

El proyecto de la estructura del Estadio Olímpico de Madrid

La adaptación y ampliación de una estructura existente a unos usos y condicionantes diferentes y flexibles

The design of the Madrid Olympic Stadium

Adaptation and enlargement of an existing structure to different and flexible uses and conditions

Julio Martínez Calzón. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Miguel Gómez Navarro. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

MC-2, Estudio de Ingeniería, Madrid, España. mc2@mc2.es

Mike Schlaich. Dr. sc. tech,

Schlaich, Bergermann und Partner, Stuttgart, Alemania. m.schlaich@sbp.de

Resumen: El proyecto de la estructura del Estadio Olímpico de Madrid desarrolla la idea de ampliación prevista en su día, cuando la Gran Tribuna Central, "La Peineta", fue construida en 1993 de acuerdo con el Proyecto redactado por los arquitectos Antonio Cruz y Antonio Ortiz. El Estadio ahora proyectado se ha planteado con una serie de nuevas condiciones muy específicas e importantes, para adaptarse a los conceptos que hoy en día deben ser tenidos en cuenta para lograr que una realización de la magnitud de la presente pueda, en cualquier caso, ser prácticamente autosuficiente con respecto a su mantenimiento y explotación. Para ello, la solución prevista presenta una potente flexibilidad en relación a la adjudicación o no de la organización por parte de la ciudad de Madrid de las Olimpiadas del año 2016, de manera que, en el caso de que no fuera Madrid la ciudad elegida, el recinto deportivo se construirá con una disposición apropiada para poder constituir un moderno estadio de fútbol. En el caso de que Madrid alcanzara la concesión de sede Olímpica, la solución ejecutada para acoger la pruebas atléticas se transformaría, con posterioridad a la realización de los Juegos, en el citado estadio de fútbol de la manera prevista en el proyecto.

La solución estructural adoptada tanto para las zonas de nueva planta, como las relativas a la remodelación necesaria de la construcción actualmente en uso, sigue básicamente los conceptos y criterios generales adoptados para la realización de la Gran Tribuna existente, aunque se han sustituido las cimentaciones directas por profundas. Al diseño original se le ha añadido igualmente una cubierta textil tensada que se adopta onduladamente a la forma característica del edificio, convirtiéndose en el nuevo elemento definitorio del conjunto.

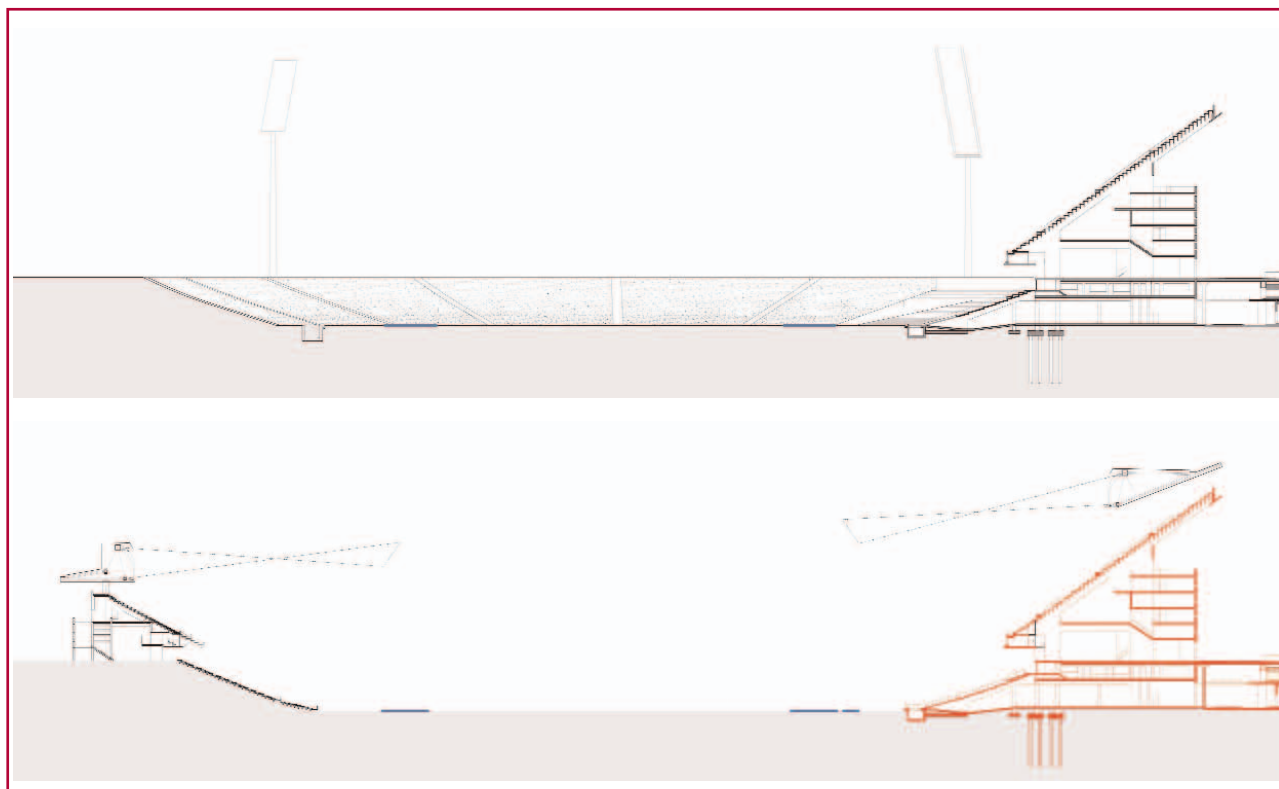
Palabras Clave: Estadio; Ampliación; Cubierta textil; Membrana tesa; Arquitectura

Abstract: The design of the Madrid Olympic Stadium is based on the enlargement of the original Main Central Stand, "La Peineta", built in 1993 in accordance with the designs of the architects Antonio Cruz and Antonio Ortiz. The newly designed Stadium has had to take into account a series of very specific and important new conditions to adapt the project to modern-day concepts and to ensure that any arena of this scale be practically self-sufficient in terms of maintenance and operation. For this reason the design solution allows a high degree of flexibility in accordance with the decision of the International Olympic Committee (IOC) regarding the host city for the 2016 Olympic Games. In the event that Madrid is not chosen, the stadium will be adapted for use as a modern football stadium. In the case that the city is successful, the stadium will be built to host field and track events and, at the end of the Games, then be transformed into the football stadium.

The structural solution adopted for the new areas as well as for the refurbishment of the old parts of the building, basically follows the same concepts and general criteria adopted for the design of the existing Main Stand, although the footings have been substituted by deep foundations. A tensile textile roof that follows the characteristic undulating shape of the building has been added to the original design and will become the new defining element of the Stadium.

Keywords: Stadium; Enlargement; Textile roof; Tensile membranes; Architecture

Fig. 1.
Secciones
transversales
del estadio con
la solución
actual y
ampliada
(solución
atletismo).



1. Introducción

El proyecto de la estructura resistente del Estadio Olímpico de Madrid desarrolla en su totalidad, para su incorporación como principal instalación deportiva para los Juegos Olímpicos Madrid 2016, la idea de ampliación prevista en su día, cuando la Gran Tribuna Central-conocida popularmente como “La Peineta”- fue construida en 1993 de acuerdo con el Proyecto de Arquitectura redactado por los arquitectos Antonio Cruz y Antonio Ortiz (1), ganadores del concurso convocado para la realización de la “Ciudad Deportiva de la Comunidad de Madrid”. La solución estructural del conjunto de la referida tribuna y de la totalidad de las instalaciones que se ubican debajo de la misma fue diseñada por el primero de los ingenieros firmantes de este artículo.

Este mismo equipo técnico de arquitectos e ingenieros -ampliado con la presencia de la mundialmente conocida oficina consultora alemana *Schlaich, Bergermann und Partner*, para el diseño específico de la cubierta anular de membrana tesa prevista- ha sido el encargado de proyectar la ampliación necesaria para poder dotar a la ciudad de Madrid de la necesaria instalación olímpica para las

pruebas de Atletismo, deporte fundamental y rey de los Juegos (Figura 1) (2).

El Estadio ahora proyectado se ha planteado, lógicamente, con una serie de nuevas condiciones muy específicas e importantes, para adaptarse a los conceptos que hoy en día deben ser inevitablemente tenidos en cuenta para lograr que una realización de la magnitud de la presente pueda, en cualquier caso, ser prácticamente autosuficiente con respecto a su mantenimiento y explotación. Para ello, la solución prevista presenta una potente flexibilidad en relación a la adjudicación o no de la organización por parte de la ciudad de Madrid de las Olimpiadas del año 2016, de manera que, en el caso de que no fuera Madrid la ciudad elegida, el recinto deportivo se construirá con una disposición apropiada para poder constituir un moderno estadio de fútbol, perfectamente adaptado para poder ser utilizado como sede de un equipo de Primera División; mientras que si Madrid alcanzara la concesión de sede Olímpica, la solución ejecutada para acoger la pruebas atléticas se transformaría asimismo de inmediato, con posterioridad a la realización de los Juegos, en el citado estadio de fútbol de la manera prevista en el presente proyecto (Figura 2).

