

Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. El edificio oeste: las torres – la corona – la viga museo

Renovation of the Santiago Bernabéu Stadium. The West Building: The Towers – La Corona – The Museum Beam

José Martínez Salcedo^a, Alejandro Yustres Real^b,
Alberto Curbelo Díaz^b y Santiago del Río Rodríguez^{*,a}

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Servicio Obras Especiales FCC Construcción, S.A. (Madrid, España).

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería S.L. (Madrid, España).

Recibido el 28 de octubre de 2024; revisado el 30 de diciembre de 2024, aceptado el 4 de mayo de 2025

RESUMEN

En este artículo se describen los aspectos de diseño más importantes de la estructura principal que conforma el Edificio Oeste. Esta estructura está compuesta por una cercha espacial de canto 15.7 m y 144m de luz, denominada Corona, que junto con las dos nuevas torres de la Castellana constituyen el mega pórtico que soporta verticalmente dicho edificio y que proporciona, a su vez, apoyo horizontal y vertical al conjunto de la cubierta; y de la estructura de la envolvente de lamas exterior.

Además, en el interior de esta cercha se albergan dos forjados y de ella cuelga, mediante bielas, la viga museo donde se disponen tres forjados adicionales.

Entre las características más significativas de esta estructura destaca la elevada magnitud de las cargas a soportar debiendo hacer uso de aceros de alta resistencia, S460 y S690QL1; su complicada geometría y ejecución en taller, incluyendo un montaje en blanco tridimensional completo; y finalmente, el izado mediante heavy lifting de la viga museo desde la propia corona.

PALABRAS CLAVE: Torres del oeste, corona, viga museo, acero de alta resistencia, *heavy lifting*.

©2025 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

ABSTRACT

This article describes the most important design aspects of the main structure that forms the West Building. This structure consists of a space truss with a depth of 15.7 meters and a span of 144 meters, called La Corona, which, together with the two new Castellana towers, constitutes the mega-portal that vertically supports the building and provides both horizontal and vertical support to the roof assembly and the exterior louvered envelope structure.

Additionally, inside this truss, there are two floors, and hanging from it, via struts, is the museum beam where three additional floors are located.

Among the most significant features of this structure are the high magnitude of the loads to be supported, requiring the use of high-strength steels, S460 and S690QL1; its complex geometry and workshop execution, including a complete three-dimensional trial assembly; and finally, the heavy lifting of the museum beam from La Corona itself.

KEYWORDS: west towers, corona, museum beam, high strength steel, heavy lifting.

©2025 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

* Persona de contacto / *Corresponding author*:
Correo-e / e-mail: srior@fcc.es (Santiago del Río)

Cómo citar este artículo: Salcedo, J.M., Yustres, A., Curbelo, A., del Río, S. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. El edificio Oeste: las torres – la corona – la viga museo. *Hormigón y Acero*. 76(307):131-152. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3987>

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los criterios básicos de diseño del estadio ha sido transmitir la totalidad de las nuevas cargas a elementos de nueva construcción. Con este objetivo se diseña el Edificio

Oeste. Además de sus propias funciones obvias, como torres de evacuación y generación de espacios para usos variados como *skywalk* o museo, este nuevo edificio está estructural-



Figura 1. Vista aérea del Edificio Oeste durante la construcción. Foto cedida por cortesía de 'Nuevo Estadio Bernabéu' - Copyright © 2024 Nuevo Estadio Bernabéu.

mente relacionado con la cubierta del estadio ya que le sirve como apoyo principal, tanto vertical como horizontalmente.

Los tres elementos principales del Edificio Oeste son los siguientes:

- Nuevas torres de evacuación.
- Corona
- Viga museo

2. NUEVAS TORRES DE EVACUACIÓN DE LA CASTELLANA

Estas dos nuevas torres son elementos esenciales del Edificio del Oeste. Están situadas frente a la Castellana en los extremos Sur y Norte del estadio. Su funcionalidad principal es la evacuación del público, lo que condiciona la geometría, al tener que adaptar las nuevas rampas de evacuación helicoidales a los forjados existentes en el estadio. Sin embargo, estructuralmente tienen dos funciones igual de importantes: constituyen dos de los cuatro apoyos de la nueva cubierta; y forman, junto con la corona, un mega pórtico en sentido Norte/Sur trasladando tanto las cargas de la cubierta como de la corona a la cimentación.

2.1. Esquema estructural.

Como se acaba de mencionar, el esquema estructural de las torres está condicionado por las distintas necesidades que debe satisfacer.

- *Como apoyo de la cubierta fija*
En primer lugar, debe proporcionar apoyo vertical y horizontal a la cubierta. Los apoyos se sitúan sobre una estructura denominada Trípole, que distribuye la reacción del apoyo puntual a los pilares principales de la torre mediante sus dos patas traseras, como se explica posteriormente en el [apartado 2.3](#).
En cuanto a la reacción horizontal Este/Oeste, las dos torres son el único punto de bloqueo en esa dirección. Esto se debe a que en el lado opuesto de la cubierta se sitúan dos péndulos de 50m de altura de la calle de Padre Damián, los cuales están articulados en sentido Este/Oeste y no pueden asumir estas reacciones horizontales. La tercera pata del trípole es la encargada de transmitir dicha reacción desde el apoyo al pilar delantero de la torre.
En la dirección Norte/Sur, la cubierta se une a la corona en un punto situado en el centro de vano del cordón superior de esta última; transmitiéndose la reacción de este

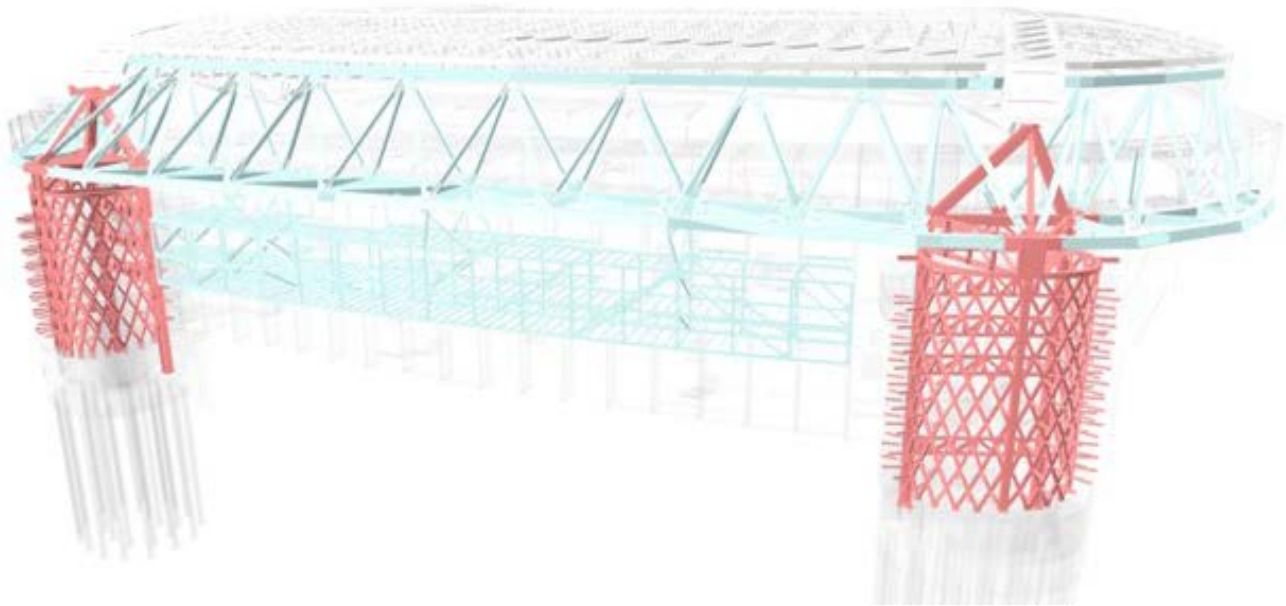


Figura 2. Vista espacial de la estructura de las torres.

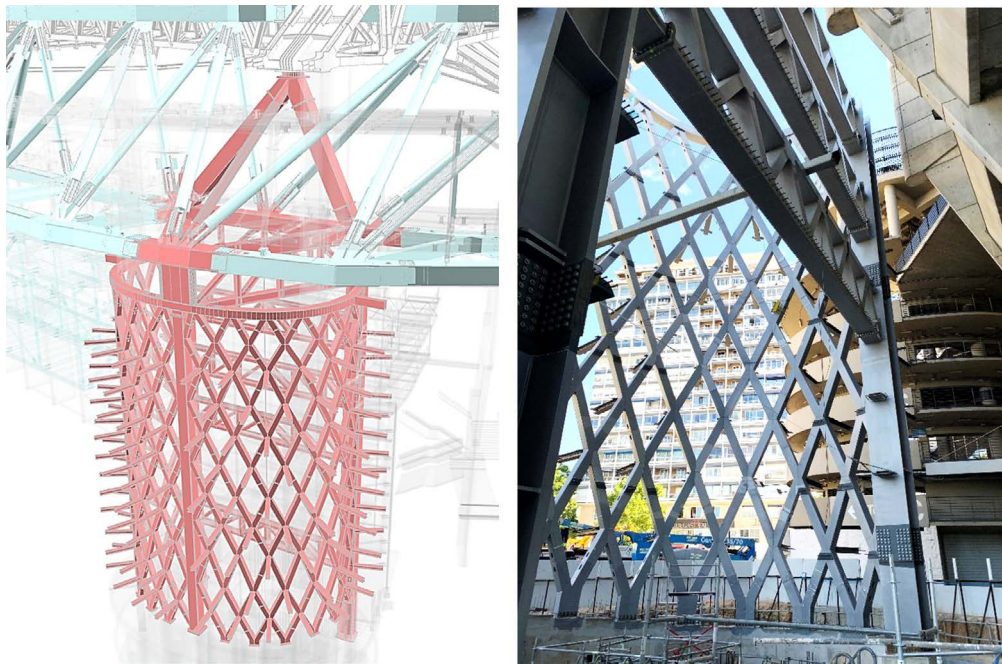


Figura 3. Vista espacial de la estructura de la torre B.

sentido a través de la corona hasta las torres, y de estas, hasta la cimentación.

- *Como pilares del mega pórtico del Oeste*
Todas las cargas provenientes de la corona y la viga museo deben llegar a la cimentación de las torres. Para ello, las torres y la corona forman un mega pórtico en sentido Norte/Sur. Este pórtico se materializa maclando las diagonales y cordones inferiores de la corona con los pilares principales de las torres, formando un único conjunto.
- *Como torres de evacuación*
Finalmente, tiene que cumplir su función como elemento de evacuación y acceso, conectándose a los forjados del

estadio existente. Para ello, alberga en su interior núcleos de ascensores y escaleras; y proporciona, en su parte exterior, el apoyo y la geometría adecuada a las rampas de evacuación que se conectan a los nudos de las diagonales que forman la piel o malla de la torre.

2.2. Aparatos de apoyo.

El apoyo de las cerchas atirantadas de la cubierta se realiza en las torres mediante una única rotula esférica por cercha. Con este aparato de apoyo también se transfieren las fuerzas horizontales en dirección Este-Oeste de la propia cubierta. En la dirección Norte-Sur tienen una capacidad de movimiento de $\pm 100\text{mm}$ ya que, como se ha indicado anteriormente, los

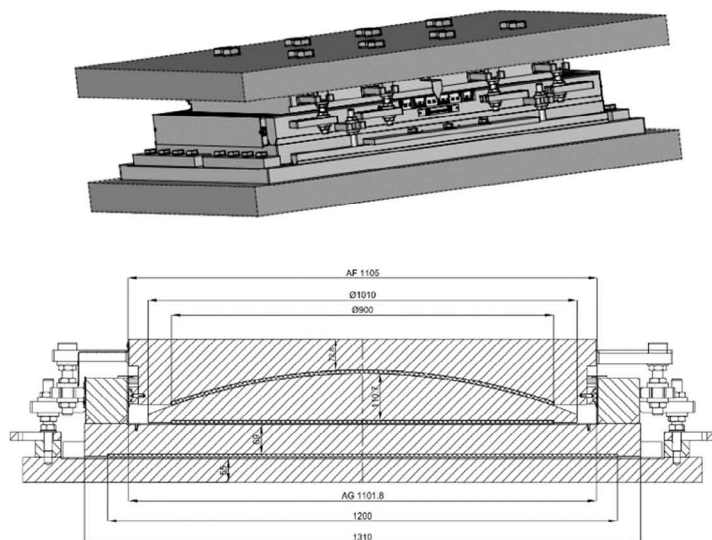


Figura 4. Apoyo esférico.

