

Corona del nuevo Edificio Oeste del estadio Santiago Bernabéu, Madrid

Corona of the new West building of the Santiago Bernabeu Stadium, in Madrid

José Martínez Salcedo^a, Alejandro Yustres Real^b,
Alberto Curbelo Díaz^c, Santiago del Río Rodríguez^d

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. FCC Construcción, S.A. Jefe de departamento de Obras Especiales. JMartinez@fcc.es

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puerto. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPESA). Jefe de Proyectos. alejandro.yustres@mc2.es

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puerto. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPESA). Jefe de Proyectos. alberto.curbelo@mc2.es

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. FCC Construcción, S.A. Jefe de Proyectos. srior@fcc.es

RESUMEN

La Corona es una celosía espacial que, junto con las dos nuevas torres, conforma un megapórtico que da forma al edificio Oeste del Estadio Santiago Bernabéu. Esta cercha, con una luz de 144 m y un canto total de 15.7 m, tiene como misión, además de dar soporte a los forjados de su interior, proporcionar apoyo horizontal a la cubierta, servir de elemento de dónde cuelga la Viga Museo y sustentar la estructura envolvente de la fachada. Para materializar esta estructura, se han empleado chapas de gran espesor, de hasta 100 mm, así como aceros de alta resistencia, como S460 y S690QL1.

ABSTRACT

The Corona is a spatial truss that, together with the two new towers, forms a mega portal frame shaping the West building of the Santiago Bernabéu Stadium. This truss, with a span of 144 m and a total depth of 15.7 m, is designed not only to support its inner slabs, but also to provide horizontal support to the roof. Additionally, it serves as a hanger point for the Museum Beam, and it supports the enveloping structure of the façade. To construct this structure, very thick plates up to 100 mm and high-strength steels such as S460 and S690QL1 have been used.

PALABRAS CLAVE: celosía espacial, estructura metálica, estadio

KEYWORDS: spatial truss, steel structure, stadium

1 Introducción

En la remodelación del estadio Santiago Bernabéu, además de la construcción de la cubierta, se plantea el desplazamiento de la línea de fachada hacia el exterior tanto en su cara este, correspondiente con la calle Padre Damián, como en su cara oeste, hacia los antiguos jardines del Mundial 82 en el Paseo de la Castellana. En

el marco de esta ampliación surge el nuevo edificio Oeste que es, fundamentalmente, un megapórtico en el cual las Torres B y C constituyen los pilares [1], y la Corona es el dintel, permitiendo que el volumen de este edificio no tenga contacto con el suelo entre las dos torres.

Las funciones que tiene la Corona son diversas:

- Soporte horizontal Norte-Sur de la cubierta

- Sustentación de los forjados N09 y Skywalk que se alojan en su interior
- Cuelgue del edificio del Museo [2]
- Apoyo horizontal y vertical de la fachada

2 Descripción general

La Corona es el principal elemento del Edificio Oeste. Se sitúa entre las dos torres de evacuación [1] y consiste en una celosía espacial triangular, con un único cordón superior y dos cordones inferiores a la misma cota. La luz de esta cercha varía entre los 125 m de su cordón interior y los 145 m del exterior.

La geometría de esta celosía está muy condicionada por la Arquitectura, ya que su cordón inferior exterior debía seguir la geometría de la fachada, el inferior interior la posición de

las costillas existentes del estadio y el superior la huella en planta del borde de cubierta. Además de estas restricciones geométricas, resultaba fundamental integrar la geometría de la corona con la de la cubierta fija, a la que tiene que esquivar puntualmente en su cordón superior, en el entorno de los trípodes de apoyo, de las cerchas principales atirantadas, en las torres.

Finalmente, cabe destacar que la Corona presenta sendos voladizos que se prologan a cada lado de las torres [1], y que se caracterizan por una acusada curvatura en planta impuesta por la geometría de la envolvente exterior. Estos voladizos se extienden hasta las cerchas de fondo de la cubierta, y permiten el apoyo de los pórticos de los forjados del nivel superior, garantizando así la continuidad del Skywalk a lo largo de todo el perímetro del estadio.

