

Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Estructura soporte del videomarcador

Renovation of the Santiago Bernabéu Stadium. Videoboard Support Structure

Eduardo Romero Rey^a, Tejani El Bannoudi^b y Rodrigo Burgos Valverde^c

^{a, b} Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR, S.A. (Madrid, España).

^c Arquitecto. FHECOR, S.A. (Madrid, España).

Recibido el 24 de noviembre de 2024; revisado el 25 de diciembre de 2024, aceptado el 15 de septiembre de 2025

RESUMEN

El videomarcador del Estadio Santiago Bernabéu es una pantalla electrónica con capacidad para reproducir imágenes de video en un anillo de 360°. Su altura es variable y oscila entre 6,58 m y 10,95 m. Para sostener estas pantallas, junto con el resto de las instalaciones, se ha diseñado una estructura suspendida de la cubierta. Uno de los principales desafíos en su diseño ha sido compatibilizar las deformaciones de la cubierta, tanto por sobrecargas como por los desplazamientos derivados de la posición cambiante de la cubierta móvil, con las estrictas limitaciones impuestas por el fabricante. Estas restricciones son fundamentales para garantizar la calidad de la imagen y la integridad del sistema, lo que ha condicionado por completo la solución estructural adoptada en cada zona.

PALABRAS CLAVE: Estructura metálica, colgada, izado, deformaciones, uniones atornilladas.

©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

The videoboard at the Santiago Bernabéu Stadium is an electronic screen capable of displaying video images on a 360° ring. Its height is variable, ranging from 6.58 m to 10.95 m. To support these screens, along with the rest of the installations, a structure suspended from the roof has been designed. One of the main challenges in its design has been reconciling the roof deformations caused by live loads and the displacements resulting from the shifting position of the retractable roof with the strict limitations imposed by the manufacturer. These restrictions are essential to ensuring image quality and system integrity, which has entirely conditioned the structural solution adopted in each area.

KEYWORDS: Steel structure, suspended, hoisting, deflections, bolted connections.

©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: err@fhecor.es (Eduardo Romero Rey)

Cómo citar este artículo: Romero, E., El Bannoudi, T., & Burgos, R. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Estructura soporte del videomarcador. *Hormigón y Acero*. 76(307):249-269. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4009>

1. INTRODUCCIÓN

Entre las distintas intervenciones estructurales llevadas a cabo para mejorar y renovar la imagen de uno de los estadios más emblemáticos del mundo, destaca la instalación de un videomarcador de 360° en el perímetro interior de la cubierta fija del estadio.

Este videomarcador tiene como principal objetivo modernizar el estadio, ofreciendo a los aficionados una nueva manera de disfrutar del fútbol, así como una experiencia inmersiva y completa. Además, se contempla su uso en una

amplia variedad de eventos de entretenimiento, tales como conciertos, congresos, eventos públicos y privados, competiciones de otros deportes, e incluso otro tipo de competiciones de Esports o Deportes electrónicos.

En todas estas actividades, el videomarcador juega un papel crucial para enriquecer la experiencia de los aficionados y espectadores que acuden a los diferentes eventos.

El presente artículo tiene como finalidad explicar y describir la estructura que soporta dicho videomarcador, así como detallar los desafíos y dificultades que surgieron durante su diseño y ejecución.



Figura 1. Diseño conceptual inicial del videomarcador. (Real Madrid).

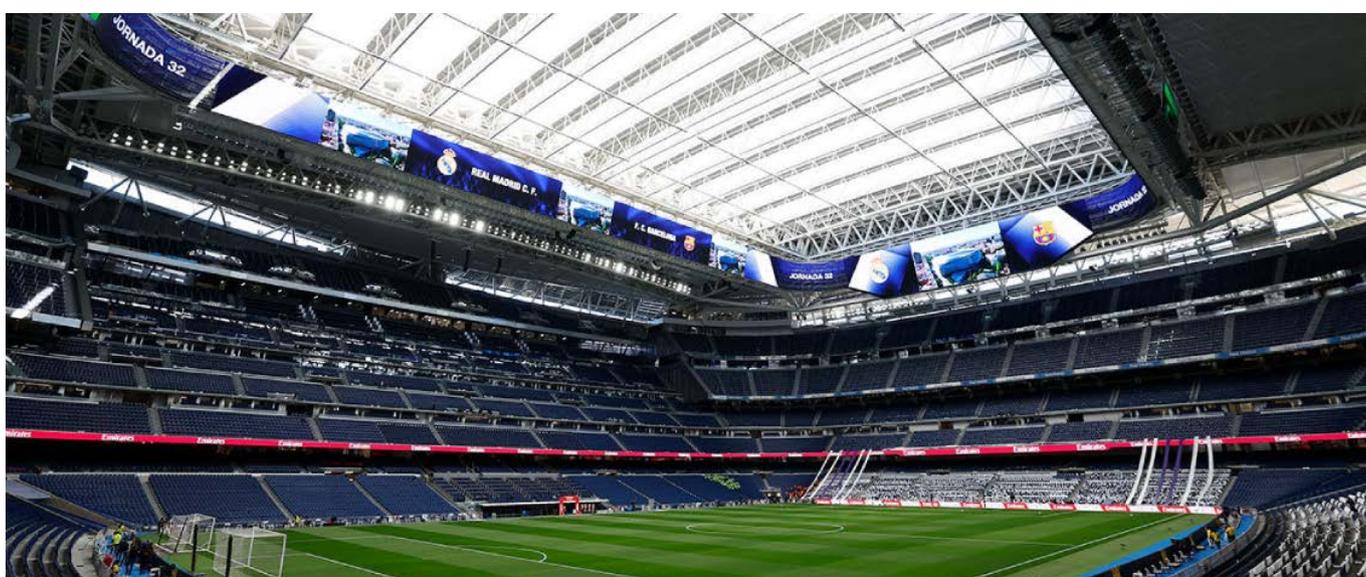


Figura 2. Diseño final del videomarcador. (Real Madrid)

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL VIDEOMARCADOR

En el diseño de un estadio moderno, contar con medios audiovisuales de calidad es fundamental, destacando especialmente el papel del videomarcador 360°. La tecnología de estos elementos está en constante evolución y, como era de esperar, ha evolucionado significativamente desde la solución propuesta en el proyecto de licitación de octubre de 2018, hasta su construcción en agosto de 2023.

Con objeto de adaptarse a esta evolución tecnológica y de diseño se ha realizado una actualización del videomarcador en septiembre del 2022, que es el que finalmente se ha construido.

En la [figura 1](#) se presenta el diseño conceptual inicial de dicho videomarcador, mientras que la [figura 2](#) se muestra el diseño final.

El videomarcador está compuesto por un halo 360° orientado hacia el campo, con una altura estándar de 6,58 m y máxima de 10,95 m en los fondos. Además del halo, se disponen 10 pantallas adicionales (tres en cada uno de los laterales y dos en cada fondo) dirigidas hacia los graderíos, para facilitar la visión de los graderíos superiores.

El videomarcador tiene en los fondos una longitud de 52,67 m, mientras que los laterales 114,08 m y están unidos por una zona curva de una longitud media de 18.50 m.

La superficie total de todas estas pantallas es de más de 3700 m², lo que representa una superficie mayor a la mitad del terreno de juego.

La estructura de soporte del videomarcador, además de cumplir esa función, sirve de soporte para diversas instalacio-

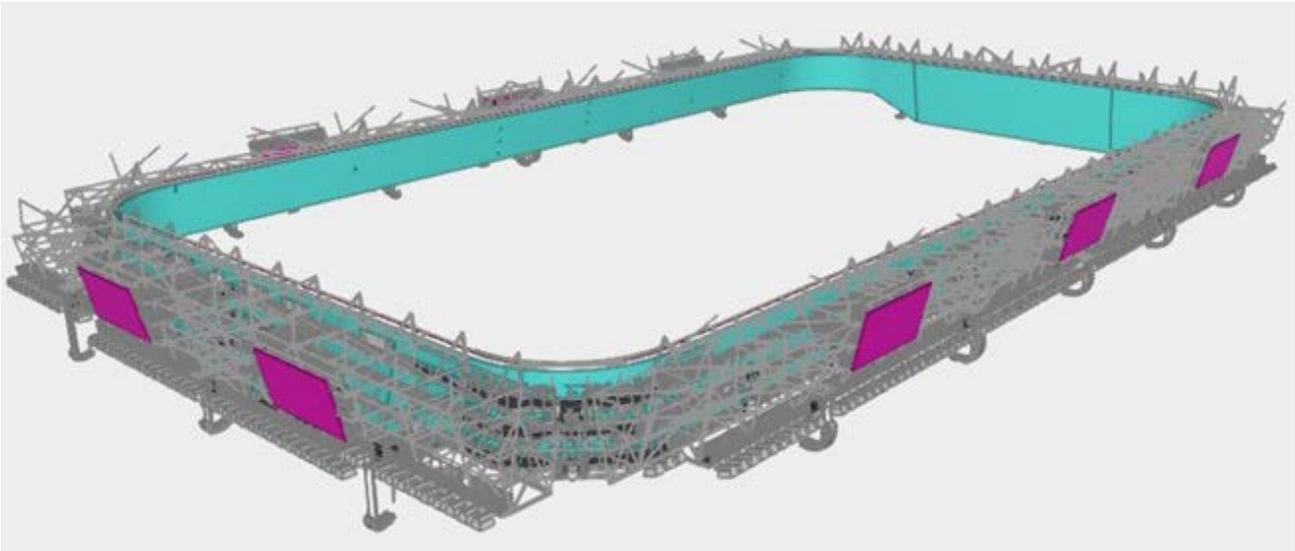


Figura 3. Modelo 3D desarrollado por ARUP en que se marca las pantallas del videomarcador.

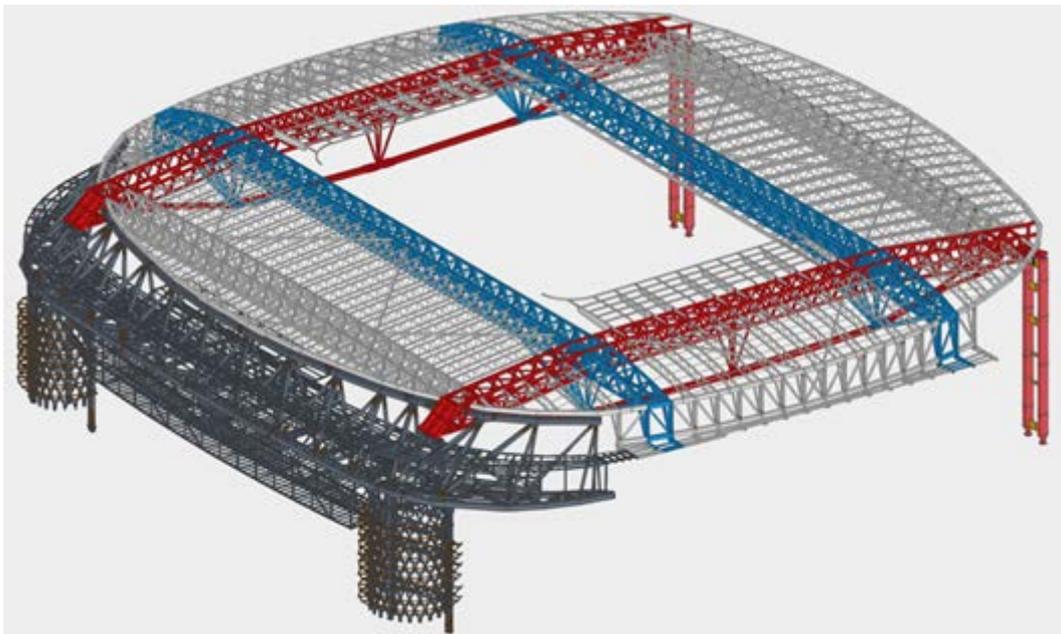


Figura 4. Cerchas principales de cubierta. Modelo BIM.

nes, como el sistema de megafonía, iluminación, calefacción, equipos de control, la Skycam, entre otros. Para facilitar el acceso y el mantenimiento de estas instalaciones tecnológicas, se han proyectado una serie de pasarelas y plataformas distribuidas a lo largo de los distintos niveles de la estructura.

En la [Figura 3](#) se ilustran todas las pantallas que componen el videomarcador.

3. CONDICIONANTES PRINCIPALES

El diseño del videomarcador debe cumplir con una serie de requisitos específicos, para realizar con su función. Además, el contorno en que se ubica impone ciertas condiciones a las

que la estructura debe adaptarse. A continuación, se explican en detalle los principales condicionantes.

3.1. Condiciones de apoyo

La estructura de soporte del videomarcador se encuentra colgada de las cerchas principales de la cubierta fija. Los fondos están colgados de las cerchas atirantadas (marcadas en rojo en la [Figura 4](#)) y los laterales están suspendidos de la cercha de rodadura sobre la que se desplaza la cubierta móvil (marcadas en azul en la [Figura 4](#)).

Dado que la estructura de soporte del videomarcador se encuentra suspendida de estas cerchas, sus deformaciones (que a efectos del cálculo de la estructura es una deformación impuesta) juegan un papel crucial en la elección del sistema estructural más adecuado, así como en su propio diseño.

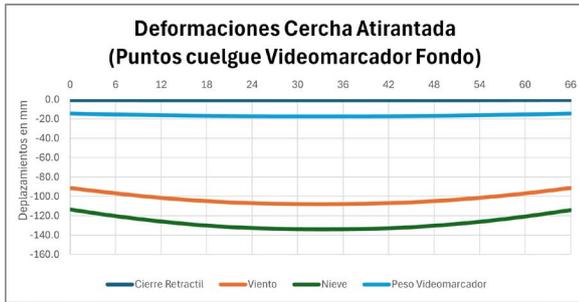


Figura 5. Deformaciones punto de cuelgue video marcador fondo.