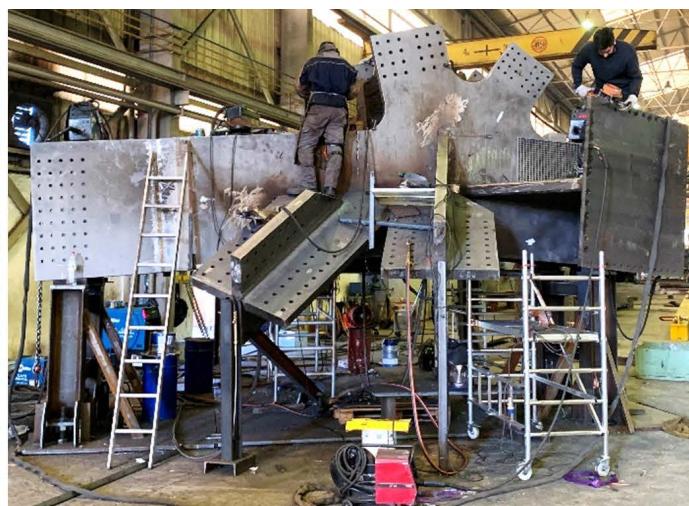
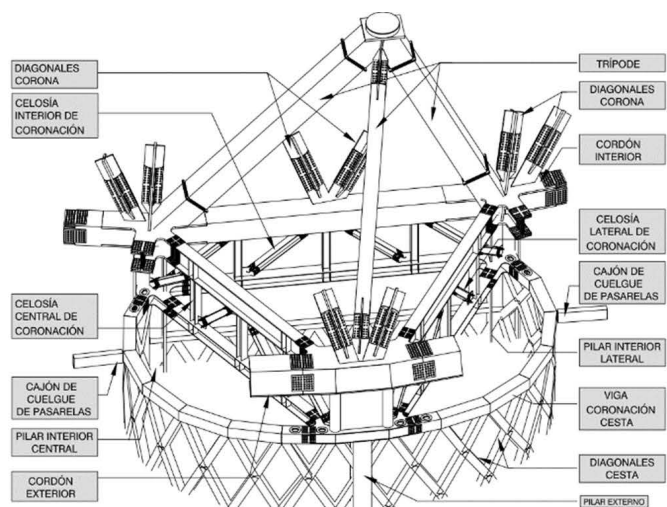


Figura 5. Trípode de conexión -izquierda- y nudo principal de conexión Corona-Torre-Trípode -derecha-.

bloqueos Norte/Sur de la cubierta están situados en el centro del cordón superior de la corona del edificio Oeste y de la del Este. Las dimensiones del apoyo son 1600x1600mm y la máxima carga vertical en Estado Límite Último transmitida por este apoyo es de 6700t, mientras que la máxima carga horizontal es de 375t. Cada apoyo pesa más de 4t.

Estos apoyos estaban preparados para estar liberados o bloqueados en todas las direcciones dependiendo de las necesidades de cada fase de montaje. Para ello cuentan con dos superficies de deslizamiento, la provisional, que permite el movimiento o bloqueo en todas las direcciones y la final sobre la que queda funcionando el aparato en su situación definitiva y que solo permite el movimiento en dirección Norte/Sur.

Para su instalación, el apoyo se subió con la primera dave de la cercha atirantada de la cubierta a la que iba atornillada. De cara a garantizar su correcto contacto con las chapas a las que va unido, éstas fueron mecanizadas en toda su superficie. Finalmente, los apoyos fueron soldados en su parte inferior contra la chapa superior del trípode.

2.3. Trípode.

El trípode es el elemento intermedio entre apoyo y torre por el que ha de transmitirse la gran carga concentrada que se recibe en los apoyos a través de los extremos de las cerchas atirantadas de la cubierta. Su geometría está condicionada por la posición del apoyo, situado en la intersección del plano que forman los dos pilares principales interiores de la torre con el plano vertical que pasa por el eje de la cercha atirantada.

El trípode está formado por dos barras traseras y una delantera, como se muestra en la figura 5. Las dos barras traseras están contenidas en el plano de los soportes principales interiores de la torre, por lo que reciben la totalidad de la carga vertical de la cubierta, mientras que la delantera o exterior únicamente tiene como misión la transferencia de las fuerzas horizontales.

Las barras traseras son cajones de 1200x1200x60 mm que se maclan bajo la chapa del aparato de apoyo. Tienen axiles de compresión que superan las 55 000 kN de compresión y momentos superiores a los 500 mt.

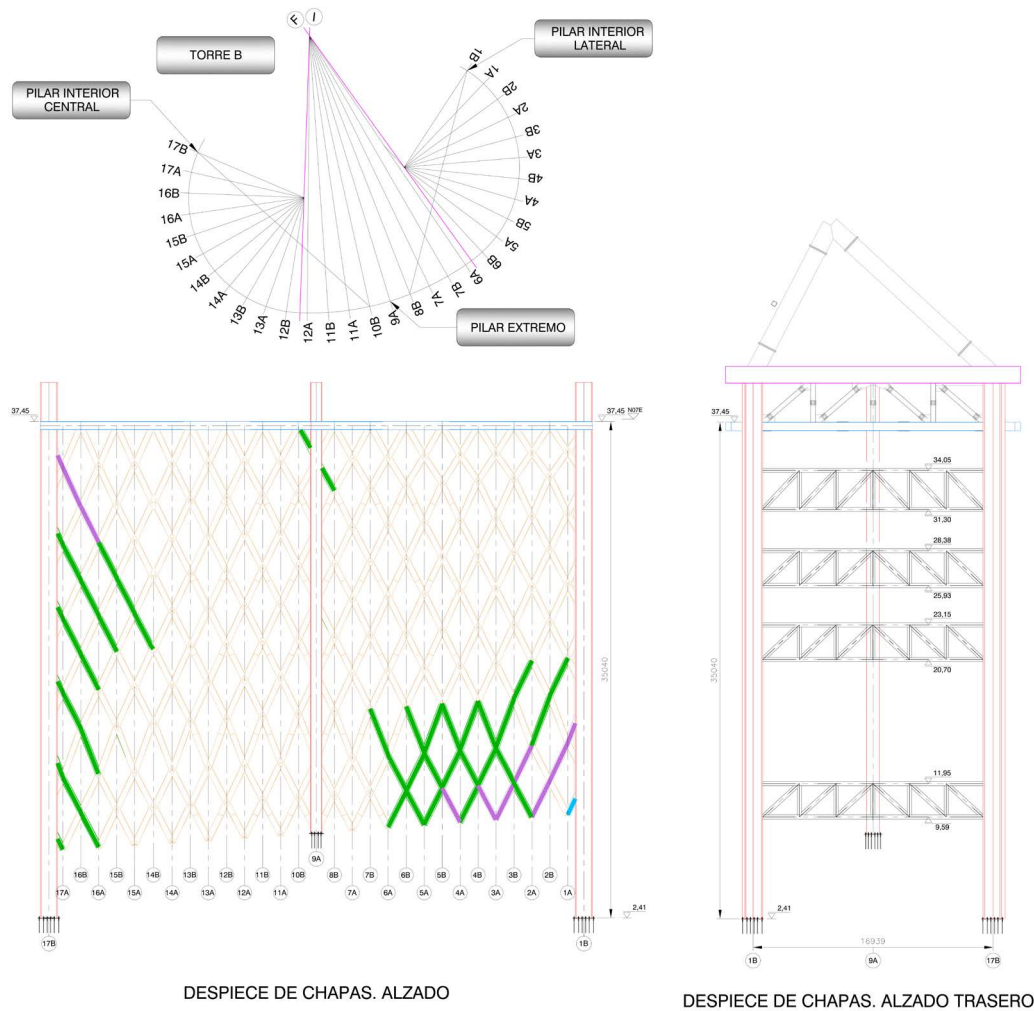


Figura 6. Pilares principales.

En cuanto a la barra delantera o exterior del trípode, se trata de un tubo circular de dimensiones 711x20 mm. Se consideró articulada al trípode y sus máximos axiles son de 6 000 kN, pudiendo ser de tracción o compresión dependiendo de las combinaciones de las distintas acciones variables.

Los nudos inferiores de las tres barras del trípode forman parte de los cordones inferiores de la propia corona dando lugar a nudos a los que acomenten hasta 8 barras. Son sin lugar a duda, los nudos más complejos de la corona.

Con el fin de introducir de manera más homogénea las cargas horizontales, se disponen tres cerchas verticales formando una planta triangular, cuyos cordones superiores son a su vez diagonales del plano inferior de la corona. De esta manera se consigue un diafragma que reparte las fuerzas horizontales de corona y cubierta, y las introduce en la viga superior y las diagonales de la cesta.

2.4. Pilares y malla.

La morfología de la cesta consiste en la unión de tres sectores tangentes de cilindro de diferente radio, cortados a su vez con un plano vertical en la cara interior de la torre. La forma global de la malla se consigue mediante diagonales contenidas en las caras de los cilindros. Uniendo los nudos de intersec-

ción entre estas diagonales se genera una geometría helicoidal necesaria para empotrar en estos nudos las ménsulas que forman las rampas exteriores. En el plano vertical interior, se colocan unas celosías Warren, que además de generar un pórtico con los dos pilares principales interiores cierran el circuito de la torre, dando soporte a los forjados interiores.

En las aristas del corte de los cilindros por el plano vertical se colocan los soportes verticales principales interiores, que son los encargados de transmitir a la cimentación la mayoría de la carga de la cubierta y gran parte de la corona. El pilar exterior se sitúa en el punto central del segundo sector circular de la cesta.

Los pilares interiores tienen secciones dobles T armadas, con chapas de hasta 120 mm de espesor y un canto (a caras interiores de alas) y ancho de 1200 mm, empleando aceros S355K2, S460ML, S690QL1. Estas secciones son necesarias ya que por el pilar más cargado se transmiten hasta 100 000 kN. El pilar exterior es un cajón armado de 900x900 con chapas de 60 mm de espesor.

En cuanto a la malla formada por diagonales, tiene como misión principal la de absorber los esfuerzos tangenciales que aparecen en la cesta debido a su función como pilar del mega pórtico. El modo en el que estas fuerzas recorren la cesta determina la distribución de espesores de las diagonales, las cua-



Figura 7. Montaje en blanco de tramos consecutivos de las cestas.

les en todos los casos debían tener una dimensión exterior de 400x400 mm. Aún teniendo estas dimensiones fijadas se ha tenido que realizar un importante esfuerzo de uniformización de espesores de cara a facilitar la realización de los nudos.

Con vistas al cumplimiento de los plazos de ejecución acordados, la totalidad de la estructura se planteó con uniones atornilladas en Obra. Adicionalmente, los requisitos arquitectónicos de la malla, provocaron que estas uniones tuviesen que ser ocultas. Por ello, las uniones de las diagonales se materializaron mediante chapas de testa con tornillos interiores dispuestas en el punto medio de la barra, de manera que se minimizaban los momentos. La unión estaba compuesta por 12 tornillos que para poder ser apretados requerían de la ejecución de ventanas en las caras no frontales de los cajones de la malla. En los puntos donde se ejecutaban las ventanas se reforzaron las paredes de los cajones con objeto de recuperar el área perdida por la propia ventana. Estas uniones se dispusieron de manera que se dividían los cilindros en 9 sectores, separados en 2 alturas cada sector, por lo que cada cesta se dividía en 18 partes en taller. Una vez apretados los tornillos y comprobados sus pares de apriete se procedió a sellar las ventanas para garantizar su estanqueidad.