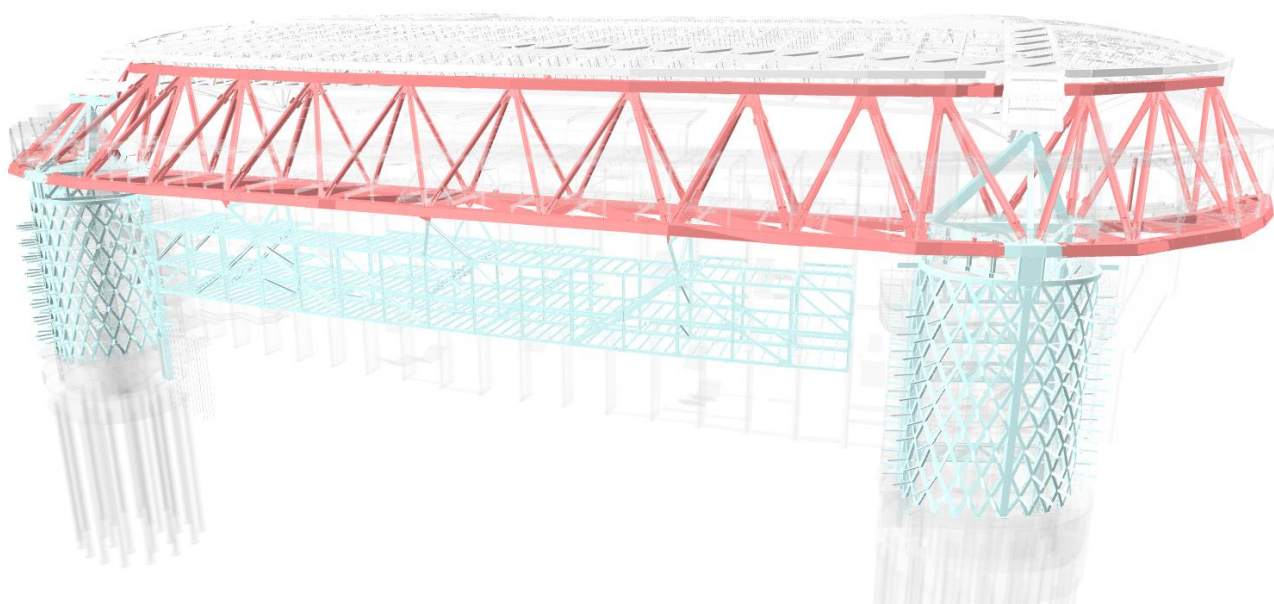


Figura 1. Vista espacial de la estructura de la Corona

3 Diseño estructural

3.1 Configuración general

Se configura una cercha espacial triangular de 15.7 m de canto entre ejes, con cordones conformados por cajones rectangulares, de 2.0 x 1.2 m el superior y 1.2 x 1.2 m los

inferiores. Las diagonales y montantes pertenecientes al plano horizontal entre cordones inferiores se resuelven mediante elementos armados en I, de 1.20 m de canto. Sin embargo, las diagonales inclinadas son tubulares de diámetros Ø711 y Ø914, con espesores de chapa de hasta 100 mm.

La luz de la corona no es igual en ambos cordones inferiores, dado que los soportes interiores de las torres [1] se encuentran más

próximos entre sí que los exteriores. Esto provoca que los esfuerzos se concentren significativamente más en las diagonales interiores que en las exteriores. Este hecho hace que la corona tenga, bajo cargas puramente gravitacionales, una mayor deformación vertical en el cordón exterior, debida tanto a la torsión generada por la geometría curva en planta, así como por la mayor luz del cordón exterior.

A la hora de establecer el tamaño de las piezas y los nudos que conforman la corona,

además de los esfuerzos en los mismos influyó en gran medida el planteamiento que fijaba que todas las uniones en obras debían ser atornilladas para, de esta manera, acortar los plazos de montaje inicialmente previstos. Todas las uniones dentro del nudo eran soldadas en taller, limitando el transporte el tamaño del nudo. Las barras entre nudos se conectaban a éstos mediante uniones atornilladas, en obra.

