

EN EL CAMPO DE TENSIÓN ENTRE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA. LA CONCEPCIÓN DE ALGUNAS CUBIERTAS CON ELEMENTOS DE ACERO

Peter Tanner, Juan Luis Bellod
CESMA Ingenieros
C/ Villa de Marín 6, Local 4. 28029 Madrid
e-mail: cesma@acttec.com

Resumen

En la contribución se presenta la concepción estructural de diferentes cubiertas, proyectadas por CESMA Ingenieros. En algunas de ellas el acero se emplea conjuntamente con otros materiales constructivos, mientras que otras están constituidas enteramente por elementos de acero.

Los ejemplos ponen de manifiesto que las estructuras de edificación requieren una concepción y una planificación extremadamente cuidadosas, teniendo en cuenta las complejas interacciones entre geometría, funcionalidad, concepto estructural y aspecto estético. Que el resultado final sea satisfactorio depende fuertemente de la buena colaboración entre la propiedad, el arquitecto y el ingeniero. Algunos de los ejemplos demuestran, además, que a través de consideraciones estructurales es posible incrementar el valor del diseño arquitectónico.

1. Introducción

En términos generales, las estructuras deben cumplir con dos requisitos fundamentales: por un lado deben, con una fiabilidad adecuada, resistir a todas las acciones e influencias a las que previsiblemente puedan estar expuestas durante las fases de su construcción y de su uso y, por otro lado, deben ser aptas para el uso para el que hayan sido proyectadas. Para alcanzar estos objetivos se deben desarrollar, durante las distintas fases que engloban desde los estudios previos, el proyecto y la ejecución, hasta la utilización, la inspección y el mantenimiento de la obra, una serie de actividades que están interrelacionadas.

Un análisis de las causas que están detrás de los daños que se producen en las estructuras demuestra que, en la gran mayoría de los casos, éstos se deben a errores humanos y que con demasiada frecuencia los errores se cometen en la fase de la concepción de la solución estructural [1]. Efectivamente, no solamente la funcionalidad y la economía, sino también la fiabilidad de una estructura dependen básicamente de su concepción. El hecho de que un número considerable de los daños que se producen en los edificios se deban a una concepción estructural poco adecuada pone de manifiesto que a esta tarea muchas veces no se le presta la atención debida. Esta

circunstancia resulta sorprendente si se tiene en cuenta que se trata posiblemente de la actividad más creativa y fascinante del trabajo de un ingeniero estructural.

Normalmente, a la hora de plantear una solución para una estructura de edificación, la dificultad principal reside en la traducción geométrica de las exigencias arquitectónicas y funcionales. Según el caso, a estos condicionantes habituales se les pueden superponer condicionantes específicas, por ejemplo los relacionados con la construcción, con las condiciones de uso de una obra, con posibles acciones especiales, etc. Sobre la base de todos estos condicionantes se establecen, en un primer paso, las ideas básicas a las que se debe ajustar la solución estructural a proyectar. Estas ideas se refieren por ejemplo a la tipología estructural (estructura espacial, atirantada, etc.), los materiales a emplear, los procedimientos de fabricación y montaje, o al tipo de detalles constructivos (uniones soldadas o atornilladas, etc.). A continuación, estas ideas se deben desarrollar mediante esquemas, incluyendo los detalles constructivos. La viabilidad de la solución es de demostrar mediante cálculos simplificados. El resultado del proceso de concepción debe incluir la definición del sistema global de la estructura, de los elementos estructurales con sus dimensiones principales, de los detalles constructivos incluido su funcionamiento, así como de los procedimientos de construcción y de las fases del montaje. El subsiguiente análisis detallado de la estructura también es importante, pero los cálculos tienen como objeto principal la comprobación y, en su caso, la optimización de la solución adoptada. Una estructura bien concebida sufre en esta fase solo cambios de menor envergadura.