Para asegurar la correcta ejecución de la geometría de la malla, se realizaron en taller premontajes en blanco de paneles, y una vez comprobada dicha geometría se mandaron a obra donde se unieron a los pilares.

Las uniones de los pilares principales interiores se hicieron mediante cubrejuntas, mientras que el exterior se solucionó con una placa frontal.

2.5. Proceso de montaje.

El complejo sistema de montaje de la cubierta requería iniciar el avance en voladizo de las cerchas atirantadas en fase

muy temprana, por lo que era fundamental que la torre estuviera ejecutada hasta el trípode para poder comenzar con la ejecución de la cubierta.

El montaje se realizó colocando en primer lugar los pilares principales, cuyos tramos se iban subiendo a la vez que se unían las cerchas interiores del plano vertical de la torre. Una vez conformado este pórtico, se montaron los sectores cilíndricos de la cesta hasta llegar a coronación. Finalmente, se montó el trípode y los apoyos de cubierta, momento en el que se estaba en disposición de iniciar la construcción de la cubierta por avance en voladizo desde esta nueva estructura.

Como se ha mencionado anteriormente, todas las uniones fueron atornilladas y las piezas elevadas mediante grúas.

La parte superior de la cesta y el trípode ya llevaban preparados los muñones para la posterior conexión de los elementos de la corona, que se ejecutó en una fase muy posterior a la del montaje de la cubierta.

3. CORONA

La corona es el principal elemento del Edificio del Oeste. Se sitúa entre las dos torres de evacuación y tiene una luz que varía entre los 125 en su parte interior y los 145m en la exterior.

La arquitectura imponía una geometría compleja a este gran elemento, ya que su cordón inferior exterior estaba condicionado a la geometría de la fachada, el inferior interior por la posición de las costillas existentes del estadio y el superior debía coincidir con la huella de la cubierta.

A través de su función como pórtico junto con las torres de evacuación, la corona cumple con los siguientes propósitos:



Figura 8. Montaje de los sectores cilíndricos de la cesta -izquierda- y torre durante la construcción -derecha- Vista general -inferior-. Foto derecha e inferior cedidas por cortesía de 'Nuevo Estadio Bernabéu' - Copyright © 2024 Nuevo Estadio Bernabéu.

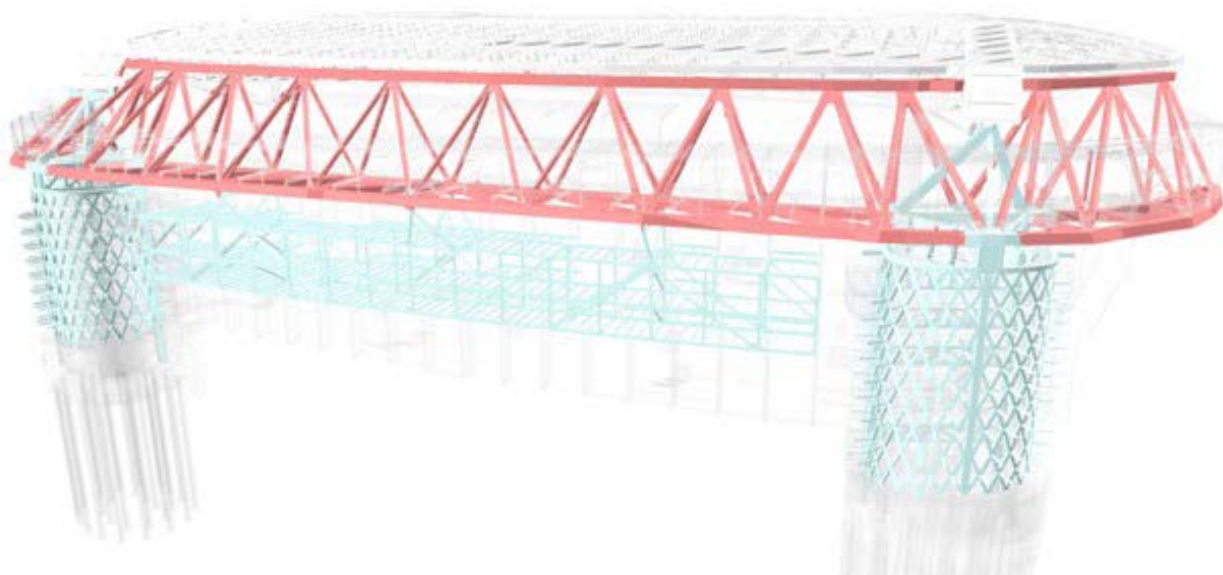


Figura 9. Vista espacial de la estructura de la Viga Corona.

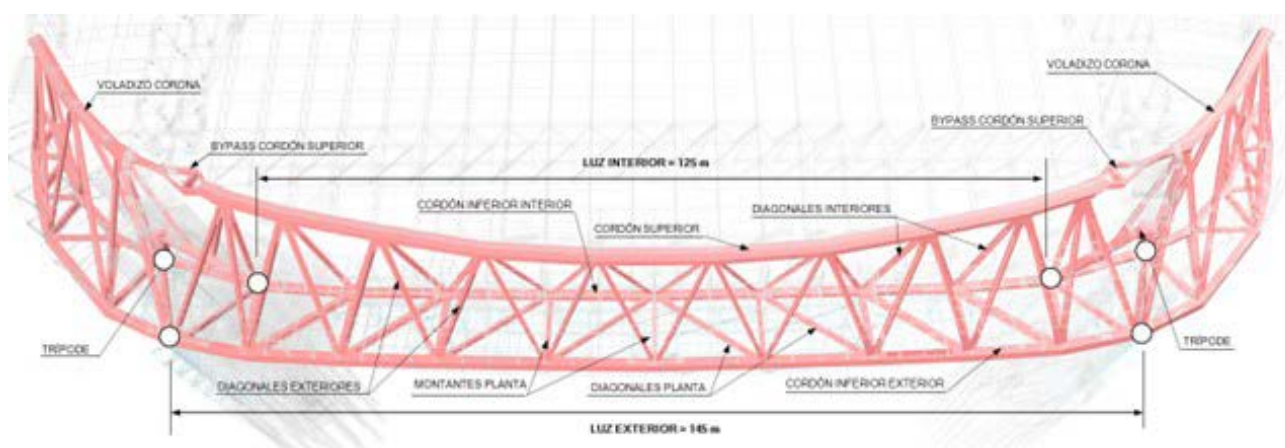


Figura 10. Luces de los cordones de la corona.

en primer lugar, sirve para recibir la reacción horizontal del apoyo norte-sur de la cubierta en el oeste. En segundo lugar, para albergar dos niveles de forjados en su interior. En tercer lugar, como elemento del que colgar la viga museo y finalmente, como punto de anclaje de la fachada. Todo ello integrándose en la geometría de la cubierta fija a la que tiene que esquivar puntualmente en su cordón superior en el entorno de los tripo-des para permitir el apoyo de las cerchas atirantadas.

Finalmente, cabe destacar que la estructura presenta sendos voladizos que se prologan a cada lado de las torres, 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.

3.1. Diseño de la corona.

Se configura una cercha espacial triangular de 15.7m de canto entre ejes, con un cordón superior en cajón rectangular

de 2.0 x 1.2m y dos inferiores de 1.20 x 1.20m, las diagonales en alzado son tubulares Ø711 y Ø914 con espesores de hasta 100mm, mientras las diagonales y montantes en planta entre cordones inferiores se resuelven mediante elementos armados en I de 1.20m de canto. Se emplea acero S355 en la mayoría de los elementos que componen la corona, salvo en determinados nudos que se emplean calidades superiores.

La luz de la corona no es igual en ambos cordones inferiores, dado que los soportes interiores se encuentran mucho más próximos que los exteriores. Esto provoca que los esfuerzos se concentren mucho más en las diagonales interiores que en las exteriores. Este hecho hace que la corona tenga, por cargas gravitacionales, una mayor deformación vertical en el cordón exterior, debida tanto a la torsión generada por la geometría curva en planta, así como la mayor luz del cordón exterior.

3.2. Nudos

Los nudos de la corona son elementos complejos a los que al menos llegan cuatro barras además del cordón. Para posibilitar la confluencia de barras y favorecer las uniones atornilladas de

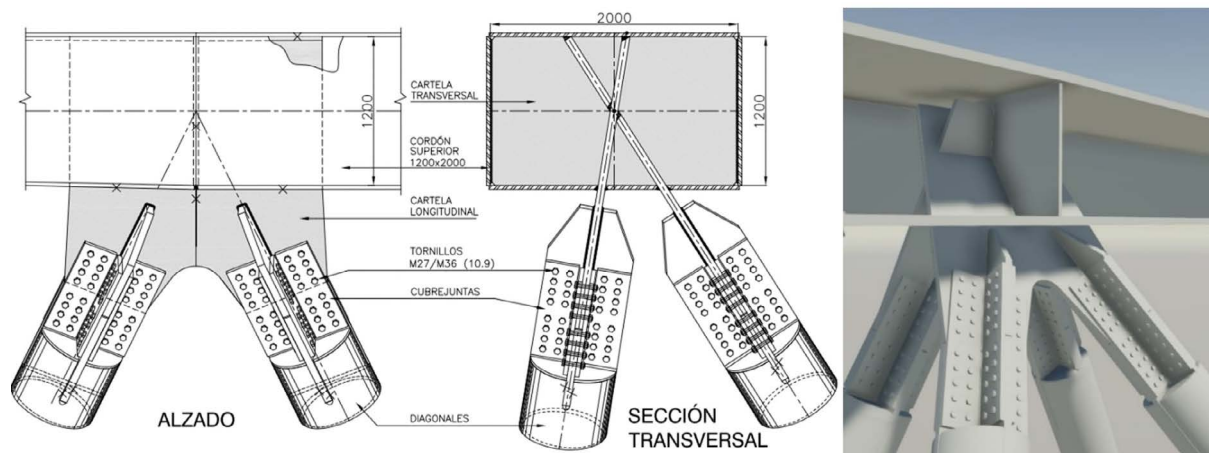


Figura 11. Nudos de la corona.



Figura 12. Ejecución de nudo corona en taller.

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 una de las dos chapas es la que finalmente entra 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 los cajones, 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 fueron selladas para garantizar la estanqueidad del cordón.

Dada la complejidad de los nudos y los esfuerzos tan importantes que se debían transmitir entre diagonales y cordones, los espesores de las chapas resultantes eran ya considerables. Para reducir al máximo esos espesores, se utilizó aceros de alta resistencia en dichas cartelas 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, llegando a espesores de 100mm, se cuidó especialmente la geometría de las soldaduras de cada chapa, intentando minimizar en todo lo posible los volúmenes de soldadura a ejecutar.

3.3. Sensibilidad esfuerzos en función de los parámetros del terreno

Desde el equipo de geotecnia del proyecto se aportaron dos grupos de valores para la rigideces equivalentes del terreno a considerar en un modelo Winkler de la cimentación pilotada. Estas propiedades se denominaron “Mohr-Coulomb” y “Hardening Soil”, y representaban diferentes propiedades en función de las hipótesis en el cálculo tomadas por el equipo geotécnico.

Este hecho implicó tener en cuenta varios modelos simultáneamente, ya que si visualizamos el conjunto de torres y corona como un gran pórtico, el grado de empotramiento del

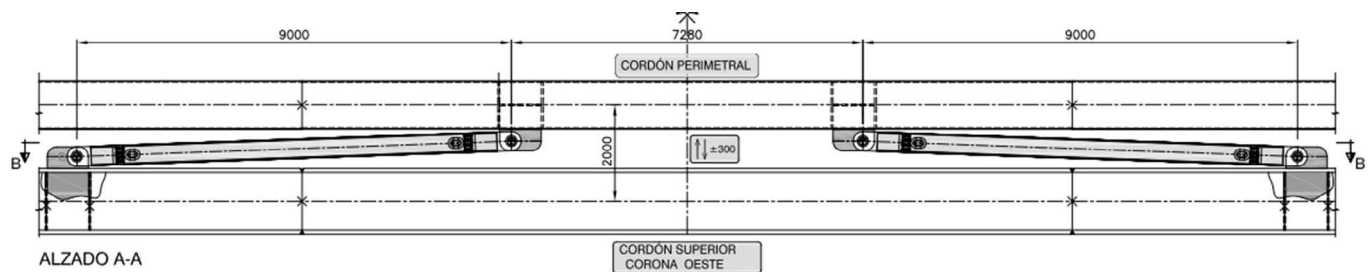


Figura 13. Bielas de bloqueo Norte/sur entre Corona y Cubierta.

mismo en sus apoyo, así como su grado de restricción horizontal eran diferentes en cada una de las hipótesis.