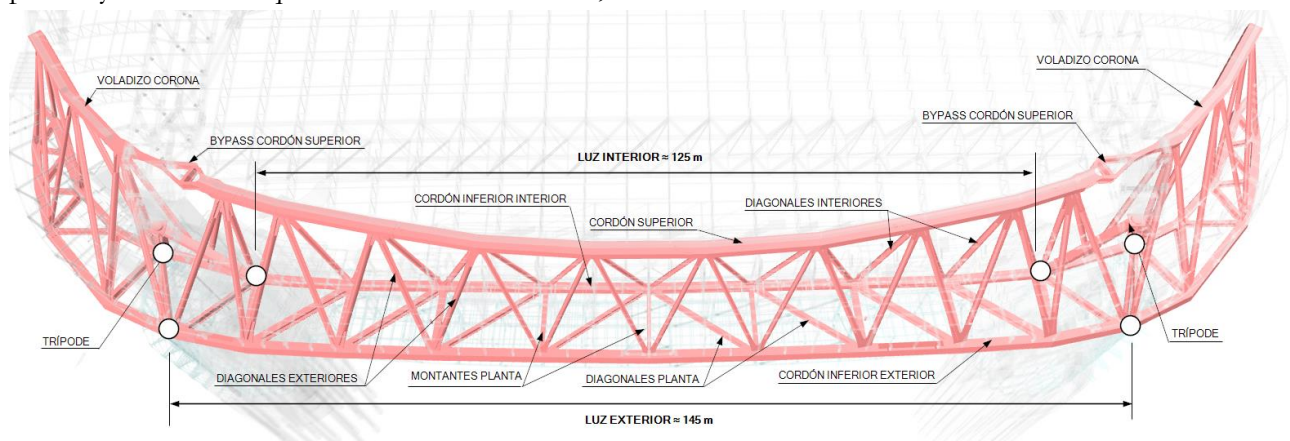


Figura 2. Vista espacial de elementos de la Corona y luces

3.2 Elementos y nudos

Los nudos de la corona son elementos complejos en los cuales convergen al menos cuatro barras además del cordón. Para posibilitar la confluencia de dichas barras y favorecer las uniones atornilladas de las diagonales con los cordones, se planteó la colocación de unas cartelas en el plano formado, por un lado, por las dos diagonales interiores, y por otro, por las dos exteriores. Los perfiles circulares de las diagonales se transforman en su extremo en secciones en forma de cruz, en las que sólo una de las dos chapas es la que finalmente penetra en el nudo del cordón de la corona. La unión de las diagonales con el nudo se produce mediante cubrejuntas dispuestos en las caras de esas cruces.

En las uniones entre tramos de piezas de tipo cajón, se definió una solución con cubrejuntas por ambas caras de cada chapa, tanto interior como exterior al cajón, por lo que

ha sido necesario prever y diseñar pasos de hombre para el atornillado de estos elementos. Estos accesos presentan chapas de refuerzo para recuperar la sección perdida y, posteriormente al apriete de la unión atornillada, se sellaban para garantizar la estanqueidad del cordón.

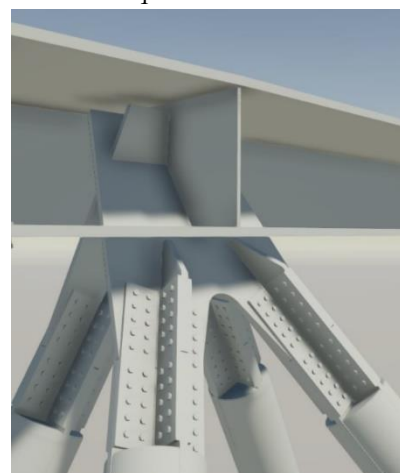


Figura 3. Nudos de la Corona

Dada la complejidad de los nudos y la envergadura de los esfuerzos que se debían transmitir por ellos entre diagonales y cordones, los espesores de las chapas resultantes son

considerables. Para reducir al máximo esos espesores, se han empleado aceros de alta resistencia en dichas cartelas, del tipo S460ML y S690QL1.

La geometría de cada nudo de la corona es única, por lo que hubo que fabricar un sistema de utillajes propio para cada uno de los nudos que bloquease la geometría de las chapas mientras se realizaban las soldaduras entre ellas. Aunque el espesor de las chapas era importante, alcanzando los 100 mm en numerosos casos, se cuidó especialmente la geometría de las soldaduras de cada chapa intentando minimizar los volúmenes de soldadura a ejecutar.



Figura 4. Ejecución del nudo de la Corona en el taller

3.3 Apoyo horizontal de la cubierta

Como parte de las condiciones de contorno de la cubierta, ésta requiere unos bloqueos

horizontales en dirección Norte/Sur que se sitúan a la altura del centro del campo, tanto en la Corona Oeste como en el Edificio Este.

En el caso de la corona, esta coacción horizontal que une ambas estructuras se materializa mediante dos bielas situadas entre el cordón superior de la corona y la viga de borde de la cubierta fija. Estas bielas permiten el desplazamiento vertical relativo entre la corona y la cubierta. A su vez, unas rótulas esféricas situadas en los bulones extremos permiten que estas bielas se acomoden a movimientos diferenciales fuera del plano de las bielas, con un detalle análogo al que muestra la Figura 6.

Para su montaje, las bielas se colocaron y unieron al cordón superior de la corona, a la espera de que se montasen los voladizos perimetrales de la cubierta. Una vez montada la viga de borde de esta última, se levantaron los extremos de las bielas hasta proceder a su conexión mediante uniones atornilladas adyacentes a las rótulas de conexión, consiguiendo así que todos los bulones viniesen montados en sus rótulas desde taller.

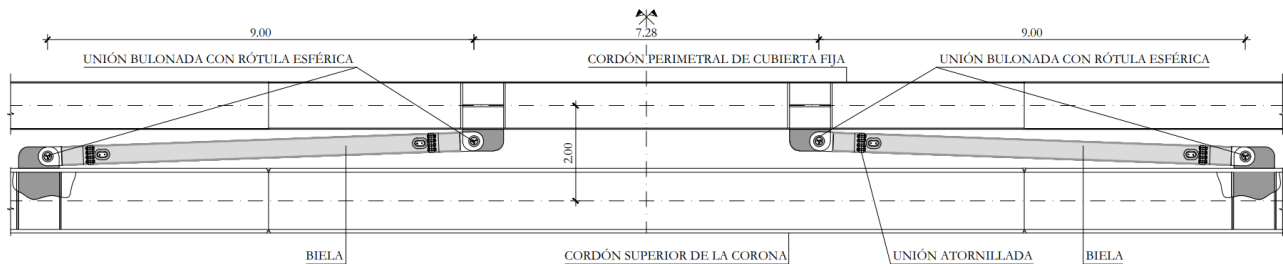




Figura 5. Bielas de bloqueo norte/sur entre Corona y Cubierta.

