

Reforma Estadio Santiago Bernabéu. Estructura soporte del videomarcador

Renovation of Santiago Bernabéu Stadium. Videoboard support structure

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

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR, S.A. err@fhccor.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR, S.A. teb@fhccor.es

^c Arquitecto. FHECOR, S.A.

RESUMEN

El videomarcador del Estadio Santiago Bernabéu es un anillo de 360° con una altura variable que oscila entre 6.58 m y 10.95 m. Su soporte está compuesto por una estructura suspendida de la cubierta, cuyo diseño ha estado condicionado por la necesidad de compatibilizar sus deformaciones con las estrictas limitaciones impuestas por el fabricante de las pantallas de video. Gran parte de estas deformaciones se deben a las cargas variables de la cubierta fija, como sobrecargas de viento y nieve y la posición cambiante de la cubierta móvil.

Todo el proceso de diseño, fabricación y construcción se completó en menos de un año.

ABSTRACT

The video scoreboard at the Santiago Bernabéu Stadium is a 360° ring with a variable height ranging from 6.58 m to 10.95 m. Its support structure is suspended from the roof, with its design being influenced by the need to accommodate deformations while adhering to the strict limitations imposed by the video screen manufacturer. Many of these deformations are caused by variable loads on the fixed roof, such as wind and snow loads, as well as the changing position of the retractable roof.

The entire process of design, fabrication, and construction was completed in less than a year.

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

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

1. Introducción

Entre las intervenciones realizadas en la remodelación del Estadio Santiago Bernabéu se incluye la instalación de un videomarcador de 360° (conjunto de pantallas digitales sincronizadas que permiten la reproducción de videos de alta calidad) en el perímetro de la cubierta fija.

Consiste en un halo de 360° orientado hacia el campo con alturas variables entre 6.58 m

y 10.95 m, complementado por 10 pantallas adicionales ubicadas mirando a los graderíos superiores, sumando una superficie total de más de 3 700 m², equivalente a más de la mitad del terreno de juego.

El videomarcador en los fondos tiene una longitud de 52.67 m, mientras que los laterales tienen 114.08 m y están unidos por una zona curva con una longitud media de 18.50 m.

La estructura que lo soporta integra además los sistemas de megafonía, iluminación, calefacción, control y cámaras como la Skycam.

Para facilitar el mantenimiento, se han diseñado pasarelas y plataformas a distintos niveles.



Figura 1. Diseño final del videomarcador. (Copyright © 2024 Nuevo Estadio Bernabéu).

2. Principales condicionantes

2.1 Cuelgue de la cubierta fija

La estructura está colgada de las cerchas principales de la cubierta fija (cerchas atirantadas y cerchas de rodadura) y por tanto se ve afectada por las deformaciones de estos elementos frente a las sobrecargas y las cargas de la cubierta retráctil.

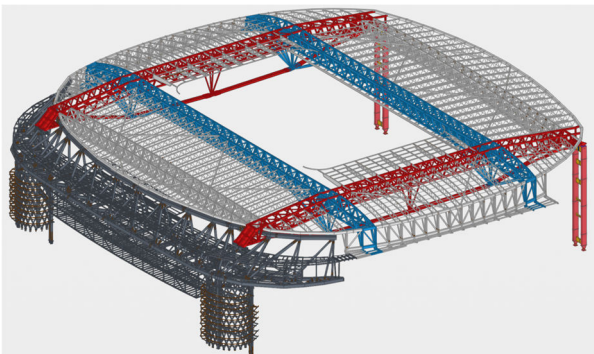


Figura 2. Cerchas principales de cubierta. Modelo BIM.

Las cerchas atirantadas (marcadas en rojo en la Figura 2), orientadas Este-Oeste, presentan deformaciones relativas mínimas, mientras que las cerchas de rodadura (marcadas en azul en la Figura 2), orientadas Norte-Sur, experimentan mayores desplazamientos debido a cargas de viento, nieve y la cubierta retráctil.