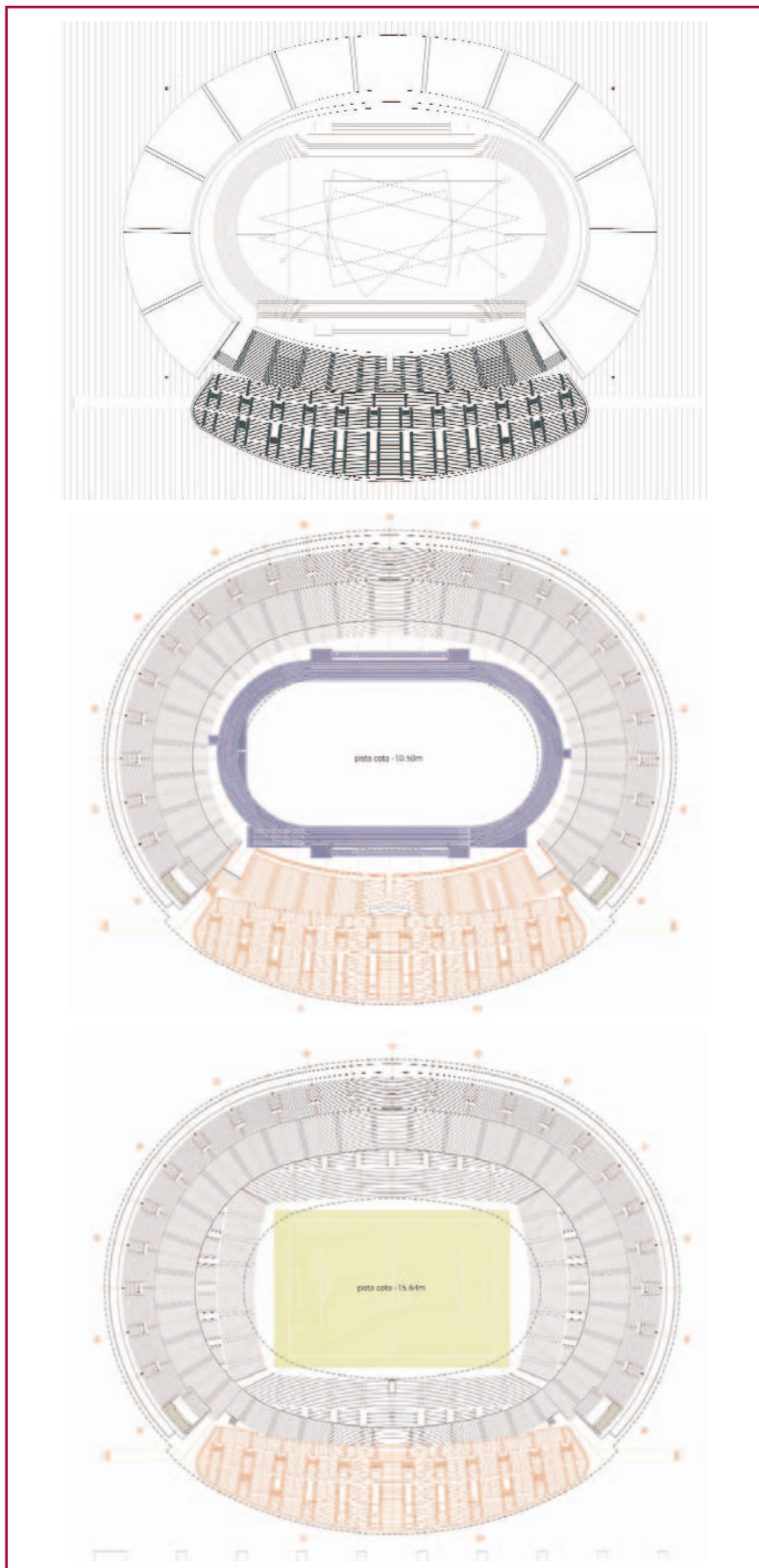


Fig. 2. Plantas generales del estadio con la solución actual y ampliadas (solución atletismo y solución fútbol).

La solución estructural adoptada, tanto para las zonas de nueva planta, como las relativas a la remodelación necesaria de la construcción actualmente en uso, sigue básicamente los conceptos y criterios generales adoptados para la realización de la Gran Tribuna existente, salvo en el hecho de utilizarse prácticamente en todos los casos soluciones de cimentación profunda, mediante pilotaje, con el fin de garantizar plenamente el perfecto funcionamiento de la totalidad de las instalaciones. Se aprovecha además esta gran actuación para eliminar no solo las zonas en las que actualmente existe cimentación directa, y que resultan afectadas por los necesarios cambios y dotaciones a introducir, sino la práctica totalidad de aquellas otras zonas en las que actualmente se ha mantenido la cimentación superficial.

De esta manera, el proyecto determinará una solución arquitectónica, funcional y estructural de la máxima cualidad, capaz de asumir totalmente la línea de actuación más oportuna en relación a las decisiones de Comité Olímpico Internacional en un caso; o la correcta implantación y gestión del gran complejo deportivo para el fútbol que se constituirá en el otro.

2. Estructura original

En su configuración original el Estadio de Atletismo de la Comunidad de Madrid posee una imponente estructura en hormigón armado que, prácticamente, configura la arquitectura del conjunto del edificio (Figura 3). Su tratamiento global se realizó con las premisas de lograr un hormigón de calidad, próximo a un tratamiento visto, aunque por las grandes dimensiones de las piezas, las difíciles condiciones de sus intersecciones, y el reducido coste del presupuesto, esto solo fue parcialmente posible (3, 4).

El edificio se planteó como un complejo sistema de galerías, comunicaciones y espacios de uso múltiple (público y privado: squash; pistas de calentamiento; etc.) ubicados bajo el graderío de la tribuna principal que tiene capacidad para veinte mil espectadores. En la redacción del proyecto se preparó la tribuna para incorporar en el futuro una cobertura de tipo marquesina para la práctica totalidad de las localidades.

Este gran complejo presenta, aparte de los elementos tradicionales de este tipo de estructuras (grandes pórticos de tipo radial, losas de hormigón de 15 x 14 m, grandes losas en voladizos externos, altas galerías de



Fig. 3. Vista general frontal y detalles dorsales de la Gran Tribuna del estadio existente.

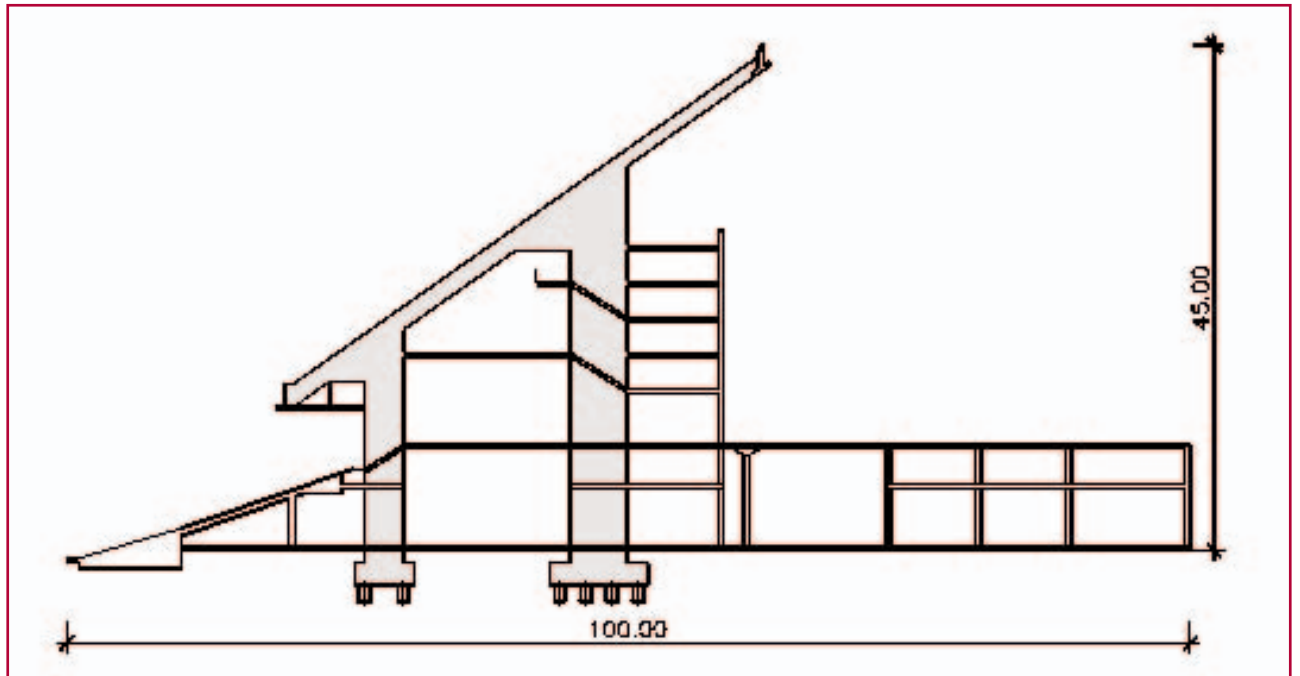


Fig. 4. Sección tipo del graderío existente.

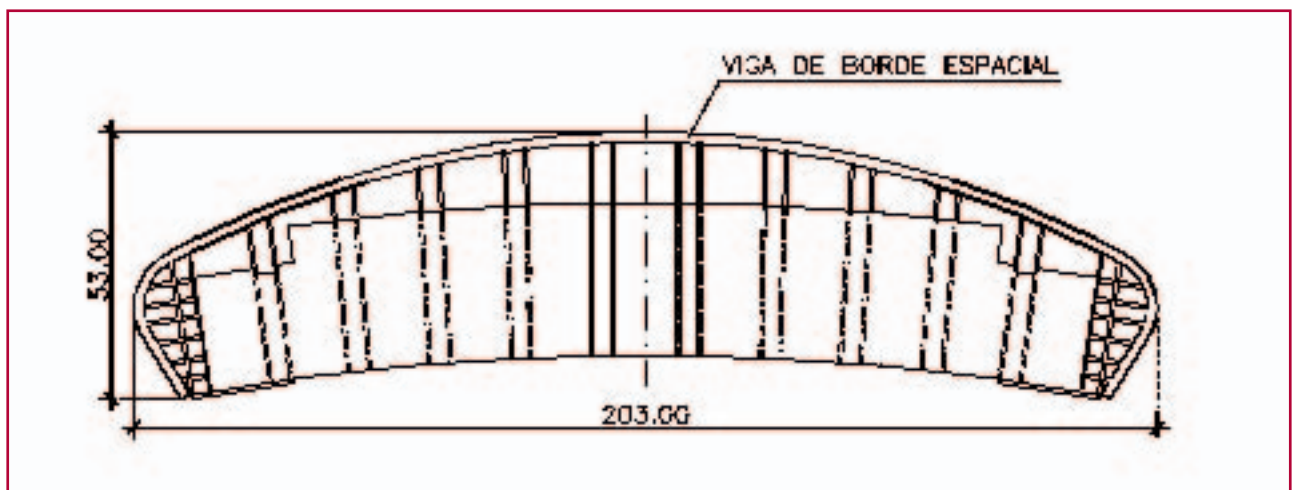


Fig. 5. Planta del graderío superior incluyendo la viga de borde espacial curva.

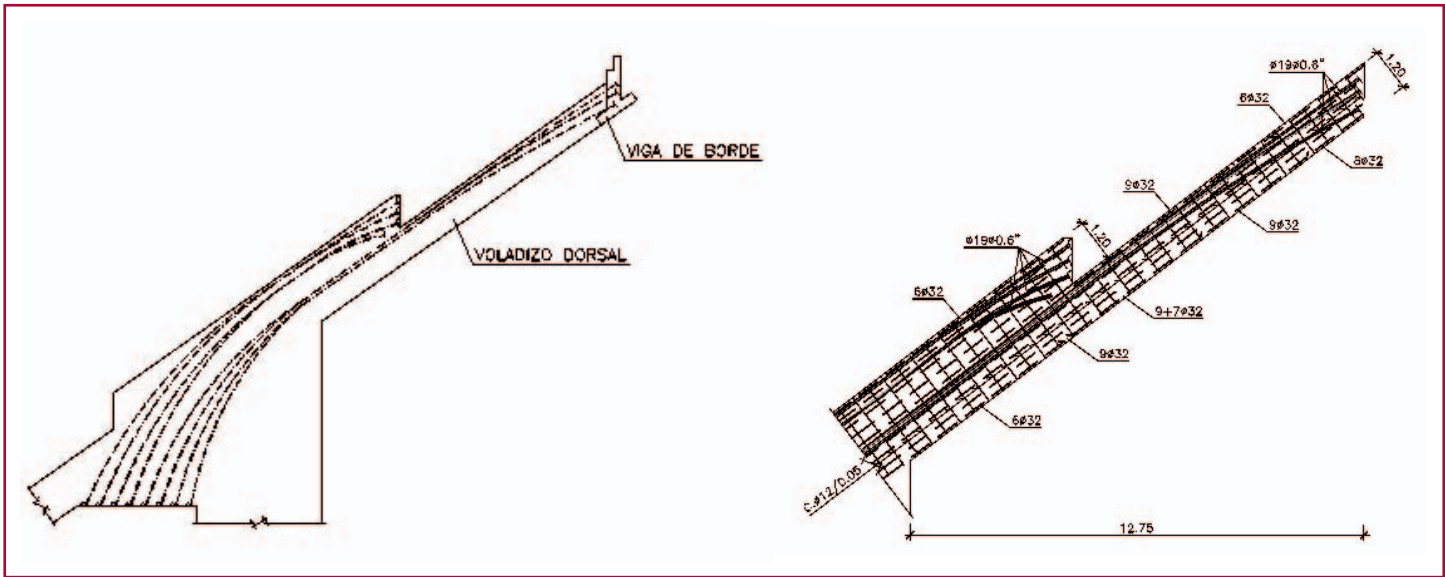


Fig. 6. Geometría y distribución de armaduras activas y pasivas en las vigas en voladizo de los pórticos.

columnas, etc.) (Figura 4), una serie de elementos estructurales especiales, entre los que destacan las grandes vigas en voladizo, de hormigón pretensado que, empotrándose en los pórticos principales, sobresalen dorsalmente del cuerpo-fachada del edificio, generando la imagen principal del conjunto, especialmente al estar rematadas en su extremo por una enorme viga curva espacial que une a todas las piezas y cierra el gran abanico que forma el graderío volado (Figura 5).