3.4 Cuelgue de la Viga Museo

En correspondencia con los nudos de los cordones inferiores de la Corona se materializan los cuelgues de la Viga Museo. La carga vertical de ésta es recogida por orejetas con bulones rotulados situados en el segundo nudo desde el eje de simetría de la corona.

Las cargas horizontales se recogen en el centro de la corona a través de otra unión bulonada, pero esta vez rasgada en vertical, para garantizar que en este punto no se transmitan las cargas verticales

Para una descripción más detallada del sistema de cuelgue de la viga museo, ver artículo de la misma [2].

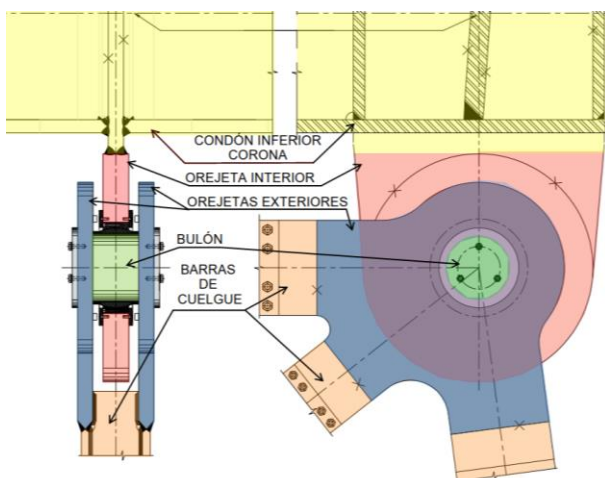


Figura 6. Nudo de cuelgue vertical de viga Museo en Corona

3.5 Apoyo de la fachada

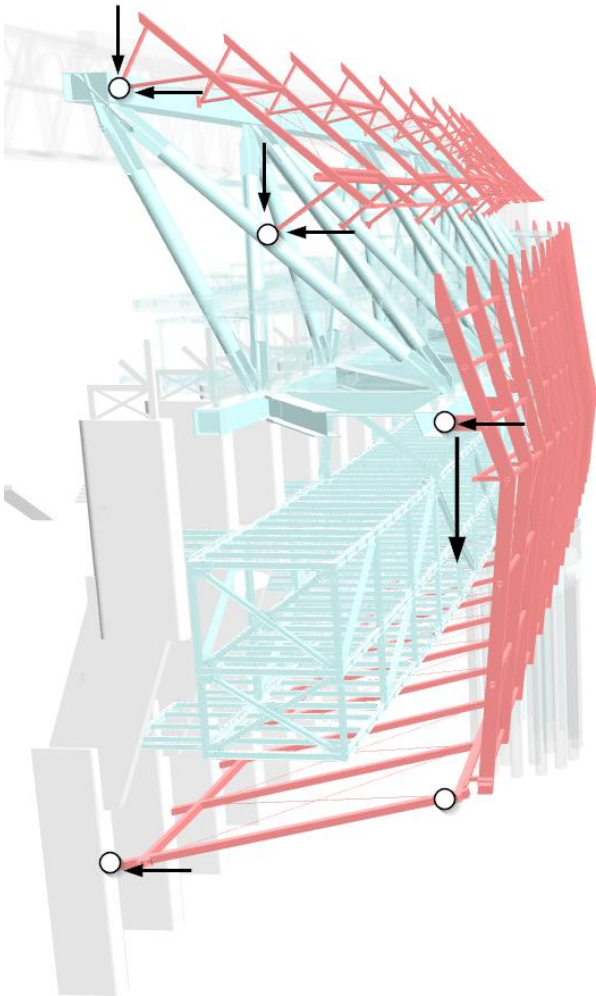
Dentro de las funciones estructurales de la corona destaca su papel de elemento sustentador del revestimiento de lamas que actúa de envolvente exterior del estadio.

La estructura principal de la fachada inferior se resuelve mediante nervios que presentan un apoyo superior a nivel del cordón inferior de la corona, y que recoge las reacciones principales, verticales y horizontales; y un apoyo inferior, dotado de una biela en su parte final, que se conecta a las costillas del estadio existente, transmitiéndole solamente cargas horizontales

Respecto a la fachada superior, la estructura principal se materializa mediante un pórtico biarticulado, que se conecta al cordón superior de la corona en su apoyo más elevado; y a un punto intermedio de las diagonales exteriores de la misma en su apoyo inferior, transmitiendo en ambos fuerzas verticales y horizontales.

