

Reforma del Estadio Santiago Bernabéu (Madrid). El nuevo Edificio Este

Renovation of Santiago Bernabéu Stadium. The new East building

Eduardo Romero Rey^a, J. Miguel Haro Tornero^b y Elena Hortigüela Páramo^c

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

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR, S.A. / jmht@fhcor.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR, S.A. / chp@fhcor.es

RESUMEN

El nuevo Edificio Este se encuentra ubicado en la plaza de la calle Padre Damián. Su compleja estructura integra múltiples funciones: soporte de dos nuevos anfiteatros, apoyo para la cubierta fija y la envolvente de fachada, y contenedor de flujos verticales mediante grandes escaleras en ménsula. En su parte superior, se remata con una celosía tridimensional que cierra el recorrido peatonal del Estadio y alberga espacios de oficinas y ocio.

ABSTRACT

The new East Building is located in the new plaza on Padre Damián Street. Its complex structure integrates multiple functions: support for two new grandstands, support for the fixed roof and facade envelope, and a container for vertical circulation flows through large cantilevered staircases. At its top, it is crowned with a three-dimensional lattice that closes the pedestrian pathway around the Stadium and houses office and leisure spaces.

PALABRAS CLAVE: Estructura metálica, vibraciones.

KEYWORDS: Steel structure, vibrations.

1. Introducción

El nuevo Edificio Este está situado en el lateral de la calle Padre Damián y la zona que ocupaba el edificio anexo construido en la reforma de 2005 y que ha sido demolido previamente.

El diseño y construcción del Edificio Este presentaron numerosos desafíos, derivados de su emplazamiento, su interacción con la estructura existente, y los exigentes requisitos funcionales y arquitectónicos. Estas condiciones hicieron del edificio una obra de alta complejidad geométrica, marcada por elementos estructurales como apeos, cuelgues y voladizos de gran magnitud (Figura 1). La ejecución exitosa de este proyecto fue posible gracias a la colaboración de FCC, tanto a nivel de obra como a través de sus

Servicios Técnicos, cuya contribución permitió superar no solo los retos estructurales, sino también la exigente y compleja coordinación interdisciplinaria requerida.

El objetivo fundamental del edificio es servir de gran núcleo de comunicación de sus 10 niveles, permitiendo la circulación de personas a través de sus escaleras, “convencionales” y mecánicas, y sus núcleos de ascensores. En su interior también se alberga un gran espacio comercial, zona para la colocación de instalaciones, así como dos nuevos anfiteatros de gradas en su parte superior.

El nivel superior del edificio está rematado por la “Viga Corona,” una celosía

tridimensional que se extiende hacia el Norte y Sur, superando las torres existentes (A y D). En la parte central, la viga corona se apoya directamente en los pórticos del edificio, mientras que en los extremos utiliza estructuras tipo "árbol" y dos grandes pórticos, denominados "muletas," que se integran con la estructura existente, sin conectarse a ella. En un nivel intermedio de esta viga, se desarrolla el



Figura 1. Vista general del Edificio Este durante la construcción

2. Niveles de forjado y Bowl

2.1 Estructura horizontal

El Edificio Este cuenta con 10 plantas sobre rasante, con superficies variables en cada nivel para crear áreas de varias alturas en las zonas nobles. Los forjados destacan por su complejidad geométrica, adaptándose en el lado exterior a los contornos de las escaleras y, en el lado interior, a la geometría del estadio existente.

En cuanto a la estructura horizontal, se ha resuelto mediante vigas de acero al nivel de los forjados que además de servir de apoyo de la chapa colaborante hace de arriostramiento a los pilares de los diferentes pórticos (Figura 2).

Como regla general, para las vigas principales que conforman los pórticos no se ha considerado el comportamiento mixto por lo

Skywalk, un anillo perimetral que conecta los tramos Norte y Sur. Además, en el nivel superior de la viga se apoya la visera, que forma parte de la fachada del edificio.

En los extremos Norte y Sur, se han diseñado dos nuevos núcleos de hormigón que conectan todos los niveles, conocidos como Torreones Norte y Sur, que proporcionan rigidez al conjunto frente a acciones horizontales.

que no es necesario conectarlas al forjado de chapa colaborante. Como excepción, se ha previsto acción mixta en las vigas principales de los vanos de mayor luz para control de vibraciones, así como para evitar posibles efectos de pandeo lateral de las mismas. Por el contrario, en las correas dispuestas entre pórticos sí se ha considerado el comportamiento mixto y se han conectado con el forjado.