2. Tanatorio de la M-30, Madrid

La cubierta del patio central del Tanatorio de la M-30, de 47 m de longitud y 10 m de ancho, tiene la forma de una bóveda con una relación flecha – luz de aproximadamente 1/5. Vista en planta, la cubrición de la bóveda se divide en 5 franjas, orientadas en sentido longitudinal del patio y constituidas por diferentes materiales. La franja central con una proyección horizontal de 4,55 m de ancho es de vidrio, mientras que las dos franjas adyacentes a la central, de 1,5 m de ancho cada una, están cubiertas con un panel sándwich. Las franjas laterales no están cerradas, con el fin de asegurar una adecuada circulación del aire en el patio.

La estructura de la nueva cubierta está formada por arcos de perfiles tubulares, separados 4,66 m, que se apoyan en sendas vigas cajón de acero situadas por encima de la cubrición de los edificios existentes que delimitan el patio en sentido longitudinal. Los arcos están unidos entre ellos mediante 4 correas cuyos ejes coinciden con las separaciones entre las distintas franjas de la cubrición. Estas correas sirven por un lado de apoyo a los elementos de la cubrición y, por otro lado, contribuyen a estabilizar los arcos fuera de su plano.

La separación entre arcos es superior a la luz que pueda ser salvado económicamente con vidrios comerciales por lo que se requiere un apoyo intermedio. Con el fin de conseguir una mayor transparencia de la franja de vidrio, en lugar de por perfiles metálicos estos apoyos están formados por rigidizadores con cables (figura 1). Se dispone un rigidizador con cables entre cada dos arcos, en sentido transversal al patio, por lo que la luz de los vidrios se reduce a 2,33 m.

Los dos cables de un rigidizador están tensados uno contra el otro formando cada uno una línea poligonal que aproxima una parábola. Esta forma se obtiene mediante tres bielas de compresión que mantienen los cables separados (figura 2). Los extremos de los cables están retenidos por las correas que delimitan la franja de vidrio. Los cables están pretensados con una fuerza de 11 kN. El valor de la fuerza de pretensado se ha elegido de forma que el cable superior no se pueda destesar en condiciones de servicio, lo que permite limitar las deformaciones del conjunto. Para estabilizar

el rigidizador fuera de su plano, los extremos superior e inferior de las bielas de compresión se unen con los arcos adyacentes mediante unos cables dispuestos en sentido longitudinal del patio.



Figura 1. Vista inferior de la cubierta del patio central del Tanatorio de la M-30.

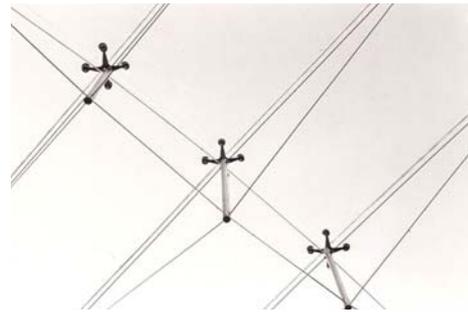


Figura 2. Rigidizador con cables.

3. Observatorio en el parque del Retiro, Madrid

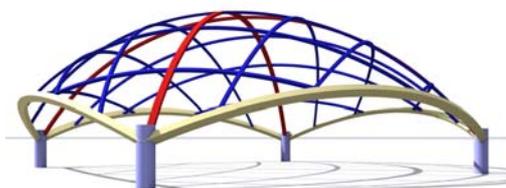
La apariencia exterior del edificio que alberga el telescopio Herschel [2] ofrece un volumen aproximadamente cúbico sobre el que se levanta una calota esférica (figura 3). El cubo se materializa mediante cuatro pórticos que forman sus aristas. Las caras verticales de este volumen están cerradas mediante mamparas de vidrio. La calota esférica cubre una superficie cuadrada de 12,9 m de lado, y con un radio de 10,85 m alcanza una altura máxima de 5,225 m sobre el nivel de la cara superior del volumen cúbico. Por motivos de economía, así como de facilidad y rapidez de ejecución, la estructura de la cúpula debía ser metálica.



Figura 3. Vista exterior del edificio en el Observatorio Astronómico.