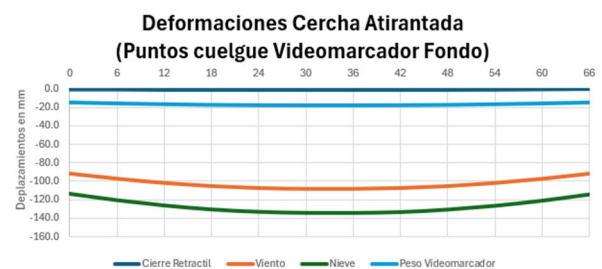


Figura 3. Deformaciones puntos de cuelgue videomarcador de fondo.

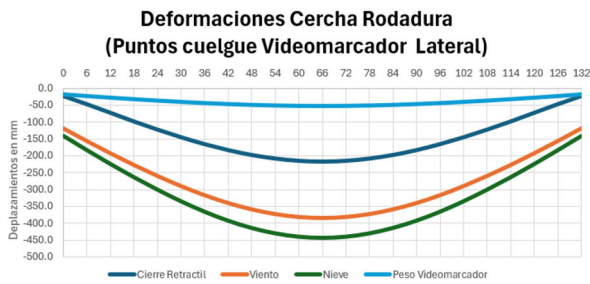


Figura 4. Deformaciones puntos de cuelgue videomarcador de lateral.

Estas diferencias condicionaron la tipología estructural a emplear en cada una de las zonas.

2.2 Límite de deformaciones de las pantallas

El fabricante del videomarcador estableció estrictos límites de deformaciones para garantizar la calidad visual y la integridad de las pantallas.

El videomarcador está compuesto por pantallas, de 2195x2195 mm² apoyada en sus cuatro esquinas que deben mantenerse alineadas con tolerancias de 50 mm en sus uniones.

También se establecen las siguientes limitaciones de deformaciones relativas:

- 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 característica.

Por último, la distorsión fuera del plano de cualquiera de los cuatro puntos de apoyo no puede ser mayor de 9 mm.

2.3 Interferencias con las cerchas de cubierta

El tirante inferior de las cerchas Norte-Sur de la cubierta pasa entre la estructura de soporte de los fondos y por lo tanto es necesario evitar choques entre ambos.

De igual forma, la parte extrema de la estructura de los laterales también rodea a los puntales de apoyo de la cercha de rodadura.

Para evitar interferencias con estos elementos ha sido necesario cambiar posición de perfiles y modificar soluciones de elementos de arriostramiento.

Esta situación además de afectar al diseño de la estructura ha condicionado y complicado fuertemente el proceso de montaje de estas zonas.



Figura 5. Estructura de fondos envolviendo al tirante de la cercha de cubierta.



Figura 6. Estructura de laterales rodeando a los puntales de apoyo de la cercha de rodadura.

2.4 Instalaciones, plataformas y pasarelas.

La estructura diseñada no solo sostiene los paneles de las pantallas del videomarcador, sino que también incorpora sistemas de megafonía, iluminación, calefacción y otras instalaciones (Figura 7). Para ellos es necesario disponer plataformas y elementos de mantenimiento y de cuelgue.

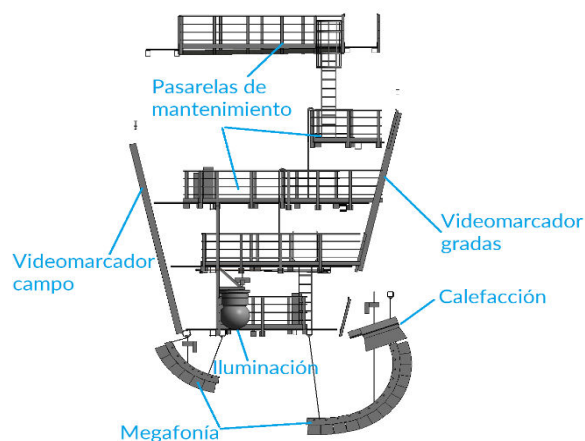


Figura 7. Instalaciones alojadas en la estructura de soporte del videomarcador.

2.5 Peso de la estructura

La necesidad de optimizar el peso de la estructura fue crítica, ya que el diseño inicial de

la cubierta consideraba cargas basadas en el videomarcador de la licitación, que era más pequeño.

Gracias al diseño de una solución eficiente, la optimización de los perfiles y el uso de tramex y barandillas más ligeras, se logró mantener el peso final por debajo de las estimaciones iniciales.

Tabla 1. Comparativa pesos videomarcador inicial y construido en toneladas.