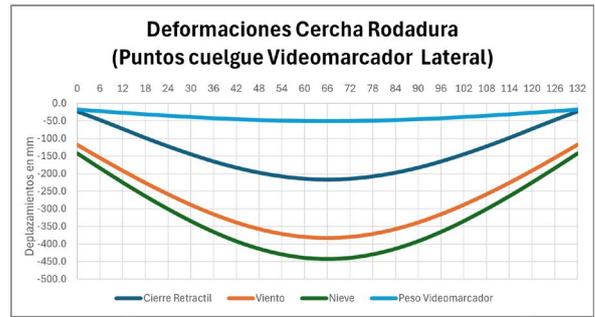


Figura 6. Deformaciones punto de cuelgue video marcador lateral.

Pasamos a continuación a hacer una breve explicación de cómo son estas deformaciones y a que son debidas. Para un conocimiento más detallado del funcionamiento de la cubierta fija se puede consultar la referencia [1].

Las cerchas atirantadas van en dirección este – oeste y están simplemente apoyadas sobre los péndulos del este y los torreones del oeste. Las cerchas de rodaduras van en dirección Norte – sur y se encuentran apoyadas en las cerchas atirantadas y continúan en vuelo hacia ambos extremos hasta llegar a la fachada del estadio [2], [3]. Sobre la cercha de rodadura se desplaza la cubierta retráctil [4] (de ahí su nombre), que cubre el terreno de juego.

De acuerdo con este comportamiento global se puede entender que una gran parte de la carga que soporta la cercha atirantada es debido a la carga que recibe de las cerchas de rodadura. Esto hace que la deformada de la cercha atirantada entre las cerchas de rodadura (zona en la que está suspendido el video marcador) sea muy pequeña y uniforme.

Como puede observarse en la Figura 5, el movimiento de la cubierta retráctil prácticamente no genera deformaciones sobre los puntos de cuelgue de los fondos. Son las hipótesis de viento y nieve las que producen mayores deformaciones, un máximo de 134 mm por nieve y 108 mm por viento, pero con una deformación relativa de 20 y 17 mm respectivamente (una relación de L/3200).

En cambio, las cerchas de rodadura tienen la deformación clásica de una viga biapoyada con cargas distribuidas, como se puede observar en la Figura 6.

La deformación máxima se obtiene para las hipótesis de nieve y viento, con valores máximos de 440 y 380 mm, respectivamente, con deformaciones relativas de 301 y 265 mm (una relación de L/438).

El desplazamiento de la cubierta retráctil tiene un impacto importante en los vanos laterales, produciendo una deformación máxima de 217 mm, y relativo de 194 mm (relación de L/682).

Por lo tanto, y como era de preverse, las deformaciones de las cerchas de rodadura y atirantada son completamente diferentes. Este aspecto condiciona fuertemente el diseño y ha sido uno de los puntos críticos analizados y que ha determinado la solución estructural desarrollada para cada una de las zonas.

3.2. Limitaciones de deformaciones de las pantallas

El fabricante del video marcador impone unos límites de deformaciones para garantizar el correcto funcionamiento de las pantallas, asegurar su integridad estructural y garantizar la calidad visual.

El video marcador de fondos y laterales de forma general está compuesto por pantallas de 2195x2195 mm² que se conectan a la estructura soporte en las cuatro esquinas. La posición de estas conexiones es un aspecto crítico y deben alinearse con precisión para lograr una calidad visual óptima. Las tolerancias horizontales y verticales prescritas para estas uniones son de 50 mm.

Para cumplir estas tolerancias se han diseñado elementos de regulación en las conexiones con la cubierta y en los tubos que sirven de apoyo a las pantallas.

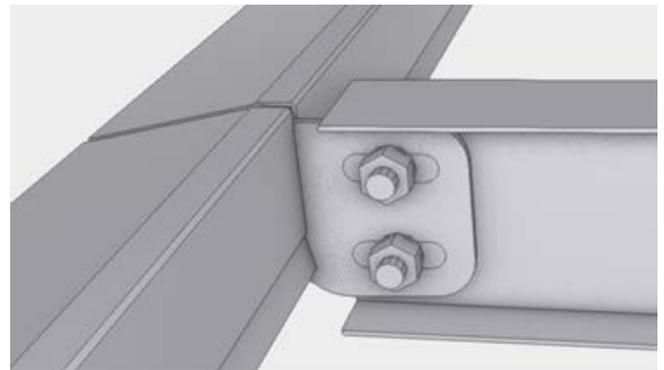


Figura 7. Elemento de regulación del perfil de apoyo de las pantallas. Modelo de Taller (Horta Coslada).

En cuanto a las deformaciones, el fabricante (Dacktronics) establece los siguientes valores límites:

- L/400 para deformación en el plano para combinaciones de cargas a corto plazo.
- L/400 para la deflexión fuera del plano debido a cargas muertas, y para combinación frecuente.
- L/240 para deformaciones fuera del plano para combinación características.

Además, también está limitada las distorsiones de la pantalla (marco) a 9 mm, como se indica en la Figura 8.

Para garantizar que la calidad de imagen de las pantallas no se vea afectadas, es necesario realizar estas comprobaciones en cada una de ellas.

El cumplimiento de estos requisitos de uso, junto con la necesidad de adaptarse a las deformaciones de la cubierta mencionadas en el apartado anterior, ha supuesto un gran desafío en el diseño de la estructura de soporte de los video marcadores, especialmente en los laterales.

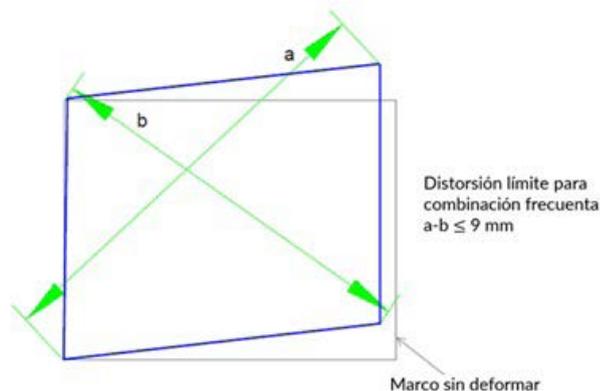


Figura 8. Limitación de distorsión angular de la pantalla.

3.3. Interferencias con las cerchas de la cubierta

Las cerchas de la cubierta también interfieren geoméricamente con la estructura “ideal” diseñada para el soporte del videomarcador. Esto ha obligado a modificar su geometría para evitar colisiones, teniendo en cuenta la posición deformada bajo las diferentes combinaciones de carga. Asimismo, se ha tenido en cuenta las tolerancias necesarias para garantizar el montaje seguro de estos elementos a 40 metros de altura.

La estructura de los fondos envuelve el tirante inferior de la cercha de cubierta. Esta situación, además de condicionar la posición de los perfiles, ha complicado notablemente el diseño de esta zona. En su diseño se ha tenido en cuenta en todo momento la complejidad de su montaje.



Figura 9. Estructura de fondos envolviendo al tirante de la cercha de cubierta.

Los extremos de la estructura de los laterales también envuelven completamente a los puntales de apoyo de la cercha de rodadura (figura 10). Al igual que en el caso anterior, este hecho ha condicionado la geometría de la estructura y complicado notablemente el proceso constructivo, como se verá en el apartado 5.

3.4. Plataforma de mantenimiento

La estructura proyectada no solo soporta los paneles de las pantallas del videomarcador, sino que también integra el sistema de megafonía, iluminación, calefacción y otras instalaciones (figura 11). Para garantizar el mantenimiento adecuado, tanto de estas instalaciones, como de las pantallas se ha previsto una red de pasarelas de acceso. Estas pasarelas deben cumplir con los anchos mínimos de paso, lo cual ha representado un desafío adicional en el diseño de la estructura debido a las grandes restricciones de espacio de algunas áreas.



Figura 10. Estructura de laterales rodeando a los puntales de apoyo de la cercha de rodadura.

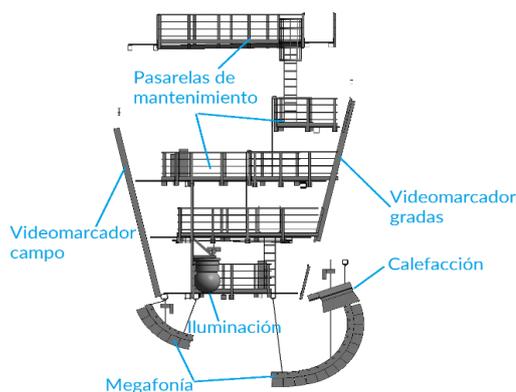


Figura 11. Instalaciones alojadas en la estructura de soporte del videomarcador.

3.5. Peso de la estructura

El diseño del videomarcador actual se llevó a cabo una vez completada la ejecución de la estructura principal de la cubierta. En la fase de diseño de la cubierta, se habían considerado unas cargas basadas del diseño inicial del videomarcador. Sin embargo, al actualizar el diseño y aumentar sus dimensiones, uno de los requisitos imperativos para su diseño fue optimizar al máximo el peso para no exceder la estimación original. Finalmente, se logró cumplir con el objetivo y el peso final ha sido menor que la estimación inicial.

En la tabla siguiente se indica los pesos de los distintos elementos y la optimización que se realizó para los distintos elementos.

	Peso Inicial [ton]	Peso final [ton]	Diferencia [ton]
Fondos + ½ curva	185,5	156,0	-29,5
p.p. estructura	128,5	116,0	-12,5
Tramex	27,9	21,5	-6,4
Barandilla	29,1	18,5	-10,6
Laterales + ½ curva	336,6	216,5	-120,1
p.p. estructura	239,9	159,0	-80,9
Tramex	49,2	30,0	-19,2
Barandilla	47,5	27,5	-20,0
Parcial	522,1	372,5	-149,60
Videomarcador	144,5	164,7	20,2
Total	666,6	537,2	-129,4

3.6. Plazo de diseño y construcción

El diseño de la estructura soporte del videomarcador, al igual que el resto de las reformas del estadio se ha hecho mediante

el sistema “design and build”. Sin embargo, en este caso, el plazo de ejecución estaba particularmente condicionado, ya que el montaje de gran parte de la estructura solo podía realizarse desde el terreno de juego y, por lo tanto, debía llevarse a cabo una vez finalizada la temporada de liga.

Dado que el diseño del videomarcador se empezó en septiembre del 2022 y el montaje debía realizarse en verano del 2023, los plazos fueron muy reducidos, lo que requirió un gran esfuerzo de todo el equipo. En términos generales, puede decirse que el diseño se realizó entre septiembre de 22 a enero de 23 (estructura: Fhecor, arquitectura e instalaciones: Arup y coordinación general: servicios técnicos de FCC), los planos de taller y la ejecución de la estructura entre enero de 23 a junio de 23 (realizada por Horta Coslada) y el montaje de junio de 23 a septiembre de 23 (ejecutado por FCC y BBR).

4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Teniendo en consideración todas las condiciones explicadas anteriormente, se analizaron para cada zona distintas alternativas con el objetivo de encontrar la solución que mejor se adaptara.

4.1. Acciones consideradas

Las principales cargas permanentes consideradas, además del peso propio de la estructura, son las siguientes:

- Pasarelas de tramex: 0.25 kN/m² (tradicional). 0.18 kN/m² (resina)
- Barandillas: 0.15 kN/ml (aluminio)
- Pantallas del videomarcador:
 - Fondos y Laterales: 2.65 kN/ud (2.195 x 2.195 m²).
 - Ud. lado campo: 2x116 (fondos) + 2x156 (laterales)
 - Ud. lado grada: (2x2) x15 (fondos)+ (2x3)x15 (laterales)
 - Curva: 66.6 kN cada curva. Compuesta por 662 stick.
- Calefacción: 0.82 kN/ml
- Iluminación: 1.55 kN/ud
- Sonido, Racks, skycam ...

En cuanto a las sobrecargas de uso, se han tenido en cuenta las indicadas en el CTE [5] para cubierta accesibles únicamente para mantenimiento, así como las cargas horizontales aplicadas a las barandillas.

Los valores de carga de viento utilizados son los indicados en el ensayo de tunel de viento realizado al Estadio.

Dado que la estructura está protegida de la radiación solar directa, al igual que la cubierta, se ha considerado un salto térmico de ±30 °C. Además, al estar suspendida de la estructura principal de la cubierta y compartir las mismas condiciones de exposición térmica y soleamiento, no se ha contemplado una diferencia de temperatura significativa entre ambas estructuras.

4.2. Estructura de fondos

Para el cumplimiento de los condicionantes indicados anteriormente (apartado 3), se optó por un concepto estructural

Impermeable video screens:

$W_{net,video\ screens}$	A = 1 m ² :	+1.10 kN/m ² (towards grandstands) / -0.80 kN/m ² (towards playing field)
	A = 10 m ²	+1.00 kN/m ² (towards grandstands) / -0.75 kN/m ² (towards playing field)

Video screens with 60% opening degree (wind loads on gross area):

$W_{net,permeable\ video\ screens}$	A = 1 m ² :	+0.75 kN/m ² (towards grandstands) / -0.60 kN/m ² (towards playing field)
	A = 10 m ²	+0.70 kN/m ² (towards grandstands) / -0.55 kN/m ² (towards playing field)

Figura 12. Valores de presión/succión de viento indicados en el informe del túnel de viento.

lo más simple posible. Se diseñó una estructura compuesta por 12 pórticos verticales independientes, situados cada 6 metros, con arriostramientos en K, (ver figura 13 y figura 14) colgados de los nudos de la cercha de cubierta.

Las dimensiones aproximadas de la estructura de los fondos son 74.85 m de largo, 5.50 m de ancho medio y 13.65 m de altura máxima.

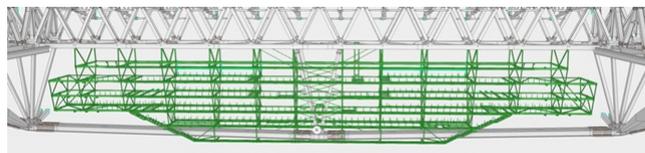


Figura 13. Modelo 3D de la estructura de fondos.