Para tener acotadas las implicaciones de estas diferencias de rigidez de los apoyos se hicieron cuatro modelos con las siguientes propiedades:

- Modelo Mohr-Coulomb
- Modelo Hardening Soil
- Modelo Hardening Soil x 10
- Modelo rígido, sin muelles y con apoyo vertical y horizontal en parte inferior del pilote, y horizontal en encajado.

De este análisis de sensibilidad se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las reacciones horizontales globales (dirección N-S) no varían significativamente, siendo su diferencia máxima del 5% entre modelos. Fuera del pórtico (E-O) apenas se aprecia variación alguna.
- Hay una variación máxima del 40% en el momento del pórtico (eje hacia el interior del estadio) entre Mohr-Coulomb y Hardening-soil x10. La diferencia entre Mohr-Coulomb y Hardening-Soil es del 20 %.
- En el momento fuera del pórtico, la diferencia es menor del 8%.
- La variación de esfuerzos en cabeza de los soportes interiores de la cesta, así como en el centro de vano de la corona es muy baja.
- La diferencia máxima de movimientos en la corona, así como en la viga museo es del 5%.

Teniendo en cuenta estas conclusiones, parecía que las propiedades del terreno no tenían gran influencia salvo en los

esfuerzos de la corona, para lo que fue necesario hacer una verificación de la misma con diferentes modelos para cada una de las hipótesis de cimentación.

3.4. Bloqueo Norte/Sur de la cubierta en Corona.

Como parte del esquema estático de la cubierta, esta requiere unos bloqueos 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 Oeste, esta coacción horizontal entre ambas estructuras se materializó 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, rótulas esféricas situadas en los bulones extremos permiten que estas bielas se acomoden a movimientos diferenciales perpendiculares a su eje.

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 la cubierta, 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.

3.5. Apoyo de la fachada.

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

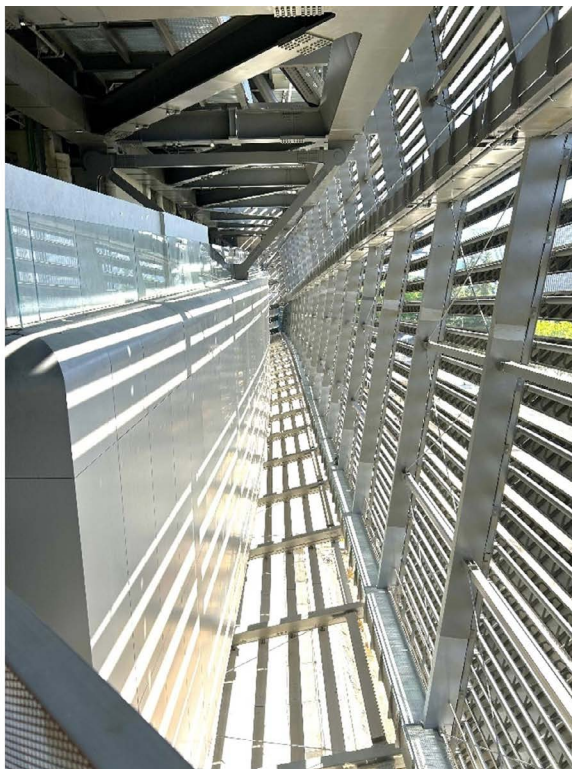
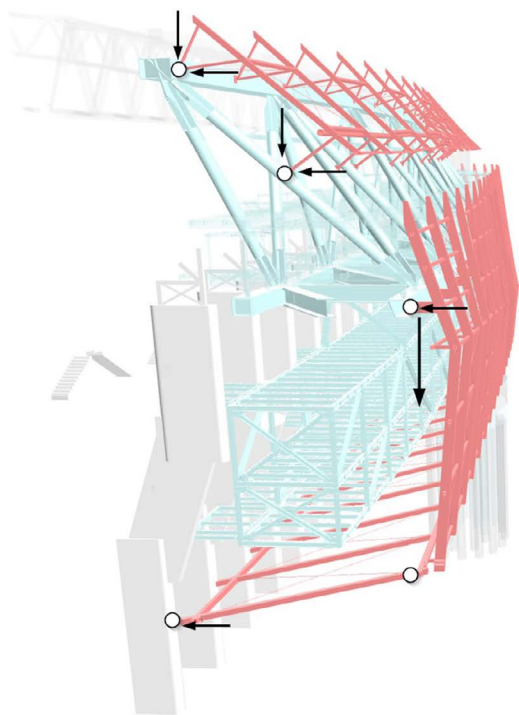


Figura 14. Esquema general conexión de la envolvente exterior del estadio con el Edificio Oeste.

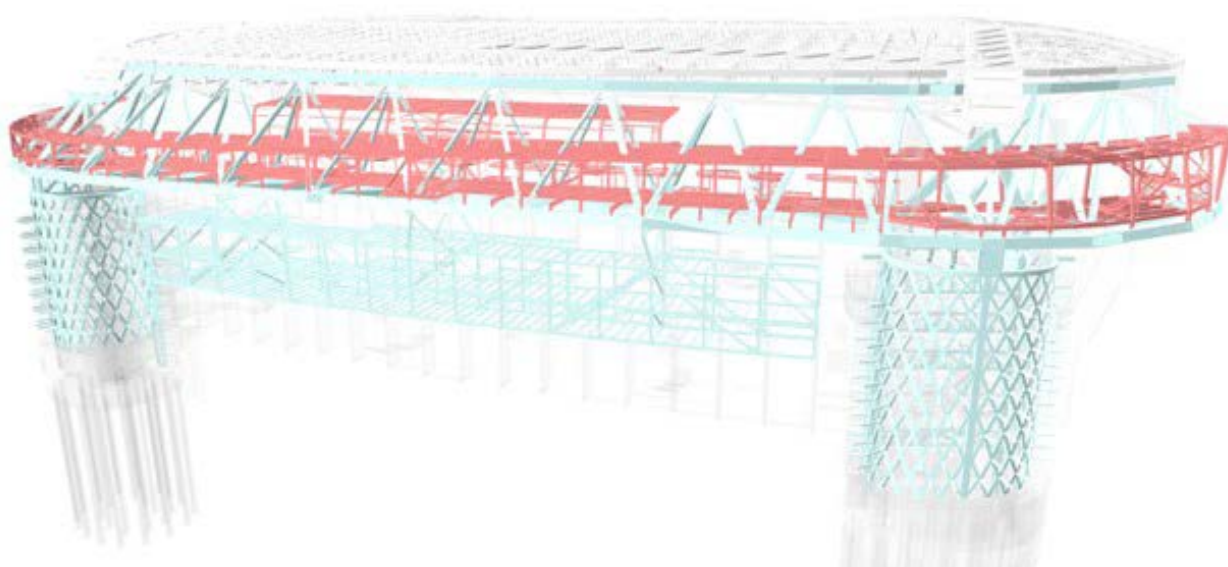


Figura 15. Vista espacial de los forjados en el interior de la corona.

La estructura principal de la fachada intermedia e inferior se resuelve mediante costillas que cuentan con un apoyo superior a nivel del cordón inferior de la corona encargado de recoger las fuerzas principales, tanto verticales y horizontales. Además, disponen de un apoyo inferior, dotado de una biela en su extremo, que se conecta a las costillas del estadio existente, transmitiendo solamente cargas horizontales. Ver [figura 14](#).

Respecto a la fachada superior, la estructura principal se materializa como un pórtico biarticulado, que se conecta al cordón superior en su apoyo más elevado; y a un punto in-

termedio de las diagonales exteriores en su apoyo inferior, transmitiendo en ambos fuerzas verticales y horizontales.

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

3.6. Forjados de la corona

En el interior de la corona se encuentran dos niveles de forjados, el N09 y el N10. El nivel inferior, destinado fundamen-

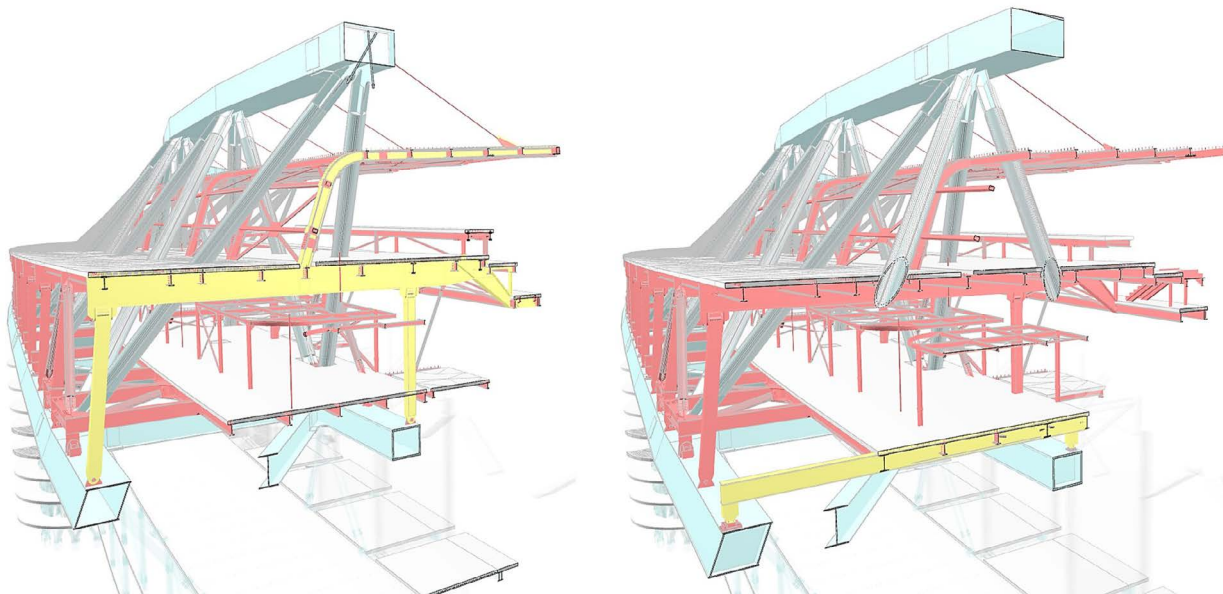


Figura 16. Forjados en el interior de la corona.

