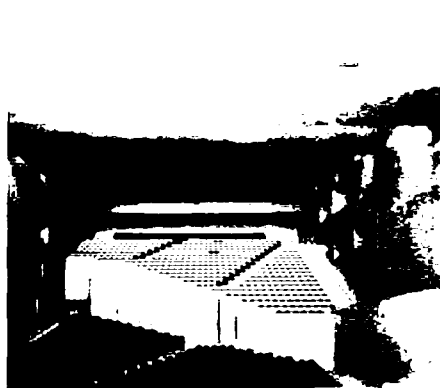
Fig. 8. Arriostamiento de los arcos.



Estación Intermodal de Zaragoza-Delicias



Mercat de Santa Caterina, Barcelona



Auditorio y Palacio de Congresos de Castellón



Escuela de Música de Barcelona

CONSTRUCCIONES EN MADERA

www.frapont.es

Ciutat d'Asunción, 32 08030 Barcelona Tel: 93 274 64 55 Fax 93 346 76 07 frapont@frapont.es

FRAPONT
CONSTRUCCIONES EN MADERA



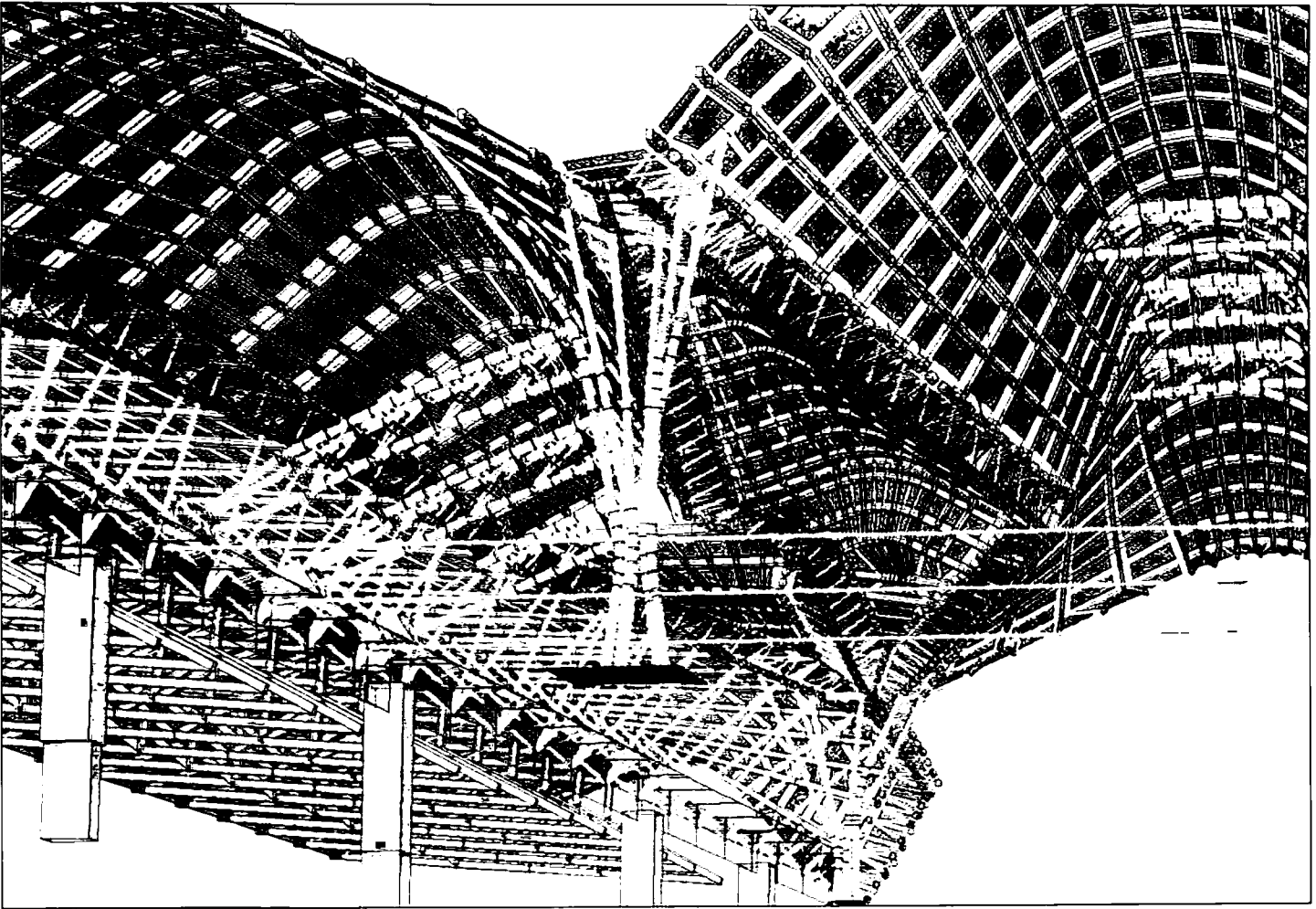


Fig. 9. Vista interior del modelo numérico.

lugares. La recuperación sería lo más natural posible, obligando, por tanto, al empleo de la tecnología de la madera aserrada, dejando de lado la madera laminada, más artificial.

Tabla (3-2,5 cm de espesor), tablón (7,5 cm de espesor) y tabloncillo (5,5-5 cm de espesor) han sido tradicionalmente las tres medidas de madera que se han utilizado en obra para la realización de encofrados o de construcciones auxiliares. Se eligió el módulo del tabloncillo puesto de canto (20 cm x 5cm) como patrón de formación de los arcos. Su dimensión se corresponde con la de los tubos metálicos (219,1 mm de diámetro) con los que se engarza.