La concepción de la cubierta se ha basado en una serie de ideas estructurales destinadas a conjugar la eficacia de la solución con criterios funcionales y estéticos, así como con la facilidad de ejecución. En particular, se decidió que los elementos debían inscribirse en la lógica de una esfera, es decir que cada elemento debía ser un arco meridiano (figura 4). En consonancia con esta idea, los elementos de borde también debían formar arcos meridianos, por lo que la forma de la cúpula se ha obtenido por la intersección de la superficie esférica con cuatro planos, definidos cada uno de ellos por, respectivamente, dos esquinas adyacentes del cuadrado a cubrir y el centro de la esfera. De acuerdo con esta forma, las fachadas de la cúpula, también cerradas con vidrio, son

inclinadas con una altura máxima de 1,681 m sobre el nivel del cubo. La disposición de arcos meridianos conlleva la aparición de momentos torsores en los elementos. Por este motivo, y también por razones estéticas, los arcos se debían fabricar de perfiles cerrados y con uniones soldadas.



a) Modelo 3 D (Infografía: Santiago Rivera).

b) Durante al construcción.

Figura 4. Estructura metálica de la cúpula.

La cúpula se puede asimilar a una membrana en la que la superficie continua ha sido sustituida por nervios metálicos. Su funcionamiento es por ello similar al de una membrana apoyada en cuatro puntos, situados en las esquinas del cuadrado que debe cubrir. Las dos diagonales de este cuadrado marcan las direcciones principales del flujo de las fuerzas, mientras que sus cuatro lados, correspondientes a las aristas superiores del volumen cúbico, funcionan como tirantes que resisten los empujes horizontales transmitidos por la cúpula. Finalmente, el funcionamiento de la estructura como membrana requiere unos elementos de borde suficientemente rígidos, así como el mantenimiento de la forma de los rombos esféricos formados por los arcos meridianos. En relación con esta última condición, es posible contar con el efecto estabilizador de la piel de la cúpula, siempre y cuando sus elementos sean suficientemente resistentes y rígidos dentro de su plano para mantener la indeformabilidad de los rombos, y si su fijación con la estructura de acero se dimensiona para transmitir los esfuerzos correspondientes.

4. Parque Deportivo de Nazaret, Valencia

El parque deportivo Nazaret engloba tres edificios que contienen, respectivamente, una piscina, una pista de baloncesto y una pista para otros deportes de sala. Las fachadas de los dos primeros edificios —con unas dimensiones en planta de 40 m por 40 m y de 45 m por 40 m, respectivamente—, adyacentes al edificio central, tienen una altura sobre el terreno de 14,25 m, mientras que la altura de las fachadas opuestas es menor, de 8,45 m. El desnivel de 5,8 m entre las dos fachadas se salva mediante una cubierta abovedada de 40 m de luz y con un radio de 140 m (figura 5). El edificio central con una planta de 45 m por 25 m, finalmente, también dispone de una cubierta abovedada, de 25 m de luz y con un radio de 195,5 m, apoyada en los elementos estructurales de su fachada cuya altura es constante.

La estructura de los tres edificios es de hormigón armado, con pilares de fachada prefabricados, separados 5 m. Para la estructura de las cubiertas se ha optado por una solución en madera laminada encolada. Las bóvedas de 40 m de luz están formadas por una serie de arcos con tirante

inferior, apoyados en los pilares de fachada por lo que su separación es de 5 m. Los tirantes inferiores evitan la transmisión de los empujes horizontales de los arcos a los pilares. Por otro lado, la succión del viento puede producir una inversión de las cargas. En estos casos, el tirante inferior se convierte en un elemento comprimido por lo que se le debe proporcionar la necesaria rigidez y resistencia.



Figura 5. Cubierta de la pista de baloncesto.

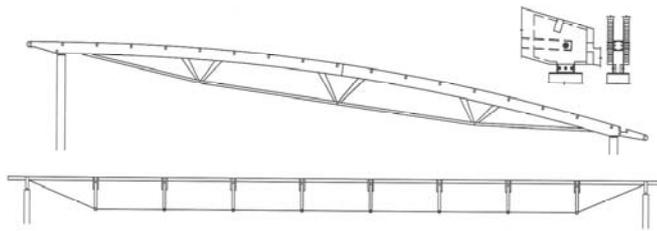


Figura 6. Arco de madera con tirante inferior, detalle de unión tirante-arco y estabilización de los tirantes fuera de su plano.