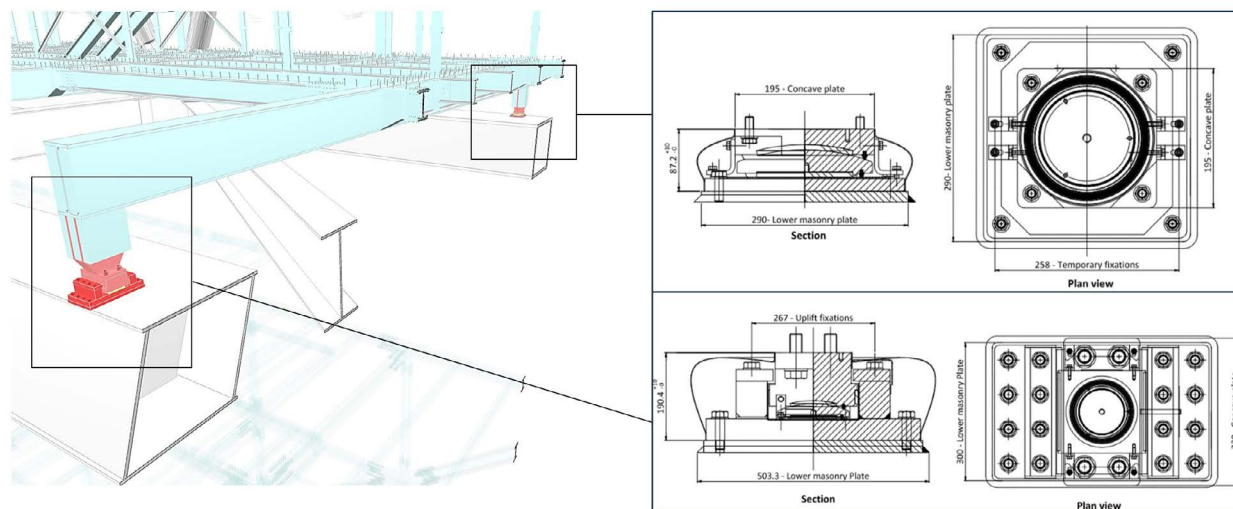
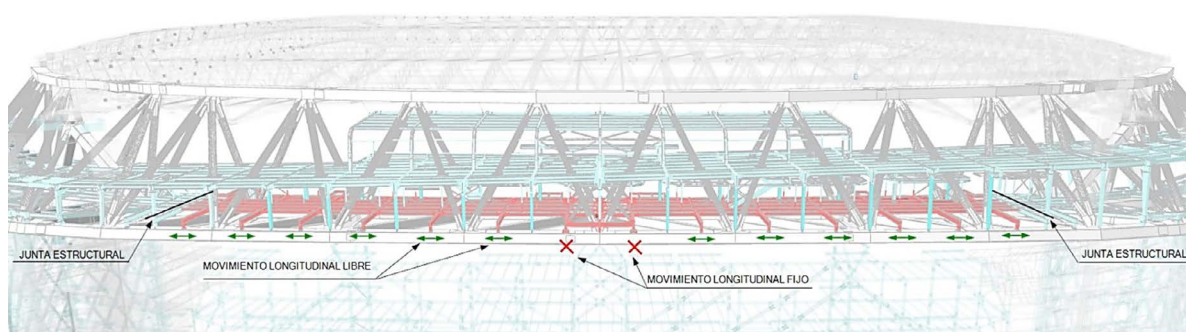


Figura 17. Apoyos de pórticos bajos.

talmente a servicios, y el superior, conocido como Skywalk, que es un forjado de cota variable que recorre perimetralmente el estadio. En su parte central, los dinteles de los pórticos de este nivel superior se prolongan en voladizo generando una viga de graderío. Además, en el centro de vano de dicho dintel nace una estructura de cubierta atirantada al cordón superior de la corona, que, junto con la extensión anterior, conforman el espacio denominado Skybar.

Como se observa en la imagen anterior, 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. Se hicieron coincidir los pórticos altos con los nudos y con el centro de vano entre nudos de cordones, 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.

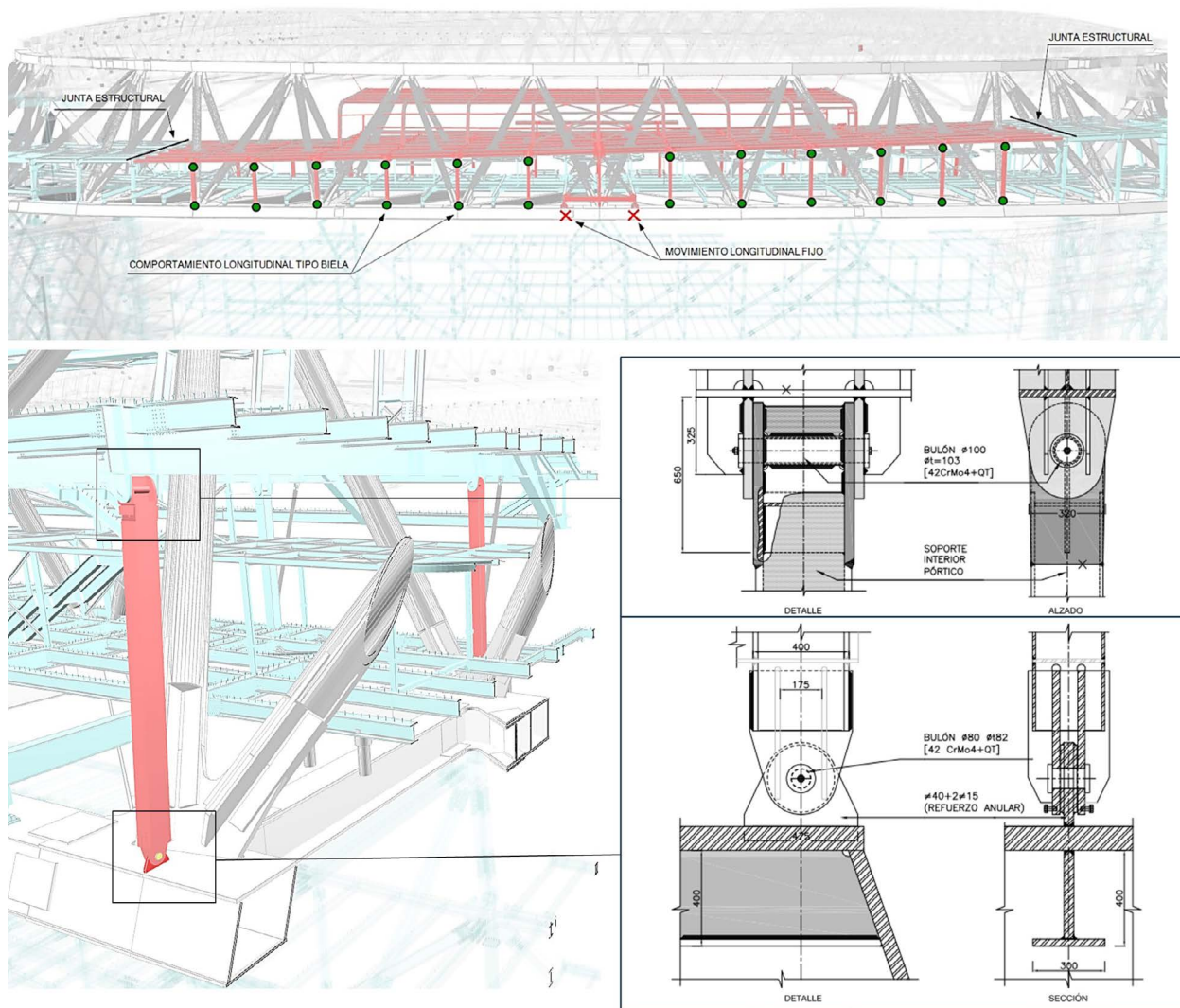


Figura 18. Apoyos de pórticos altos.

El mayor reto del diseño en estos pórticos era independizar estos forjados de las deformaciones de la corona, pues el orden de magnitud de éstas, del orden de 40 cm en centro de vano, impedía un dimensionamiento sensato de los pórticos. El objetivo era evitar la transmisión de rasante entre la corona y los forjados, efecto que haría inviable 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 entre los apoyos descrita anteriormente.

En los pórticos bajos, se resolvió este problema con apoyos deslizantes en longitudinal, con un punto fijo central evitando de esta manera la transmisión de rasantes longitudinales por el descenso de la corona (ver figura 17). En la dirección del pórtico, se fijó el apoyo en el cordón exterior y se liberó en el cordón interior, estando también articulados para el giro en el plano del pórtico; de forma que el pórtico no se veía afectado por el descenso diferencial entre el cordón exterior y el interior de la corona (figura 18).

En los pórticos altos, en dirección longitudinal se resolvió con una doble biela con rótulas tanto en la parte inferior como en la superior, fijándose a la corona en el punto central con un apoyo en delta. En la dirección transversal, se articuló la base, pero se mantuvo el nudo rígido del pórtico en el nudo superior.

3.7. Premontaje en blanco

Como se ha visto 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 industrial 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 se cumplía con las tolerancias exigidas para el montaje final.

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 cu-

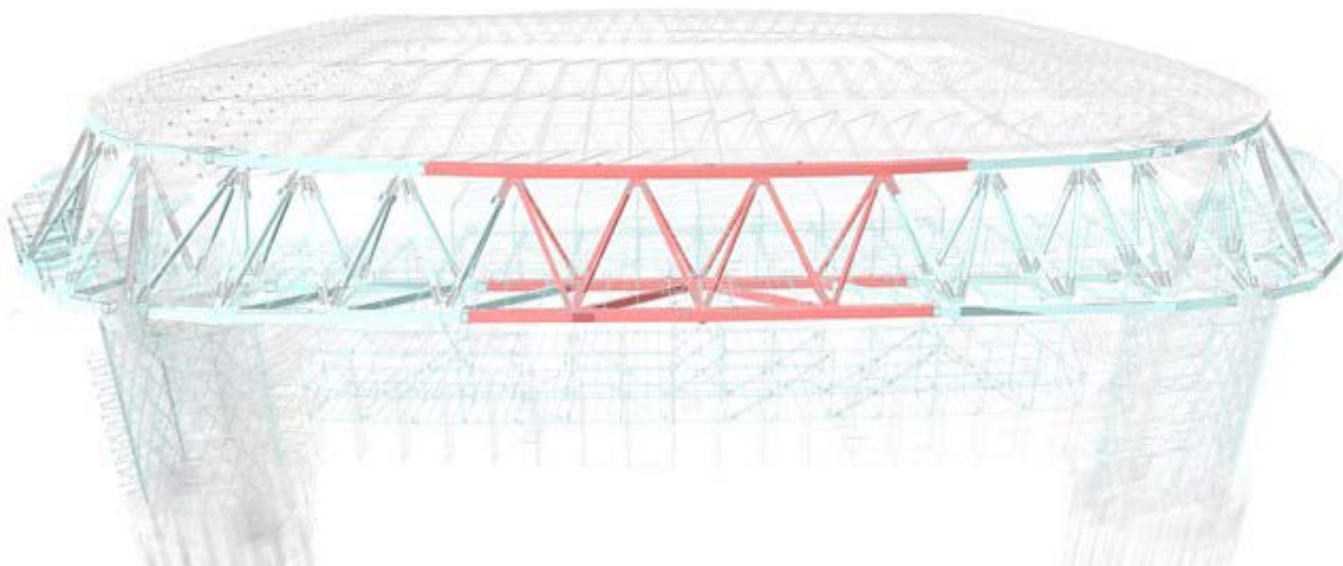


Figura 19. Módulo de corona con premontaje en blanco.

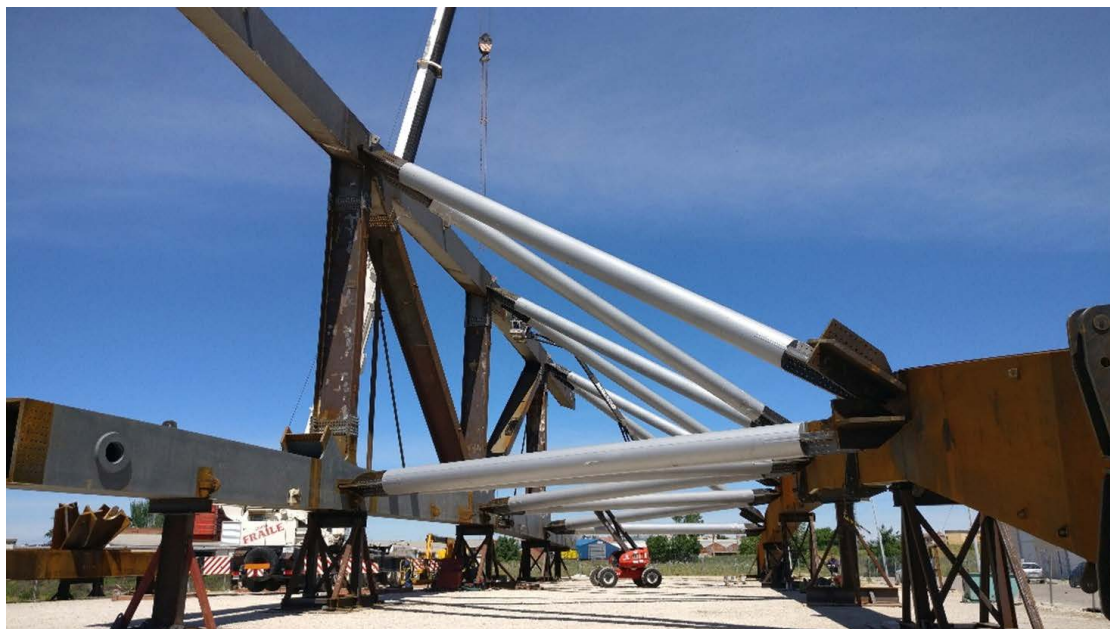


Figura 20. Premontaje en blanco de módulo de corona en taller.

brejuntas de todas las diagonales, se procede a su desmontaje y su traslado a obra para el ensamblaje definitivo.