Así, la forma ondulante de la cubierta se configura mediante arcos de madera que constituyen las costillas del cerramiento. Esta madera estructural es de sección de 200 x 400 mm en viga plana. Los arcos son todos diferentes en su longitud y forma y constan en general de 2 faldones planos y una parte curva superior. En cálculo contra incendio se debe descontar por disminución de canto 30 mm a

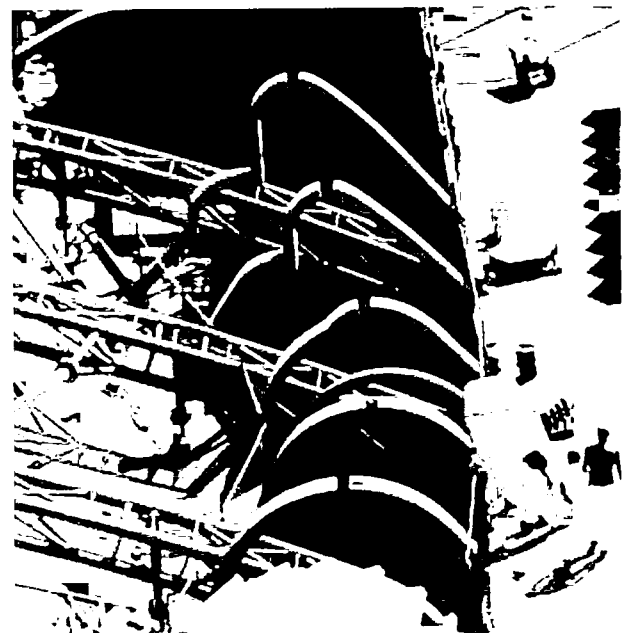


Fig. 10. Arcos de madera lobulados de uno de los lucernarios.



Fig. 11. Cerramiento y cubierta de la paiza de Joan Capri

cada lado y otros 30 mm en la base. Por tanto, la sección útil es de 170 mm de canto y 240 mm de ancho (Fig. 2).

Los arcos se encuentran articulados en la base para no transmitir momentos entre las partes de madera y las vigas metálicas.

Los arcos más peraltados son triarticulados con el fin de liberar tensiones en su centro debidas a movimientos propios de la madera, así como por razones constructivas pues dada su envergadura conviene que sean piezas independientes.

Los arcos rebajados son biarticulados para favorecer su rigidez, pues forman parte de los rombos centrales que funcionan como grandes vigas horizontales, y debido a que trabajando fuertemente a compresión se deben evitar las deformaciones secundarias por fluencia que originarían el descentramiento de los axiles entre directrices de los semiarcos en la rótula de unión.