En todos los casos, los puntos de conexión se materializan como uniones bulonadas, garantizando el comportamiento isostático de las estructuras de fachada y evitando la transmisión de momentos flectores en estos puntos.

Figura 7. Esquema general conexión de la envolvente exterior del estadio con el Edificio Oeste.



3.6 Forjados de la corona

En el interior de la corona se albergan dos niveles de forjados, el N09 y el N10. El nivel inferior, destinado fundamentalmente a servicios, y el superior, conocido como *Skywalk*, que es un forjado de cota variable que recorre perimetralmente el estadio. Estos forjados se resolvieron con pórticos apoyados sobre los cordones de la corona, unos pórticos bajos para el nivel N09 y unos pórticos altos para el nivel N10 (ver Figuras 9 y 10).

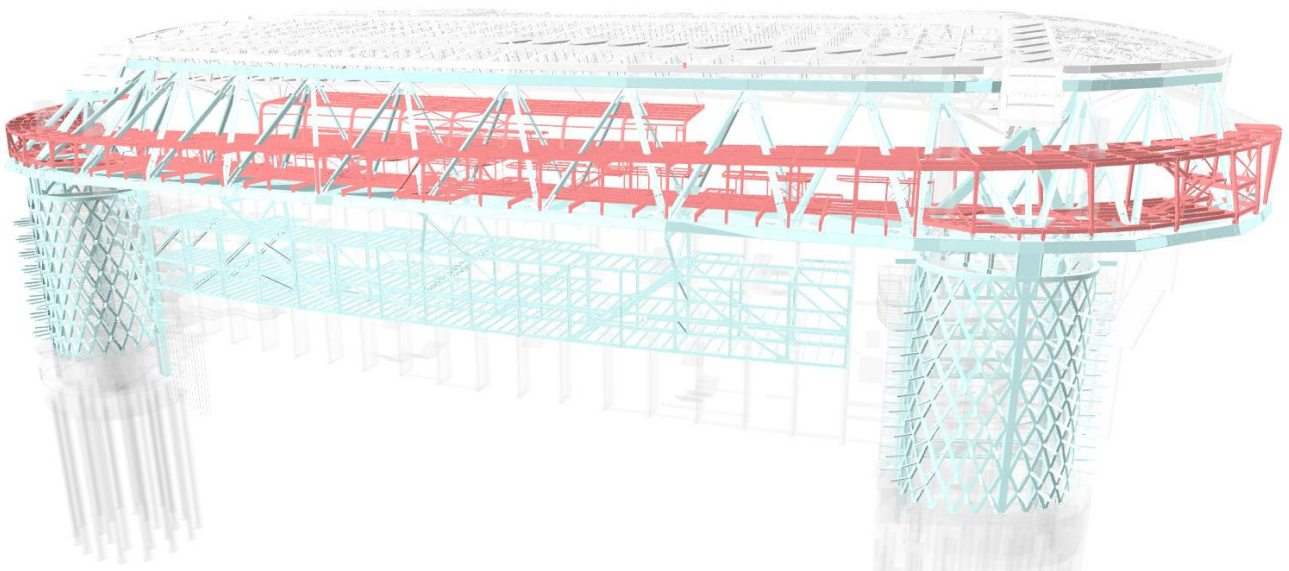
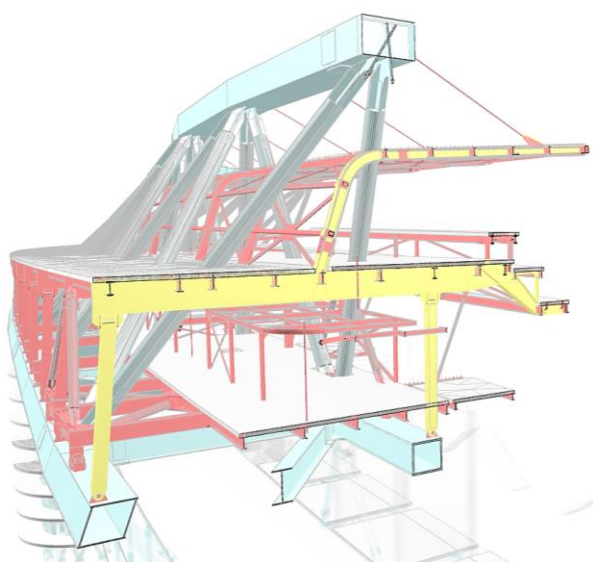