	Peso Inicial [t]	Peso final [t]	Diferencia [t]
pp estructura	368.4	275.0	-93.4
Tramex	77.2	51.5	-25.6
Barandilla	76.6	46.0	-30.6
Parcial	522.1	372.5	-149.6
Videomarcador	144.5	164.7	20.2
Total	666.6	537.2	-129.4

2.6 Plazo de diseño y construcción

El videomarcador, adaptado a la evolución tecnológica, fue presentado en septiembre de 2022, con la condición de ser instalado durante el verano de 2023, período en el que el terreno de juego no estaría en uso. Esta circunstancia obligó a comprimir los plazos de todos los involucrados.

En términos generales, el diseño estructural se llevó a cabo entre septiembre de 2022 y enero de 2023, seguido por la fabricación de la estructura metálica entre enero y junio de 2023, y culminó con el montaje final entre junio y septiembre de 2023. La coordinación entre Fhecor, FCC, Horta Coslada y BBR fue clave para cumplir con estos estrictos plazos.

3. Descripción de la estructura

3.1 Estructura de fondos

Sus dimensiones aproximadas son 74.85 m de largo, 5.50 m de ancho medio y una altura máxima de 13.65 m.

Se ha optado una solución estructural simple y funcional, compuesta por 12 pórticos verticales independientes, separados 6 metros

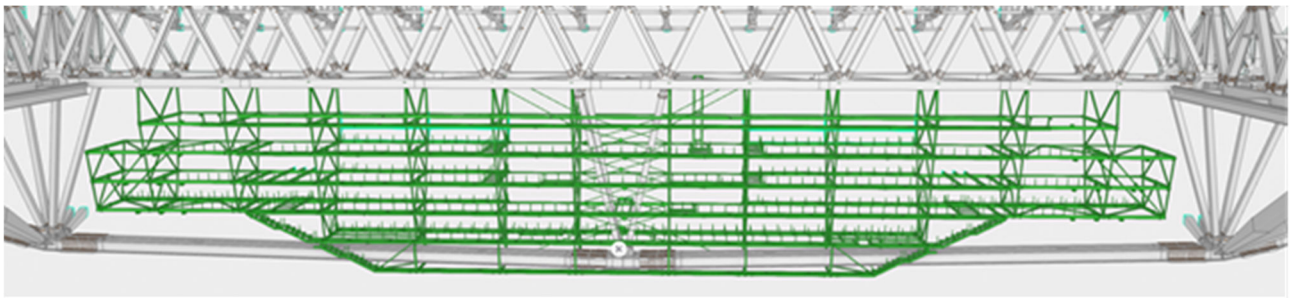


Figura 8. Modelo 3D de la estructura de fondos.

Los elementos estructurales están mayoritariamente fabricados con tubos cuadrados y rectangulares de los pórticos, mientras que las porterías emplean perfiles doble T armados. Todos ellos de acero S-355 JRH.

Los pórticos se fabricaron en taller en dos mitades, las cuales se ensamblaron mediante uniones atornilladas en obra antes de ser posicionadas en su posición definitiva con ayuda de una grúa. Del mismo modo, los largueros entre pórticos se unieron utilizando conexiones atornilladas.

La unión con las cerchas de cubierta también se ha realizado atornilladas con chapas de regulación para facilitar su replanteo.

entre sí. Estos pórticos están arriostrados mediante elementos en forma de K y se encuentran conectados directamente a los nudos de la cercha de cubierta.

En los extremos se incorporan dos pórticos adicionales en voladizo de 4 metros, ya que no es posible conectarlos a la cubierta. Estos voladizos se estabilizan mediante diagonales que los vinculan al pórtico contiguo.

La altura típica de los pórticos es de 11.35 m, complementada con “porterías” rígidas articuladas y diagonalizada para rodear el tirante inferior de la cercha y controlar deformaciones transversales.

Las cargas longitudinales se resisten mediante cruces de San Andrés dispuestas en la zona central para minimizar los esfuerzos producidos por el gradiente térmico.