Estas piezas ofrecen una complejidad específica, al presentar una doble asimetría en los planos longitudinal y transversal, motivada por la integración de estas piezas estructurales en el esquema funcional y estético del edificio.

Así, en sentido longitudinal (Figura 6) la viga presenta una fuerte discontinuidad, motivada por su encaje en la disposición del graderío, acogiendo en la zona de mayor canto los vomitorios de acceso superior, pero obligada después a reducir su canto para integrarse en el graderío dorsal.

Transversalmente, su sección es disimétrica (Figura 7) también con una justificación funcional; en la zona de máximo canto presenta una superposición de dos rectángulos, de espesor muy estricto y diferente, con el fin de lograr un escalón de apoyo al graderío situado en uno de los lados, mientras que en el opuesto, en el que se sitúan los vomitorios, su cara es plana, recogiendo únicamente en una parte piezas de tipo parasol, para dar continuidad y cierre visual al conjunto.

Estas discontinuidades y disimetrías se tratan de reducir al mínimo empleando un tesado que tiende a

dar una gran continuidad tensional a las zonas, minimizando las componentes de rasante y verticales entre zonas que el sistema geométrico tiende a provocar.

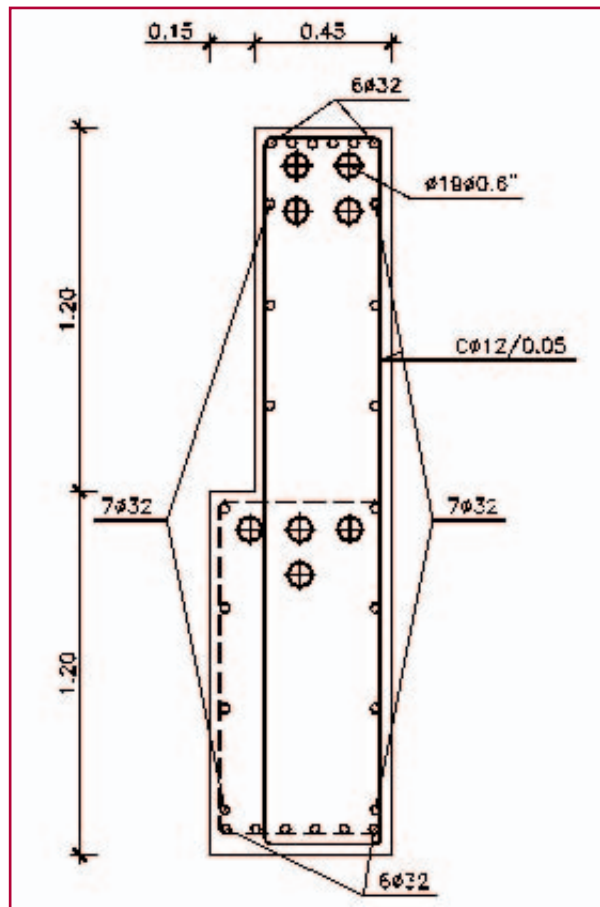


Fig.7. Sección tipo de las vigas en voladizo, incluyendo las armaduras principales y los cables de pretensado.

Fig. 8. Ejecución cimbrada de la Gran Tribuna.



La ejecución de estas piezas, tras haberse planteado procesos constructivos prefabricados, fue llevada a cabo, por decisión final del constructor, mediante un sistema convencional con una gran cimbra que, debido a su altura y la importancia de las cargas de peso propio de elementos, interactuó de forma importante a causa de sus deformaciones, con la propia estructura, por lo cual los esquemas y secuencias de ejecución de los elementos, su tesado y puesta en carga, así como su definitiva vinculación con la gran viga dorsal de cierre en hormigón amado, realizada con la misma cimbra, hubieron de ser cuidadosamente considerados y analizados (Figura 8). Los tesados se efectuaron exclusivamente desde el borde inferior, para evitar dificultades de armado e interacción con la pieza de cierre y su ejecución en fases.

Fig. 9. Ferrallado y colocación de cables en las vigas principales.



A pesar de efectuarse un cuidadoso replanteo, tanto teórico como real, de las armaduras activas y pasivas que se realizaba exteriormente para luego incorporarse de una vez al encofrado, se consideró necesario, aprovechando que debió de cambiarse, por razones de seguridad funcional, el ángulo de inclinación del graderío, incrementar la anchura de las secciones a partir de la zona de remate del fuste del pórtico, una vez cumplida la continuidad total de las caras de este elemento; además de ello, se dejaron cámulas de inyección de morteros de alta resistencia en los lugares más complicados de cruces de armaduras y vainas, conos de anclajes, etc. para su inyección posterior, que en algunos puntos aislados fue requerida (Figura 9).

Todos estos cambios requirieron, lógicamente, un nuevo análisis de los elementos para adaptarlos a estas nuevas condiciones. La enseñanza de todo ello, que no por menos conocida no deba ser nuevamente reseñada, puede consistir en que las peticiones arquitectónicas –aunque se debe estar bien dispuesto para plantear y resolver aquéllos puntos complejos que los edificios presentan– han de ser claramente limitadas a términos y condiciones apropiadas, porque de otra forma la obra, la realidad, no acepta las soluciones ideales teóricas y como resultado de ello exige cambios a veces importantes, duplicación de cálculos y trabajos, discusiones de costes, etc. La primigenia y obscura sentencia de Anaximandro tiene aquí una explicación clara: “De donde las cosas tienen su origen, hacia allá tienen que perecer también, según la necesidad, pues tienen que pagar pena y ser juzgadas por su injusticia, de acuerdo con el orden del tiempo”.

3. Planteamiento general del esquema estructural de la ampliación

El conjunto de la estructura del Estadio en su configuración tras la ampliación proyectada se divide en dos zonas perfectamente diferenciadas (Figura 10):

- Gran Tribuna principal; que se corresponde totalmente con la parte del edificio actualmente construida y que, a efectos de su definición y descripciones generales necesarias, se denominará de aquí en adelante Tribuna
- Graderío, que se corresponde con la totalidad de las instalaciones del resto del anillo que circunvalará las pistas de atletismo o el terreno del fútbol, completando el recinto deportivo. El tratamiento estructural de ambas zonas difiere, asimismo, sensiblemente.

En efecto, la zona de Tribuna debe experimentar una ampliación, y una serie de modificaciones o rehabilitaciones, tendentes a adaptar el sistema, tanto funcional como resistentemente, al nuevo uso doble posible Atletismo-Fútbol, por un lado; y por otro, a incorporar en ciertas zonas colaterales adyacente dos nuevas instalaciones:

- Un pabellón deportivo polivalente, insertado en la zona del lado izquierdo del recinto situado al exterior de la Tribuna, cuya cubierta se dispone en continuidad con la planta general de comunicaciones y accesos que forma la gran plaza frontal situada a la cota +0,00, y para la cual se integran algunos lucernarios nuevos.
- Un nuevo acceso Sur para el conjunto de las instalaciones albergadas bajo la tribuna y la plaza frontal; necesario para potenciar la nueva distribución de usos y actividades actuales y futuras, y que se integrarán, con las modificaciones oportunas, en el edificio existente cuyo uso se ha destinado hasta la fecha a la práctica del squash.

Ambos sistemas estructurales se detallan pormenorizadamente más adelante, pero es apropiado señalar aquí, que sus esquemas estructurales se asemejan totalmente al resto de las instalaciones contenidas bajo la Tribuna principal, integrándose en la misma con una presencia global homogénea y unitaria.

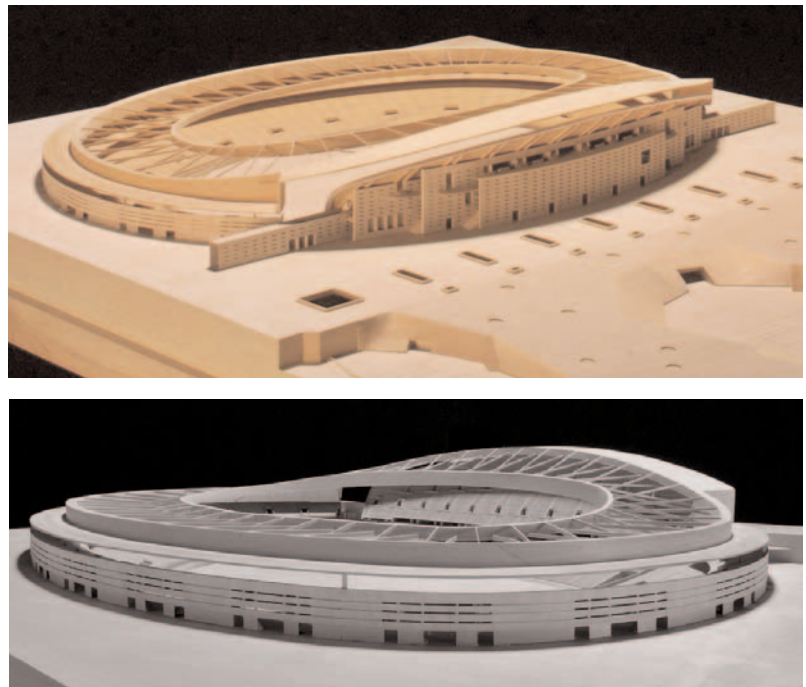


Fig. 10. Vistas generales de la maqueta del nuevo estadio.