3.8. Procedimiento de montaje.

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 27m de altura, todas cimentadas directamente al suelo, pero las interiores debían esquivar la plataforma de montaje elevada. Tenían unas dimensiones en planta de 2,9x2,2m.

Todas las torres disponían en cabeza de unos yugos que permitían el apoyo articulado de las piezas de los cordones inferiores de la corona y además estaban provistas de gatos para el posterior desapeo y entrada en carga de la corona una vez finalizado el montaje.

En primer lugar, se constituyó la cercha horizontal que componen los cordones inferiores de la corona. Colocando piezas desde los muñones dejados en las cestas hacia el centro desde ambos lados. Finalmente, se cerró en el centro 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.



Figura 21. Montaje corona. Izado de cordón superior mediante grúas. Foto cedida por cortesía de 'Nuevo Estadio Bernabéu' - Copyright © 2024 Nuevo Estadio Bernabéu.

Para desapear la corona se pusieron en carga los gatos de los yugos 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.

Finalmente, una vez desapeada la corona, se procedió al montaje de los pórticos de los forjados de su interior.

4. VIGA MUSEO

Este conjunto arquitectónico consta de un volumen de 105 m de longitud, 10m de canto y 7.50m de ancho que alberga tres plantas colgadas de la corona, adoptando el nombre del uso previsto para este espacio. Este elemento debía tener un diseño que permitiera el acceso desde el estadio existente en la mayor parte de su longitud, a pesar de que las luces de su apoyo estaban enormemente de las luces entre costillas del estadio existente.

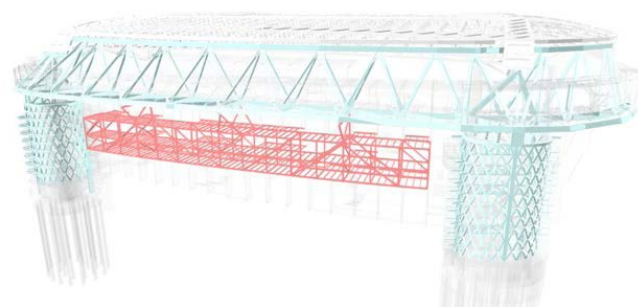


Figura 22. Vista general 3D de la Viga Museo.

4.1. Esquema estructural

La viga museo está formada por dos planos de mega-celosis Pratt, uno exterior y otro interior que conforman el perímetro de este elemento, presentando una ligera curvatura en planta para adaptarse a la geometría del estadio. Entre estas dos celosías se colocan tres niveles de forjados, correspondientes a los cordones inferiores, intermedios y superiores de esta celosis.

La distribución de montantes de las mega-celosis viene condicionada por la posición de las costillas existentes, para

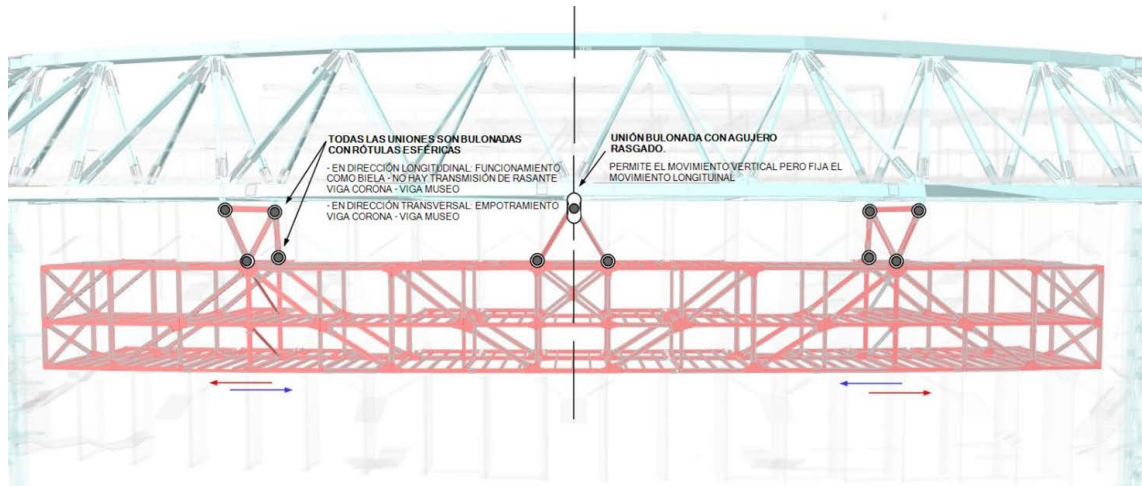


Figura 23. Esquema de grados de libertad de la estructura de cuelgue de la Viga Museo.

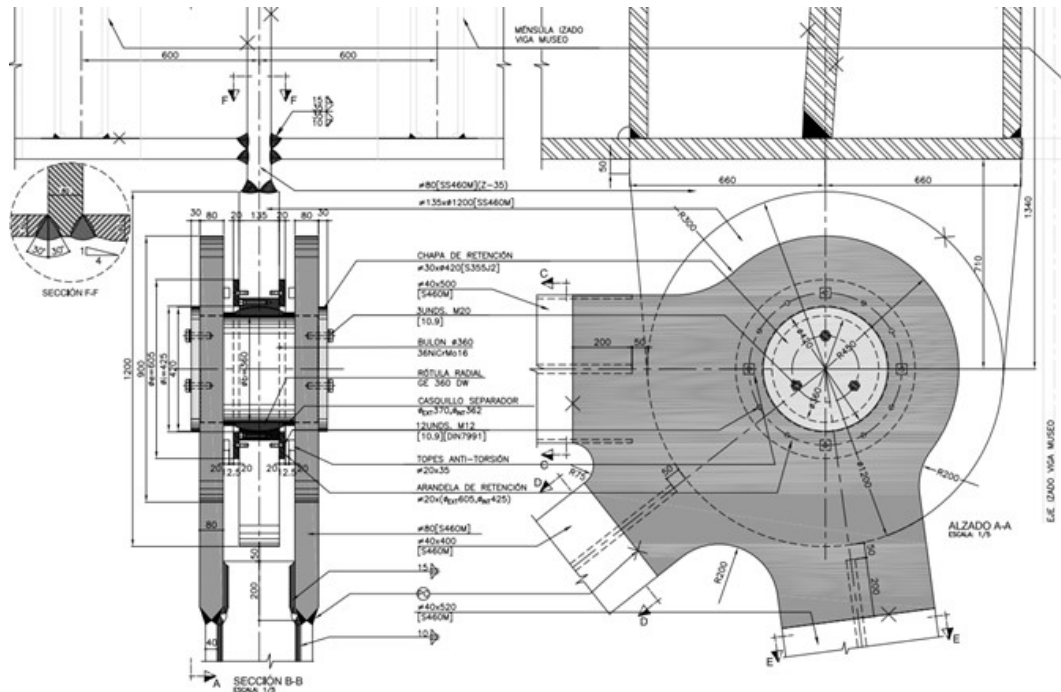


Figura 24. Cuelgue vertical y bloqueo transversal entre viga museo y corona.

mejorar la permeabilidad entre la estructura existente y crear amplios pasillos entre ambos elementos.

De cara a minimizar los esfuerzos en la misma, se colocaron los cuelgues a 1/5 de la longitud total coincidiendo con un nudo de la viga museo (determinado por las costillas existentes del estadio) y debiendo hacer coincidir en este caso con el nudo de la corona, el cual tuvo que ajustarse ligeramente.

Como es la tónica general de la obra, este elemento se ha montado mediante uniones atornilladas. La mayoría de los cordones son perfiles HEB/HEM, que se unen mediante cubrejuntas a los nudos en las proximidades de estos últimos.

4.2. Cuelgue viga museo. Independencia de viga museo con Corona.

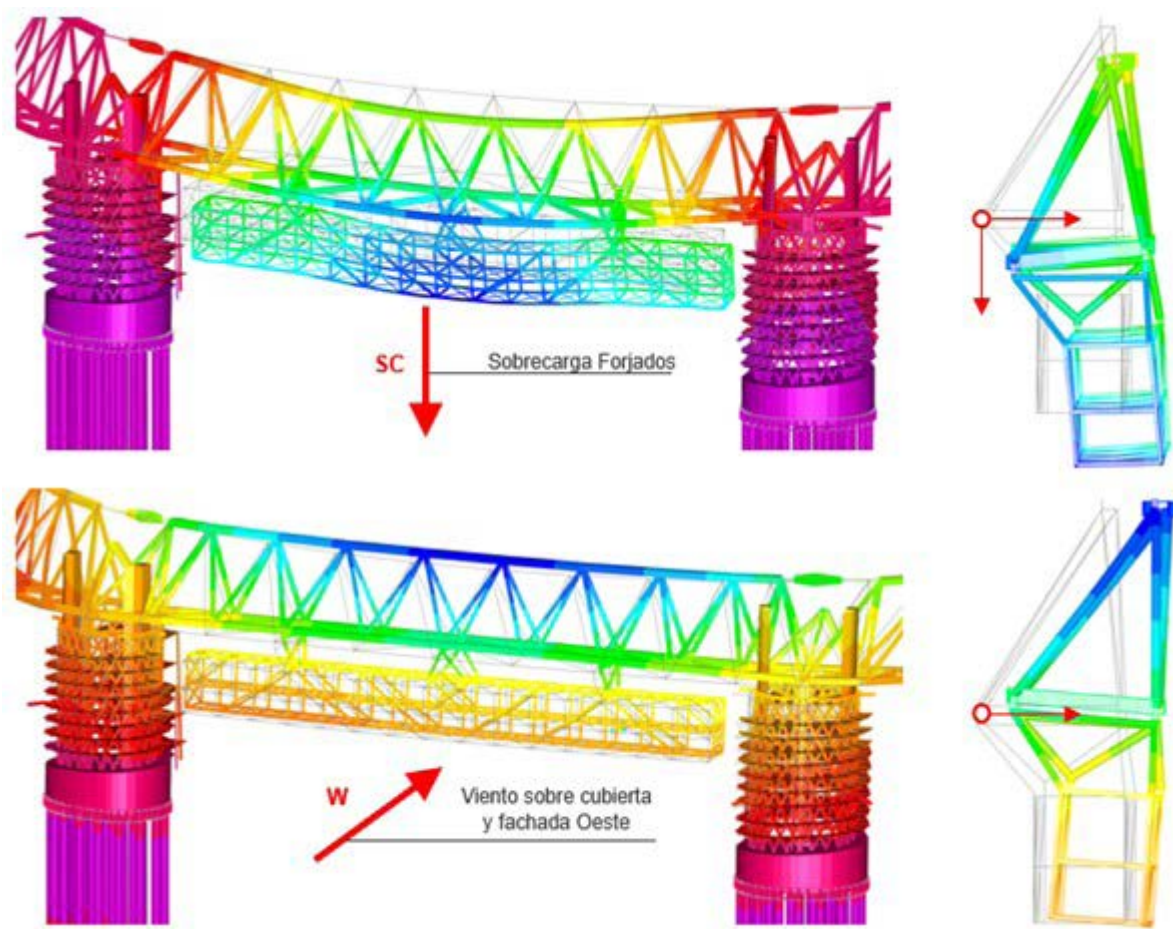
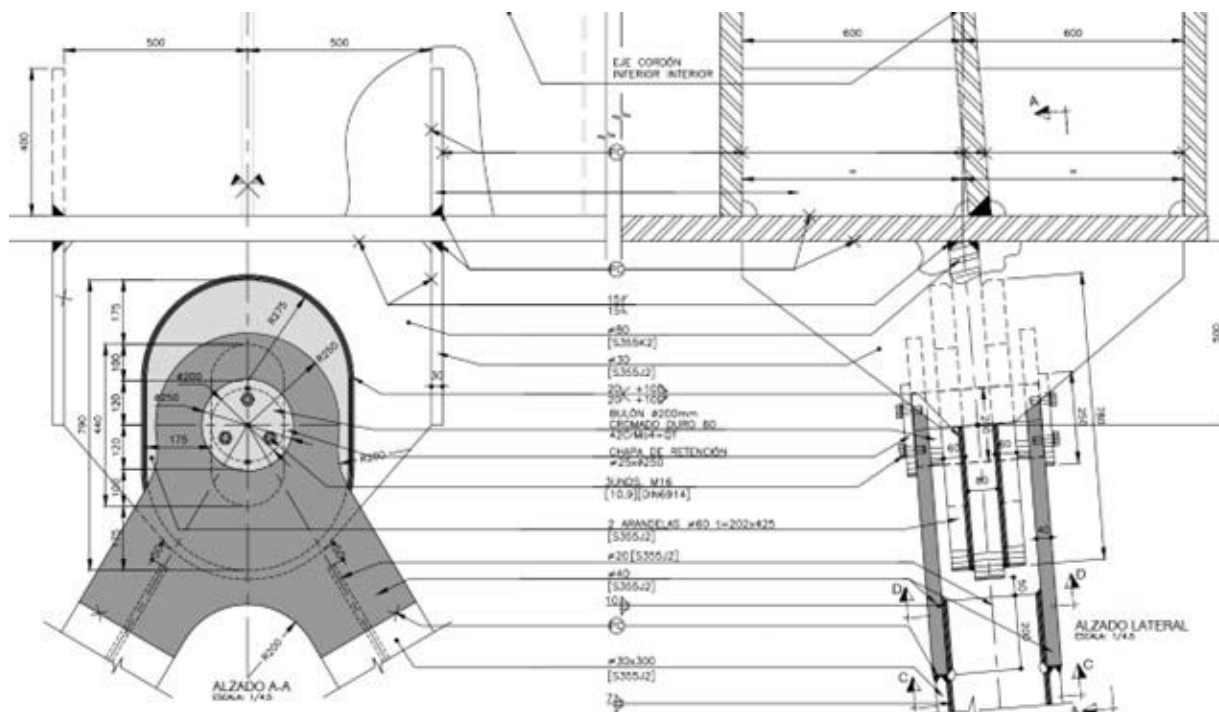
Para el cuelgue de la viga Museo, se ha buscado un diseño que independizara lo máximo posible el comportamiento de esta