Figura 8. Vista espacial de los forjados en el interior de la corona

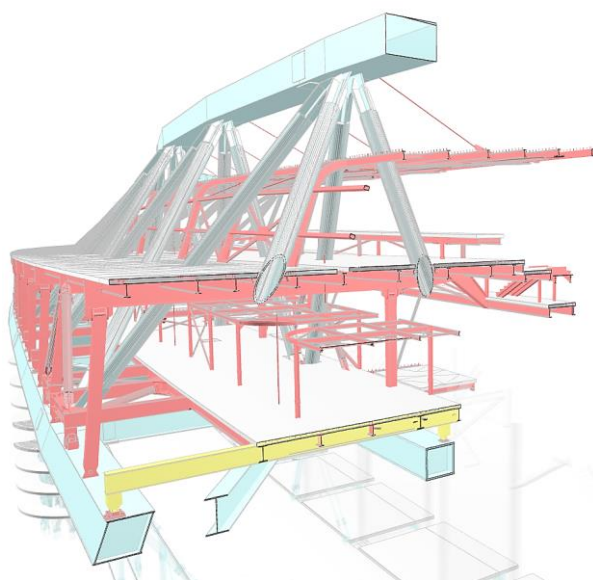
Las vigas radiales del nivel superior, que constituyen los dinteles de los pórticos altos, se prolongan en voladizo hacia el interior del estadio generando una viga de graderío. En el centro de vano de cada dintel arranca, además,

una estructura de cubierta atirantada al cordón superior de la corona. Esta cubierta ligera conforma, junto con la extensión anteriormente definida, el espacio denominado Skybar.



**Figura 9. Forjados en el interior de la corona.
Pórticos altos**

Se hicieron coincidir los soportes de los pórticos altos con los nudos y con el centro de vano entre nudos de los cordones inferiores de la corona, mientras que los pórticos bajos se situaron a cuartos y tres cuartos de la luz. Se decidió esta distribución alterna para evitar la interferencia del dintel del pórtico bajo con el nudo.



**Figura 10. Forjados en el interior de la corona.
Pórticos bajos**

El mayor reto en el diseño de estos pórticos ha sido el de independizar los dos forjados de las deformaciones de la corona, pues el orden de magnitud de éstas impedía un dimensionamiento sensato de las estructuras locales de planta. El objetivo era evitar la transmisión de rasante entre la corona y los forjados, efecto que habría invalidado cualquier solución, sobre todo en el nivel inferior, el cual está muy próximo a su cordón inferior.

Adicionalmente, en la dirección del pórtico, se debía buscar una solución de apoyos que permitiera absorber el descenso diferencial que experimenta el cordón inferior exterior de la corona respecto al interior, como consecuencia de la diferente luz de los apoyos descrita anteriormente.

En los pórticos bajos, se resolvió este requisito con apoyos deslizantes longitudinalmente, con un punto fijo central. En la dirección del pórtico, se fijó el apoyo en el cordón exterior y se liberó el del cordón interior, estando también articulados para el giro en el plano del pórtico, de forma que éste no se veía afectado por el descenso diferencial del cordón exterior de la corona.