La incorporación del nuevo Pabellón polivalente citado, permite, precisamente, la eliminación de una parte importante de la estructura del muro de contención perimetral, en una zona en la que –debido a la presencia de una zona de vaguada antigua, situada bajo los rellenos actuales, se producía una fuerte línea de escorrentía de las aguas recogidas por todo el conjunto de la superficie ocupada por la pista y las zonas exteriores a la misma confinadas por los muros de contención citados– se habían producido apreciables asentamientos del terreno y deformación de los sistemas. La disposición de esta nueva instalación deportiva, a realizar considerando cimentación profunda, determinará la total eliminación de esta problemática zona.

En contraposición a lo anteriormente expuesto, el gran anillo del Graderío de nueva construcción, presenta una disposición propia, totalmente ajustada a los actuales requerimientos que se exigen a las instalaciones deportivas de este tipo: gradas totalmente cubiertas, una importante proporción de zonas de palcos, áreas de acceso y expansión importante, etc., de tal manera que en el futuro, una vez terminadas las posibles actividades olímpicas, puedan colaborar en el establecimiento de procesos de gestión autofinanciada y mantener en correcto uso la totalidad de las instalaciones que incluyen.

La tipología estructural de esta nueva zona anular, que junto con la Tribuna cierra el perímetro de la superfi-

cie deportiva central, es básicamente semejante a la empleada en la parte construida existente, dando lugar a una total homogeneidad y armonía del conjunto. Esta armonía y unidad, no solamente se manifiestan desde el interior del recinto, sino que lo hacen también en la parte externa, en la que se reitera la singular continuidad visual y de imagen de la actual "Peineta", potenciándose de esta manera la presencia global y la belleza y fuerza del conjunto.

El Graderío perimetral se subdivide a su vez en dos partes bien diferenciadas:

- Zona superior o Graderío Alto
- Zona inferior o Graderío Bajo

situándose entre ambas, y ubicado en la línea frontal inferior del Graderío Alto, y colgado del mismo, un anillo completo de palcos conectados por un pasillo continuo dorsal, dotado de áreas de expansión dispuestas intermitentemente a lo largo de dicho anillo.

El conjunto de los dos tipos de estructuras citados, Tribuna y Graderío, se cubrirá con una Gran Cubierta del tipo de membrana tesa que se extenderá por encima de la totalidad de los graderíos citados, sin solución de continuidad, situándose a una cota prácticamente uniforme en la zona del Graderío, y pasando a elevarse suavemente al acercarse por ambos lados a la zona de la Tribuna, de manera de alcanzar la altura necesaria para cubrir también totalmente dicha zona, y permitir la correcta visión del área de competiciones a los espectadores de la misma. Esta suave ondulación permitirá obtener un potente efecto de carácter dinámico y espacial, tanto desde el exterior, en las vistas aéreas, como especialmente desde el interior, constituyendo una novedosa y original disposición dentro de la tipología de los sistemas de membrana.

El apoyo de esta gran cubierta continua se realiza sobre los sistemas estructurales del Graderío y de la Tribuna, mediante potentes soportes de hormigón de sección pseudo-elíptica, dispuestos en la línea dorsal de las parejas de pórticos radiales que constituyen el sistema portante fundamental, y en el punto medio de ambos pórticos, a través de potentes cargaderos de luz de vano muy reducida. Dichos soportes, en número de 17 se sitúan separados cada 45m. aproximadamente: 15 en la zona del nuevo Graderío, y 2 en la Tribuna existente; en la cual y como ya se ha dicho, en su fase de ejecución anterior, ya se había contado con las acciones adecuadas sobre las dos parejas de pórticos afectados,

de manera de hacer frente en el futuro (presente actual) a la incorporación de una gran cubierta de la zona de la Peineta.

Todo el conjunto estructural así descrito presenta una gran homogeneidad, tanto de materiales como de formas y disposiciones de sus elementos resistentes, y también funcional y de imagen. Esta homogeneidad estructural quedará perfectamente completada con la potente continuidad traslúcida ofrecida por la cubierta a lo largo de todo el desarrollo perimetral de las gradas, permitiendo dotar al conjunto de una presencia singular y unitaria que otorgará al Estadio una gran dignidad e imagen.

4. Descripción de las estructuras resistentes del estadio ampliado

Los aspectos fundamentales que han presidido el diseño estructural de los sistemas resistentes del Estadio ampliado no sólo se refieren a la adecuada capacidad portante que sus elementos han de poseer sino, y de manera muy expresa y determinante, a las condiciones constructivas que han de tenerse en consideración en orden a conseguir que la imagen y presencia final de todas las piezas estructurales ofrezcan una calidad y estética elevadas, para lograr una instalación de la máxima categoría. Para ello, se definieron y siguieron los conceptos básicos que se describen a continuación:

- ausencia de juntas
- monolitismo
- cimentaciones profundas
- reducción del número de pórticos
- empleo prioritario de hormigón en soportes y losas
- mantenimiento de las tipologías desarrolladas en el proyecto original

En primer lugar, todo el conjunto de la estructura anular de nueva planta, que conforma la zona denominada Graderío, se llevará a cabo sin juntas de dilatación, incorporando a la estructura la incidencia de los esfuerzos de carácter reológico y térmico que esta disposición produce, teniendo en cuenta con gran precisión el proceso constructivo y las características de las piezas y uniones que el sistema presenta.

Igualmente, todos los elementos principales de carácter radial, que en términos generales se denominarán Pórticos, se ejecutarán de forma "monolítica"; es

decir, sin interrumpir su realización vertical, mediante encofrados continuos, para ejecutar las uniones de intersección con elementos horizontales: vigas, losas, escaleras, etc. Consiguientemente, todas las uniones estructurales de estos tipos de piezas que hayan de apoyarse sobre los referidos pórticos radiales, deberán llevarse a cabo mediante procedimientos específicos de diseño de carácter industrial, chapas ancladas, incorporadas en el interior de los encofrados, dispositivos de anclaje de barras por perforación y relleno de resinas o alveolos dejados en el sistema radial para cruce de armaduras y relleno de hormigón;

A excepción de las soleras correspondientes a pistas deportivas o zonas destinadas a un uso específico con requerimientos especiales, dichos elementos estructurales de solera se llevarán a cabo mediante apoyo directo sobre el terreno (con la disposición intermedia de encachados y/o aislamientos apropiados de protección); es decir, sin utilizar pilotes. Dichas soleras, sin embargo se armarán suficientemente para garantizar, una cierta capacidad resistente y de reparto, para el caso de que en zonas parciales, localizadas bajo las mismas, puedan producirse asientos locales del terreno existente. Por el contrario, todo el resto de los sistemas estructurales, incluidos los pórticos y túneles de conexión de los graderíos bajos, se sustentarán mediante cimentaciones profundas (pilotes de diversos diámetros en función de las características de los diferentes elementos y cargas a transmitir) cuya disposición, longitud, y condiciones constructivas se han determinado en base al Estudio Geotécnico específico llevado a cabo en el propio terreno y con las indicaciones señaladas en el mismo para cada zona, en función de los importantes espesores del estrato superficial de terrenos rellenados, que la explotación de sepiolita en el área ocupada por el Estadio produjo.

Tanto por consideraciones estructurales, como también por aspectos funcionales de circulación y accesos, la disposición elegida finalmente para los sistemas radiales aporticados que transfieren prácticamente la totalidad de las cargas del recinto a la cimentación, consistió en aumentar al máximo posible la distancia entre las parejas de pórticos gemelos que constituyen la base estructural y formal del sistema portante, reduciendo al mínimo el número de dichos pórticos y potenciando de la mejor forma posible la optimización de las cimentaciones profundas. Asimismo, el número de uniones entre pórticos radiales y piezas circunferenciales queda así también reducido a un mínimo, mejorando el proceso de continuidad constructiva indicado más arriba.

La totalidad de los elementos empleados para la realización del soporte de los graderíos se ha dimensionado en hormigón armado y con carácter macizo (secciones básicamente rectangulares), con el fin de unificar las nuevas zonas de estructura con las anteriormente ya construidas. Únicamente a partir de la cota de apoyo del sistema de la cubierta sobre los soportes previstos para sustentación de la misma, hacen su presencia los sistemas metálicos y de membrana; creándose de esta manera una total separación tipológica y visual del conjunto, entre las dos grandes unidades constructivas señaladas, Graderíos y Cubierta. Se exceptúan de esta disposición genérica de gran alcance, los pequeños elementos de tipo tirante que sustentan el pasillo de palcos con las grandes vigas cargadero entre pórticos; de manera semejante a como en su día se procedió a resolver en la Peineta el mismo sistema generado para palcos y cabinas de prensa, TV y otros medios de comunicación.

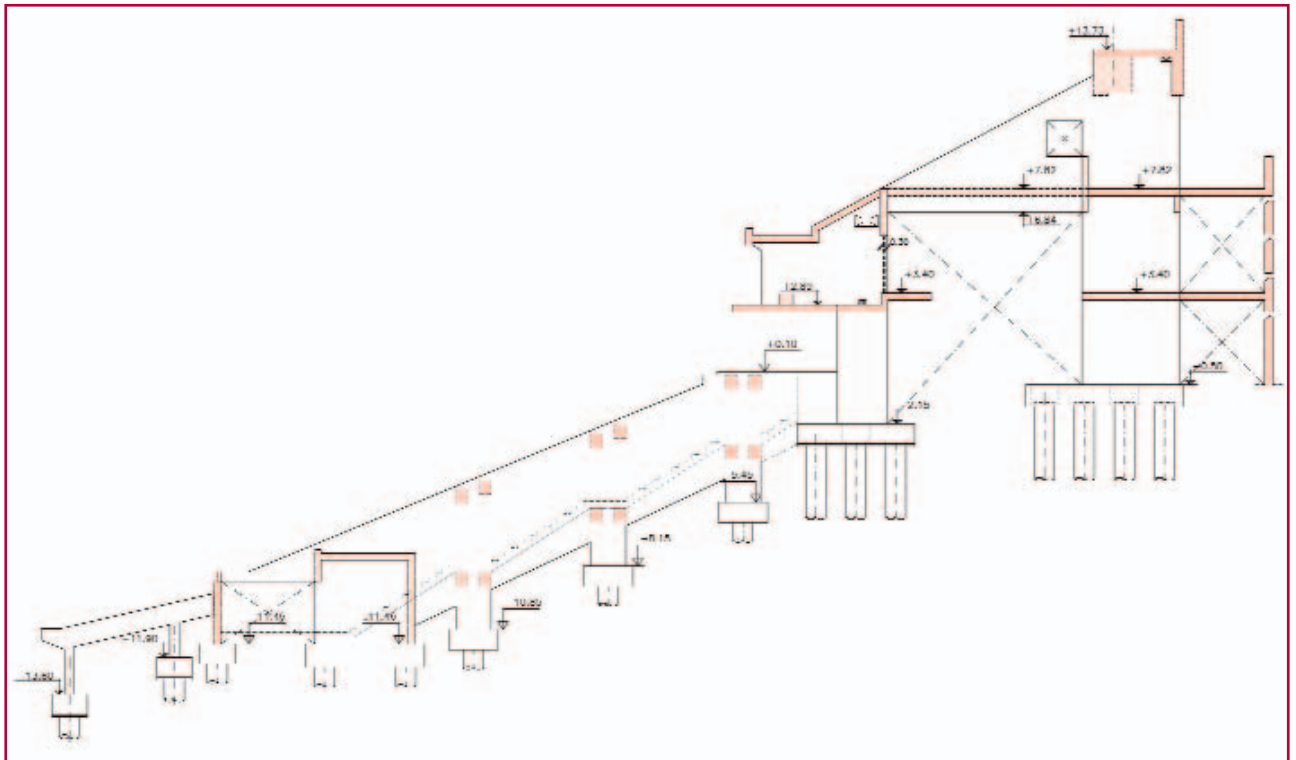
Todas las necesarias modificaciones requeridas para la zona de la Gran Tribuna se han efectuado, asimismo, mediante empleo de sistemas de hormigón armado, adecuadamente conectados a los elementos portantes principales existentes inalterados, mediante los mismos sistemas industriales o específicos adoptados en los nuevos Graderíos.