Figura 2. Vigas principales y correas de forjado

El forjado de chapa colaborante tiene un canto de 15 cm y en el dimensionamiento no se ha considerado la chapa en situación accidental de fuego para evitar la necesidad de protegerla.

La conexión de las correas con la viga principal se realiza a cortante mediante tornillos de calidad 8.8.

Entre el edificio existente y el Edificio Este se ha dispuesto una junta de dilatación, lo que ha requerido retranquear el último pilar de apoyo y dejar en voladizo el tramo final de forjado, con longitud aproximada de 5 metros.

Adicionalmente, las vigas de los pórticos se encuentran afectadas por la presencia de los pilares de hormigón existentes, lo que ha obligado a rodearlos mediante unas vigas en forma de diapasón (Figura 3).

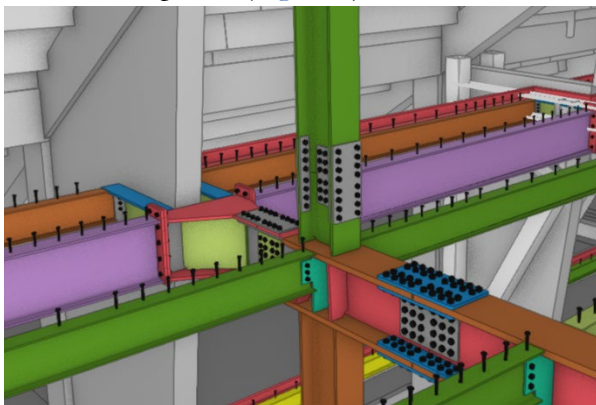


Figura 3. Modelo de taller (INBERSA). Estructura de forjados en ménsula rodeando pilares existentes (diapasones)

Los movimientos máximos previstos en la junta de dilatación en dirección Este-Oeste son de 30 mm debido al térmico y 35 mm por el viento. En dirección Norte-Sur, los desplazamientos máximos alcanzan los 25 mm, también atribuibles al viento.

Los péndulos de apoyo de la cubierta fija atraviesan los forjados del Edificio Este en los Torreones Norte y Sur. Para evitar colisiones, se han dejado espacios libres de 25 cm en dirección Norte-Sur y 18 cm en dirección Este-Oeste, generando un hueco de 290x126 cm en los forjados.

2.2 Estructura vertical

La estructura vertical del Edificio Este está formada por pórticos, pilares metálicos y núcleos y pantallas de hormigón.

Hay veintiún pórticos radiales al estadio situados en los ejes E201, E18, E16, E14, E12, E10, E08, E06, E021, E011, E031, E05, E07, E09, E11, E13, E15, E17, E191 y E25 y separados entre sí una distancia de 8 m aproximadamente.

Adicionalmente a estos elementos metálicos, se disponen dos núcleos de hormigón que, junto a dos pantallas situadas en dirección perpendicular al plano de fachada, dotan de rigidez horizontal al edificio.