respecto a la corona, asegurando un comportamiento puramente isostático.

El sistema elegido para resolverlo consiste en conectar las dos estructuras en dos puntos, que dan estabilidad tanto vertical como transversal, mientras que la coacción horizontal longitudinal de la viga museo se produce en un tercer punto en los nudos centrales de la corona.

Los cuelgues verticales se localizan en nudos de los cordones inferiores de la corona y aprovechan las chapas de rigidización interior utilizadas en cada nudo para descolgar en vertical los puntos de conexión. Todas las conexiones son bulonadas. Para asegurar la perfecta articulación de estos cuelgues, se han dispuesto rótulas esféricas libres de mantenimiento en cada uno de estos nudos, funcionando los cuelgues como una triangulación de barras articuladas.

En el bloqueo longitudinal central, para garantizar que no haya transmisión de cargas verticales, el detalle se realiza



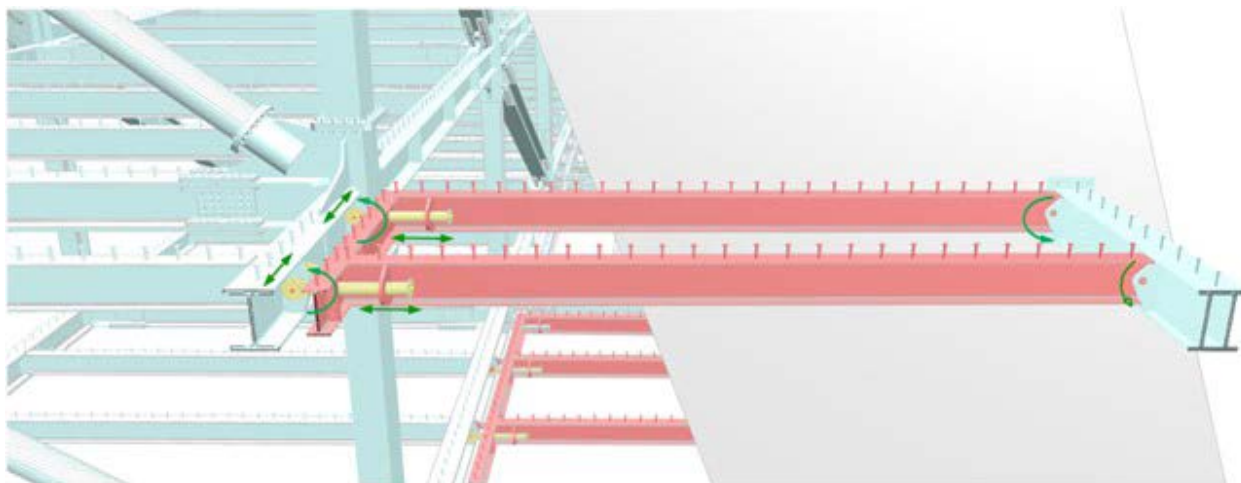


Figura 27. Forjados basculantes-deslizantes entre viga museo y forjados existentes.

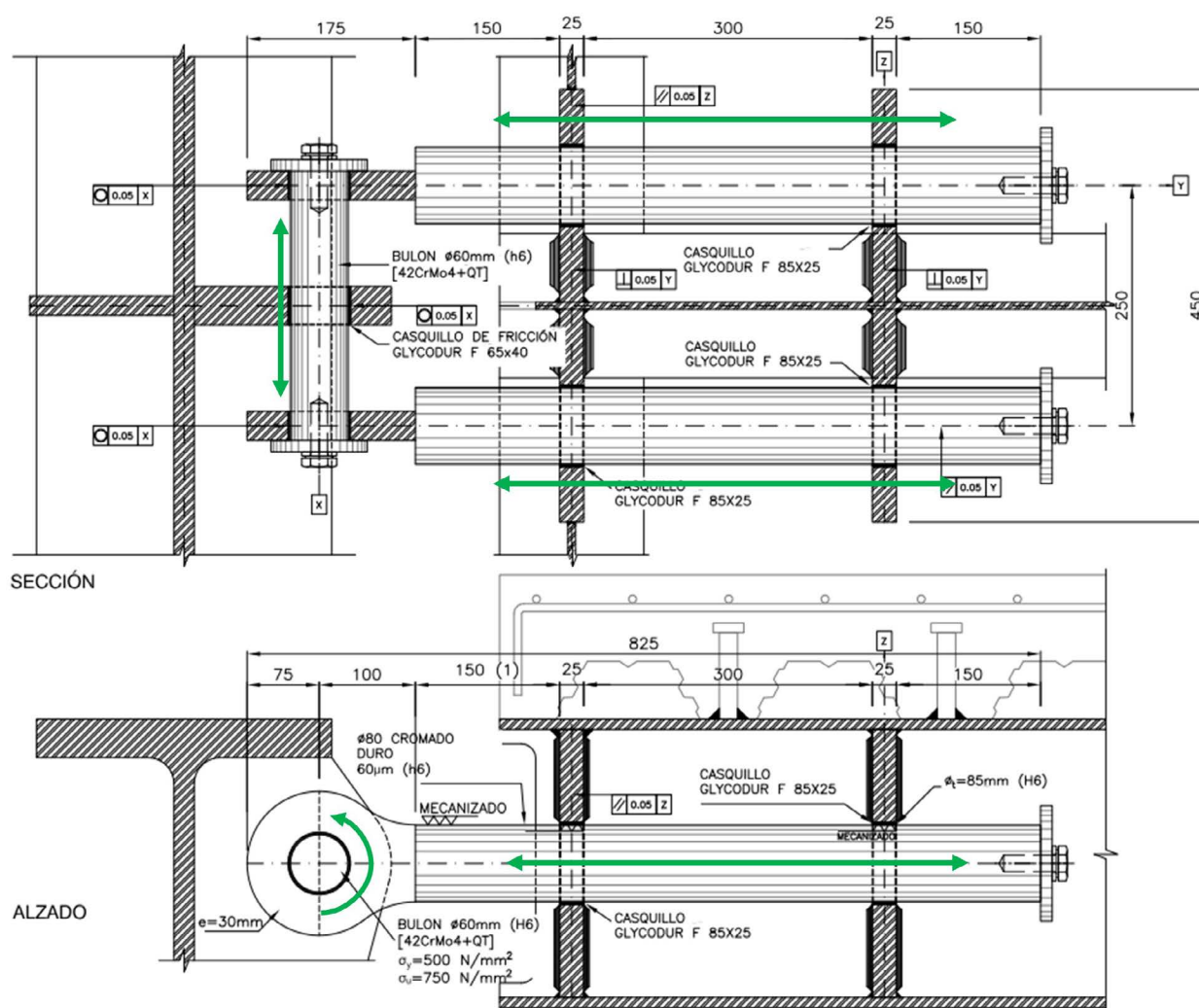


Figura 28. Detalle conexión forjados basculantes-deslizantes.

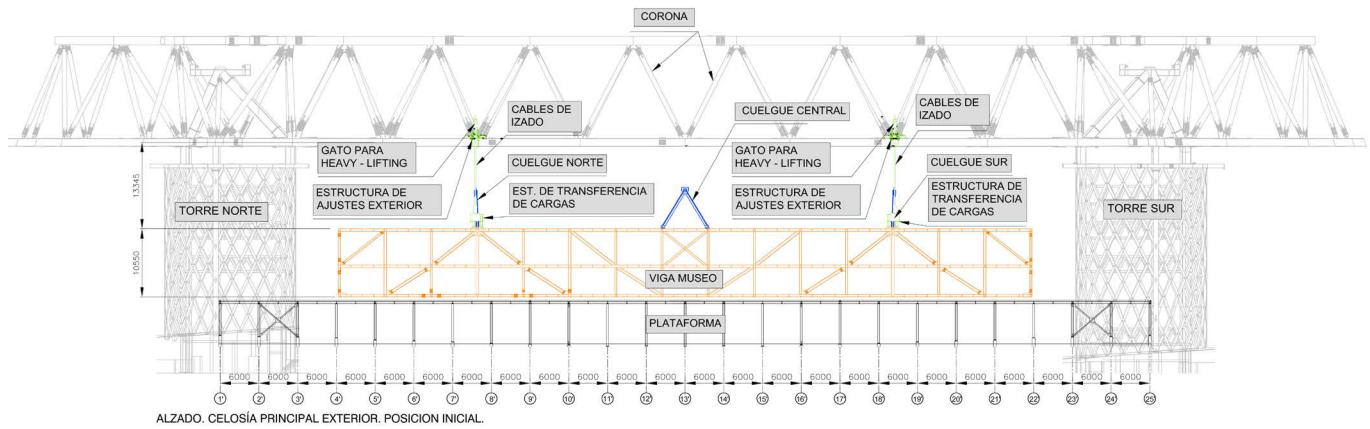


Figura 29. Esquema izado viga museo.

mediante bulones alojados en cartelas que bajan de la corona con taladro rasgado en la dirección vertical. La holgura vertical dispuesta fue de $\pm 100\text{mm}$ y es suficiente para absorber las deformaciones diferenciales provocadas por las sobrecargas tanto en la corona como en la viga museo.

Esta independencia entre los elementos tiene múltiples ventajas, como la separación entre las diferentes fases de construcción, evitando así posibles procesos de transferencia activa de carga, y adicionalmente simplifica el análisis estructural.

Como el ancho inferior de la corona es más grande que el ancho de la viga museo, estos cuelgues longitudinales no están en un plano vertical, sino que están en unos planos inclinados formados por cordones de corona y cordones de viga museo.