Cada uno de los arcos con tirante inferior está formado por dos elementos gemelos de madera laminada encolada de 850 mm de canto y 105 mm de ancho y un tirante poligonal con cuatro tramos (figura 6), fabricado de perfiles tubulares de acero con una sección cuadrada. Esta forma, con una separación máxima entre arco y tirante de 2500 mm en el centro del vano, se obtiene mediante la disposición de montantes rígidos entre arco y tirante. Estos montantes tienen una forma en V y están fabricados de perfiles cerrados de acero con una sección variable. Para estabilizar los arcos con tirante fuera de su plano para el caso de una inversión de las cargas, se unen los extremos inferiores de los montantes en V de todos los arcos mediante cables. Tanto el tirante en sus extremos como los montantes de acero se alojan entre los dos elementos de madera, separados 180 mm, de modo que los dispositivos auxiliares de las conexiones entre acero y madera quedan ocultos. Esta disposición, conjuntamente con la elección de uniones soldadas entre tirante y montantes, conduce a una solución estéticamente muy limpia.

5. Hemisferic, Valencia

La forma de la cubierta del planetario recuerda la de una almendra, con una longitud total de más de 100 m y un ancho máximo de su proyección en planta de 46 m (figura 7). La altura máxima sobre el nivel del terreno es de 25 m, aproximadamente. En su parte inferior, la cubierta dispone de unas cancelas que abarcan toda la longitud de las dos fachadas laterales, y a través de las cuales se vislumbra la cúpula del planetario en el interior del edificio. Con las cancelas abiertas, el conjunto formado por la cubierta, la cúpula y el mecanismo plegado de la cancela se percibe como un ojo sobredimensionado. En los dos extremos, la cubierta acaba en sendos trípodes que transmiten las cargas a la cimentación y, finalmente, al terreno.



Figura 7. Vista exterior del planetario de la Ciudad de las Artes y las Ciencias.

La principal dificultad en el momento de concebir y proyectar la estructura de la cubierta residía en la traducción de los requisitos arquitectónicos y funcionales en una solución racional y consistente. Era un imperativo arquitectónico dejar libres de elementos estructurales las franjas laterales de la cubierta, cerradas mediante las cancelas. Por este motivo, los elementos principales de la estructura debían transmitir las cargas en sentido longitudinal del edificio y no en sentido transversal, de menor luz.

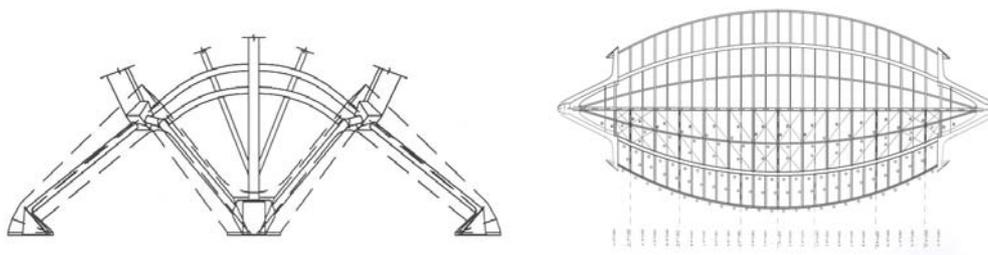


Figura 8. Estructura metálica de la cubierta del Hemisférico.

La estructura está constituida por 7 arcos longitudinales de acero, apoyados en los dos trípodes en ambos extremos de la cubierta (figura 8). El arco central está situado en un plano vertical, mientras que los arcos restantes, simétricos con respecto al primero, están contenidos en planos inclinados de acuerdo con la doble curvatura de la cubierta. En sentido transversal, la estructura está formada por costillas de acero, dispuestas en planos verticales cada 2,8 m y con una geometría curva en alzado. Las costillas transversales se encuentran con los dos arcos laterales que sirven de apoyo a las cancelas. Con la excepción de uno de los diferentes tipos de costillas, todos los elementos estructurales tienen una sección en cajón cuyas dimensiones dependen de su función estructural y, en ocasiones, de criterios arquitectónicos. Los trípodes están formados por elementos de acero y mixtos, acero – hormigón.