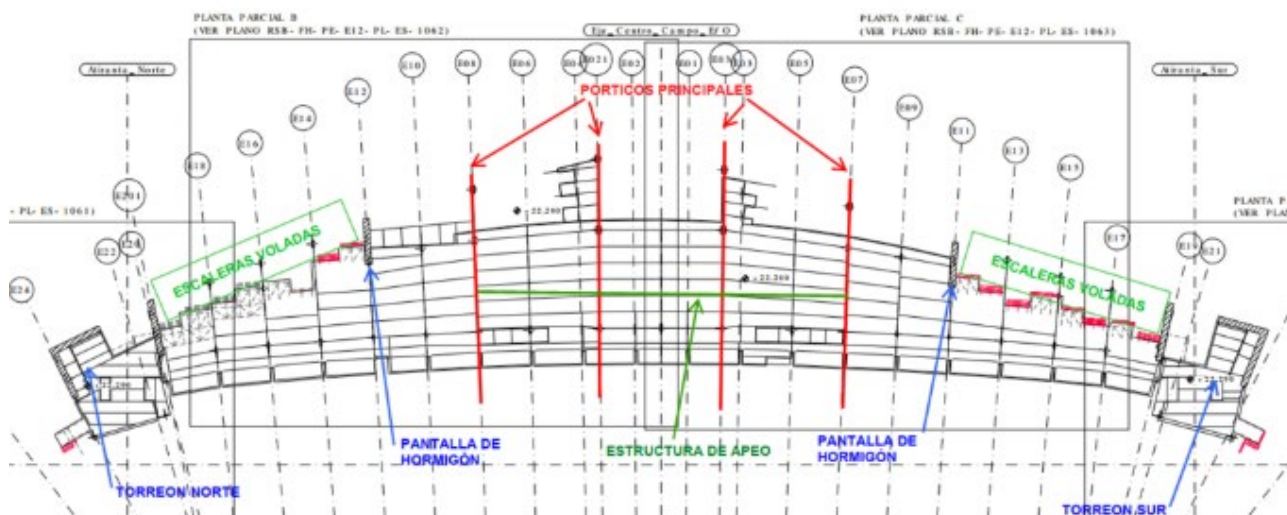


Figura 4. Planta con distribución de pórticos y elementos principales del Edificio Este

2.2.1. Pórticos y pilares metálicos

En las alineaciones radiales se disponen pórticos que sirven de soporte a los forjados y las gradas. Según su tipología, y enumerados desde el centro a los bordes, se distinguen los siguientes elementos (Ver Figura 4).

- Cuatro pórticos principales en la zona central del edificio, separados aproximadamente 18 m. Los dos pilares exteriores sirven además de apoyo de la corona (Figura 5).
- Pórticos secundarios que nacen en el nivel N07 sobre la viga de apeo (ver apartado 2.2.2), que transmite la carga a los pórticos principales. Estos pórticos secundarios sirven de apoyo a las vigas portagradas (Figura 6).
- A ambos lados, una pantalla de hormigón armado con estructura metálica en su parte superior para formar los pórticos de apoyo de los graderíos (Figura 7).
- Tres pórticos a ambos lados en la zona de escaleras voladas (Figura 7).
- Finalmente, a ambos lados se encuentran los núcleos de hormigón de torreón Sur y Norte (ver apartado 2.2.3).