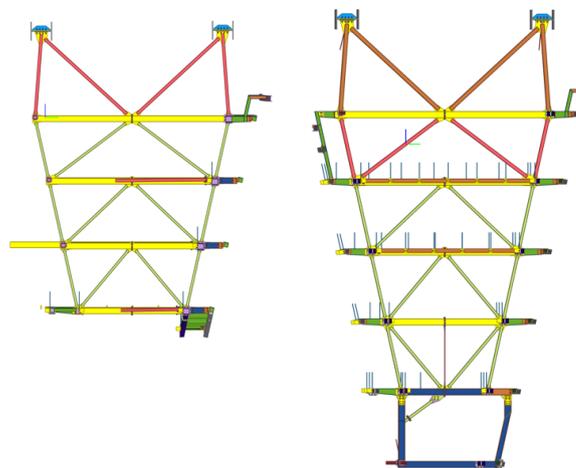


Figura 14. Pórticos tipos de los fondos. Extremo (Izq.) y típico con “portería” (Drcha.).

Los pórticos típicos (zona central) tienen 5 niveles, a los que se añade unas “porterías”, para rodear al tirante inferior de la cercha de cubierta, sobre la que se sitúa el nivel 6. Estas “porterías” son pórticos rígidos articulado en sus apoyos y rigidizados con una diagonal, lo que simplifica la unión y, al mismo tiempo, permite controlar sus deformaciones transversales,

Este planteamiento estructural facilita el montaje, ya que permite montar primero el tramo no afectado por la cubierta y conectar después a éstos las “porterías”.

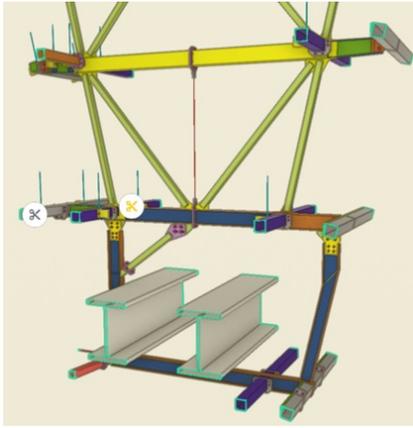


Figura 15. Pórtico de nudo rígido inferior “portería”.

Estos pórticos verticales están conectados entre sí por tubos horizontales, generalmente de 140x140x4, que sirven de apoyo a las pasarelas, las zonas de instalaciones y las pantallas del videomarcador.

Las cargas horizontales perpendiculares a las pantallas, principalmente viento, son transmitidas a la cubierta a través de los pórticos, generando un par de tracción/compresión en las conexiones con esta.

Para resistir las cargas horizontales en el plano de las pantallas se han dispuesto unas cruces de San Andrés en la zona central, dimensionadas únicamente a tracción. Se ha elegido esta zona para reducir el impacto que las cargas térmicas provocan y minimizar los esfuerzos que esto produciría.

En la figura 16 se muestra un croquis inicial de la concepción estructural de la estructura de fondos.

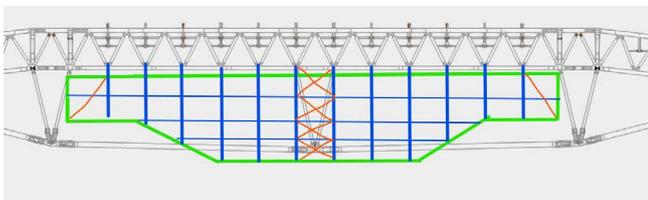


Figura 16. Concepción estructural. Estructura de fondos.

Para evitar interferencia de estas cruces con los puntales de la cercha atirantada, en la parte superior e inferior se han desdoblado los arriostramientos hacia los vanos contiguos (ver figura 17).

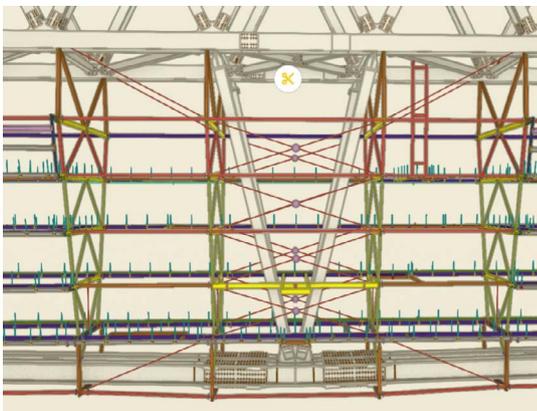


Figura 17. Detalle de las cruces de arriostramiento centrales. Modelo BIM de fabricación de Horta Coslada.

La parte final presenta otra singularidad producida por la imposibilidad de colocar el último pórtico por interferir nuevamente con la cubierta. Esto ha obligado a que trabajen en ménsula, tanto vertical como horizontalmente (de una luz de cuatro metros), sostenida por diagonales que transmite las cargas al resto de la estructura.

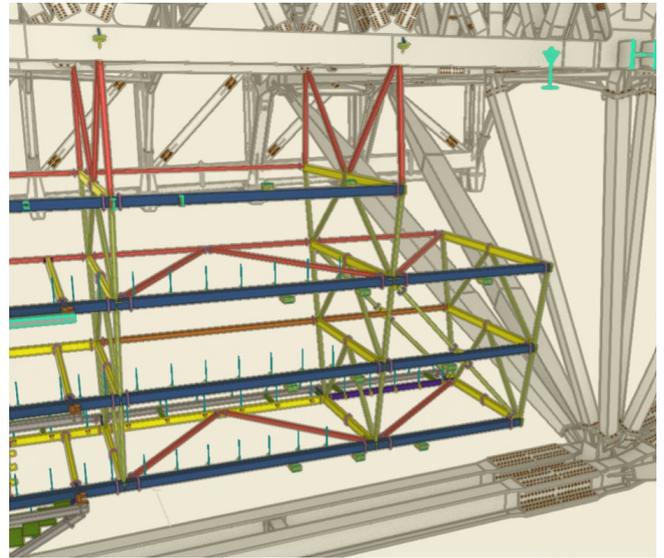


Figura 18. Detalle de tramo final de la estructura de los fondos.

En general, la estructura se ha resuelto con tubos cuadrados o rectangular (140x140x4, 140x140x5, 200x100x4 y 80x80x4), excepto las “porterías” que por facilidad constructiva se ha empleado perfiles doble T armados de 150 mm de canto.

Los pórticos se han construido en taller en dos mitades y se han unidos en obra mediante uniones atornilladas (se usaron tornillos de calidad 10.9), previamente a su izado mediante grúa a su posición definitiva. Los largueros entre pórticos también se conectan mediante uniones atornilladas. En general se ha optado por uniones de chapa frontal.

La conexión de esta estructura con la cercha atirantada se realiza mediante tornillos pretensados de calidad 10.9 a los taladros que se habían dejado previstos para este fin (figura 19 y figura 20). Para evitar tener que realizar soldadura a la cercha atirantada la rigidización del nudo se ha realizado con una chapa en T por la cara superior del nudo.

La unión permite un cierto grado de ajuste mediante la colocación de chapa adicional por la parte inferior que ayuda al replanteo de la posición final del pórtico.

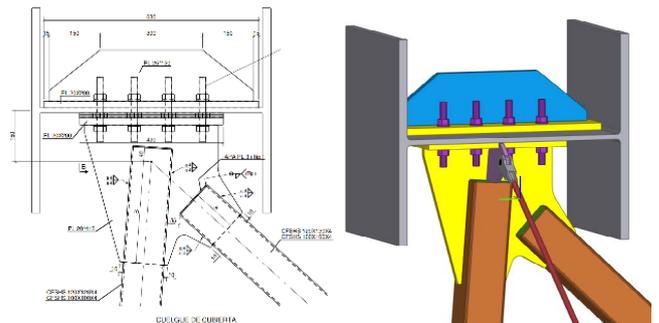


Figura 19. Detalle de unión a la cercha Atirantada. Plano de definición y modelo de taller.

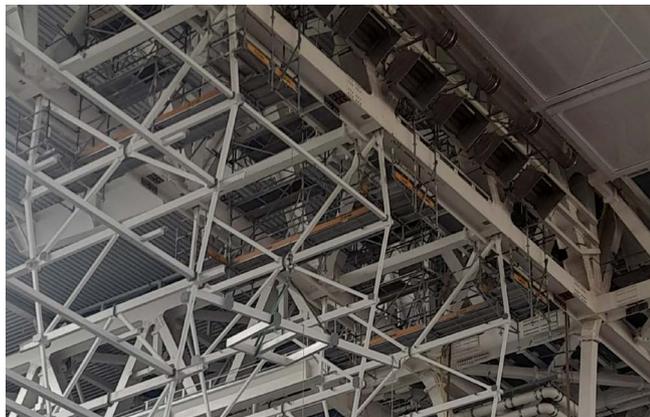


Figura 20. Conexión de pórticos con cubierta atirantada.

Para reducir el peso global, además de plantear un diseño estructural muy eficiente y optimizar las dimensiones de los perfiles, se ha optado por el empleo de barandillas de aluminio y un tramex de resina.

4.3. Estructura de laterales

Se encuentra ubicada a lo largo de la dirección longitudinal del campo. Su longitud total es de 132,90 metros, con un ancho que varía entre 6,75 m en el nivel 1 y 4,75 m del nivel 4 y una altura de 9,17 m.

La estructura está fuertemente condicionada por las deformaciones impuestas producidas por la cubierta, debidas a las sobrecargas y el movimiento de la cubierta retráctil (ver figura 6), y las limitaciones de deformaciones proporcionadas por el fabricante del videomarcador, indicas en el apartado 3.2.

Con el objetivo de encontrar la solución óptima se estudiaron varias soluciones alternativas para esta zona.

Primeramente, se analizó una solución similar a la de los fondos (por su facilitada constructiva), pese a que las deformaciones no parecían que cumplieran los requisitos del fabricante.

Esta primera solución consistía en una serie de pórticos verticales que cuelgan de cada nudo de la cercha de Rodadura, conectados horizontalmente por las pasarelas de mantenimiento de los distintos niveles y con cruces de San Andrés en el centro para dotar a la estructura de rigidez en sentido longitudinal.

En la figura 21 se muestra el esquema estructural analizado.

En la figura 22 se muestran las deformaciones producidas por el movimiento de la cubierta retráctil. Se puede observar, como era de esperar, que las deformaciones producidas son prácticamente idénticas a las que tienen los puntos de la cubierta de los que descuelga.

Para esta solución se tiene para la combinación de cierre de la retráctil y nieve una deformación relativa de $194+301=495$ mm, que equivale a una ratio de $L/267$, mayor que $L/400$ solicitado por el fabricante.

Además, las importantes deformaciones verticales relativas entre los puntos de cuelgue inducen esfuerzos adicionales en los elementos horizontales (ver figura 23), a no ser que se liberen sus movimientos horizontales mediante uniones rasgadas, por ejemplo. Pero esta solución sería incompatible con la colocación de un único punto de arriostamiento longitudinal.

Una vez descartada esta solución, se propone dividir la estructura de los laterales en cinco módulos, colgados cada uno únicamente de dos pórticos ($2 \times 2 = 4$ apoyos). Cada módulo trabajará como una cercha biapoyada, en realidad dos cerchas: una en el lado hacia el terreno de juego y otra en el lado hacia el graderío.

Al suspender cada módulo únicamente de dos puntos, se logra que cada uno actúe como un sólido rígido (debido a que la relación entre el canto y luz de la cercha es muy grande), de modo que las deformaciones relativas entre los puntos de apoyo de los paneles del videomarcador son prácticamente nulas. Por contra, se rompe la continuidad del videomarcador debido a la creación de cuatro juntas entre los cinco módulos.

En la figura 24 se ilustran los cinco módulos mencionados anteriormente.

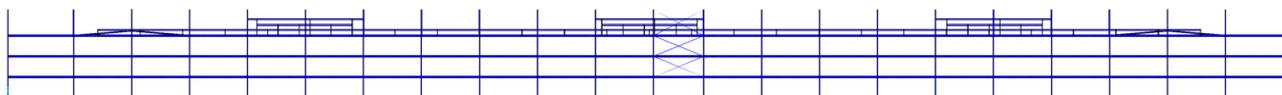


Figura 21. Estructura de laterales. Alternativa 01.



Figura 22. Deformaciones por el movimiento de la cubierta retráctil.

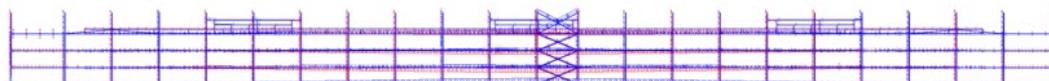


Figura 23. Esfuerzos originados por desplazamientos impuestos en los puntos de cuelgue.



Figura 24. Estructura de laterales. Solución de 5 módulos.

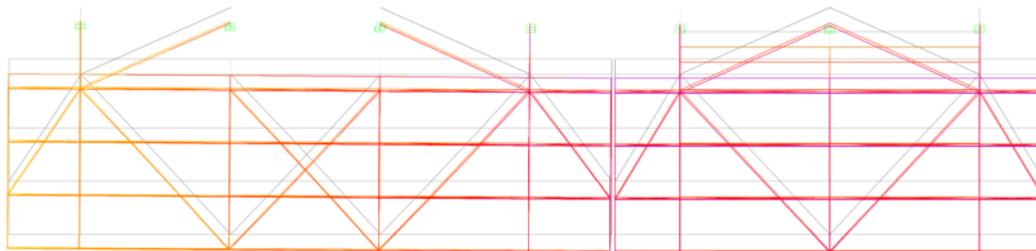


Figura 25. Deformaciones módulos 4 y 5.