Un conjunto de arcos especiales lobulados dan forma a los lucernarios.

Aspectos importantes en el momento del diseño era la calidad resistente de la madera. Era casi imposible encontrar en ese momento alguien que pudiera garantizar el suministro de una madera tipo C-30, ni tan siquiera la terminología estaba generalizada. La existencia del borrador del eurocódigo nº 5 dedicado a estructuras de madera, y bibliografía técnica nacional estableciendo las diferentes calidades resistentes permitía prever que se podría ejecutar de alguna manera.

El último paso, ya en obra, fue encontrar talleres que se comprometieran a hacerlo con la filosofía indicada. Las empresas de madera laminada fueron incapaces de ejecutar radios de curvatura tan pronunciados, frecuentemente de 3 m y descendiendo hasta los 0,40 m en los arcos lobulados. Sólo la solución de colocar la madera de canto permitía realizar el diseño (Fig. 10).



Fig. 12. Pilar en plaza Joan Capri y unión de tres vigas metálicas

Al final fue la empresa sevillana "2F Construcciones en madera" la que aportó el cañío necesario para su ejecución, permitiendo finalmente la ejecución de la cubierta tal y como se concibió. Dicha empresa aportó al diseño la creación de juntas tipo "finger joints", mejorando la transmisión de esfuerzos entre piezas, así como la mejora de la presencia de los herrajes: las tuercas se sustituyen por arandelas que son asimismo tuercas.

El nivel de esfuerzos varía de unos a otros. En los más peraltados los esfuerzos mayores son los axiales, mientras que, en particular en la nave central, cuando los arcos se abren, aumentando la luz hasta 15,80 m, y disminuyendo el peralte a 3,6 m, pasan a ser preponderantes los esfuerzos a flexión. En este caso las vigas son de 200 mm de canto y 600 mm de ancho. Los arcos extremos se transforman en metálicos, básicamente porque en algunas zonas los arcos de madera debían cambiar de dimensión, por los esfuerzos generados, en particular debido a los esfuerzos torsores.

10. El cerramiento

Los arcos de madera se unen entre sí mediante correas de madera. Sobre éstas se disponen las capas siguientes: En primer lugar, dos capas de 1 cm de espesor cada una formada por listones machihembrados de 15 cm de anchura y dispuestos ortogonalmente. Sobre éstas listones de 4x4cm separados cada 60 cm con aislante a base de lana de roca entre ellos. Encima otras dos capas de madera similares a las primeras y sobre éstas las piezas cerámicas unidas con una resina especial aplicada en dos capas y con función de impermeabilización y de adherencia con la cerámica.

Tanto las correas como las dos primeras capas se consideran estructurales, no así el resto del cerramiento.

Las correas trabajan tanto a tracción como a compresión, además de flexión debida a las cargas locales. La causa se debe por una parte a las tensiones generadas por el diferente coeficiente de dilatación térmica entre madera y acero; y, por otra, al funcionamiento como grandes vigas de las bóvedas. Son, por tanto, estructura principal y no secundaria.

Las dos capas cruzadas de madera actúan de rigidización de los rectángulos estructurales formados por las correas y los segmentos de arco correspondiente controlando las deformaciones verticales del conjunto. Las capas de madera superiores se consideran prescindibles pudiéndose sustituir en caso de necesidad sin afectar a la estabilidad global del conjunto.

... una larga y afortunada historia y tradición constructiva... eurocódigo 1, anexo A, apartado A1

11. Funcionamiento estructural

El funcionamiento estructural de la cubierta depende del proceso de su puesta en suspensión.

Eran posibles dos procesos distintos:

Por una parte, poner en suspensión, provisionalmente arriestradas, las vigas metálicas mediante un tesado parcial de los arcos y proceder posteriormente a la colocación de arcos de madera, correas y cerramiento.

De esta forma las vigas metálicas y los arcos de madera trabajan fuertemente y las correas y cerramiento sólo absorben los esfuerzos existentes entre pórticos. Las vigas de acero, en toda su longitud, actúan como base estructural de los arcos de madera sobre los que descansará el cerramiento. En este caso correas de arriostamiento y cerramiento sólo absorben los esfuerzos locales.