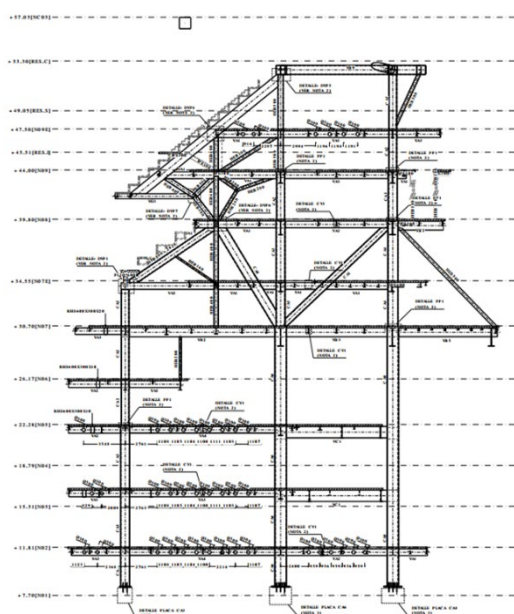


Figura 5. Pórtico tipo en alineaciones principales

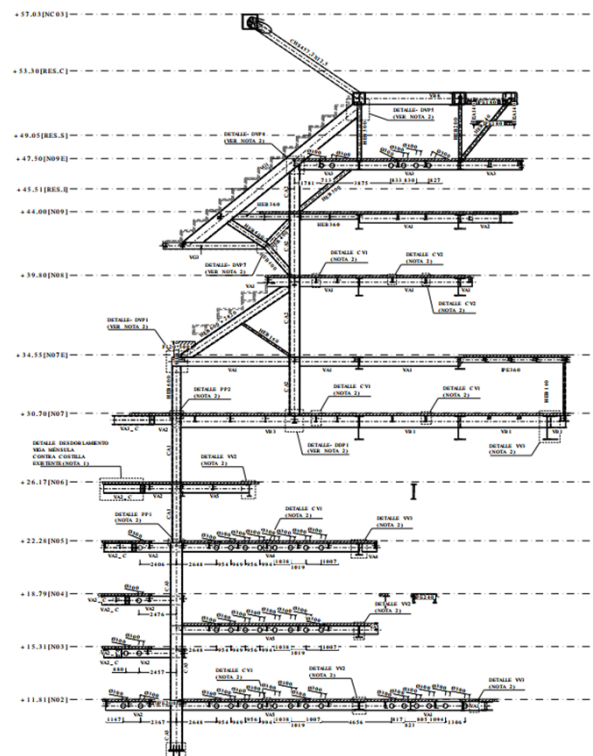


Figura 6. Pórticos metálicos secundarios tipo entre alineaciones principales

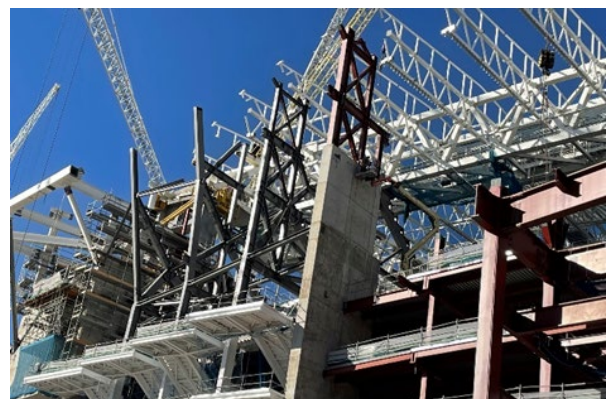


Figura 7. Pórticos en alineaciones de pantalla y de escaleras voladas en ejecución

Debido a la configuración variable del edificio, tanto en altura como en anchura, cada una de las alineaciones descritas son diferentes en cada crujía.

Los pórticos se han diseñado con uniones rígidas con arriostramientos en cruces de San Andrés o en K. Transversalmente, las correas y el forjado de chapa colaborante los arriostran frente a pandeo.

2.2.2. Estructura de apeo

La estructura de apeo para apoyo de los pórticos secundarios se plantea como una gran estructura en celosía en dirección Norte-Sur, entre los niveles N07 y N09 (Figura 8).

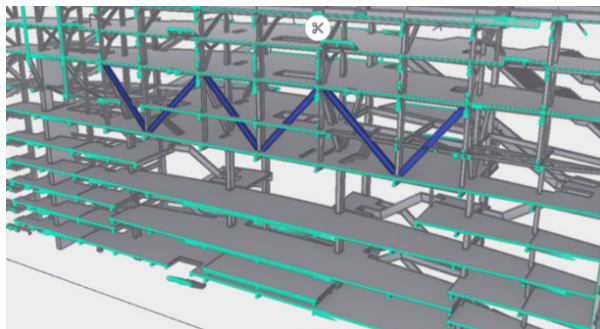


Figura 8. Modelo IFC: Celosía para apeo de pórticos intermedios E05, E11 y E06

2.2.3. Núcleos de hormigón y pantallas

Los núcleos de hormigón, situados entre las alineaciones E24-E201 y E191-E23, arrancan sobre el nivel N00 y se prolongan hasta el nivel N08, inmediatamente debajo de la estructura de la viga corona, a la que sirve de apoyo.

Las pantallas de hormigón se sitúan en las crujías que limitan las escaleras voladas, ejes E11 y E12. Se levantan en hormigón hasta el nivel N08 continuándose mediante estructura metálica triangulada hasta llegar al nivel superior del cuarto anfiteatro de gradas (Figura 9).

Ambos elementos aportan rigidez longitudinal y radial (junto con los pórticos) al Edificio Este, absorbiendo los esfuerzos horizontales Norte-Sur transmitidos por la cubierta.

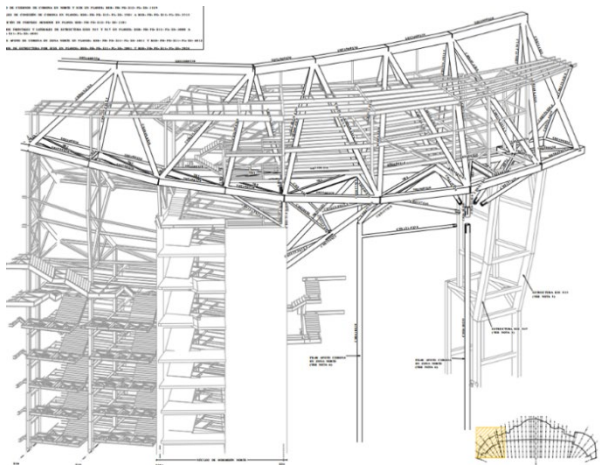


Figura 9. Modelo IFC: Vista de núcleo de hormigón Norte

Además, son los encargados de resistir gran parte del empuje de viento que la fachada transmite al Edificio Este.

2.2.4. Pilares apeados y cuelgues

Además de los pórticos metálicos y núcleos y pantallas de hormigón, ha sido necesario disponer apoyos adicionales que van apeando en los forjados inferiores o estructuras de cuelgue para garantizar el correcto apoyo de todo el contorno de los forjados.