La práctica totalidad de los tramos inclinados de las escaleras se ha previsto realizarlos a partir de piezas prefabricadas que incluyen los escalones y que se unen, de forma expresamente diseñada, a los tramos horizontales de losas de planta y/o descansillos intermedios llevados a cabo in situ.

La recepción de los grandes aparatos de apoyo (pots) de la Cubierta se ha efectuado mediante ensanchamiento de los fustes de hormigón, a modo de capiteles, que quedarán no obstante invisibles, integrados en el interior del espacio cerrado por la superficie inferior de la referida Cubierta. La interacción estructural entre el sistema de pórticos y la estructura espacial global de la Cubierta se ha efectuado mediante oportunos coeficientes de muelle deducidos del análisis de los subsistemas de hormigón (parejas de pórticos y losas), para ser integrados en el análisis general de la Cubierta citada.

Gran parte de los detalles estructurales de carácter arquitectónico: huecos en los muros exteriores del Estadio, escaleras, remates de piezas, etc.; así como los anchos, espesores, proporciones y disposiciones de elementos principales, se han igualado u homogeneizado

Fig. 11. Pórtico tipo en la zona correspondiente al nuevo graderío.



con los correspondientes al Proyecto de la parte ya construida de la Gran Tribuna; por su eficacia probada y para lograr una total imagen de obra única al final de la realización del conjunto, y alcanzar con ello una rotundidad formal y expresiva de este gran recinto. Entre ellos, la disposición y características de los diferentes tipos de piezas de gradas prefabricadas, empleadas en las diversas zonas del Graderío y la Tribuna (en su parte nueva) repiten las formas y dimensiones básicas empleadas en la Tribuna ya existente; adoptándose no obstante pequeñas variaciones en los extremos y apoyos, así como de sus dimensiones secundarias, en orden a adaptarse a las nuevas condiciones y requerimientos de seguridad, durabilidad, etc. establecidas en la actual normativa vigente.

A continuación se exponen de forma precisa los principales aspectos estructurales que se han tenido en cuenta en el dimensionamiento de los diversos elementos que se presentan en la estructura general del Estadio.

4.1. Pórticos radiales

Los elementos denominados pórticos de orientación radial se disponen, en la mayor parte de los casos, agrupados en parejas de pórticos, separados una distancia

de 4,20 m entre ejes. La función resistente de estos elementos responde por una parte a la obligada recepción de las cargas de los elementos de gradas y, en las zonas altas del estadio, al apoyo de las losas de las plantas de acceso a las propias gradas, palcos, zonas de servicios, galerías circunferenciales, etc. La configuración en pórticos dobles establece, en el interespacio creado entre ambos, las líneas principales de posicionamiento de los vomitorios de acceso a las gradas, y de las escaleras y rampas de acceso a los propios vomitorios y la comunicación entre las diversas plantas del estadio. Son por tanto los elementos directores que articulan la configuración radial del estadio, en total coherencia con la disposición de los pórticos existentes en el edificio actual. El espesor de los pórticos es en todos los casos de 60 cm. Por tanto, el interespacio libre entre pórticos dobles es de 3,60 cm.

Según las distintas zonas del estadio y el orden de las actuaciones previstas, los pórticos tienen configuraciones y características diversas (Figura 11).

4.2. Muros

El edificio incluye una importante serie de muros de carácter puramente arquitectónico en algunos casos y en otros dotados de una función estructural

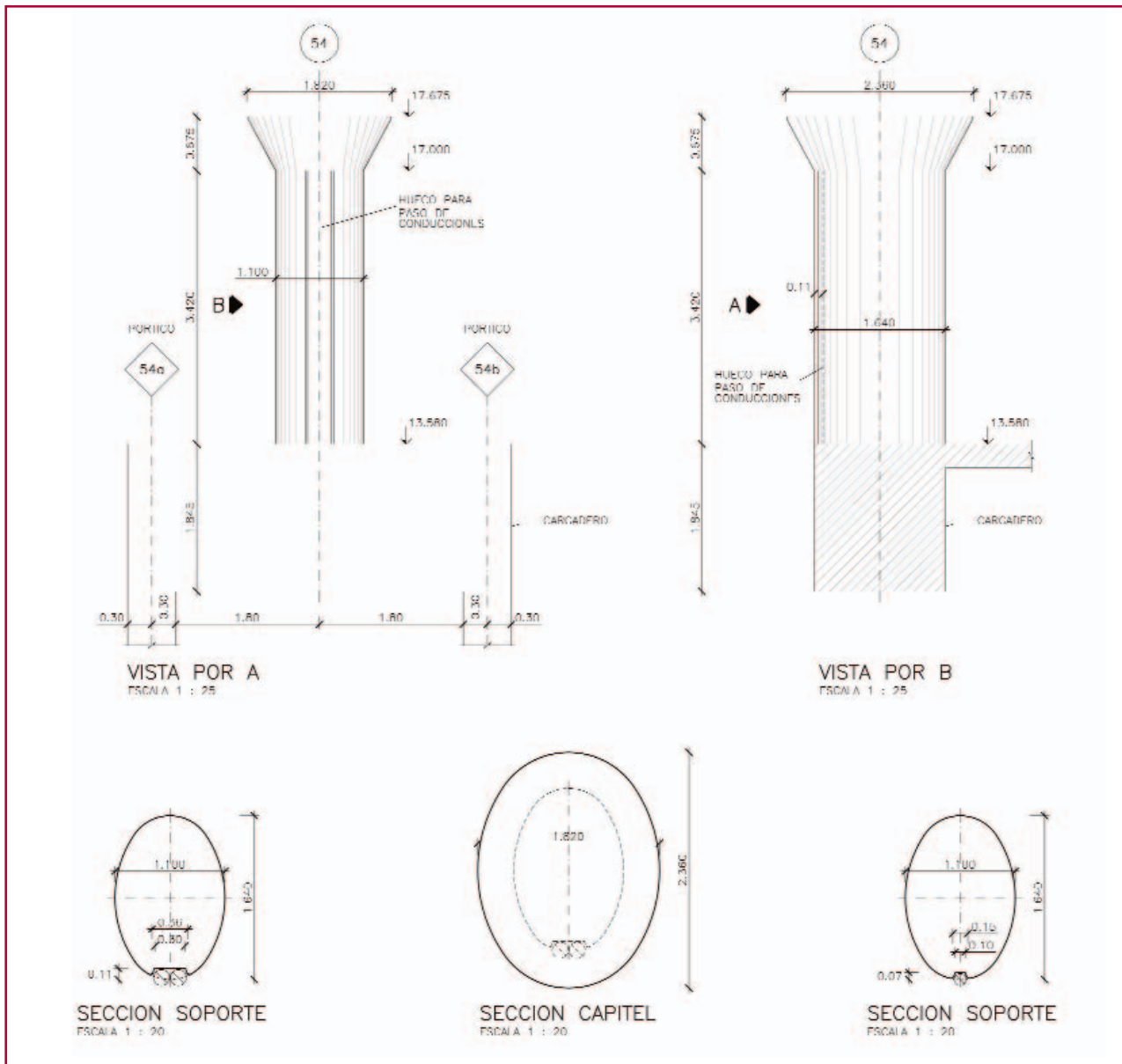


Fig. 12. Alzado y secciones del soporte tipo en la zona correspondiente al nuevo graderío.

(apoyo de losas, vigas y muros, empuje de tierras, etc.). En cualquier caso, siguiendo el planteamiento citado anteriormente de estructura integral concebida sin juntas, en todos los muros se establecen uniones de tipo rígido o semirrígido con los elementos estructurales con los que interactúan (pórticos, muros, losas, soleras, encepados, etc.).

Todos los muros de tipo estructural tienen un espesor de 30 cm, excepto el muro perimetral del nuevo Graderío cuyo espesor es de 35 cm. Dicho muro perimetral incluye una gran cantidad de huecos sistemáticamente dispuestos siguiendo el patrón definido en los muros dorsales de la Tribuna existente. Los muros

cuya función no es explícitamente portante tienen un espesor de 25cm.

En el edificio polideportivo los muros perimetrales existentes requieren en algunos casos ligeras modificaciones en el alzado de los mismos (zonas de apoyo de nuevas vigas, nuevos huecos, etc.), y en sus cimentaciones, motivado por la presencia de las nuevas cargas.

4.3. Soportes

Los apoyos de la cubierta sobre los pórticos dobles del nuevo Graderío se materializan mediante un con-

junto de soportes de hormigón armado en todos los casos, que son de sección pseudo-ovoidal (formada por cuatro arcos de círculo) constante a lo largo del fuste siendo sus medidas principales 1,64 m x 1,10 m. En la zona superior de contacto con la chapa de recepción del apoyo de la cubierta la sección se amplía a modo de capitel creando una plataforma en la cota superior de planta también pseudo-ovoidal de dimensiones 2,36 m x 1,82 m (Figura 12).

La cubierta se apoya sobre la estructura de la Tribuna existente en dos puntos situados sobre dos parejas de pórticos. Durante la realización del proyecto de la estructura existente se tuvo en cuenta la posibilidad de disponer en estos pórticos los apoyos de una hipotética cubierta actuando con unas cargas similares a la de la cubierta definida en el presente proyecto. Para transferir la reacción de la cubierta desde su punto de apoyo a los pórticos dobles se han dispuesto dos puntales biarticulados, eliminando así las acciones sobre los pórticos en el plano horizontal.

4.4. Estructura especial de zona de palcos del nuevo Graderío

Las grandes luces de las losas en la dirección circunferencial consecuencia de la gran distancia entre los pórticos dobles del Graderío Alto, y de la compleja geometría impuesta por las condiciones arquitectónicas en las zonas frontales destinadas a los palcos, requieren una solución estructural conjunta que incluye los siguientes elementos:

- Losas de planta de palcos en dos niveles apoyada sobre un nervio peraltado en la zona frontal y en tres tirantes (TI) que cuelgan de una viga de gran canto (VC) en la zona dorsal.
- Sistema formado por la losa de techo de palcos con parte horizontal y parte inclinada (LS).
- Viga de gran canto (VC) en el borde dorsal de la losa inclinada (LS) del techo de palcos.
- Grupo de tirantes (TI) sobre los que apoya la losa dorsal de la planta de palcos, colgándose estos últimos de la viga de gran canto (VC).