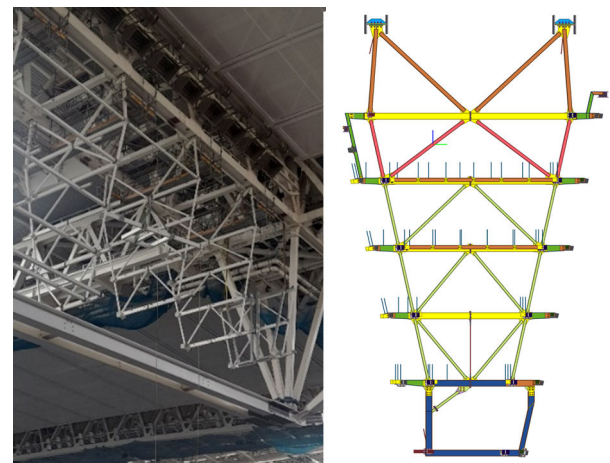


Figura 9. Izquierda. Pórticos tipos durante la construcción. Derecha. Esquema pórtico con “portería”.

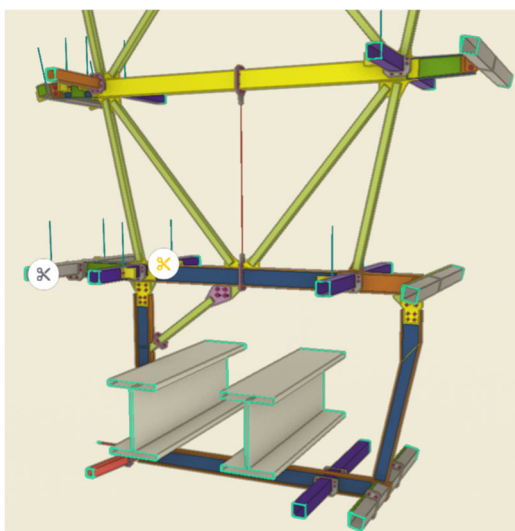


Figura 10. Detalle de “portería” con el tirante inferior de cubierta. Modelo de taller (Horta - Coslada).

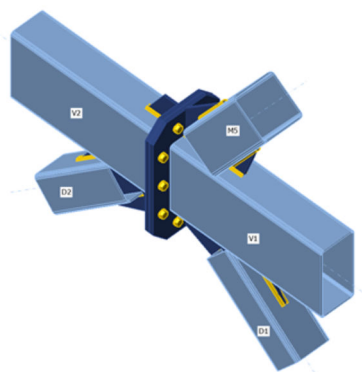


Figura 11. Detalle unión atornillada de conexión de las mitades de pórtico.

3.2 Estructura de laterales

Esta estructura tiene una longitud de 132.90 m, con un ancho medio de 5.80 m y una altura de 9.17 m.

La concepción estructural de la estructura soporte de los laterales está fuertemente condicionada por las deformaciones para acciones variables de la cubierta fija de la que está suspendida (ver Figura 4) y de las limitaciones de deformación exigidas por el fabricante del videomarcador (apartado 2.2).

Inicialmente, se analizó una solución similar a la de los fondos, con pórticos verticales colgando de la cercha de rodadura, pero las

deformaciones resultantes superaban los límites establecidos.

Una vez descartada esta opción, se plantea dividir la estructura en cinco módulos independientes, que se comportan como elementos rígidos, colgados de la cubierta únicamente por los pórticos extremos de cada módulo. De esta forma, se minimizan las deformaciones relativas dentro de cada módulo, permitiendo el cumplimiento de las deformaciones prescritas por el fabricante. Por contra, esta división en módulos rompe la continuidad del videomarcador al crear juntas entre ellos, situación que se consideró admisible.

Para lograr este comportamiento como sólido rígido se ha diseñado una cercha de toda la altura del videomarcador en cada una de las caras (lado campo y lado grada).

Transversalmente hay dos tipos de pórticos: los principales, que sirven de cuelgue de la cercha de rodadura, y los intermedios que forman parte de la celosía.

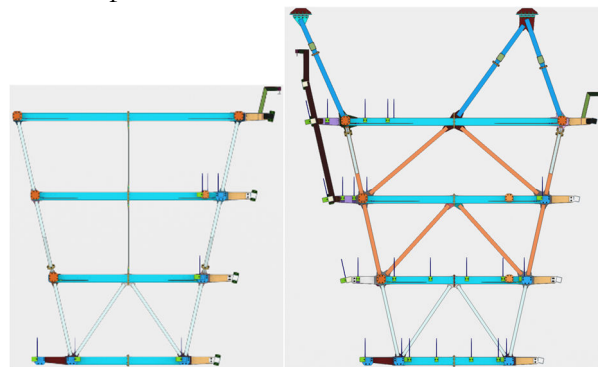


Figura 12. Tipos de pórticos. Izquierdo secundario, derecha principal.