O bien, mantener toda la cubierta apeada sobre castilletes hasta su cerramiento y, antes de colocar la cerámica proceder a su puesta en suspensión.

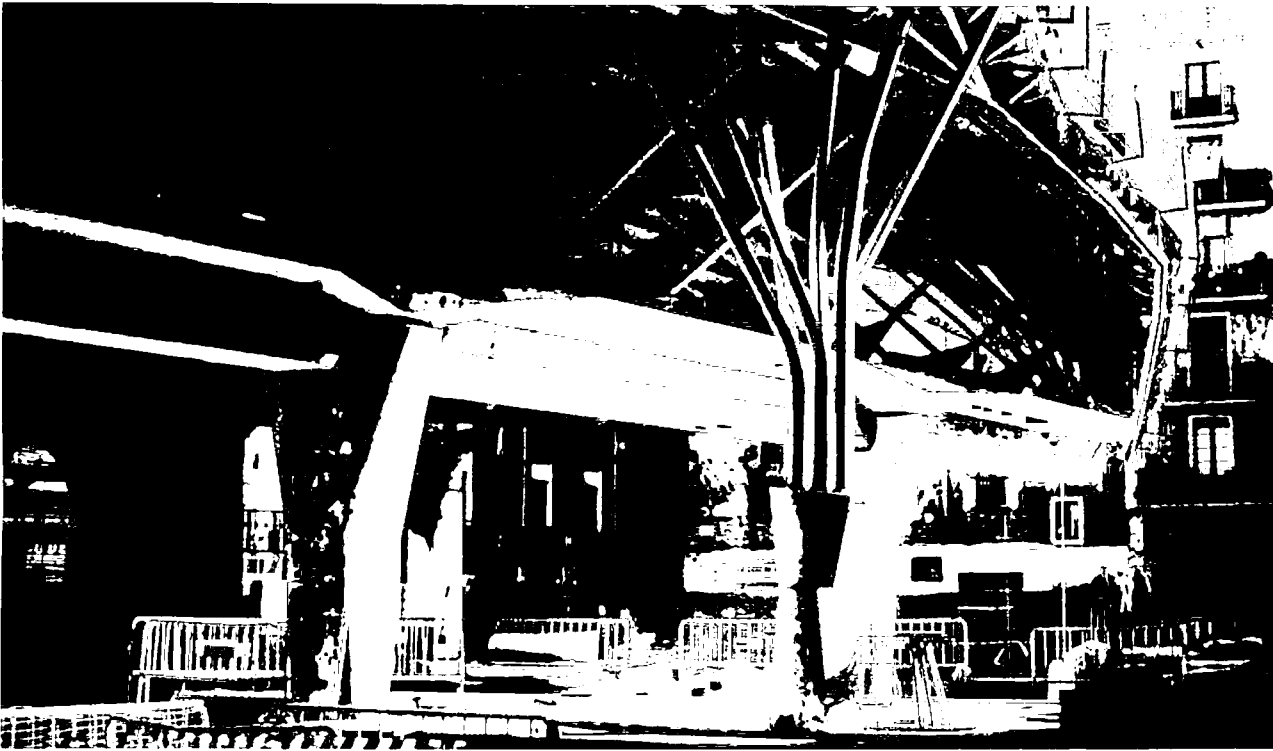


Fig. 13. Vista general de vigas de hormigón, pilares metálicos, y línea de la cubierta.

En este caso los cañones actúan como grandes vigas mixtas en que la cabeza de compresión está formada por las correas y cerramiento de madera y las vigas metálicas soportan básicamente la tracción, viendo reducidos sus esfuerzos gran parte de los arcos de madera y cambiando la forma de trabajo de las vigas metálicas.

De esta forma los esfuerzos se distribuyen por la piel liberando a los arcos de madera de parte de sus cargas. De hecho si el trabajo de las fuerzas exteriores es prácticamente el mismo en ambos casos, y si, en un caso, la energía interna de deformación se acumula en correas y cerramiento estructural, obligatoriamente debe disminuir la energía de deformación en los arcos de madera y, por tanto, sus tensiones.