5. Descripción de la infraestructura

Como ha quedado dicho, la práctica totalidad de los sistemas utilizados en la superestructura del Es-

tadio se han cimentado mediante una solución profunda consistente en el empleo de pilotes perforados de hormigón, aislados o en grupo y conectados mediante apropiados encepados de tipo rígido que reciben directamente sobre los mismos las piezas de la superestructura portante.

En los casos concernientes a la Gran Tribuna, en cuyo recinto ya construido se han debido incorporar nuevas estructuras para hacer frente a las nuevas instalaciones requeridas, cuando se ha comprobado que las cimentaciones de pilotes existentes no pueden soportar las nuevas cargas producidas por las estructuras adicionales a las originales, se han dispuesto soluciones de micropilotes vinculados al encepado existente y situados de forma tal que su perforación y ejecución sean compatibles con la disposición de los pilotes actuales.

La longitud de dichos micropilotes se establece de manera que su bulbo de transferencia se sitúe por debajo de los bulbos de presión de los pilotes existentes y controlando que la longitud de los micropilotes sea menor que la crítica de pandeo para las cargas previstas. Caso de que tal longitud fuera superior a la citada, en tal caso los micropilotes se disponen ligeramente inclinados, de forma que las perforaciones de los mismos atraviesen a alguno de los pilotes actuales y reduzcan de esa manera las luces de pandeo de dichos micropilotes.

6. Descripción de la cubierta textil tensada

6.1. Introducción

La cubierta del Estadio Olímpico de Madrid, servirá para proteger a los espectadores del futuro estadio en sus dos modalidades, tanto como estadio olímpico como estadio de fútbol. La cubierta es una "estructura en anillo de cables" que está compuesta por un anillo de compresión exterior de acero, un anillo de tracción de cables y dos grupos de cables radiales, que conectan y traccionan los dos primeros elementos. Esta estructura primaria será recubierta por un material de membrana (5, 6).

La cubierta cubrirá la tribuna principal, la "peineta", así como todas las nuevas tribunas que serán construidas a lo largo del perímetro del campo de deportes. Como las nuevas tribunas no alcanzan la altura de la peineta, la cubierta varía de altura en alzado.

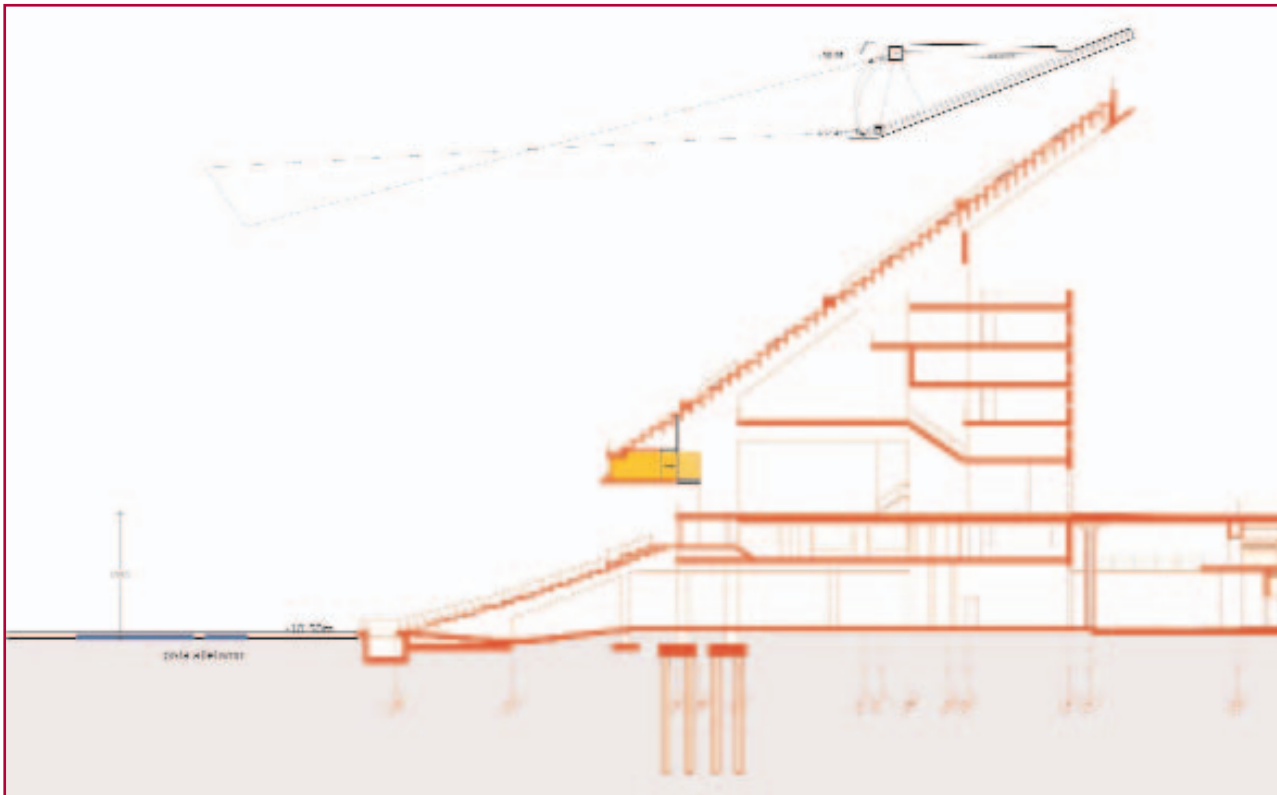


Fig. 13. Graderío existente con la cubierta textil incorporada (solución atletismo).

El nivel inferior del anillo de compresión es de 17 m sobre el nivel de referencia y llega a alcanzar 32,45 m en la peineta (Figuras 13 y 14).

En el plano, la estructura es simétrica con respecto a dos ejes (excepto para los apoyos). La forma en planta está definida por secciones concéntricas de

círculos y alcanza una extensión de alrededor de 273,84 m (298,64 m incluidos los voladizos) en la dirección longitudinal y 214,44 m (243 m incluido voladizos) en la dirección transversal. El ancho de la cubierta (la distancia entre el anillo de compresión y el anillo de tracción) es de aproximadamente 54 m.

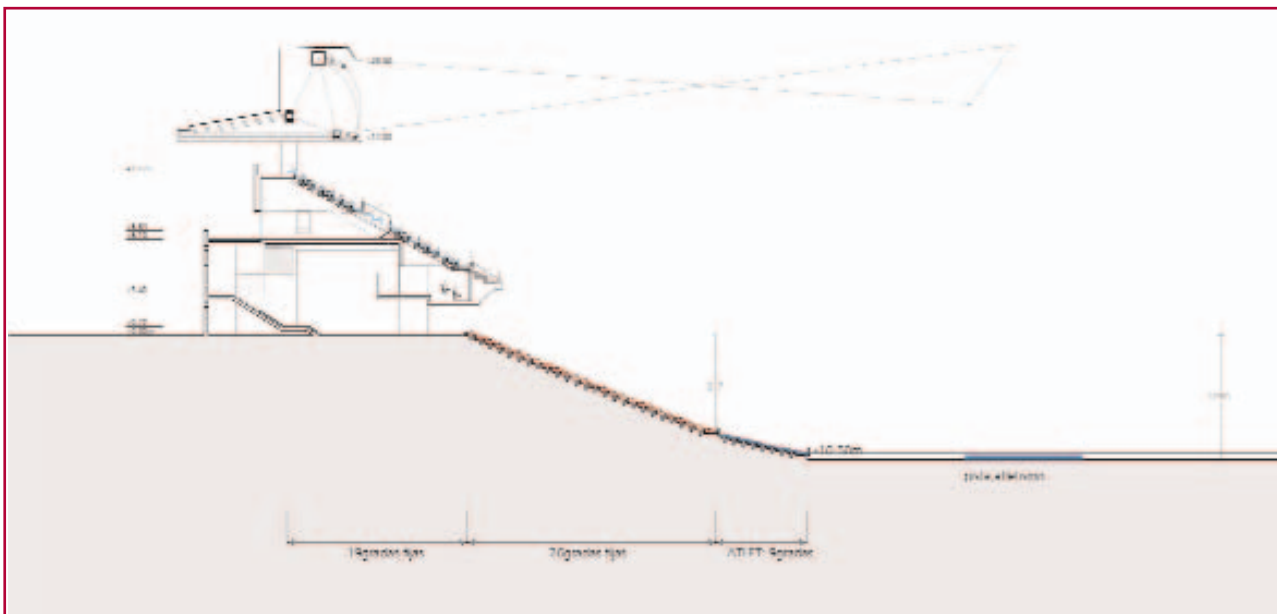


Fig. 14. Nuevo graderío incluyendo la cubierta textil (solución atletismo).



Fig. 15. Estadio Olímpico de Sevilla.

Esta estructura de cubierta ligera traccionada es autoequilibrada, manteniéndose las fuerzas de pretensión de los cables en permanente equilibrio con las fuerzas en el anillo de compresión. Este anillo de compresión es una gran celosía espacial de acero de sección triangular. Este anillo resiste las fuerzas horizontales de los 106 cables radiales conectados a ella y transmite las componentes verticales y las fuerzas del viento a la estructura inferior o al terreno a través de los 19 apoyos que la soportan.

Todos los apoyos están situados de manera que permitan los movimientos en dirección radial (por ejemplo, para permitir los movimientos debidos a cambios de temperatura sin restricción). Para soportar

las cargas del viento, cuatro de esos apoyos están colocados de manera que no puedan permitir el movimiento en la dirección tangencial del anillo de compresión.

6.2. Diseño conceptual

Schlaich, Bergemann und Partner colaboraron ya con Cruz y Ortiz en el diseño del recubrimiento de la cubierta del “Estadio Olímpico de Sevilla” (Figura 15). Esta cubierta difiere de la cubierta de anillo de cables convencional en el que los cables radiales no fueron colocados de dos en dos en planos verticales, sino que se colocaron de manera que la membrana se extiende entre los cables radiales en forma de zigzag y se convierte en un elemento portante, de manera que crea la tensión necesaria para aumentar la rigidez de la estructura de cables (Figura 16). En alzado, todos los cables radiales se encuentran en el mismo nivel en el anillo interior de tracción pero alcanzan diferentes alturas en el anillo de compresión. Los cables que son conectados al cordón superior, soportan cargas gravitacionales a causa de su inclinación, mientras que aquellos conectados al cordón inferior resisten las fuerzas de succión originadas por las cargas del viento. Otra cubierta comparable a la de Sevilla se ha construido en la ciudad de Foshan (China) en 2007. La primera vez que se consideró tal solución fue quizá en la cubierta de la plaza de toros de Zaragoza, España en 1989.