Los módulos tienen longitudes variables. Los extremos (1 y 5) son los más largos, con siete pórticos cada uno: dos principales y cinco secundarios, tres de ellos entre los principales y dos en voladizo. Los módulos 2 y 4 cuentan con seis pórticos: dos principales y cuatro secundarios. El módulo central (3) tiene cinco pórticos, con dos principales y tres secundarios.

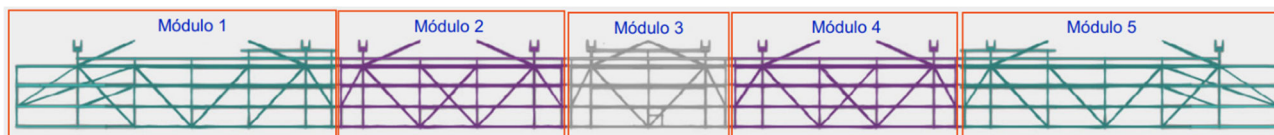


Figura 13. Estructura de laterales. 5 módulos.

Para resistir las cargas horizontales perpendiculares al videomarcador, se dispusieron cruces de San Andrés en todos los niveles, que actúan como cerchas horizontales, transmitiendo la carga a los pórticos de cuelgue y de ahí a la cubierta.

En cuanto a las cargas horizontales longitudinales, se transmiten mediante las cerchas hasta el nivel superior de los pórticos, donde se transfieren a la cubierta a través de tirantes.

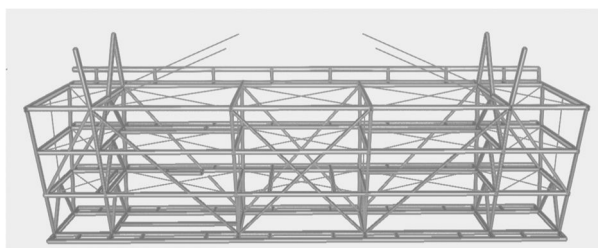


Figura 14. Modelo 3D del módulo 2.



Figura 15. Módulo 2 durante la construcción.

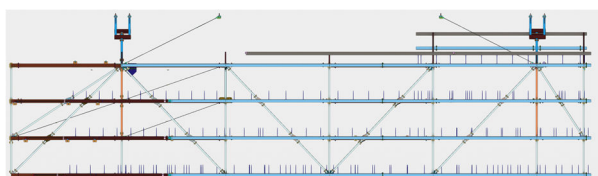


Figura 16. Módulo extremo. Módulos 1 y 5.

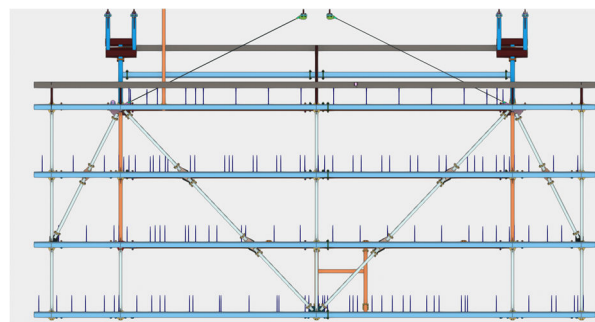


Figura 17. Módulo central. Módulo 3.

En la figura siguiente se puede observar la deformada, prácticamente como sólido rígido de los módulos 4 y 5.

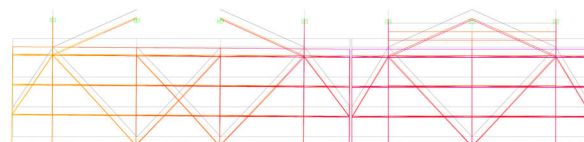


Figura 18. Deformaciones módulos 4 y 5.

Como se indicó anteriormente en los extremos de la estructura existen interferencias con la estructura de cubierta (Figura 6) lo que obligó a la modificación de la geometría de esta zona y ha complicado enormemente su montaje.