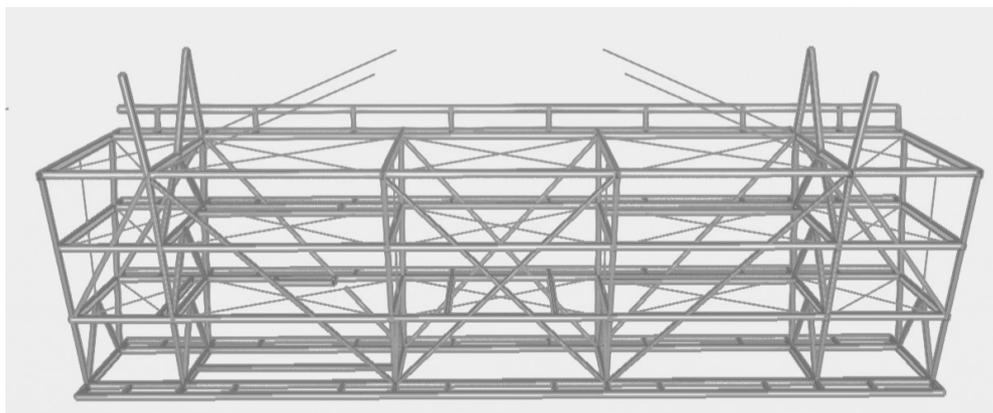


Figura 26. Modelo 3D del módulo 2. El módulo 4 es simétrico a este.

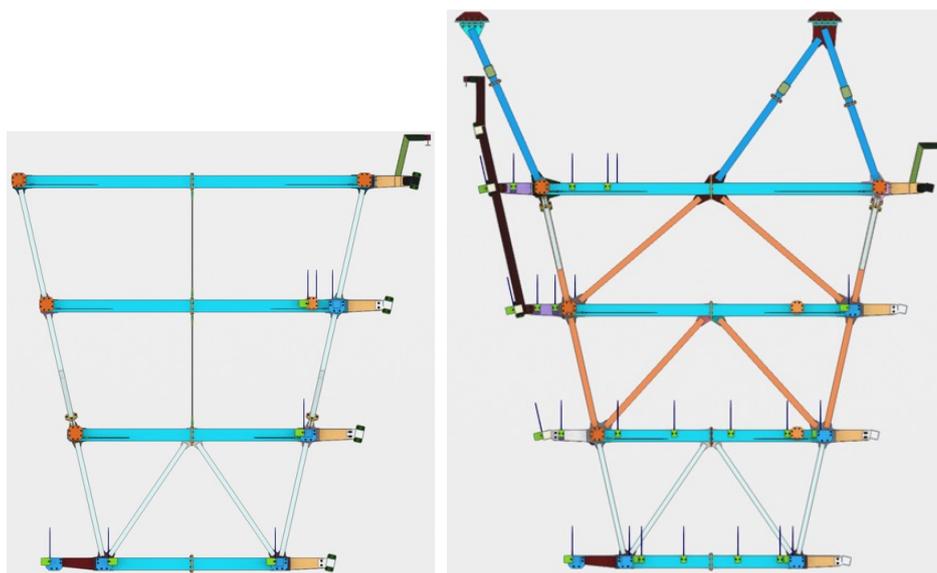


Figura 27. Tipos de pórticos. Izquierdo intermedio, derecha principal.

En la [figura 25](#) se muestran las deformaciones de los módulos 4 y 5, donde se puede apreciar que cada módulo se deforma como un sólido rígido.

Para resistir las cargas horizontales perpendiculares al videomarcador, se han dispuesto cruces de San Andrés en todos los niveles, excepto en el inferior (por incompatibilidad con las instalaciones). Estas cruces, trabajando como cerchas horizontales, transmiten la carga a los pórticos de cuelgue, los cuales, a su vez, transfieren la carga a la cubierta, funcionando como un pórtico vertical triangulado (ver [figura 26](#)).

En cuanto a las cargas horizontales longitudinales, se transmiten a la cubierta a través de las cerchas “verticales” hasta el nivel superior de los pórticos de cuelgue, y de allí a la cubierta mediante cuatro tirantes, dos en lado campo y dos

en el lado grada (ver [figura 26](#)).

En cuanto a la estructura vertical, se distinguen dos tipos de pórticos: los que cuelgan de la cercha de rodadura (principales), y los que no (intermedios). Los dos tipos se pueden apreciar en la [figura 27](#).

Los módulos tienen diferentes longitudes. Los extremos, módulos 01 y 05, son los de mayor longitud, con 7 pórticos, 2 principales y 5 intermedios, de los cuales 3 están entre los principales y los otros 2 en voladizo. Los módulos 02 y 04 están formado 6 pórticos, 2 principales y cuatro intermedios. Finalmente, el módulo 03 tiene solo 5 pórticos, 2 principales y 3 intermedios.

A continuación, se muestra la configuración del resto de módulos.

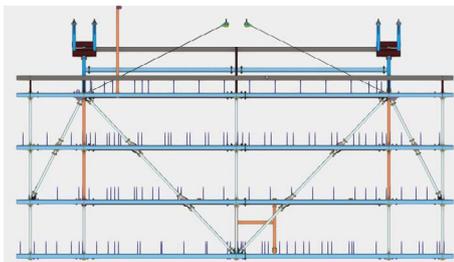


Figura 28. Módulo central. Módulo 3.

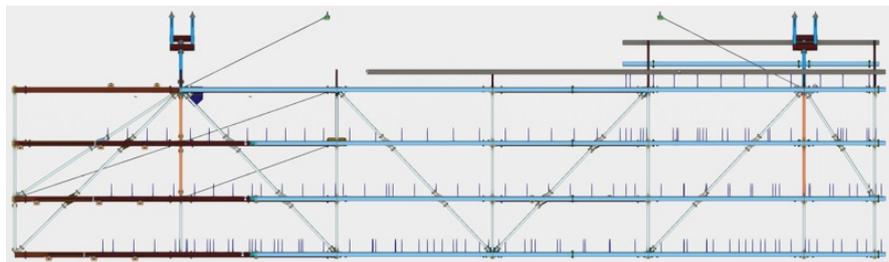


Figura 29. Modulo extremo. Módulos 1 y 5.

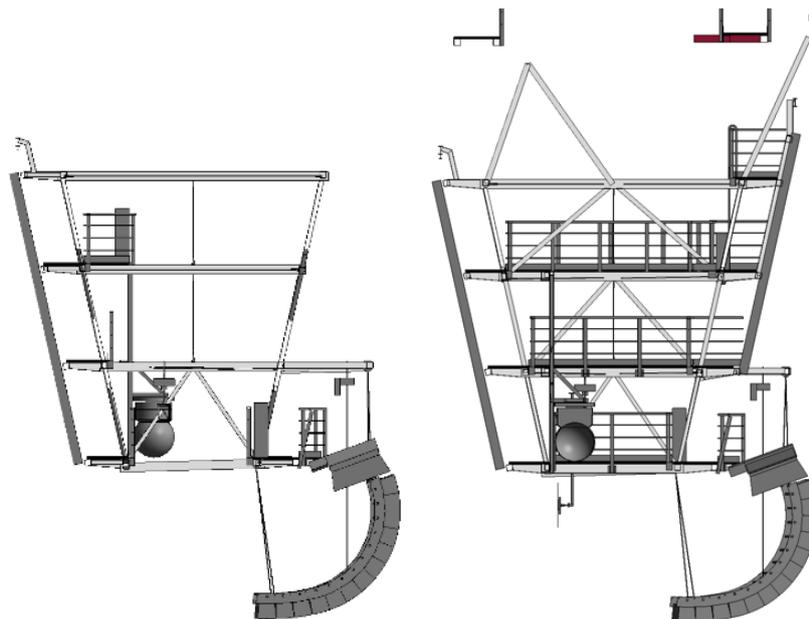


Figura 30. Sección transversal en que se aprecian las instalaciones que cuelgan de la estructura.

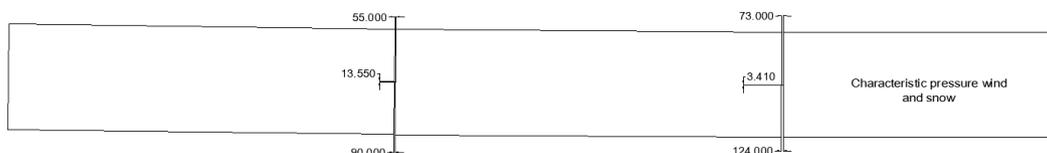


Figura 31. Desplazamientos máximos previstos para combinación característica de viento y nieve.

Al igual que en la estructura de los fondos, la estructura ha sido diseñada teniendo en cuenta las múltiples instalaciones que cuelgan de ellas, como se puede apreciar en la [figura 30](#).

Los perfiles de esta estructura están formados, al igual que los fondos, por tubos cuadrados y rectangulares (140x140x5, 200x100x4, 80x80x4, 100x100x4 y 120x120x4), optimizados para no penalizar el peso.

Este mismo concepto estructural se analizó con tres módulos en vez de cinco, pero debido a que los movimientos de las juntas eran mayores, se descartó.

Es importante destacar que los desplazamientos máximos requeridos por el fabricante para cada una de las 694 pantallas han sido comprobados obteniéndose valores inferiores a los admisibles. Además, se han consensuado con el fabricante los desplazamientos máximos admisibles de las juntas.

En la [figura 31](#) se muestra un alzado de los módulos 3, 4 y 5 en que se indican los desplazamientos máximos de la junta entre módulos teóricos para la combinación característica de

viento y nieve. Los desplazamientos de las otras dos juntas son simétricos a los indicados.

Cabe señalar que, al igual que en los fondos, la geometría de la estructura de los extremos de los módulos 1 y 5 ha tenido que ser adaptada para no interferir con la estructura de la cubierta, tal y como se muestra en la [figura 32](#).

Al reducirse el número de puntos de cuelgue de la estructura a la cercha de rodadura, la carga que se transmite por estos es mayor, ya que la carga total de la estructura se mantiene, pero ahora se transmite de forma más concentrada. Esto provoca que las conexiones tengan que ser más potente, sin embargo, en términos de flexión, el momento máximo en la cercha de rodadura es menor.

Al igual que en los fondos, se ha diseñado una unión atornillada para la conexión entre la estructura del videomarcador y la cubierta, pero en este caso ha sido necesario emplear los taladros previstos en la cercha de rodadura a ambos lados del nudo. Para ello se ha diseñado unos perfiles en forma de

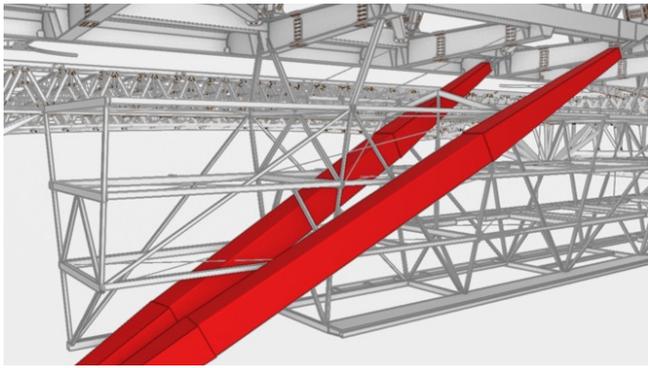


Figura 32. Interferencia de los extremos con la estructura de cubierta.

“tirachinas” que permite rodear el perfil transversal de la cercha de rodadura (figura 33).

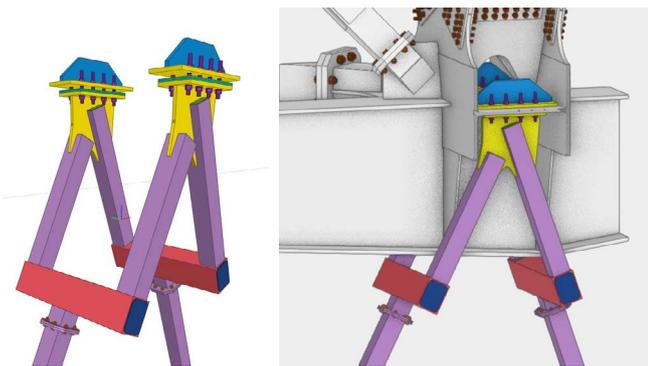


Figura 33. Unión con la cercha de Rodadura en forma de tirachinas. Modelo de taller (Horta Coslada).

4.4. Estructura de esquina (zonas curvas).

La transición entre los laterales y los fondos se realiza mediante una estructura especial denominada estructura de curva, que sirve de soporte a unas pantallas tipo “stick”, compuestas por barras o tiras individuales de LED, que se apoyan en elementos verticales inclinados en vez de en los horizontales utilizados en fondos y laterales.

El principal condicionante de esta zona radica en la necesidad de diseñar una estructura apoyada en los fondos y en los laterales, pero compatible con las deformaciones de ambas estructuras, que, como se ha comentado en el apartado 3.1, se deforman de forma totalmente diferente y en direcciones perpendiculares entre sí (ver figura 34).

Se ha diseñado una estructura compuesta por tres plataformas horizontales independientes apoyadas en la estructura del fondo y laterales, y conectadas entre sí únicamente por unos perfiles inclinados regulables, que sirven de apoyos a las pantallas del videomarcador.

Cada plataforma tiene tres vigas principales (marcadas en azul en la figura 34), sobre la que se apoya el resto de estructura secundaria que sirve de apoyo a los forjados de tramex (marcados en amarillo). Para resistir los esfuerzos horizontales de viento se ha formado una celosía entre la primera y la segunda viga (marcadas en rojo).

Para dar continuidad a las pasarelas de mantenimiento del videomarcador, se han colocado dos vigas a cada lado, apoya-

das en la viga principal y en el último tramo de pasarela de fondo y lateral (marcadas en verde).

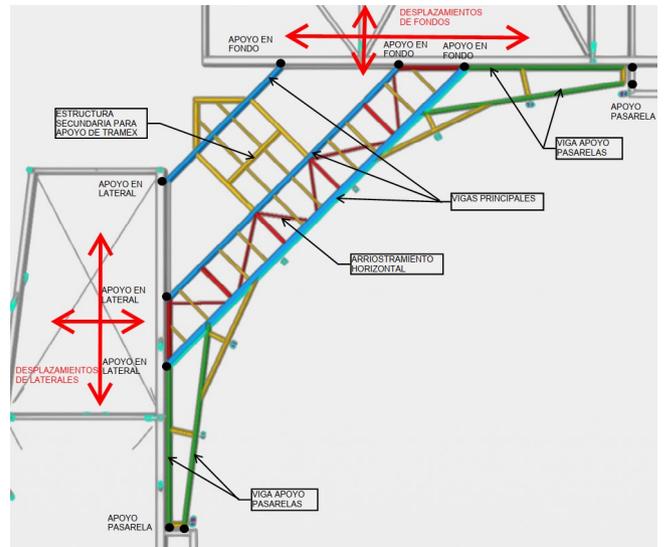


Figura 34. Esquema de diferentes elementos y movimientos de la estructura de curvas.