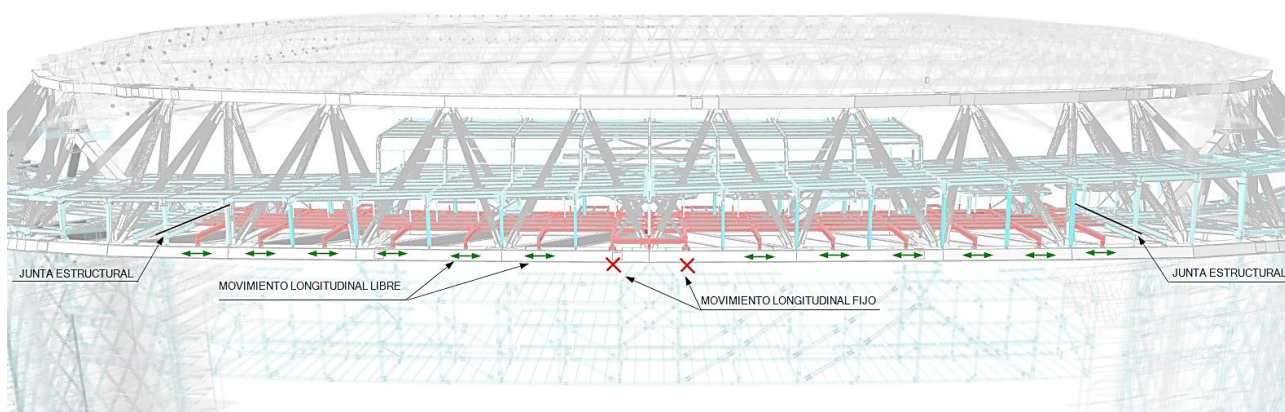


Figura 11. Vista global de apoyos de pórticos bajos

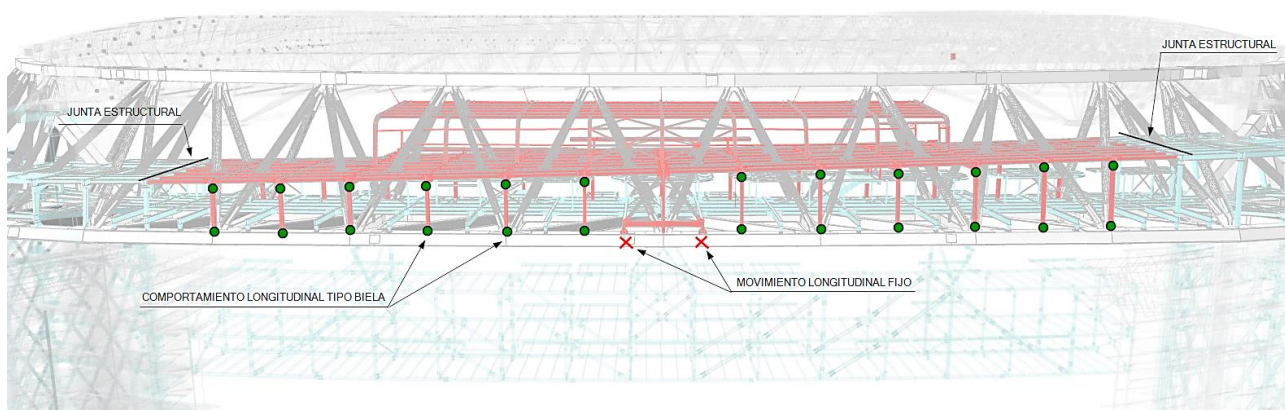


Figura 12. Vista global de apoyos de pórticos altos

4 Construcción

4.1 Fabricación en taller

Como se ha anticipado en apartados anteriores, la complejidad geométrica de la estructura de la corona en general, y de los nudos en particular, fue una constante desde el inicio del diseño. A la hora de trasladar esto a la fabricación, el taller metálico tuvo que desarrollar un complejo sistema de posicionamiento y orientación para la colocación de nudos y cartelas. Para validar dicho sistema, se realizó en taller un montaje en blanco del módulo central de la corona, comprobándose que cumplía con las tolerancias exigidas para el montaje final.

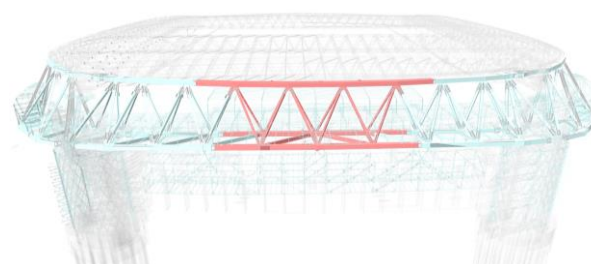


Figura 13. Módulo de corona con premontaje en blanco

Por motivos de accesibilidad a la estructura, dicho montaje se realizó con el módulo tumbado en horizontal. Una vez comprobada la correcta geometría del módulo completo, y que se podían introducir los tornillos en las uniones con cubrejuntas de todas las diagonales, se procedió a su desmontaje y su traslado a obra para el ensamblaje definitivo. Las piezas se trasladaban a obra con la pintura de protección a fuego y la de protección ambiental C4 ya aplicada, para lo que se eligió una pintura de alta durabilidad, es decir, de más de 15 años.



Figura 14. Premontaje en blanco de módulo de corona en taller.

4.2 Montaje en obra

El montaje de la viga corona se planteó para ser realizado utilizando torres de apeo para sus cordones inferiores. Para el tramo central se dispusieron 6 torres de apeo de 27 m de altura, todas cimentadas directamente a nivel de suelo, pero las interiores debían esquivar la plataforma de montaje elevada.

Las torres presentaban unas dimensiones en planta de 2.9 x 2.2 m y disponían en cabeza de unos yugos que permitían el apoyo articulado de las piezas de los cordones inferiores de la corona. Además, estaban provistas de gatos para el posterior desapeo y entrada en carga de la corona una vez finalizado su montaje.

En primer lugar, se constituyó la cercha horizontal comprendida entre los cordones inferiores de la corona, colocando piezas desde los muñones dejados en las cestas [1] hacia el centro desde ambos lados. Finalmente, se cerró la estructura en su centro de vano conectando los dos cordones con uniones atornilladas con cubrejuntas. Se habían previsto elementos de tiro

anclados a cada cordón para poder realizar pequeños ajustes que facilitasen la unión final.

Una vez cerrada la celosía horizontal, se colocaron las diagonales inclinadas. Para ello, se utilizaron unos apeos en forma de árbol que permitían asegurar que la geometría superior de la confluencia de las cuatro diagonales era la correcta hasta que se instalase el cordón superior.

Como último paso, se conectaron los cordones superiores de la cercha.

Este proceso se repitió en los voladizos laterales, apoyados sobre tres torres cada uno, los cuales se montaron íntegramente antes de proceder al desapeo.

Para desapear la corona se pusieron en carga los gatos de las cabezas de las torres de apeo para coger todo el peso y permitir la retirada de los apoyos provisionales. Una vez retirados, se fueron descendiendo los gatos hasta que se produjo el despegue de los cordones y la corona quedó en su posición definitiva.