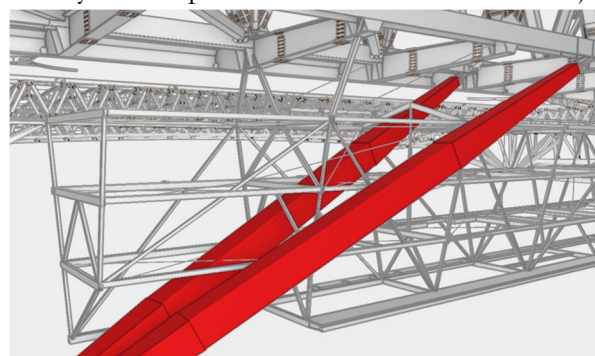


Figura 19. Interferencia de los extremos con la estructura de cubierta.

Al igual que en los fondos, la estructura está compuesta fundamentalmente por tubos cuadrados o rectangular de acero S-355 JRH. Las cruces de San Andrés se han realizado con cables

tipo “Pfeifer” y los bulones con acero 36NiCrMo 16+QT.

Los pórticos se fabricaron en taller en dos mitades, que luego se unieron en obra mediante conexiones atornilladas de calidad 10.9. Debido a que los módulos actúan como cerchas, fue necesario ensamblarlos completamente a nivel del suelo antes de izarlos a su posición final.

Destaca la conexión de los módulos con las cerchas de cubierta, realizada mediante una estructura en forma de “tirachina” que permite fijarlos con tornillos a ambos lados del nudo, utilizando los taladros previamente previstos.

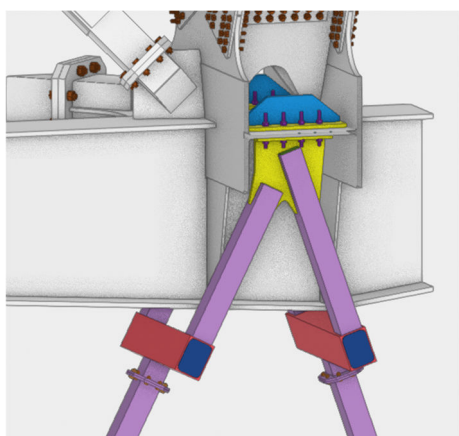


Figura 20. Unión del tirachinas con la cercha de rodadura. Modelo de taller (Horta Coslada).

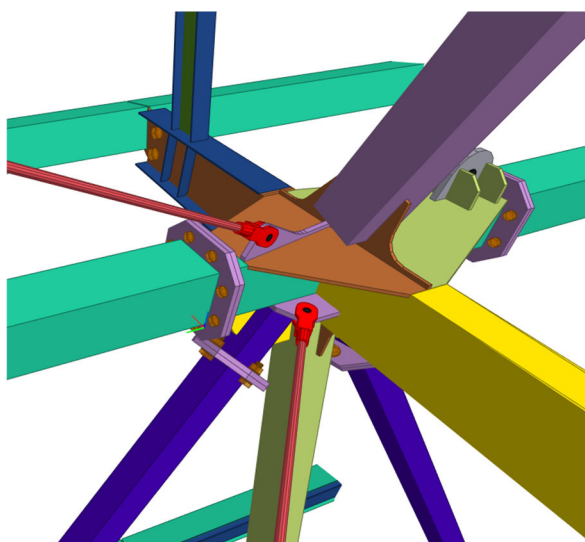


Figura 21. Detalle de nudo de nivel superior del pórtico de los laterales. Modelo de taller (Horta Coslada).

3.3 Estructura de esquina (zonas curvas)

La transición entre las estructuras de los laterales y fondos se realiza mediante una estructura especial conocida como estructuras de curvas, que sirven de soporte para las pantallas "stick", las cuales apoyan sobre bastidores verticales inclinados en lugar de los horizontales que lleva el resto del videomarcador.

El principal desafío de esta estructura radica en la necesidad de diseñar una solución que se apoye en los fondos y laterales, pero que sea compatible con las diferentes deformaciones de ambas estructuras. Para ello se han diseñado uniones que permiten los movimientos relativos producido por el térmico, viento y los desplazamientos verticales diferenciales entre las dos cerchas de apoyo de los fondos y laterales, atirantada y rodadura, respectivamente.