Esta subestructura tiene que permitir el movimiento relativo entre subestructuras de fondo y lateral impuesto por acciones térmicas y movimientos relativos verticales de las dos cerchas de apoyo (Atirantada y Rodadura).

En la figura 35 se muestra el modelo 3D de la estructura metálica de la zona de curvas.

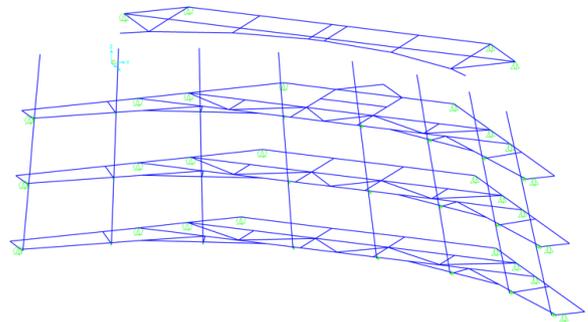


Figura 35. Modelo de cálculo de la estructura de curvas.

El apoyo de las vigas principales en la estructura colgada de fondo y laterales se realiza mediante uniones con bulones de $\varnothing 30$ (42CrNiMo4+QT cromado duro 60 micras) y chapas rasgadas de forma que se permite el desplazamiento en dos direcciones perpendiculares (figura 36). En las dos vigas interiores, la conexión interfiere con la viga de apoyo del tramex, lo que obliga a diseñarla mediante una ménsula inferior.

Uno de los extremos de las vigas de apoyo de la pasarela, marcadas en verde en la figura 34, está apoyado en la estructura de fondo o laterales, por lo que también ha sido necesario diseñar un apoyo mediante bulones con chapa rasgada, que permite el desplazamiento en dos direcciones perpendiculares (figura 37).

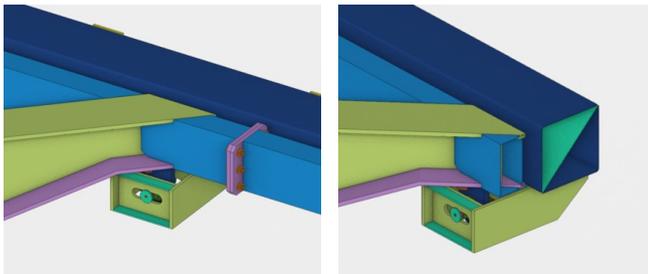


Figura 36. Detalle de apoyo de vigas principales en estructura de fondo y lateral.

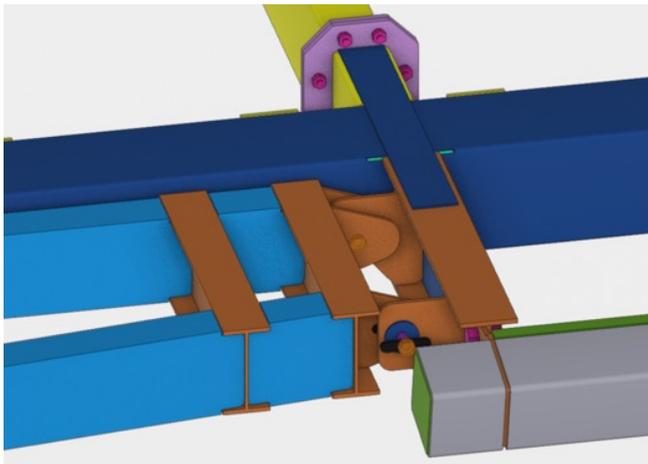
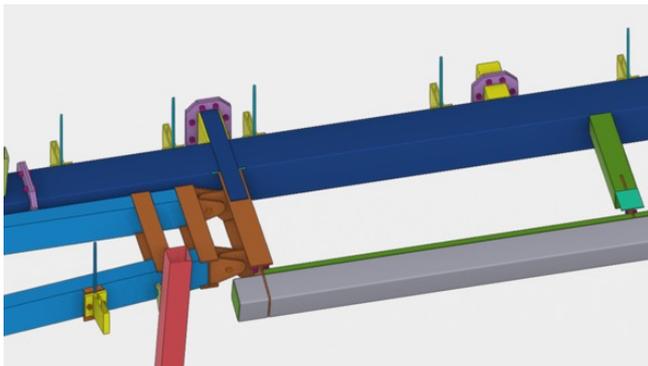


Figura 37. Apoyo estructura curva sobre tubo paralelo.

Como en el resto de los casos, la estructura también tiene que dar soporte a diversas instalaciones además de las pantallas del videomarcador. En la [figura 38](#) se muestra el modelo BIM, donde se observan dichas instalaciones.

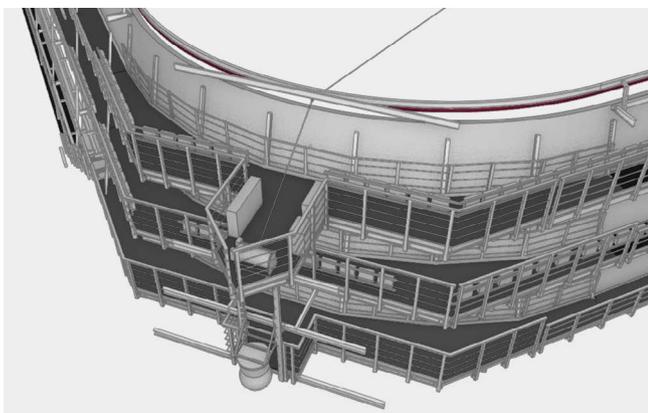


Figura 38. Modelo BIM de arquitectura, instalaciones de la zona de curva (ARUP).

4.5. Diseño de las uniones enfocado a la facilidad constructiva.

En la concepción estructural general de la estructura y, en particular, de las uniones se ha dado importancia a la facilidad y rapidez de la construcción, lo cual, como se comentó anteriormente, [apartado 3.6](#), ha sido uno de los grandes retos. Por ello, las uniones soldadas se han realizado en el taller para asegurar un mayor control de calidad, donde los pórticos se ensamblaron en dos mitades, por limitaciones de transporte. El resto de los elementos se montaron a pie de obra mediante uniones atornilladas.

Las uniones entre perfiles se han realizado con chapa de testa cuando es necesaria su continuidad y mediante una chapa intermedia a la que se conectan los perfiles cuando son articuladas, caso de los pórticos y los arriostramientos. El dimensionamiento de estas uniones se ha realizado mediante el programa IDEA Statica.

En las figuras siguientes se muestra ejemplos de algunas de las uniones más representativas.

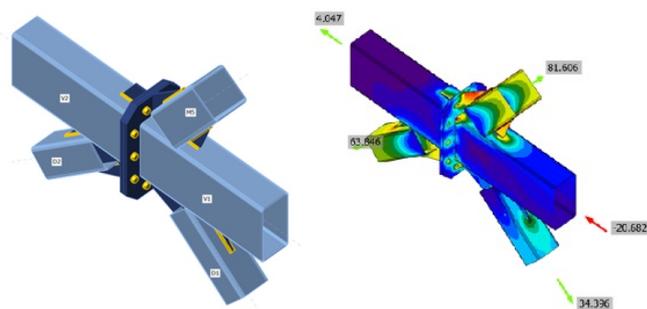


Figura 39. Detalle unión atornillada de conexión de las mitades del pórtico.

En la [figura 40](#) se puede observar la unión de los perfiles longitudinales mediante chapa de testa, las diagonales con chapa central y muñón con chapa de testa y las uniones articuladas con chapa central para los montantes y diagonales del pórtico.

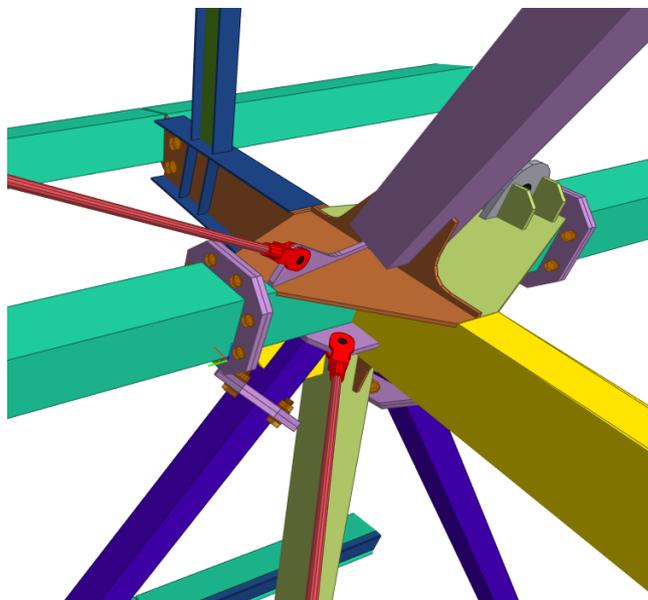


Figura 40. Detalle de nudo de nivel superior del pórtico de los laterales.

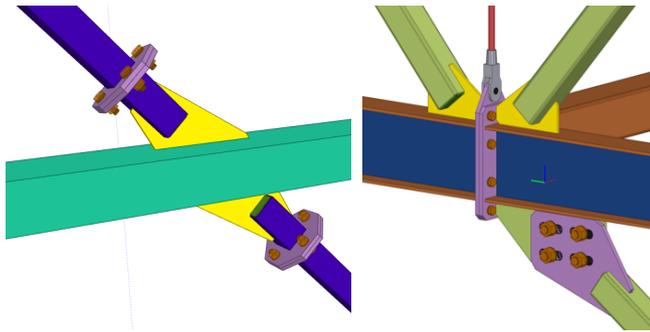


Figura 41. Detalle de continuidad de diagonales (izquierda), nudo central inferior de pórtico de fondo con diagonal de arriostamiento (derecha).

5. PROCESO CONSTRUCTIVO

5.1. Ajuste a la geometría real

Para el correcto posicionamiento del videomarcador se hizo un replanteo topográfico de los puntos de suspensión de la estructura de soporte del videomarcador.

En este replanteo se observó que las cerchas atirantadas de los dos fondos estaban ligeramente desplazadas hacia el centro del campo, algo más el fondo norte que el sur. Para compensar esta situación se decidió desplazar el eje del videomarcador unos centímetros respecto al eje del campo.

Otro efecto de este desplazamiento es que el eje del nudo de la cercha de rodadura (y, por tanto, de los puntos de cuelgue) no estaba alineado con los ejes de los pórticos. Esta circunstancia se resolvió ajustando las distancias de los dos brazos del “tirachinas” (ver figura 42).

También se detectó que la cercha de rodadura del Este estaba ligeramente desplazada hacia el centro del campo. Este efecto se corrigió variando el ángulo de inclinación de los tirachinas.

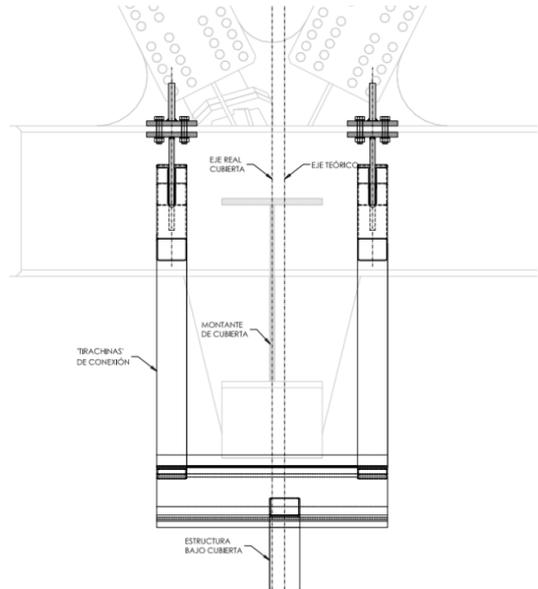


Figura 42. Desfase entre eje nudo cubierta y eje de pórticos de los laterales.

5.2. Estructura de fondos

Para esta zona se decidió izar independientemente cada pórtico con grúas y conectarlos con la cubierta mediante la unión atornillada prevista al efecto. Como se comentó anteriormente, esta unión permite cierta regulación en altura e inclinación para el ajuste final de la posición del videomarcador.

Debido a la interferencia de la estructura de fondos con el cordón inferior de la cercha atirantada, no se puede izar el pórtico completo en la zona central. Por lo tanto, la parte inferior, las porterías, se izan posteriormente. Esta circunstancia fue tenida en cuenta en el diseño y por este motivo se calcularon estas uniones como articuladas para facilitar su montaje.

En la figura 43 se puede observar el izado de los pórticos.