6. Jardín Botánico Juan Carlos I, Alcalá

La estructura existente de los antiguos hangares está constituida por 10 pórticos de hormigón armado, separados 15,5 m, con dos pilares de sección rectangular cada uno, un forjado y una lámina de hormigón formando la bóveda de la cubierta. A lo largo de todo el edificio, de 140 m de longitud, están dispuestas dos marquesinas laterales con un vuelo de 12 m, constituidas por unas láminas de hormigón con forma de parábola y sujetadas mediante tirantes de hormigón armado al núcleo central de los hangares (figura 9.a).

Aparte del imperativo de incorporar los hangares existentes en la solución, la facilidad de mantenimiento del edificio y la atenuación de los efectos de la radiación solar en un edificio completamente acristalado resultaron siendo los parámetros decisivos para la concepción de la solución estructural de la rehabilitación.

De acuerdo con el proyecto de rehabilitación, los hangares existentes forman la espina dorsal del nuevo edificio al añadirles dos envolventes, una interior y otra exterior. También se añade un sótano, desarrollándolo alrededor del hangar existente con el objetivo de no excavar bajo éste (figura 9.b).

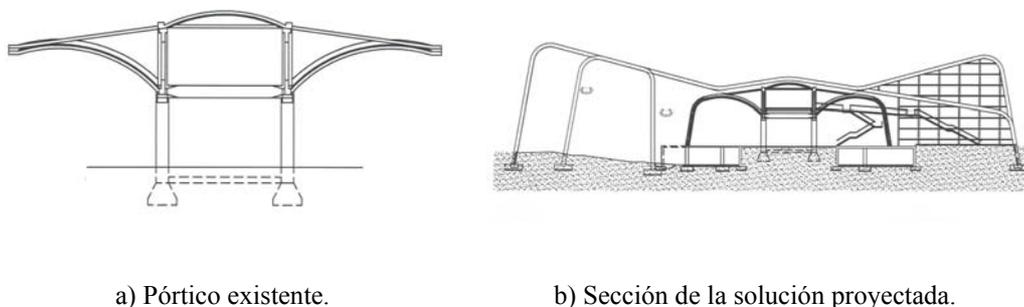


Figura 9. Transformación de los hangares del campus de la Universidad de Alcalá en Jardín Botánico Juan Carlos I.

La envolvente interior cierra las marquesinas abovedadas mediante sendas mamparas de vidrio, cuya resistencia y estabilidad se aseguran mediante rigidizadores, también fabricados de vidrio. La envolvente exterior de vidrio se apoya en una estructura formada por 19 pórticos de acero, separados 7,75 m, dispuestos perpendicularmente al eje de los hangares existentes en los que se apoyan. Se distinguen 11 diferentes tipos de pórticos, con geometrías sinusoidales, formando distintos módulos del jardín botánico con un ancho total de 100 m y con diferentes alturas de hasta 20 m sobre el nivel del terreno actual según los requisitos de la flora a implantar (figura 10). Los pórticos están formados por elementos tubulares de acero. La sección es oval con una dimensión mayor de 700 mm y con raíles incorporados que permiten la colocación y el deslizamiento de las plataformas de trabajo para limpiar y mantener la cubierta de cristal. En sentido transversal, los pórticos están unidos mediante vigas Vierendeel cuya función es múltiple. A modo de correas sirven de apoyo para los vidrios, permiten alojar los sistemas de protección contra la radiación solar y aseguran la estabilidad de los pórticos principales fuera de su plano.

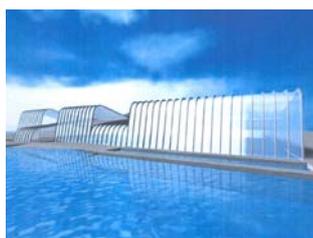
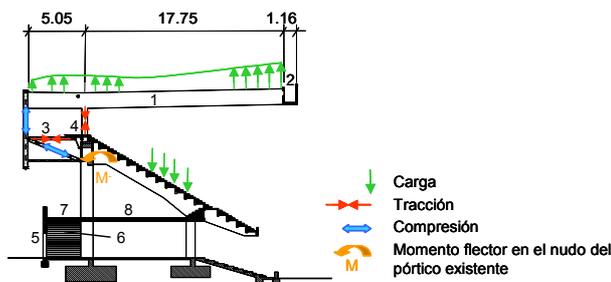


Figura 10. Representación de la intervención proyectada.