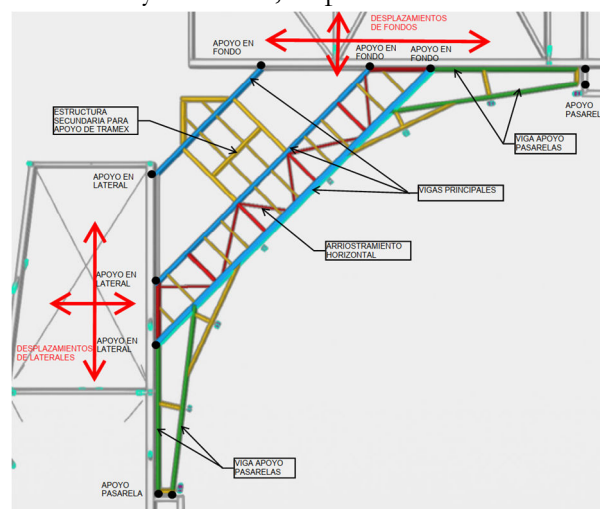


Figura 22. Esquema de diferentes elementos y movimientos de la estructura de curvas.

La solución adoptada consiste en tres plataformas horizontales independientes, apoyadas en las estructuras de los fondos y laterales (marcadas con puntos negros sobre la Figura 22), y conectadas entre sí por perfiles inclinados regulables que sirven como soportes para las pantallas del videomarcador. Cada plataforma está formada por tres vigas principales, sobre las cuales se apoya una estructura secundaria que da soporte a los forjados de tramex. Para resistir los esfuerzos

horizontales, fundamentalmente producidos por el viento, se ha dispuesto una celosía entre la primera y segunda viga.

Además, para mantener la continuidad de las pasarelas de mantenimiento longitudinales, se han colocado dos vigas paralelas a las vigas de fondo y lateral, que apoyan sobre la viga principal y en el último tramo de las pasarelas de los fondos y laterales.



Figura 23. Zona de curvas durante el montaje.

El apoyo de las vigas principales se realiza mediante uniones con bulones y chapas rasgadas, permitiendo desplazamientos en dos direcciones perpendiculares. En las vigas interiores, ha sido necesario diseñar una ménsula inferior debido a la interferencia con la viga de apoyo de la pasarela de mantenimiento (Figura 24).

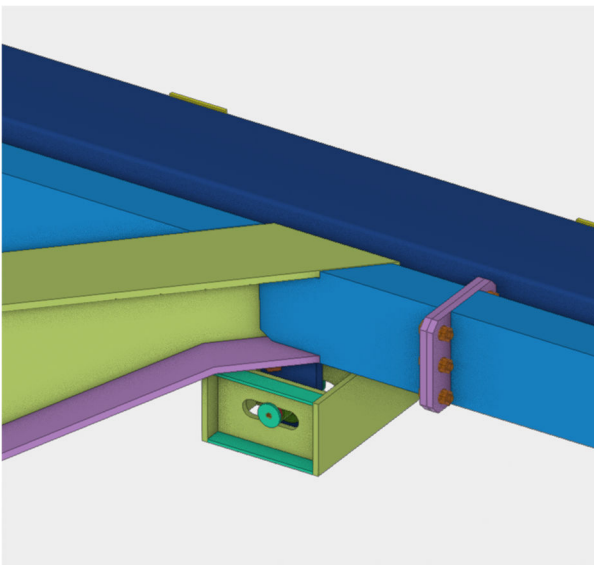


Figura 24. Apoyo de la estructura de curva sobre fondo.

Al igual que las anteriores, la estructura también tiene que soportar diversas pasarelas e instalaciones además de las pantallas, como se muestra en las representaciones gráficas.

Agradecimientos

El diseño y construcción del videomarcador se llevó a cabo en un tiempo récord de menos de un año, gracias al esfuerzo conjunto y coordinado entre la oficina técnica de obra, la constructora FCC, el taller metálico Horta Coslada, el especialista en izado BBR, el fabricante y especialista tecnológico de videomarcadores Daktronics, el diseñador de arquitectura e instalaciones ARUP, y el diseñador estructural Fhecor.