El aspecto más complejo reside en las fuertes tensiones generadas en la interfase madera acero debido al diferente coeficiente de dilatación de ambos materiales (considerado nulo en la madera).

12. El proceso constructivo

Las vigas metálicas en uve se montaron en taller en tramos de 20 ó 40 m de longitud, posteriormente se cortaban en tramadas de 10-12m para el transporte y se volvían a unir en obra en el suelo. Cuando se procedía a unir varias tramadas se izaban a su posición definitiva sobre caballetes y se procedía a la soldadura de las uniones restantes.

Cabe señalar que los errores de montaje han sido despreciables. Los arcos de madera, fabricados en Sevilla, se colocaron perfectamente sobre las orejetas de espera en las vigas en uve.

La puesta en carga de la estructura se produjo en dos fases: En la primera se puso en suspensión toda la cubierta, pero sin la carga permanente completada, mediante un primer tesado de los arcos. Y en una segunda fase, con la carga completada, se retesaron los cables para rectificar las flechas obtenidas. El tesado final fue función de las deformaciones obtenidas, aproximándose al resultante del cálculo teórico.

Gracias a las numerosas comprobaciones que se han realizado con el equipo de arquitectura, y con las empresas de estructura metálicas y de estructuras de madera se ha conseguido la eliminación de errores de ejecución.

13. La deconstrucción

En el proyecto de derribo del mercado antiguo se tituló proyecto de deconstrucción. Leer a Derriba para desentrañar el misterio ha sido, junto al estudio del pandeo lateral de los arcos, lo más arduo del proyecto, pues su filosofía indagada en el conocimiento antes de su expresión verbal.

Frecuentemente al hablar de una construcción es tal el conjunto de relaciones internas, de referencias exter-

nas, razones históricas, técnicas y de todo tipo, que se crea una malla intelectual que vela la apreciación de la construcción en sí misma, que se distancia de ella, que la deforma e incluso que la distrae. Esta es la crítica básica de Derrida, en su caso dirigida a la crítica literaria y en particular al estructuralismo. La tarea de deshacerla es la deconstrucción, quizás desintelectualización.

Abundando en ello se puede decir que de alguna manera hay diseño y conocimiento antes de su consciencia. En ese sentido el diseño de la cubierta está lejos de la plasmación de una idea, (que necesita una verbalización o al menos de una conciencia de su existencia) sino que es previa, e incluso independiente de la idea.

El diseño es preconsciente y cada formalización en el desarrollo del proyecto siempre fue mirada con prevención. Cada resolución se transformaba en una duda que daba lugar a otro punto de partida.

De esta manera, dibujando antes de racionalizar, existe una libertad inmensamente mayor, infinitamente mayor, en que el pensamiento se puede dividir y dirigir en múltiples direcciones. En que el proceso creativo está libre de referencia, tradición, y conocimiento para avanzar, valga la redundancia, libremente. El pensamiento se abstiene y aparece la forma, y después la estructura.

Así la estructura mira a todos lados y reacciona a lo que ve, pero sin condición o coacción alguna. También podría decirse que se autogenera.

Mucha de la arquitectura denominada deconstructivista son gestos, movimientos llenos de fuerza pero sin condiciones. A veces, simples interrogantes. El punto de partida es diferente a lo que se ha denominado arquitectura generada a partir de formas aleatorias.

14. La evolución del diseño.

La eliminación de los arcos centrales

De las ideas originales, cubierta flotando en un mar de cables quedó un aspecto que podía haber evolucionado y es la existencia y la forma de los grandes arcos centrales. Tras el fallecimiento de Miralles se estudió su posible eliminación. Para ellos se analizaron alternativas que alteraban fuertemente los fundamentos o principios del diseño al que se había llegado (cubierta gunitada, cubierta metálica en placas)

Pero hubo una propuesta que era realizable. Consistía en convertir el conjunto del cerramiento de la cubierta en una sección estructural. En vez de dos capas de láminas de madera de 1 cm cada una, anisótropas, que cruzadas