Todas las barras que forman los cuelgues horizontales y verticales son perfiles en H que permiten fácil acceso a las uniones atornilladas necesarias para un fácil montaje de las barras durante el izado de la viga museo.

4.3. Independencia de Viga Museo con los forjados existentes.

Uno de los principales retos del diseño de este elemento era la conexión entre los forjados del edificio existente y los de la viga museo, los cuales en cuanto a condiciones de apoyo son muy diferentes, y por tanto también en deformaciones. Para garantizar la conexión entre ambas estructuras se diseñan unos forjados basculantes, que son capaces de absorber los movimientos relativos de una y otra estructura.

Los movimientos verticales se absorben con giros mediante un sistema de doble rótula, dispuestas en cada uno de los extremos de los forjados (biela), mientras que los horizontales se permiten mediante el deslizamiento en un sistema de junta deslizante. La diferencia de cotas verticales por flechas que deben asumir los forjados basculantes va desde $+110/-40\text{mm}$ (positivo los descensos).

La magnitud del desplazamiento horizontal en dirección al estadio que debían asumir estas juntas era de $+145 / -45\text{mm}$ (positivo hacia el estadio) únicamente para sobrecargas. Sin embargo, el forjado se conectó antes de la colocación de cargas muertas en la corona y viga museo, por lo que finalmente el

corrido fue $+205 / -45\text{mm}$. En dirección longitudinal a la viga museo, los movimientos previstos son de $\pm 40\text{mm}$.

4.4. Procedimiento de montaje. Heavy lifting Viga Museo.

Para realizar el montaje de la viga museo se reutilizó la plataforma elevada que se había empleado en el montaje de las cerchas principales de la cubierta fija. Esto permitió trabajar en la estructura de la viga museo mientras se seguía teniendo acceso a los accesos oeste del estadio. Sobre esta plataforma se monta la estructura metálica de la viga museo mediante uniones atornilladas.

Una vez acabada la estructura metálica de la viga museo, así como la chapa plegada de los forjados colaborantes con la que se iba a levantar, se colocaron los gatos de izado sobre ménsulas ancladas a los cordones de la viga corona. A parte de realizar un cuidadoso replanteo para colocar estos gatos en la vertical de los puntos de izado, estos gatos estaban dotados de sistemas de ajuste de posición para poder realizar pequeños movimientos en planta y ajustar su posición de izado a la posición real de los puntos de cuelgue instalados en la viga museo. También permitían ligeros movimientos que facilitaron las conexiones finales a realizar.

Dado que la corona y la viga museo no tienen el mismo ancho entre cordones, fue necesario colocar una viga intermedia a modo de balancín en cada uno de los dos puntos de izado. Cada viga balancín recogía el cuelgue de dos de los gatos de izado. Por lo tanto, se utilizaron un total de 4 gatos de heavy lifting para realizar la operación. Por la posición del centro de gravedad de la viga museo con respecto a la corona, los gatos más cercanos al estadio recibían una carga 2.5 veces superior a la carga de izado de los gatos más exteriores al estadio. La horizontalidad de la estructura se garantizaba sincronizando el avance de los cables en cada uno de los 4 puntos.

El peso total de izado fue de 800t. La carrera total de izado fue de 14m.

Una vez llegada la viga museo a su posición definitiva, se procedió a conectar los cuelgues verticales y transversales. Para ello se extendieron las barras de los cuelgues que subían replegadas con la estructura de la viga museo. Se dispusieron

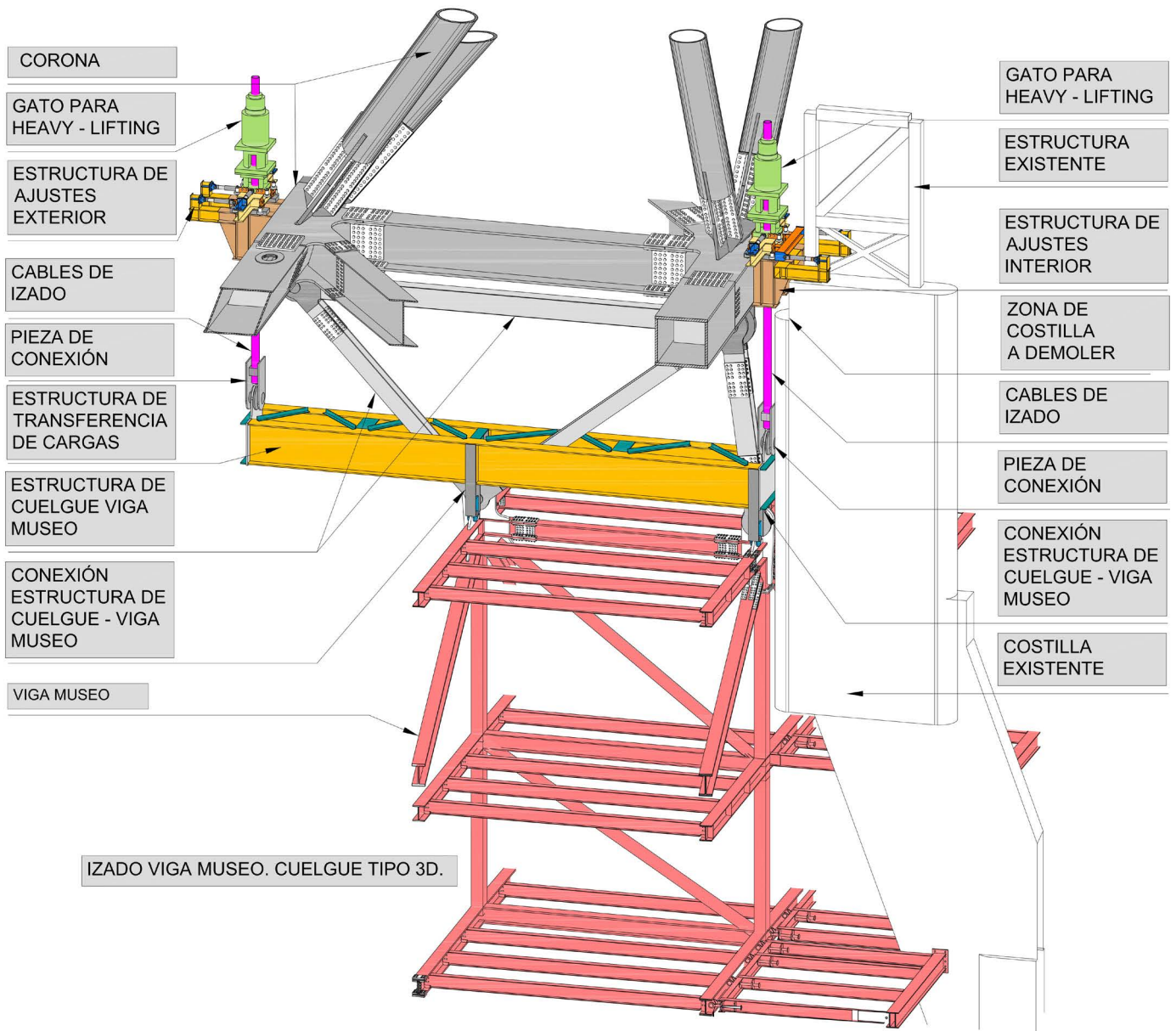


Figura 30. Sistema de cuelgue y viga balancín izado viga museo desde corona.

uniones atornilladas con cubrejuntas adyacentes a cada bulón con el objeto de que la unión final se produjese en esos tornillos viniendo los bulones ya introducidos en sus rótulas desde el taller.

Finalmente, se realizó la conexión longitudinal central quedando la viga museo con su esquema estático definitivo. Una vez realizadas todas las conexiones, se transfiere la carga a los elementos definitivos soltando ligeramente los gatos de izado.

5. CONCLUSIÓN

Se ha intentado explicar en este artículo la definición del proyecto y la construcción de esta estructura novedosa y como

se ha realizado la integración de las tres estructuras que lo componen.

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, queremos agradecer el apoyo de la asistencia de obra, Antonio Molina (Ayesa), del gerente José Luis Fernández Sánchez-Largo y sin duda de la obra, personalizada en 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 para todas las maniobras de izado fue imprescindible la colaboración de Juan Manuel Linero de BBR/FCC.



Figura 31. Conexión cuelgues verticales viga museo pendientes de realizar.

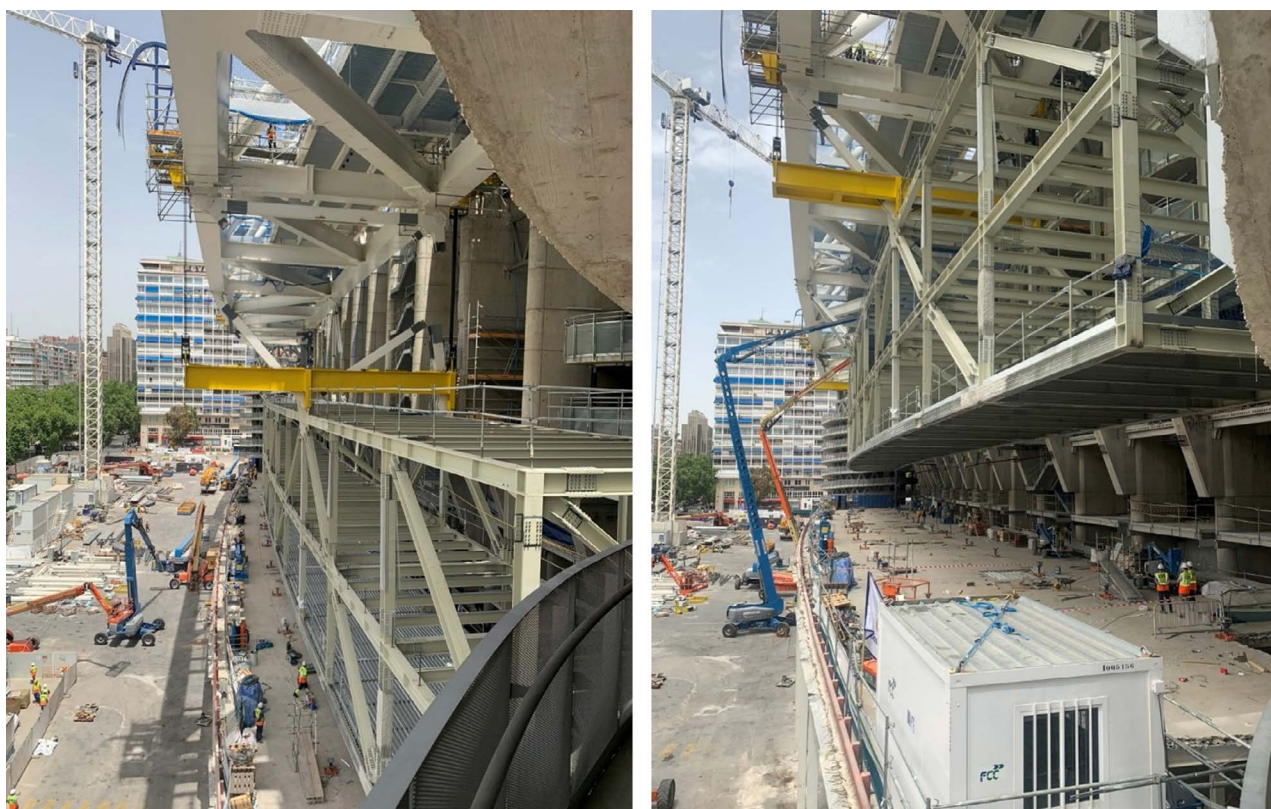


Figura 32. Visión de la Viga Museo antes y después del Heavy Lifting.

Referencias

- [1] EN 1993-1-1:2005/A1:2014- Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, CTN 140/SC 3, Brussels (n.d.)
- [2] EN 1993-1-8:2013- Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints. European Committee for Standardization, CTN 140/SC 3, Brussels (n.d.)
- [3] EN 1993-2:2006- Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 2: Steel Bridges. European Committee for Standardization, CTN 140/SC 3, Brussels (n.d.)
- [4] EN 1993-1-12:2006. Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S 700. European Committee for Standardization, CTN 140/SC 3, Brussels (n.d.)