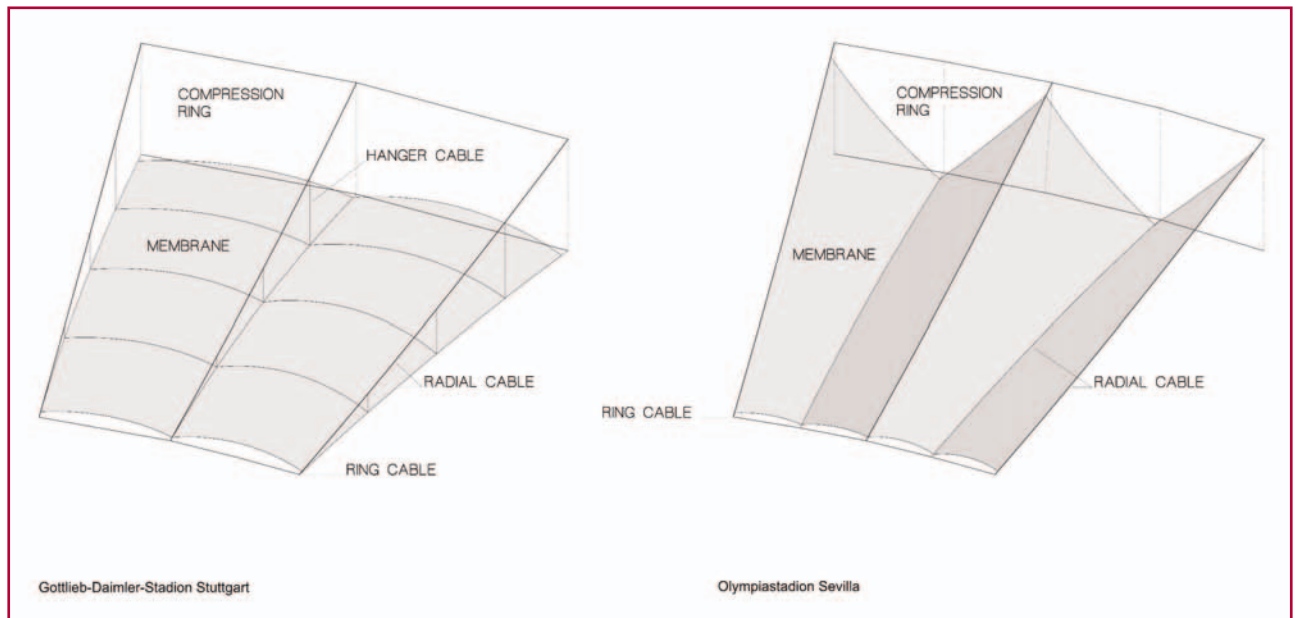


Fig. 16. Disposición de cubierta “convencional” de anillo de cables (izquierda); cubierta del Estadio de Sevilla (derecha).

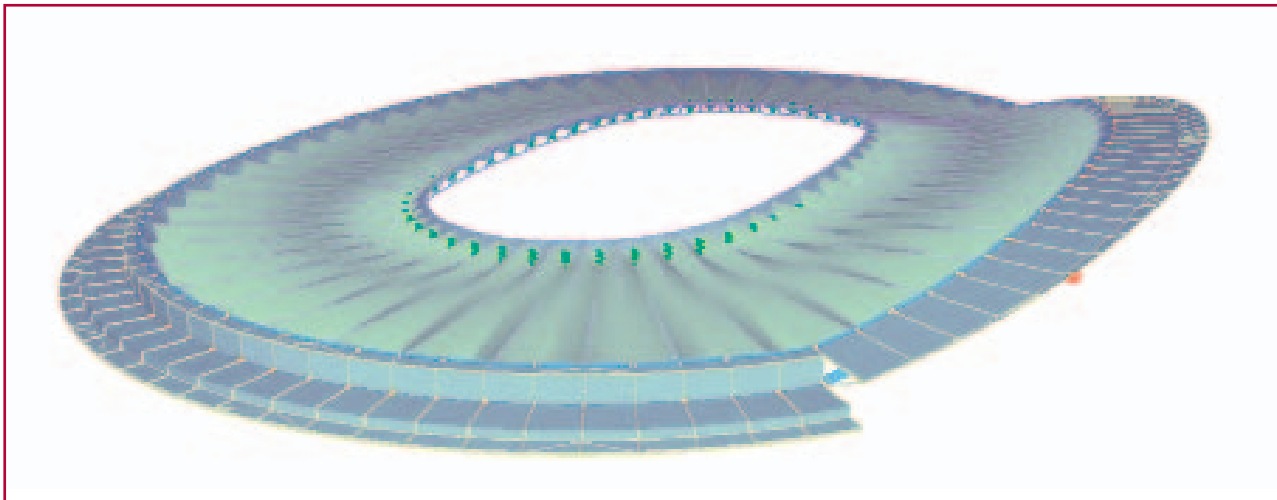


Fig. 17. Disposición de cables en Madrid con dos anillos de tracción y dos anillos de compresión.

Para cubrir el nuevo Estadio Olímpico de Madrid la solución en "zig-zag" ha evolucionado más. Aquí los cables radiales no sólo están a diferentes alturas en el anillo de compresión, sino que también lo están en el de tracción (Figura 17). En consecuencia, en alzado los cables se cruzan entre ellos en el centro. De esta manera, la altura del anillo de compresión se puede reducir considerablemente mientras el anillo de tracción consiste ahora en un anillo de tracción superior y otro inferior (Figura 18) (7).

6.3. Diseño estructural

6.3.1. Anillo de compresión

El anillo de compresión es una celosía espacial de acero formada por 54 segmentos. Su sección triangu-

lar está compuesta de tres cordones formados por perfiles huecos soldados. El eje de la longitud del cordón superior (1100x1140 mm) se encuentra a 6.5 m sobre el correspondiente al cordón inferior (550x590 mm). Unidos con un tercero, el cordón exterior (600x640 mm y a 4 m de distancia del cordón inferior) y junto con diagonales y perfiles huecos soldados, "montantes", forman la celosía que resiste las fuerzas horizontales de los cables (Figura 19).

Para anclar los cables radiales se colocan entre los cordones fuertes chapas de conexión (acero de calidad-Z). El anillo de compresión también incluye una estructura ligera de soporte para el recubrimiento formada por perfiles en I.

Los segmentos individuales del anillo de compresión se conectan mediante tornillos de alta resistencia. Las superficies de conexión entre segmentos necesi-

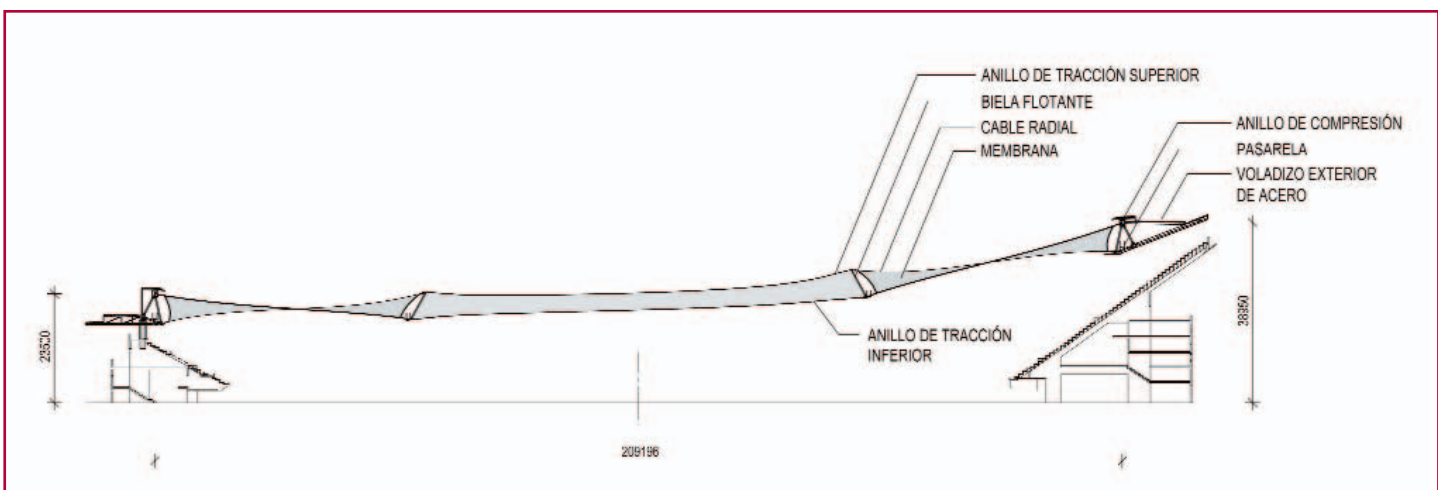
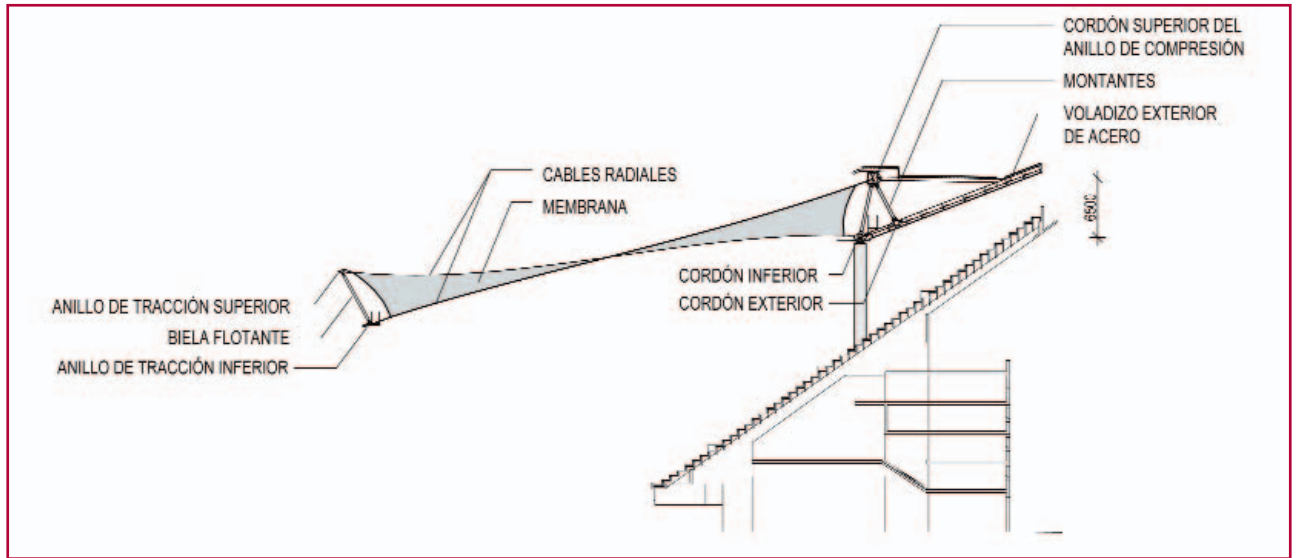


Fig. 18. Sección transversal.

Fig. 19. Sección transversal de la cubierta sobre la peineta.



tan unirse y protegerse de manera que se alcance un coeficiente de rozamiento de valor 0,5. También es necesario que todas las secciones huecas se suelden dando lugar a piezas estancas.