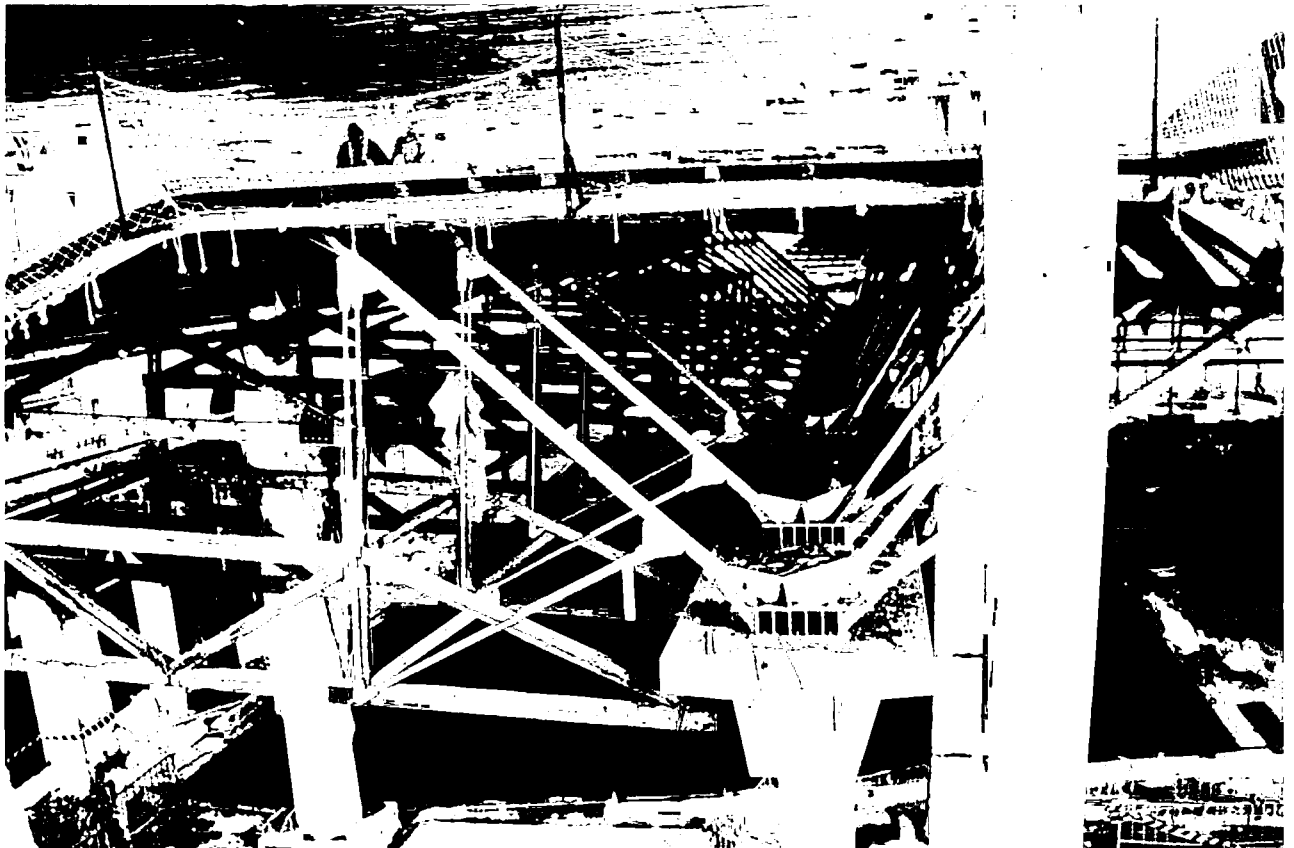


Fig. 14.
Recuperación
de las cerchas
antiguas y
anclaje de los
tomapuntas en
una de las vigas
de hormigón.



Fig. 16 Vista general de la cubierta terminada.

a 90° daban lugar estructuralmente a una capa de 1cm isótropa. Colocar 10 capas de 1cm que daban lugar a 5 cm de sección bruta resistente isótropa, pero teniendo en cuenta la inercia a la que equivalen en 9 cm. Se consideró en obra que esta alternativa consumiría mucho tiempo de ejecución por lo que se desechó. La realidad es que en la ejecución del cerramiento ha sido rápida. Ello se debió a la pericia de la empresa FRAPONT encargada de correas y madera de cerramiento.