A modo de ejemplo, hay que destacar el cuelgue del contorno del forjado del nivel N07 que “vuela” más de 8,5m para seguir el contorno de fachada. Esta zona de forjado se suspende mediante dos tirantes metálicos inclinados desde la viga de contorno de forjado para conectarse a los pórticos principales a nivel N08 (Figura 10).



Figura 10. Tirantes de cuelgue de forjado

2.3 Bowl

La nueva estructura de bowl, que constituye el tercer y cuarto anfiteatro del Edificio Este, se apoya en los pórticos anteriormente

Las gradas se plantean mediante elementos prefabricados de hormigón, en forma de “L”, apoyados en las vigas portagrade

mediante elementos elásticos y sobre el elemento prefabricado inferior (Figura 11).

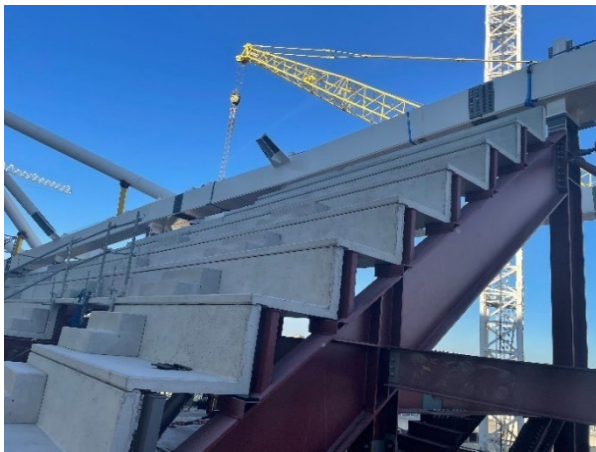


Figura 11. Vigas portagradas y gradas prefabricadas

3. Escaleras

Todas las escaleras del edificio, con la excepción de las escaleras situadas dentro de los Torreones, se resuelven mediante estructura metálica.

3.1 Escaleras voladas Norte y Sur

Se trata de ocho escaleras, cuatro al Norte y cuatro al Sur, que conectan los niveles N01 y N07. Están situadas hacia la fachada exterior y, en muchos casos, sobresalen considerablemente más allá del pilar más exterior, sobre el cual no se apoya (ver Figura 12 y Figura 13).

El funcionamiento de las escaleras voladas es el de una gran ménsula, con una luz de hasta 9 metros y con un canto igual a la altura entre los forjados que conecta. Con este diseño, la zanca superior queda en tracción (tirante) y la inferior en compresión (puntal), concentrándose la carga principalmente en las dos zancas centrales.

Para que ambas zancas se encuentren en equilibrio, se dispone una viga horizontal unida rigidamente a ambas zancas en la arista interior de la meseta y unos perfiles diagonales de arriostramiento.

Este tipo de comportamiento genera esfuerzos horizontales, además de los verticales, en los forjados donde se apoyan las escaleras. Para transmitir estas cargas a los pórticos, se han

diseñado unas celosías horizontales en el forjado.

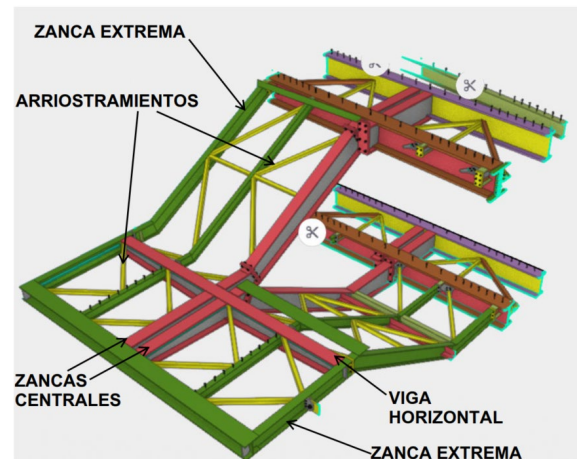


Figura 12. Modelo de taller (INBERSA): Escalera volada

Por último, estas baterías de escaleras sirven de arriostramiento frente a pandeo de los pilares exteriores de los pórticos, los cuales quedaban completamente exentos. Para ello se diseñó una conexión únicamente a cargas horizontales.

3.2 Escaleras perimetrales

Las escaleras perimetrales son unas escaleras de gran longitud (aproximadamente entre 41-45 m) que recorren la parte exterior del edificio más allá de los pilares exteriores de los pórticos y sirven para conectar el nivel N07, donde ya han finalizado las baterías de escaleras voladas, con los niveles N08 y N09 (Figura 13).