Todos los elementos del anillo de compresión están formados por acero estructural S 355.

6.3.2. Estructura de cables

El sistema principal de cables consiste en 108 cables radiales, 8 cables del anillo de tracción inferior y 3 cables del anillo de tracción superior. Todos los cables

están hechos de acero de alta resistencia, son cerrados y están conectados unos a otros mediante piezas de fundición. Los cables radiales tienen cabezales a ambos extremos. Los cables del anillo de tracción se conectan entre ellos con cabezales cónicos con bulones en su interior.

El diámetro de los cables radiales varía de 50 a 104 mm dependiendo de su posición. El diámetro de los cables del anillo de tracción es de 90 mm para el anillo superior y 100 mm para los del anillo inferior.

Las llamadas "bielas flotantes" mantienen los cables del anillo superior e inferior a una distancia que varía entre un máximo de 6,8 metros en los ejes 0 y 54 a 4,8 m en los ejes 27 y 27'. Las bielas flotantes están siempre localizadas cada dos ejes, siempre en el lugar donde hay un cable radial superior (Figura 20).

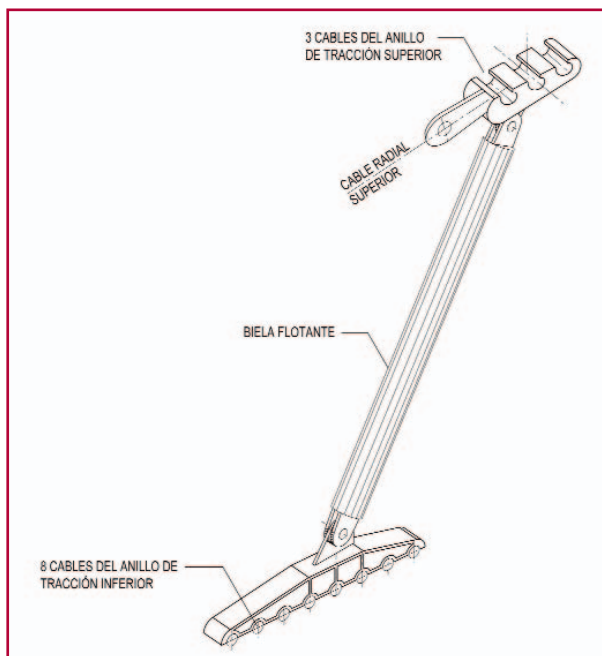
Los ocho cables de la parte inferior del anillo de tracción sirven de soporte a la pasarela y a las instalaciones eléctricas y mecánicas tales como altavoces o focos.

Este sistema de cables se rigidiza a través de una elevada tracción y una fabricación muy precisa. No está previsto el ajuste posterior de las longitudes de los cables.

6.3.3. Membranas

El principal material de la membrana es tela de vidrio de alta resistencia cubierto por PTFE ("teflón"), hecha de fibras de 3 m. 108 paneles de membrana principal hechas de "tiras" longitudinales soldadas, cubren los huecos entre los cables radiales. Éstas sopor-

Fig. 20. Biela flotante.



tan la nieve y las cargas del viento entre cable radial y cable radial, con una fuerza de pretensión en ambas direcciones de 5 kN/m aproximadamente. Las dimensiones en planta de esos segmentos son de alrededor de 54 m en la dirección radial por 3,2 a 7,4 m en la dirección tangencial. Las aberturas triangulares en el anillo de tracción y de compresión se recubren usando un material más ligero que será confeccionado según corresponda.

Los bordes de los paneles de la membrana se tensan y se fijan, mediante anclajes de aluminio o mediante cables de catenaria en bolsas de membrana. Todas las esquinas de la membrana se refuerzan mediante capas de membrana adicionales. Se utilizan membranas secundarias para recubrir todos los espacios restantes entre los cables y la estructura metálica.

Para recubrir la parte frontal del anillo de tracción se utilizan paneles mallados casi planos de mayor translucidez tensados entre los cables del anillo superior e inferior.

6.3.4. Voladizo exterior de acero

Los voladizos exteriores se conectan mediante tornillos a los cordones de la celosía del anillo de compresión. Estas celosías planas se componen de perfiles en I. Hay dos tipos diferentes de celosías, una en la "peineta" y otra para la restante parte de la cubierta.

Como la parte inferior de la sección de los voladizos se conecta al cordón exterior del anillo de compresión en todos los ejes, los elementos de conexión coinciden en ocasiones con los apoyos del anillo de compresión. En consecuencia, en esos puntos la celosía se ensancha y se desdobra para pasar por los laterales de los apoyos.

Todos los elementos del voladizo exterior son de acero estructural S355.

6.3.5. Pasarelas

Para acceder e inspeccionar tanto el anillo de compresión como el anillo de tracción, ambos están equipados de pasarelas de mantenimiento. Estas pasarelas solo podrán ser utilizadas por personal autorizado con equipos de seguridad. Dos pasarelas radiales de una longitud aproximada de 50 m conectan estas pasarelas principales con el anillo de compresión en los ejes 16/17 y 16'/17'.

6.3.6. Apoyos

Hay 17 apoyos tipo Pot y dos apoyos pendulares para soportar el anillo de compresión. Excepto en dos casos, los apoyos están situados bajo el cordón exterior del anillo de compresión. Solamente en los ejes 16 y 16' se disponen apoyos adicionales bajo el cordón interior para resistir las fuerzas verticales que aparecen en el "codo" del anillo de compresión.

Los apoyos se conectan "boca-abajo" al anillo de compresión y deslizan sobre placas de acero inoxidable conectadas a las columnas de hormigón las cuales forman parte de las gradas. Cuatro de ellos son utilizados para transferir al terreno las cargas horizontales del viento que actúan sobre la cubierta. Estos apoyos sólo permiten movimientos relativos entre el anillo de compresión y las columnas en la dirección radial, mientras que en la dirección tangencial los movimientos están impedidos.

Los apoyos pendulares en los ejes 6 y 6' son columnas hechas de secciones de acero soldadas equipadas con bulones y rótulas esféricas en ambos extremos para acomodarse a los movimientos del anillo de compresión. Estos apoyos trabajan tanto en compresión como en tracción.

6.4. Proceso constructivo

Un proceso de fabricación y constructivo adecuado y de alta precisión son fundamentales para una estructura ligera compleja como la de esta cubierta. La geometría y las dimensiones del anillo de compresión incluidos en los planos del proyecto muestran la geometría de fabricación, aunque la geometría de la cubierta bajo las cargas permanentes y el pretensado de los cables diferirá de esta geometría inicial. Los cables estarán a diferentes alturas, y el anillo de compresión se acortará. Éste se comprime y se deforma de manera que los cordones superiores estarán más cerca de la pista de atletismo y los extremos de los voladizos exteriores se moverán hacia arriba.

En consecuencia, el proceso constructivo propuesto, es el siguiente:

- Ensamblaje de prueba: Para conseguir la correcta geometría del anillo de compresión y para acelerar el proceso constructivo, todos los segmentos del anillo de compresión deben ser montados en

blanco con tres segmentos continuos apoyados sobre el terreno:

- Construir un segmento soldando todos sus componentes.
 - Conexión de placa final A a placa final B de segmento final.
 - Construcción del segundo segmento relacionándolo con el primero.
 - Repetir los dos siguientes pasos:
 - Construir el tercer segmento relacionándolo con el segundo de la misma manera que arriba.
 - Desconectar el primer segmento y colocarlo en la cubierta.
- Proceso constructivo del anillo de compresión: el peso de los segmentos individuales del anillo puede alcanzar hasta 90 toneladas. Éstos deben ser elevados por grúas pesadas y por ello se debe proporcionar un amplio espacio y superficies de apoyo alrededor de todo el estadio durante el proceso constructivo del anillo de compresión. Cada elemento será anclado al anterior utilizando apoyos temporales que necesitarán ser controlados hasta que se alcancen los suficientes apoyos permanentes.
 - Instalación de cables y membrana: Los cables del anillo de tracción se conectan y se colocan en el suelo y luego se elevarán hasta su posición final, tensionando los cables radiales que están conectados a ellos. Después de esto, los paneles individuales prefabricados de la membrana se elevan a su posición para ser puestos en tensión. La confección (el "corte definitivo") de las membranas, la determinación de la longitud de los cables y el

análisis del proyecto constructivo dependen de las propiedades finales de los materiales y de los métodos del proceso constructivo adoptados y por lo tanto tienen que ser realizados por el contratista.

7. Conclusiones

El proyecto constructivo planteado para la ampliación del Estadio de la Comunidad de Madrid ("La Peineta") de cara a su utilización como estadio de atletismo en los Juegos Olímpicos a los que la ciudad de Madrid es candidata, aprovecha al máximo las estructuras existentes sin desfigurar el carácter emblemático que les caracteriza y que forma parte indisociable del perfil de la ciudad. El diseño de la ampliación se ha desarrollado igualmente bajo los criterios de máxima flexibilidad que permitan dar lugar a una instalación deportiva autofinanciada y rentable que pueda albergar, con una intervención de entidad moderada, a un equipo de fútbol de primera división. Las estructuras diseñadas tienen características similares a las construidas en 1993, aunque se han tenido en cuenta los condicionantes modernos asociados a un hormigón durable y de mejores prestaciones, y se han aprovechado las ventajas de los modernos medios de conexión entre diferentes elementos de hormigón y las de los más potentes medios de cálculo que permiten reducir la presencia de juntas. El perfil del estadio se completa con una cubierta textil tensada que adaptándose a la forma ondulante de los graderíos y manteniendo por tanto la presencia de la gran tribuna principal, le confiere una configuración unitaria y con un marcado carácter tecnológico acorde con el deseo de innovación de los Juegos. ♦

Referencias:

-(1) CRUZ, A. y ORTIZ, A. "Ampliación del Estadio de Madrid, España.", Informes de la Construcción, Vol 56, No 492 (2004).
-(2) CRUZ, A. y ORTIZ, A., "Estadio de Madrid. La Peineta. Arquitectura", Las Arquitecturas del Madrid 2012. Proyectos y Obras. Jornada Técnica Anual de ACHE (2005).

-(3) MARTÍNEZ CALZÓN, J., "El Estadio de atletismo de la Ciudad Deportiva de Madrid. Versatilidad y diseño", Cauce 2000, nº 68, 1995.
-(4) MARTÍNEZ CALZÓN, J., "Estructura del Estadio de atletismo de la Comunidad de Madrid", Hormigón y acero nº 196, 1995.
-(5) GÖPPERT, K., SCHLAICH, J. "The essence of Light-weight Structures", Brussels, University Press, 2002.

-(6) SCHLAICH, J., BERGERMANN, R., "Light Structures", Prestel, München, 2003.
-(7) GÖPPERT, K., "Estadio de Madrid. La Peineta. Description of the roof structure", Las Arquitecturas del Madrid 2012. Proyectos y Obras., Jornada Técnica Anual de ACHE (2005).

Planta solución atletismo



Planta solución fútbol