7. Estadio de Chapín, Jerez

La mejora y ampliación del estadio de Chapín se realizó con ocasión de los Campeonatos Mundiales de Juegos Ecuestres, Jerez 2002. El estadio existente data del año 1988, y sólo su tribuna principal disponía de una cubierta. La extensión del estadio requería la construcción de una nueva cubierta con una pasarela de mantenimiento integrada y de una nueva crujía en todo el perímetro del estadio. También se han reorganizado las vías de acceso para el público añadiendo nuevas escaleras, losas y pasarelas (figura 11.a). Asimismo, un centro deportivo y un hotel han sido integrados en el estadio.

La estructura de la nueva cubierta está constituida por vigas cajón de acero con una longitud total de 22,8 m y una sección transversal constante (1.400 mm · 300 mm) en la zona del voladizo (17,75 m) [3]. Cada una de estas vigas se apoya en un pilar metálico (biela de compresión) que introduce las reacciones directamente en el marco existente de hormigón armado, y en un elemento traccionado (tirante) conectado con la estructura de la nueva crujía, con forma de cercha, a su vez conectada con la estructura de hormigón. En el caso de succión del viento, se produce una inversión del flujo de las fuerzas, con tracción en el pilar de acero y compresión en el denominado “tirante” (figura 11.a). Los paneles de la cubierta están apoyados en las vigas principales, salvando una luz de 6 m. De esta manera se evita la disposición de una estructura secundaria, obteniendo una solución extraordinariamente limpia (figura 11.b). La estabilidad fuera del plano de los marcos metálicos se alcanza a través de su interacción con, respectivamente, la pasarela de mantenimiento y los perfiles transversales en los extremos superior e inferior de los tirantes.



a) Pórtico tipo con inversión de las fuerzas.



b) Vista interior.

Figura 11. Ampliación del estadio de Chapín.

En la concepción de la conexión entre la estructura nueva y la existente se buscaba una transmisión de las fuerzas por presión de contacto en las superficies de hormigón, aunque el requisito de mantener el estadio en servicio durante las obras no permitió una solución totalmente consistente con este principio.

Los pórticos existentes se han tenido que reforzar debido al muy considerable incremento de los esfuerzos, en comparación con su situación original, inducidos por la cubierta nueva. A estos efectos se han adherido chapas de acero en la cara exterior de los pilares existentes, y láminas de fibra de carbono en las vigas inclinadas.

8. Estación Delicias, Zaragoza

Los elementos principales de la estructura de acero, necesaria para cubrir la estación de una longitud total de 480 m y de un ancho de 110 m, están constituidos por 9 arcos con tirante inferior, separados 43,64 m y apoyados en sus extremos en la estructura de hormigón del edificio (figura 12). En concordancia con la forma romboidal de la estación en planta, el ángulo formado por los ejes de los arcos y los elementos de hormigón que delimitan el volumen del edificio en sentido longitudinal es de 45° , por lo que los arcos deben salvar una luz de 154,29 m. La separación entre cada par de los 4 montantes que conectan el tirante con el arco es de 30,858 m. Los puntos de intersección entre montantes y tirante de arcos adyacentes se conectan mediante vigas transversales. De esta manera, los tirantes de los arcos y estas vigas transversales forman en planta una serie de cuadrados de 30,858 m de lado. La estructura secundaria que soporta la cubrición se encaja en estos cuadrados dividiéndolos en dos triángulos cada uno, cubiertos respectivamente por una cubierta plana y una semi-pirámide cuyo plano vertical se cierra con cristal.