El esquema estructural de estas escaleras consiste en tres zancas con perfiles IPE600 continuos que apoyan en ménsulas empotradas en los pilares exteriores de los pórticos y en las pantallas de hormigón armado de las alineaciones E11 y E12. Estas ménsulas están separadas entre sí hasta 14 m y tienen un vuelo que alcanza los 4,50 m.

En general, las ménsulas de apoyo coinciden con las mesetas, sin embargo, en unos pocos casos el apoyo se produce en la parte inclinada de la zanca, lo que llevó a diseñar unos perfiles en doble T distorsionados (las alas y el alma no son perpendiculares) para materializar

correctamente el apoyo de las zancas IPE600 en la ménsula.

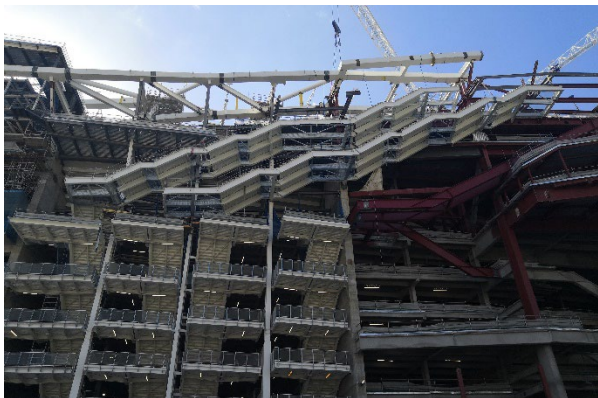


Figura 13. Escaleras perimetrales sur y escaleras voladas (por debajo)

3.3 Escaleras mecánicas

El Edificio Este cuenta con numerosas escaleras mecánicas que facilitan el acceso y la salida. Destacan especialmente las escaleras TMI 15 y TMI 16 debido a su considerable longitud.

Estas dos escaleras arrancan en el nivel N07 y desembarcan en el nivel N09 (13,3 m por encima). La longitud del tramo de escalera es de aproximadamente 35 m con luces entre apoyos que llegan a los 17,5 m (Figura 14).

La estructura de apoyo de estas escaleras mecánicas se resolvió mediante dos vigas armadas paralelas de 1,0 m de canto y separadas entre sí 1,91 m.

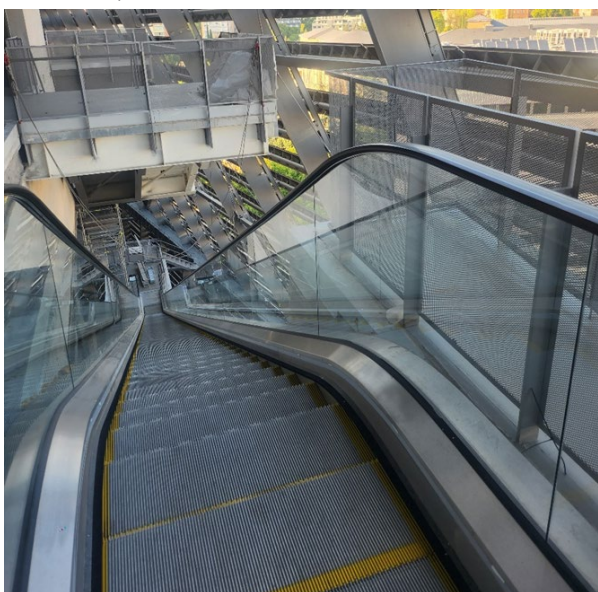


Figura 14. Visual interior de las escaleras mecánicas

4. La viga corona

La viga corona cierra el edificio en su parte superior y se prolonga hacia el Norte y el Sur, sobre las torres A y D hasta enlazar con los fondos sur y norte del estadio. Sirve de soporte a varios elementos estructurales como el Skywalk, la zona de restaurantes, la zona de oficinas y la fachada exterior.

Es una celosía tridimensional de acero con cordón superior y dos inferiores conectados por diagonales. Los cordones son de sección cajón y las diagonales, de tubos circulares (Figura 15). Las vigas doble T en los cordones inferiores soportan los pilares de oficinas y restaurantes.

La celosía adquiere mayor canto en la zona de las torres (Figura 16), mientras que este va disminuyendo progresivamente en la zona central. El cordón superior se sitúa en planta sensiblemente hacia el interior del edificio, resultando una geometría de celosía distorsionada, distorsión que va aumentando hacia el eje del campo.