Figura 15. Montaje de la estructura principal de la Corona sobre torres de apeo.[3]

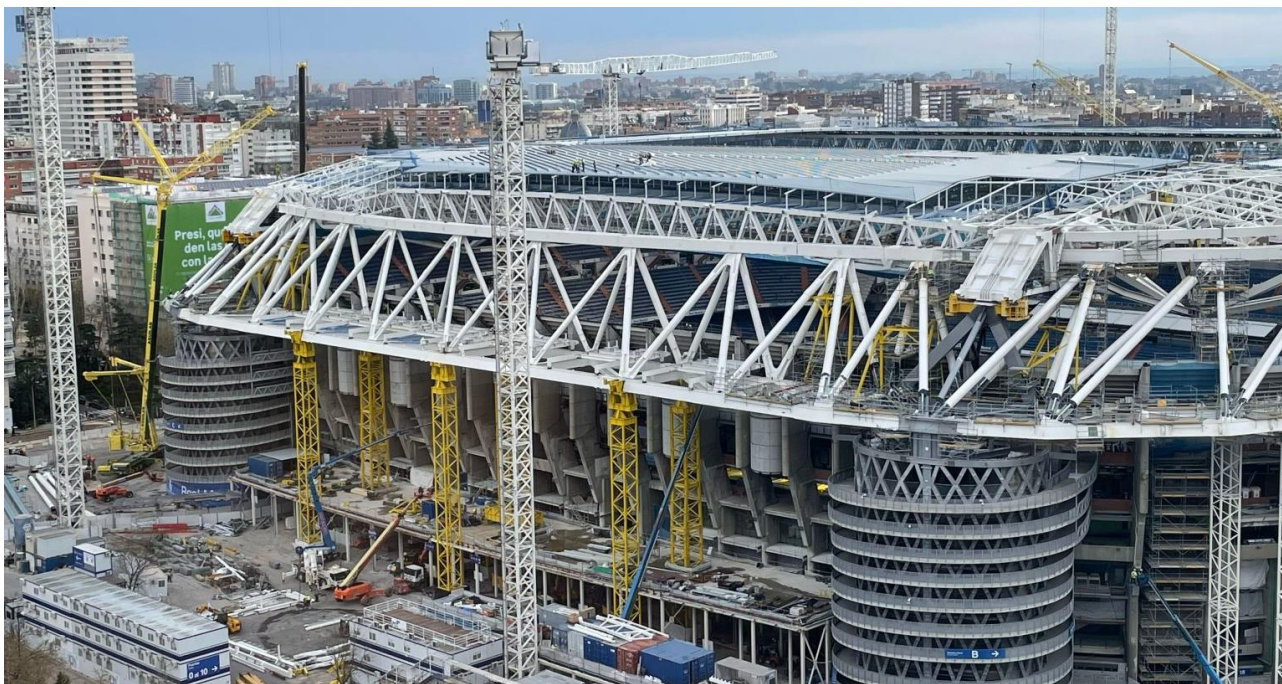


Figura 16. Estructura metálica de la corona completada previo desapeo de las torres [3]

5 Conclusiones

La definición de la geometría de la estructura de la corona ha requerido una estrecha coordinación entre la forma arquitectónica del edificio y la solución estructural.

Desde un primer momento se han tenido presentes tanto la complejidad geométrica y estructural, como los condicionantes de la obra, buscando soluciones estructurales más habituales en puente metálicos que en estructuras de edificación.

Además de estos condicionantes, el hecho de que la construcción se llevó cabo durante varias temporadas con el estadio en uso ha sido determinante para el diseño de la corona y su relación con otros elementos como lo son las torres y la cubierta fija.

6 Agradecimientos

En una obra tan singular y donde la coordinación entre equipos es imprescindible, es necesaria la confianza mutua entre todas las personas que participan en su diseño y construcción. Muchas personas han tenido una

participación fundamental en este proceso: en particular, además de la colaboración con el equipo de arquitectura de Typsa, encabezado por Manuel Bernabé, queremos agradecer el apoyo de la Asistencia a la Obra, de Antonio Molina (Ayesa), del gerente José Luis Sanchez Largo y, sin duda, del equipo de obra, liderado por Manuel Rodríguez San Juan y Ángel Lanusse.

La estructura metálica de las tres partes que componen este edificio fue fabricada y montada por Inbersa, y las maniobras de izado por BBR/FCC (Juan Manuel Linero).

Referencias

- [1] J. Martínez Salcedo, P. Bartalotta, A. Yustres A. Curbelo, G. Ladrón de Guevara, S. del Río. Torres B y C del edificio Oeste del estadio Santiago Bernabéu. IX Congreso de ACHE. Granada, 2025.
- [2] J. Martínez Salcedo, A. Curbelo, A. Yustres, S. del Río. Viga Museo del nuevo edificio Oeste del estadio Santiago Bernabéu, Madrid. IX Congreso de ACHE. Granada, 2025.
- [3] Fotos de nuevoestadiobernabeu.com
Copyright © 2024 Nuevo Estadio Bernabéu.