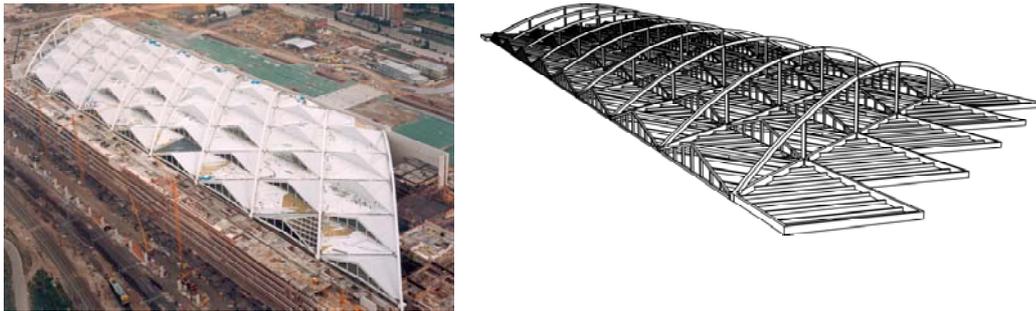


Figura 12. Vista aérea de la cubierta de la estación y representación esquemática de la estructura.

La concepción de la estructura de acero de la cubierta se ha basado en la idea que tanto la separación entre los elementos como su luz deberían ser relativamente grandes, unificando también su geometría [4]. El concepto estructural adoptado, con relativamente pocos elementos de perfiles cerrados, con uniones soldadas y sin arriostramientos conduce a una solución ordenada y estéticamente atractiva lo que resulta particularmente importante en el presente caso ya que la estructura es parcialmente visible a través del falso techo.

Los arcos tienen una relación flecha – luz de $1/11$ y están formados por un cajón de acero de 1200 mm de canto y 1000 mm de ancho. La sección transversal de los tirantes tiene las mismas dimensiones exteriores que la de los arcos. Con el fin de reducir la cuantía de acero estructural, los esfuerzos de tracción que solicitan el tirante están parcialmente resistidos por cables de pretensado alojados en el interior de su sección en cajón. Los montantes también están constituidos por cajones de acero con una sección cuadrada de 1000 mm de lado.

La estabilidad dentro y fuera del plano de los arcos se alcanza a través de la rigidez del propio arco, así como la disposición de montantes rígidos en lugar de tirantes flexibles para la introducción de las cargas verticales en los arcos desde el nivel de la cubierta. Estos montantes constituyen apoyos elásticos de los arcos fuera de su plano. La rigidez de estos apoyos se ve incrementada por la rigidez a torsión de la sección cerrada del tirante del arco y por las uniones rígidas entre el tirante y los elementos que se apoyan en él. De esta manera, no es necesario

estabilizar los arcos mediante un sistema adicional, por ejemplo con tirantes tal y como preveía el proyecto original de arquitectura.

9. Observaciones finales

Se han presentado algunas cubiertas cuya concepción estructural se tenía que ajustar a unas exigencias arquitectónicas y funcionales de gran dificultad. Por regla general, dificultades de este tipo se suelen percibir como inconvenientes. No obstante, a menudo se revelan como catalizador para un diseño estructural consistente o innovador.

Los ejemplos demuestran la importancia de la concepción estructural ya que la funcionalidad, la fiabilidad y la economía de una estructura dependen de las soluciones adoptadas en esta fase de un proyecto. El éxito de un diseño estructural depende fuertemente de una buena co-operación entre la propiedad, los arquitectos y los ingenieros estructurales durante las diferentes fases de un proyecto. Esta co-operación también es primordial durante la construcción, con el fin de realizar la estructura de acuerdo con el Proyecto. Efectivamente, la experiencia demuestra que los cambios introducidos durante la ejecución suelen responder más a las preferencias circunstanciales de alguno de los agentes que a necesidades reales.

10. Referencias

1. MATOUSEK, M. und SCHNEIDER, J. *Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken*. Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht n° 59, ETH Zürich, 1976.
2. FRAGUAS, R. *El telescopio de Herschel regresa al Retiro*. Diario El País, Madrid, 3 de junio de 2004.
3. TANNER, P. and BELLOD, J.L. *Chapin Stadium Extension, Jerez, Spain*. Structural Engineering International, Zürich, vol. 13, n° 3, 2003. ISSN 1016-8664. pp. 163-166.
4. TANNER P., BELLOD J.L. and CALVO J.M. *Roof structure for the new Zaragoza Delicias station. Concept and design*. In: Structures for High-Speed Railway Transportation, IABSE Report Vol. 87, 2003, ISBN 3-85748-109-9.