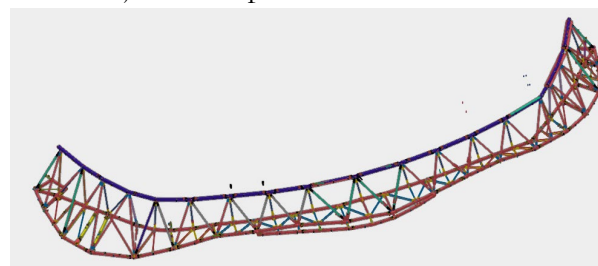


Figura 15. Modelo IFC. Viga corona

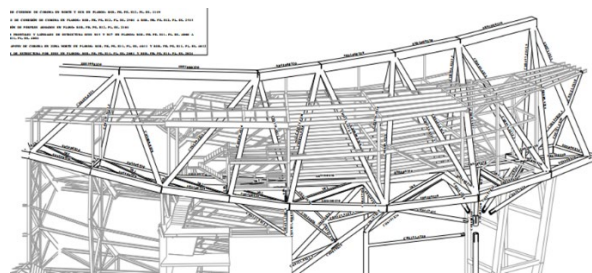


Figura 16. Viga corona. Zona torres

4.1 Apoyos

La mayor parte de la corona se apoya en los pórticos y en los núcleos de hormigón, con separación entre apoyos muy moderada.

El gran reto de diseño en cuanto a apoyos ha sido los dos extremos, donde la corona vuela

sobre las torres A y D existentes y los pórticos principales del nuevo edificio dejan de existir.

Además, estas zonas albergan los restaurantes y oficinas, por lo que, para evitar desplazamientos y deformaciones excesivas, se han dispuesto los siguientes apoyos fuera de la huella de edificio:

- Dos pilares circulares metálicos sobre cada torre existente (A y D) (Figura 18).
- Dos pórticos sobre cada extremo de la corona (muletas) (Figura 18).

4.1.1. Apoyos en torres

Los apoyos en la zona de las torres comienzan en forma de puntales inclinados apoyados en los núcleos del Edificio Este, tanto en coronación como en pared exterior. Continúa con dos nuevos pilares metálicos en forma de árbol que se integran dentro de la estructura de las propias torres (Figura 17 y Figura 18).

Así, se ejecutan dos nuevos pilares metálicos en la torre A (sur) y otros dos en la torre D (norte) que se rellenan de hormigón. Para estos pilares se define una nueva cimentación mediante encepados de micropilotes y se arriostran en horizontal con la estructura existente simplemente para evitar su pandeo.

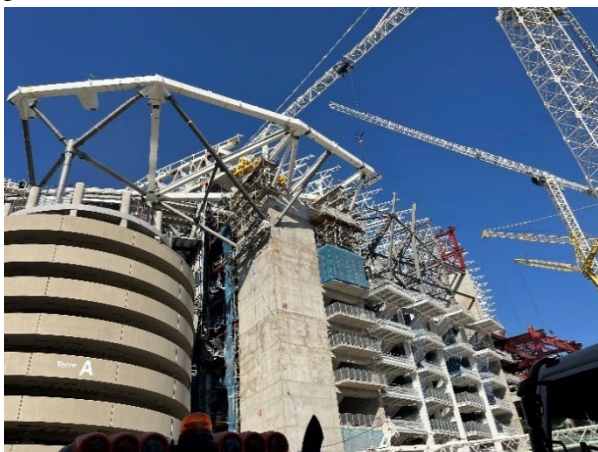


Figura 17. Viga corona. Apoyos en torres en ejecución

4.1.2. Apoyos en pórticos metálicos “muletas”

Los apoyos extremos de la viga corona en ambos fondos, de muy complicada resolución por encontrarse totalmente sobre la huella de la

estructura existente, se plantea mediante unas estructuras metálicas, “muletas”, que quedan integradas entre dos costillas de hormigón existentes (Figura 18).

Estos apoyos se dispusieron tras un análisis de deformaciones y vibraciones de los extremos de la viga corona. Así, se comprobó que estos apoyos reducían a la mitad las deformaciones en los extremos y el modo de vibración vertical de la punta de la corona dejaba de ser el modo de vibración principal. Adicionalmente, se conseguía reducir de manera significativa (en torno a un 25%) la reacción vertical en los nuevos pilares verticales de las torres.