... a veces las marcas tienen un significado, si alguien las sabe interpretar, las entiende. Pero muy a menudo tienes que pararte como desconocido, aceptar la marca porque está ahí, porque te la has encontrado, como cuando encuentras algunas inscripciones en una roca. Me interesa ese trabajo de ir aceptando los resultados que van apareciendo... E. Miralles.

15. Agradecimientos

El proyecto se ha realizado en dos fases: Desde finales de 1997 a 2000, y de 2000 a 2005. La primera parte se reali-

zó dentro de la empresa Europroject Ingeniería; la segunda como profesional liberal trabajando conjuntamente con EMBT y bajo el paraguas general de Brufau y Asociados que se incorpora al proyecto a finales del año 2000 asumiendo el diseño y los cálculos de la cubierta del mercado; y una última parte de la asistencia a obra dentro de la empresa Amatria Ingeniería.

Hasta el año 2000, proceso en que se concibió y calculó la estructura, conté con la ayuda de los Ingenieros de Caminos David Maruny y Eva Trull, así como la de los Ingenieros de Obras Públicas Mercé Alonso y Juan Mesa y de los que guardo un enorme y agradecido recuerdo. Calcularon durante año y medio y de forma casi continuada numerosas variantes y su trabajo permitió fijar el proyecto.

En la segunda parte se revisó en detalle la geometría se cambió el diseño de las vigas en uve y la forma sustentante de los grandes arcos centrales, se realizaron nuevos cálculos partiendo de cero y trabajando conjuntamente con el Director de Proyecto de EMBT el arquitecto Igor Peraza, con el que he compartido muchas horas de desazón, ilusión y de trabajo. Esta colaboración ha sido imprescindible para evitar que el proyecto se desvirtuara.

Debo resaltar el trabajo de las personas que con su habilidad profesional hicieron realidad la obra.

En los arcos de madera Fermín Garrido Pérez y Fermina López Jurado "almas mater" de la empresa "2F Estructuras de madera" que diseñaron programas informáticos de despiece de los arcos, máquinas especiales para su ejecución adaptando las máquinas a los arcos y no al revés, y aportaron conocimiento, ingenio y, también, una enorme cantidad de trabajo; y que contaron con la colaboración de la arquitecta Fermina Garrido López para la realización del control geométrico y despiece de los arcos.

Para la estructura metálica Juan Gutiérrez, Encargado General, con la ayuda de Javier Granado de Calderería Delgado (CALDELSA) que se enfrentaron con éxito a una geometría densa sin escatimar esfuerzos ni dedicación, así como Francisco Delgado, gerente de la empresa.

En el delicado cerramiento David Pérez de la empresa FRAPONT que solventó el problema geométrico de la alineación de las correas y del cerramiento, así como Francesc Galbany que coordinó los trabajos.

Todos ellos hicieron realidad la premisa base de la concepción y cálculo estructural: que aparecieran las personas que con su habilidad y dominio, con su técnica, se enfrentaran a los problemas de ejecución que la estructura planteaba. Y los resolvieran.

Naturalmente a sus empresas que entre sus cualidades se encuentra la de contar con ellos.

Debo señalar también a la empresa constructora principal COMSA que coordinó el conjunto de los trabajos y la compleja geometría, a César Pérez Ingeniero de Caminos Jefe de Obra y a José Luis Párrales, Gerente. Cabe destacar, por otra parte, el trabajo realizado por la empresa INEMA, encargada del control de calidad, y en particular de su Gerente, Salvador Miranda.

Además al equipo de dirección de obra encabezado por Josep Narcís Arderiu, Ing. Caminos; al que han acompañado José Miguel Díez (Arquitecto Técnico) (Foment de Ciutat Vella), Marc Viardell (arquitecto). Sin su buen talento la obra hubiera sido otra.

Especial agradecimiento debo a Julio Martínez Calzón, Dr. Ing. de Caminos, que a finales de 1999 supervisó y aprobó la viabilidad de la concepción general de la estructura, lo que me permitió seguir con su desarrollo, y a Robert Brufau Niubó, Dr. Arquitecto, que apoyó mi continuación en los trabajos tras el fallecimiento de Enric Miralles, y a su equipo, que realizaron el seguimiento de control de calidad de los cálculos.