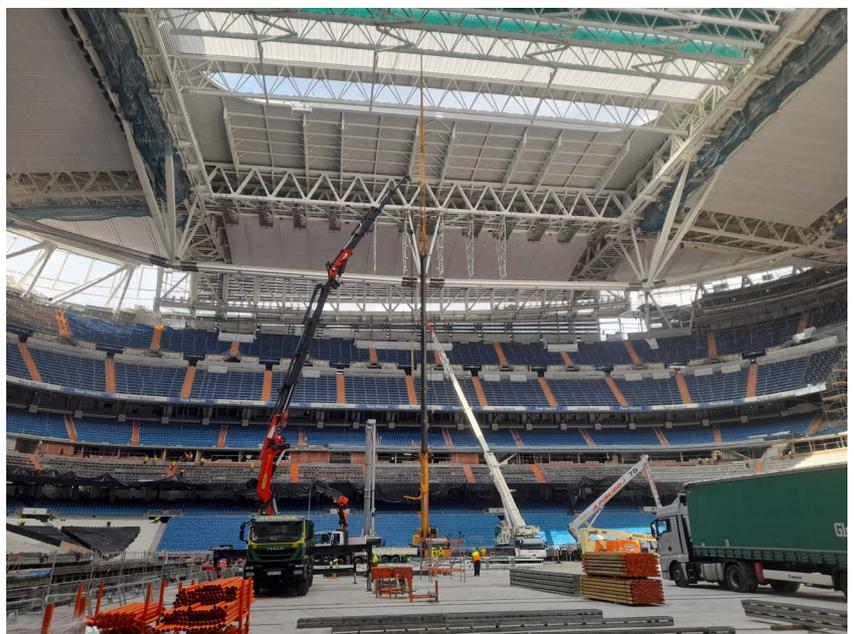
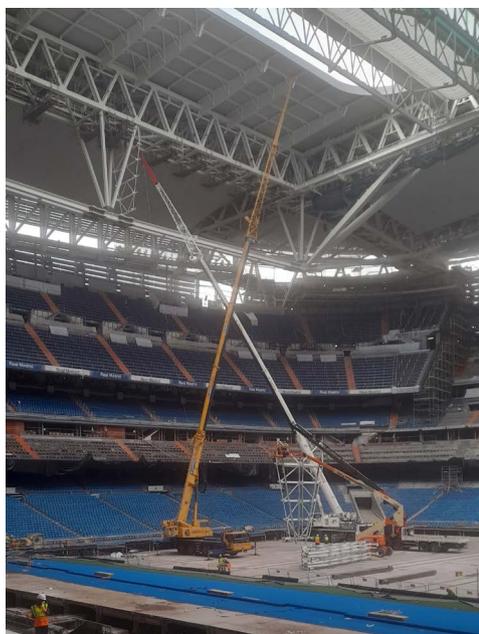


Figura 43. Izado con grúa de los pórticos de fondos.

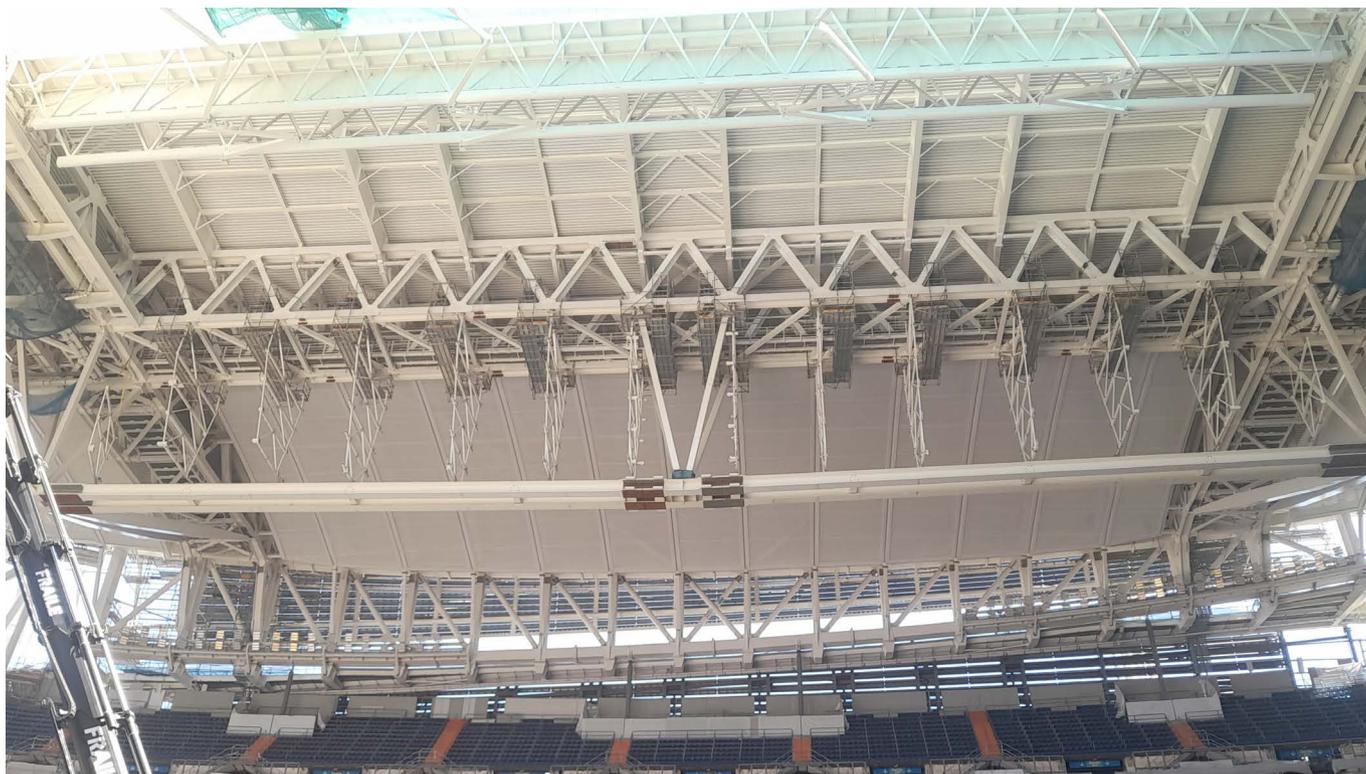


Figura 44. Imagen general tras el izado de todos los pórticos, y antes de colocar las “porterias”.



Figura 45. Izado del resto de la estructura.



Figura 46. Estructura de fondos totalmente ejecutada.

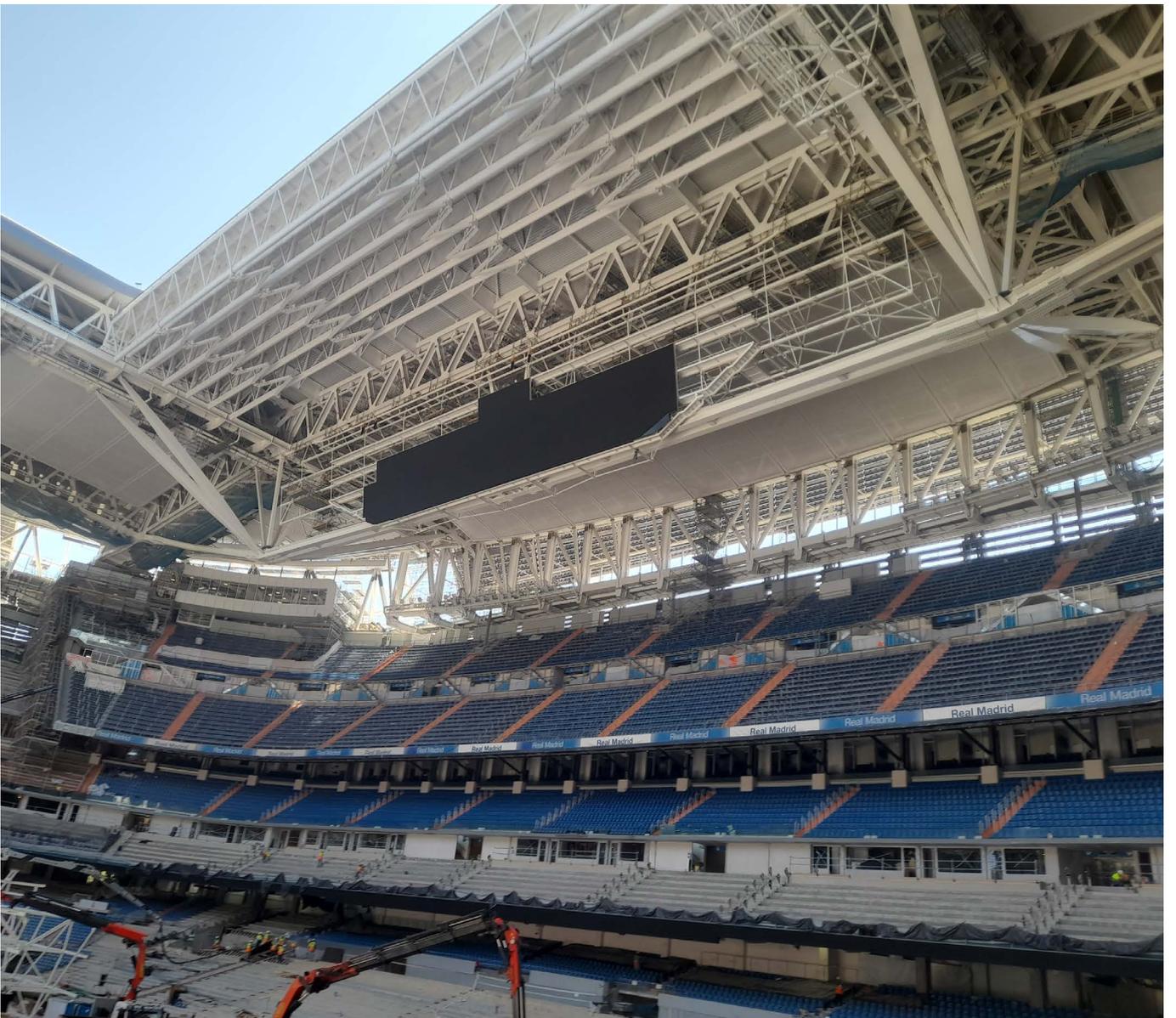


Figura 47. Pantallas de fondo. Lado campo.

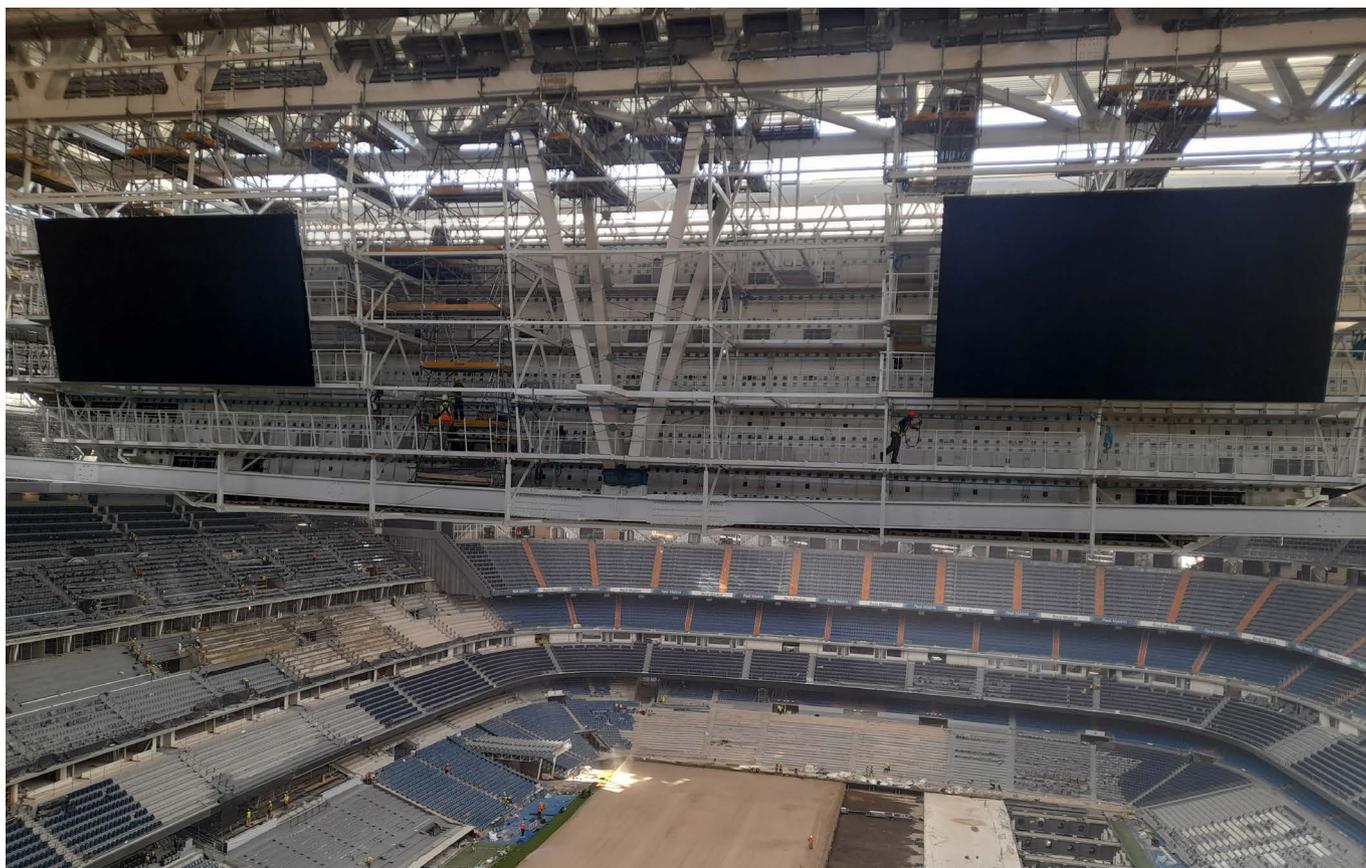


Figura 48. Pantallas de fondos. Lado graderío.

Una vez izados los pórticos, se procede al izado del resto de la estructura elemento a elemento.

Los pórticos extremos de la estructura de los fondos no se pueden colgar de la cubierta por interferir con la cercha atirantada (ver figura 18), por lo que esta parte también tiene que ser montada elemento a elemento.

En la figura 46 se muestra una de las estructuras de fondos totalmente ejecutada.

Finalmente, y en paralelo con el montaje de la estructura de laterales, se procede con el montaje de las pantallas.

5.3. Estructura de laterales

El montaje de los distintos tramos de la estructura de los laterales presenta una mayor complejidad, dado que su comportamiento como cerchas tridimensionales colgadas de la cubierta exige ensamblarlas previamente en el suelo y, posteriormente, izarlas hasta su posición final.

Para izarlas, es imprescindible realizar el montaje directamente en la vertical de su posición final, lo que implica hacerlo sobre el graderío. Esta condición exige la construc-

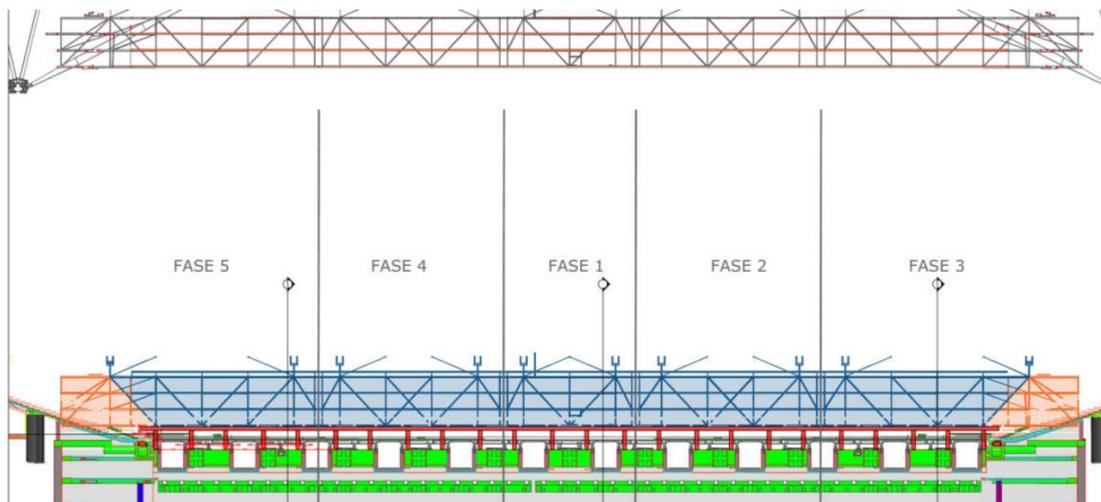


Figura 49. Zona de montaje de estructura de videomarcador de los laterales.

ción de una plataforma horizontal temporal en dicha zona.

El izado de cada tramo se hará desde tres puntos para evitar que se sobrecargue una eslinga más que otra y minimizar los movimientos del tramo durante el izado.

Se disponen dos puntos de izado en los nudos de conexión con los tirachinas de una de las alineaciones de cuelgue (figura 50), y el tercer punto en el otro pórtico de cuelgue. La posición de este último punto se ha calculado para que el centro de gravedad del tramo coincida con el centro de momentos nulos, y así evitar el giro del tramo durante el izado.

Como se muestra en la figura 50, al proyectar la vertical de los puntos de cuelgue del pórtico con dos puntos de tiro para posicionar los gatos sobre la cercha de rodadura, se detecta una interferencia con las pasarelas de mantenimiento de esta. Para resolver esta situación, se ha dispuesto un balancín que transfiere los puntos de izado a una zona libre de interferencias (ver figura 51, figura 52 y figura 53).

En estas figuras también se puede observar que los puntos de tiro están desplazados del eje del pórtico para compensar la posición real de la cercha de rodadura.

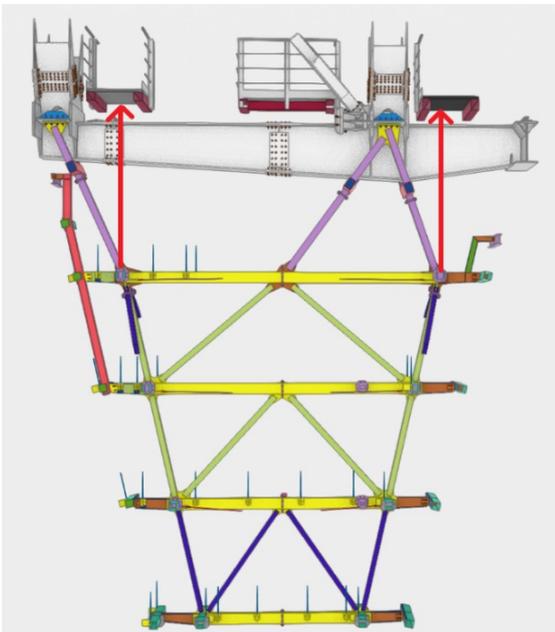


Figura 50. Sección pórtico con dos puntos de izado. Interferencia con pasarelas de cubierta.

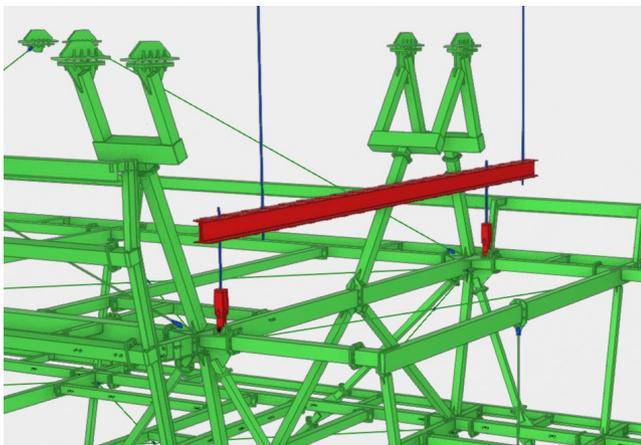


Figura 51. Detalle de la viga balancín. Modelo BIM fabricación.

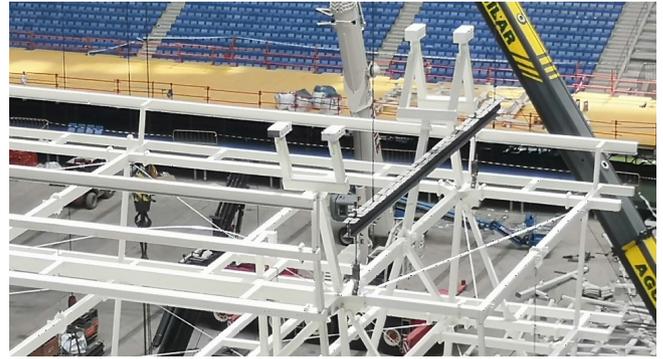


Figura 52. Viga balancín durante la ejecución.

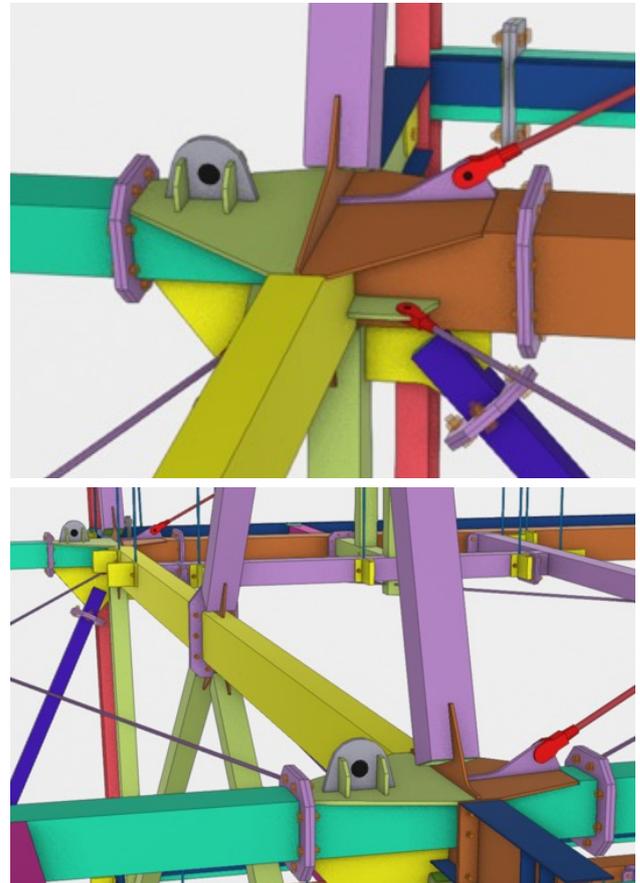


Figura 53. Detalle de nudo de izado en pórtico con 2 tiros. Modelo BIM de fabricación.

Cada uno de estos tiros se hizo con un gato situado sobre una viga puente que apoya entre un montante de cubierta y el siguiente. De esta forma el gato no generará torsiones a los montantes de la cubierta (figura 54).

En la alineación con un único punto de izado se disponen dos gatos (la carga es prácticamente el doble), uno a cada lado del montante de cubierta para no introducir excentricidades en el perfil de sección abierta de cubierta (figura 55, figura 56 y figura 57).

La conexión en el pórtico se resuelve con una chapa perpendicular a ese con dos agujeros que servirán para fijar el cable de izado mediante bulones. La geometría de esta chapa y la posición de los taladros se define teniendo en cuenta la posición de los cables de izado, condicionada por la posición real de la cercha de rodadura.

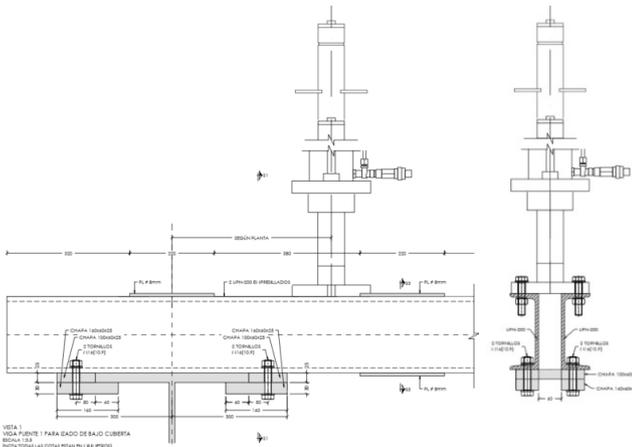


Figura 54. Plano de viga puente 1 y disposición del gato de izado.

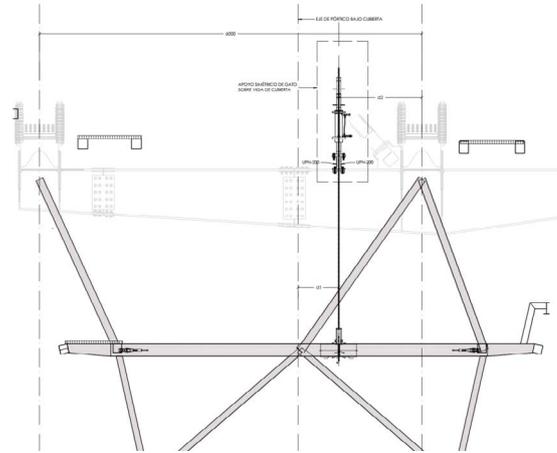


Figura 55. Sección pórtico un punto de izado.

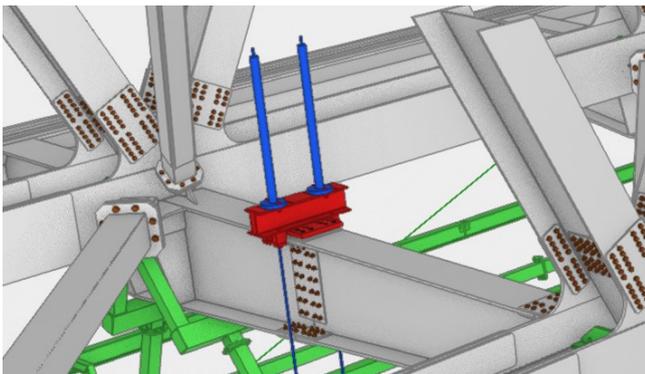


Figura 56. Apoyo de los gatos en uno de los cordones de la cercha de Rodadura. Modelo BIM de fabricación.

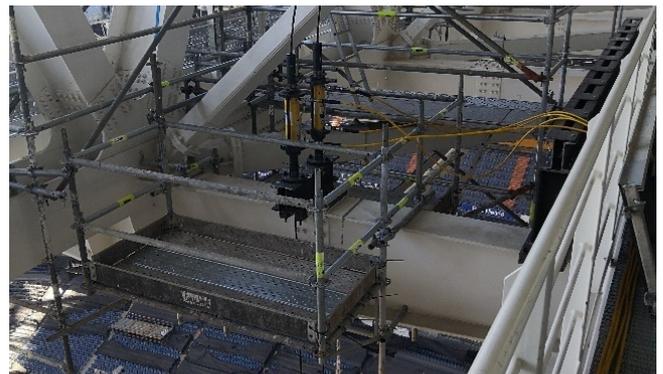


Figura 57. Apoyo de los gatos en uno de los cordones de la cercha de Rodadura. Ejecución.

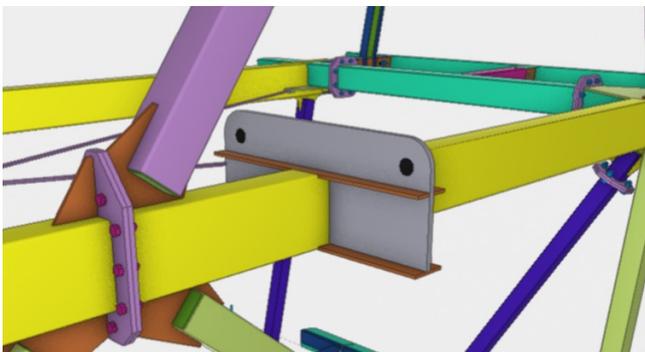


Figura 58. Detalle de nudo para izado por un punto. Modelo BIM de fabricación.

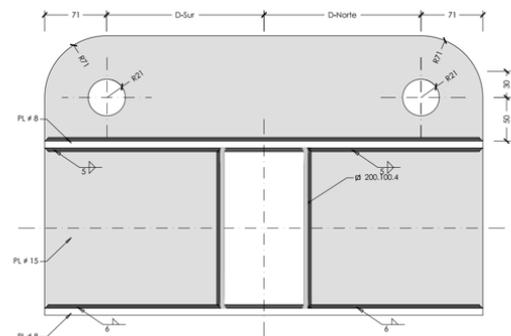


Figura 59. Detalle de cartela para su izado por un punto.

Por tanto, la distancia de los taladros al eje del pórtico principal es diferente para cada punto de izado y para cada lado (lateral este y lateral oeste). Esto provoca unas torsiones en el tubo central del pórtico en fase de montaje.