Asimismo, naturalmente, a Enric Miralles y a Benedetta Tagliabue autores de esta sinfonía de pensamientos, intuiciones y colores que es la cubierta y que aceptaron las contribuciones realizadas en el diseño estructural.

Por último al profesional y maestro que ha estado permanentemente presente en todo el proceso Domiciano Velasco Rodríguez, Encargado General de Obra, al que consulté en numerosas ocasiones. Toda la estructura es, en realidad, un homenaje a sus enseñanzas. ♦

Referencias:

-Arguelles, R.; Ariaga, F. *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. A ITIM, Madrid, 1996.
 -Derrida, Jacques. *Fuerza y Significación*, en *La Escritura y La Diferencia*, Ed. Anthropos, Barcelona, 1989
 -Dutta, D.; Wardenier, J.; Yeomans, N.; Sakae, K.; Bucak, Ö; Packer, J.A.; *Guía de diseño para la fabricación, ensamble y montaje de perfiles tubulares*. Verlag TÜV Rheinland, Comité Internacional pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubular (CIDECT), Colonia 1996.
 -Eurocódigo 0.- *Bases de cálculo de estructuras* UNE-EN 1990.
 -Eurocódigo 1.- *Acciones en estructuras* UNE-ENV 1991, Febrero 1995.
 -Eurocódigo 2.- *Proyecto de Estructuras de Hormigón* UNE-ENV 1992, Diciembre 1996.
 -Eurocódigo 3.- *Proyecto de Estructuras de Acero* UNE-ENV 1993, Diciembre 1996.

-Eurocódigo 5.- *Proyecto de Estructuras de Madera*, UNE-ENV 1995, Marzo 1997.
 -El Croquis. Enric Miralles. 183/2000,30+49+50 =100+101
 -Rondal, J.; Würker, K.-G.; Dutta, D.; Wamadier, J.; Yeomans, N.; *Estabilidad Estructural de Perfiles Tubulares*. Verlag TÜV Rheinland, Comité Intenational pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubular (CIDECT), Colonia 1996.
 -Twilt, L.; Hass, R.; Klingsch; Edward, M.; Dutta, D.; *Guía de diseño para columnas de perfiles tubulares estructurales sometidas a fuego*. Verlag TÜV Rheinland, Comité Intenational pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubular (CIDECT), Colonia 1996.
 -Velasco, Jose M^o.- *La estructura metálica del mercado de Santa Caterina*. Congreso de la Estructura Metálica -CEA2004, La Coruña 22-24 Septiembre 2004 -Guim Costa, Barcelona 1992-2004, Ed. Gustavo Offi, Barcelona 2004.
 -Velasco, Jose M^o.- *Arched Structure that supports the roof cover of Santa Caterina's market in Barcelona*. 4th Conference on Arch Bridges (ARCH'04), Barcelona 17-19 Noviembre 2004.

-Velasco, Jose M^o.- *La Madera en la cubierta del Mercado de Santa Caterina*. Jornadas comerciales Hispano-Austriacas sobre nuevas tecnologías de construcción en madera. Madrid-Barcelona, 16-17 Junio 2005.
 -Velasco, José M^o.- *The Santa Caterina's market roof cover in Barcelona*. IASS2005. International symposium on shell and spatial structures. Theory, Technique, Valuation, Maintenance, Bucarest, Rumania, 6-9 septiembre 2005.
 -Wardenier, J.; Dutta, D.; Yeonians, N.; Packer, J.A.; Bueak, Ö; *Guía de diseño para tubulares estructurales en aplicaciones mecánicas*. Verlag TÜV Rheinland, Comité Intenational pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubular (CIDECT), Colonia 1996.
 -Wardenier, J.; Kurobane, Y.; Packer, J.A.; Dutta, D.; Yeomans, N.; *Guía de diseño para nudos de perfiles tubulares circulares (CHS) bajo cargas predominantemente estáticas*. Verlag TÜV Rheinland, Comité Intenational pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubular (CIDECT), Colonia 1996.