El procedimiento anteriormente descrito es válido para los tres tramos centrales, pero como se comentó anteriormente, los tramos extremos de la estructura rodean los puntales de la cercha atirantada de cubierta (figura 60). Esta circunstancia imposibilita el izado completo del tramo, lo que añade una complejidad adicional, nada menor, al proceso de montaje.

La estrategia adoptada en este caso consiste en construir la mayor parte posible de la estructura sobre la plataforma situada sobre el graderío, para posteriormente izarla y completar el montaje del tramo restante, elemento a elemento, en altura.

En la figura 61 se muestra un alzado del tramo extremo, donde se destaca en rojo la parte de estructura que no puede ser izada. Se observa que el uno de los pórticos de cuelgue de la cubierta está afectado, lo que impide su uso como punto de tiro. Esto obliga a trasladar el punto de tiro al pórtico anterior.

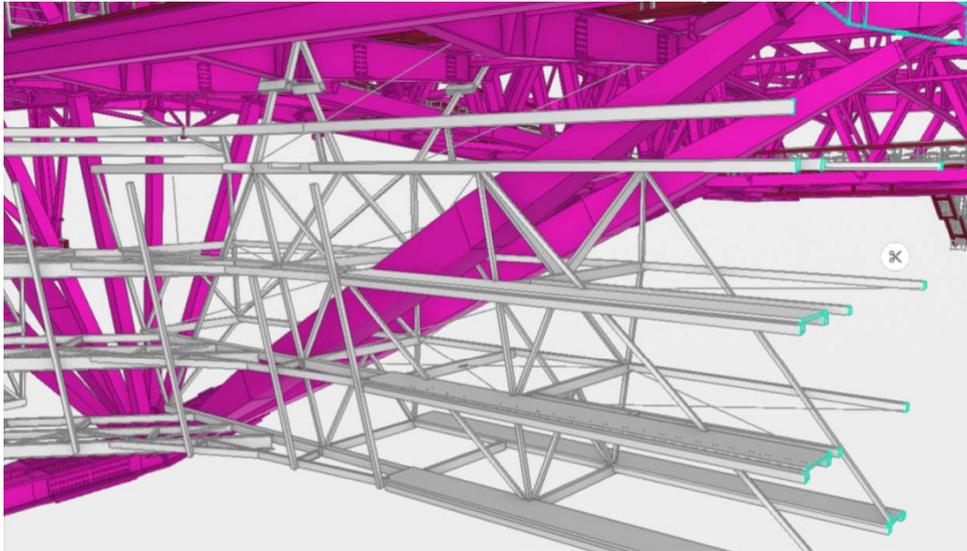


Figura 60. Tramos extremos de lateral rodeando la los desviadores de cercha de atirantada. Modelo BIM de coordinación.

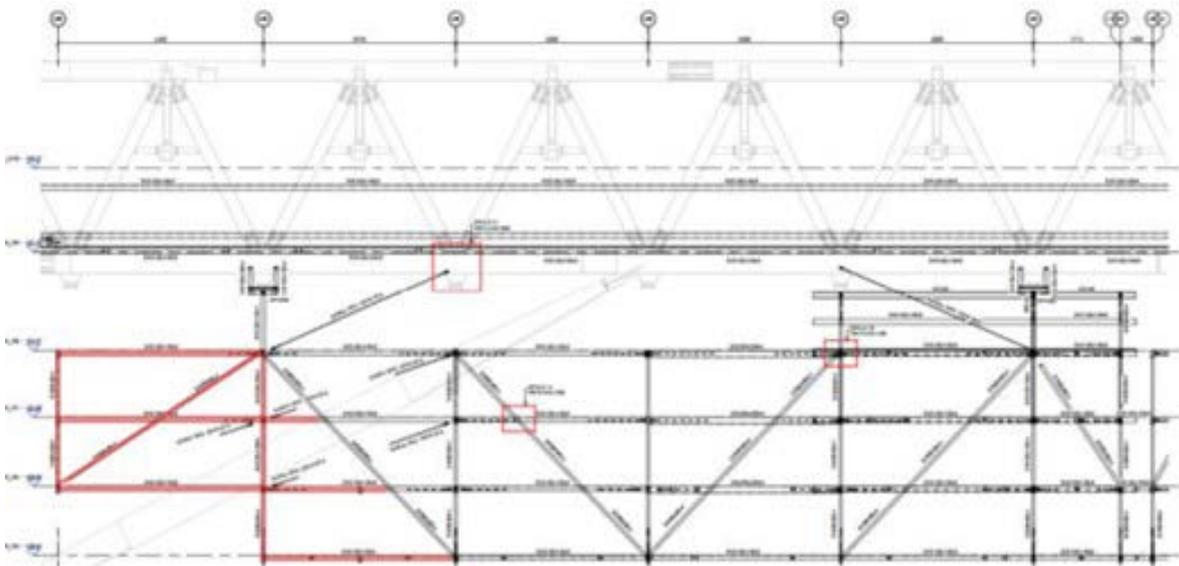


Figura 61. Tramo extremo (1 y 5). En rojo se marca la zona que puede ser izada por interferir con la cubierta.

TRAMO 1

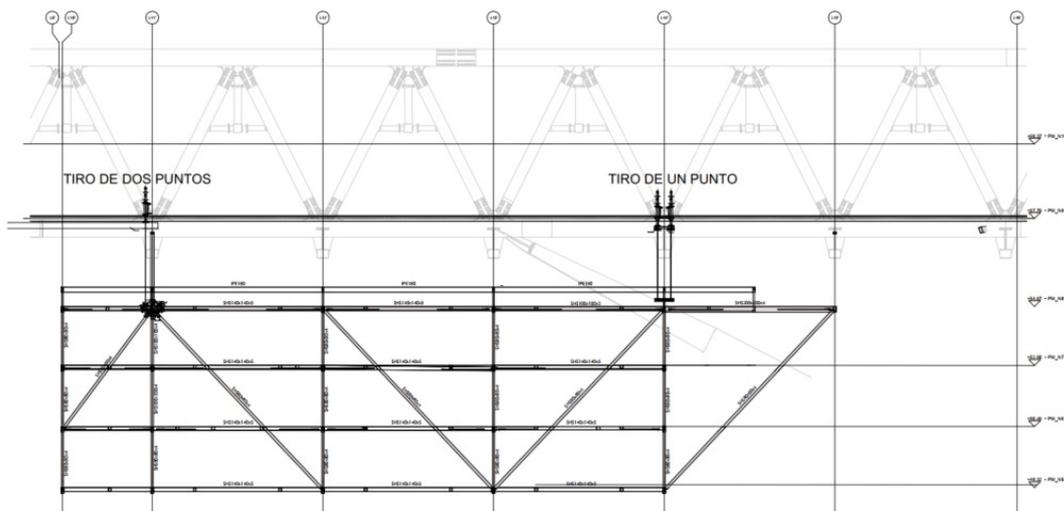


Figura 62. Tramo izado de los pórticos extremos.

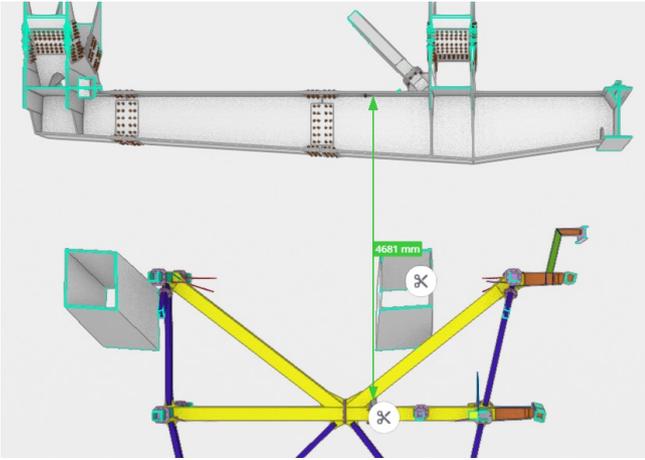


Figura 63. Punto de izado de pórtico intermedio de tramo extremo.



Figura 64. Montaje de los tramos en la estructura sobre la plataforma situado sobre los graderios.



Figura 65. Izado del módulo central. Módulo 3.



Figura 66. Izado de los tramos 2 y 4.

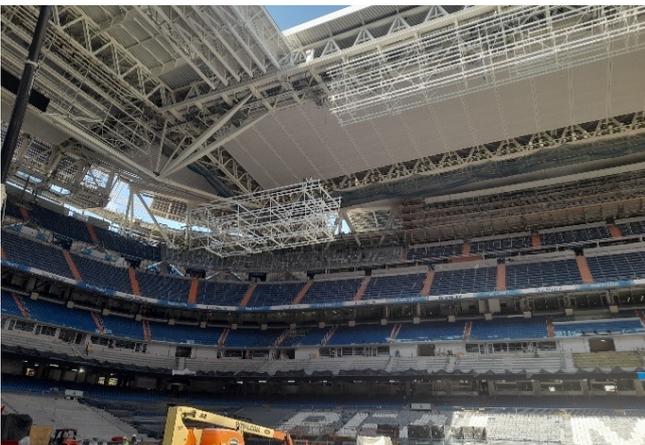


Figura 67. Izado de los tramos extremos. 1 y 5.

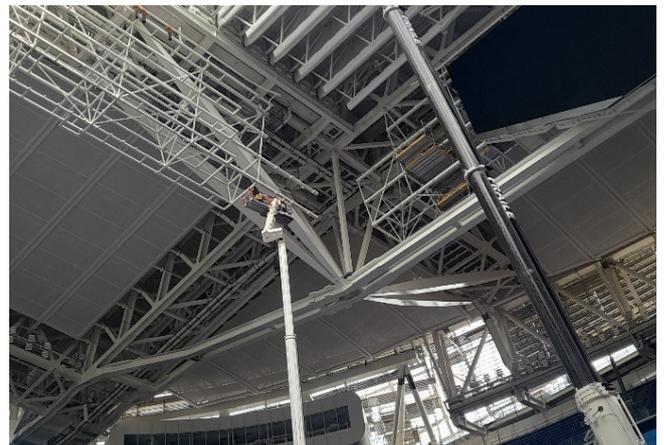


Figura 68. Colocación de elementos que rodean los puntales de la estructura de cubierta.

La configuración del tramo durante la fase de izado es la que se muestra en la [figura 62](#), donde se puede observar que el esquema estructural durante en esta fase difiere del correspondiente a la situación final. Este estado de construcción ha sido analizado, prestando especial atención a la última diagonal, que durante el izado trabaja a compresión, aunque bajo una carga muy reducida.

Este nuevo punto de izado se ha tenido que situar en el segundo nivel del pórtico intermedio, ya que en el primero no se dispone de un montante horizontal debido a la interferencia con el puntal de la cubierta.

Dado que el izado no se realiza en el mismo pórtico que los puntos de cuelgue definitivo, es necesario transferir la carga a los apoyos finales una vez completado el izado. Para



Figura 69. Instalación de las pantallas del videomarcador.



Figura 70. Estructura horizontal de la zona de curvas.

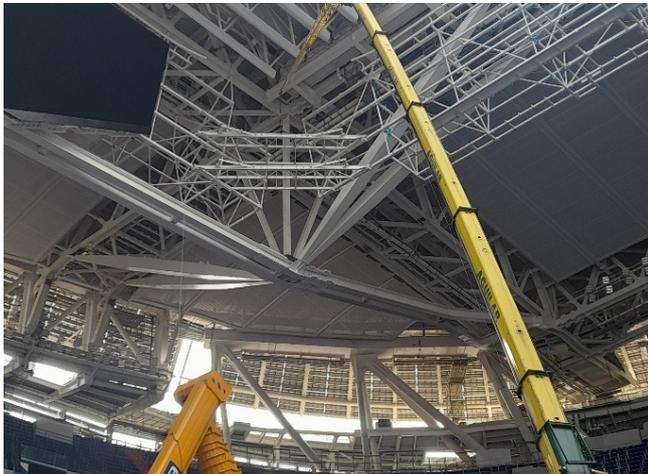


Figura 71. Izado y colocación del entramado de vigas de la estructura horizontal de las curvas.



Figura 72. Colocación de las vigas de apoyo de la pasarela.

ello, se instalan previamente los "tirachinas" de conexión con la cubierta, dejándolos listos para ser unidos al tramo izado cuando este alcance su posición final.

La ejecución de esta unión resulta especialmente compleja, ya que debe realizarse a gran altura y requiere transferir el peso de manera progresiva a medida que se va liberando la carga de los gatos.

En las figuras 64 a 69 se incluyen algunas fotos del proceso de izado y montaje de la estructura del lateral.

5.4. Estructura de esquina (zonas curvas)

Finalmente, el montaje de la estructura de la curva se llevó a cabo ensamblando en el suelo la estructura de cada nivel horizontal, excepto las vigas de apoyo de las pasarelas (figura 70), para luego ser izada con grúas hasta su posición definitiva.

Por último, se monta la estructura de soporte de las pasarelas, junto con los perfiles verticales inclinados que sostienen las pantallas del videomarcador tipo stick

Referencias

- [1] Martínez, J., Muñoz, J., & del Río, S. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Diseño y construcción de la estructura de la cubierta fija. *Hormigón y Acero*. 76(307): 65-94. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3979>
- [2] Romero, E., Hortigüela, E., & Valverde, R. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Estructuras soporte de fachada. *Hormigón y Acero*. 76(307): 199-214. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4001>
- [3] García del Valle, M., Roiz, A., & Alcaine, J. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. La ingeniería para la definición y cálculo estructural de la fachada de lamas. *Hormigón y Acero*. 76(307): 215-234. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3984>
- [4] Martínez Salcedo, J., & del Río Rodríguez, S. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Diseño y construcción de la cubierta retráctil. *Hormigón y Acero*. 76(307): 175-197. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3995>
- [5] CTE. DB SE-AE Código Técnico. Documento Básico Seguridad Estructural Acciones en la Edificación.