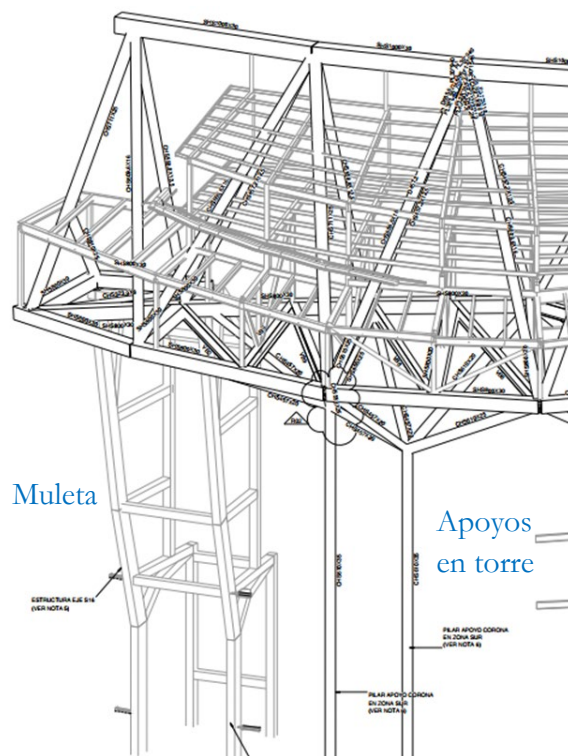


Figura 18. Viga corona. Apoyos en pórticos “muletas”

Cada una de las dos muletas está formada por dos planos paralelos aporticados y conectados entre sí en horizontal en determinados niveles.

El apoyo de la viga corona sobre las muletas se resuelve en cada una de ellas mediante dos aparatos de apoyo de neopreno. Sobre los pórticos de las muletas, estos apoyos se producen de manera totalmente excéntrica, pues la posición de estas está condicionada por la

ubicación de las costillas existentes. Esta situación implica que los pilares interiores de los pórticos se encuentren traccionados de manera permanente.

La cimentación de los pilares exteriores de los pórticos, comprimidos, se realiza de manera conjunta con la cimentación de las costillas existentes situadas muy próximas a estos nuevos pilares.

En cuanto a la cimentación de los pilares interiores, sometidos a tracción, y también situados junto a los pilares de hormigón existentes del pórtico de gradas, ha sido necesario diseñar una nueva cimentación, debido a la imposibilidad de que la cimentación existente absorba las reacciones generadas.

En el fondo Sur, las nuevas cimentaciones consisten en tres micropilotes por pilar resueltos mediante barras GEWI directamente roscadas a la placa de anclaje de los pilares, de tal manera que la tracción se transmite directamente a los elementos de cimentación profunda.

En el lado Norte, la posición de estos pilares coincide sobre la cimentación existente que puentea el túnel ferroviario de ADIF. La existencia de este túnel imposibilita una solución similar a la del sur, por lo que se optó por transmitir las reacciones a la viga de apeo existente. Para ello se diseñaron unas conexiones que abrazan a estas vigas. La viga existente no precisó de ninguna intervención ni refuerzo porque se comprobó que la reacción transmitida por los nuevos pilares era menor que el peso propio de la viga, de dimensiones considerables.

4.2 Estructuras sobre la viga corona

4.2.1. UCO-UCI

La zona de oficinas de la Unidad Central Operativa (UCO) y la Unidad de Control Interno (UCI) se sitúan en el lado Sur de la viga corona. Consta de dos plantas más una cubierta ligera accesible solo para mantenimiento.

De forma general, la estructura de esta zona se configura con una serie de pórticos apoyados en la corona que sirven de soporte a

correas perpendiculares que sirven a su vez como apoyo del forjado colaborante (Figura 19).

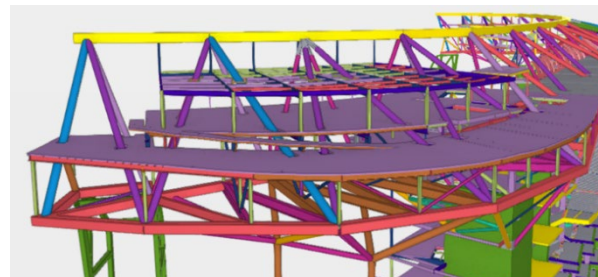


Figura 19. Modelo IFC – Oficinas UCO-UCI.
Solución estructural

4.2.2. Restaurantes

La zona de restaurantes consta de dos plantas más cubierta y su diseño es similar a las oficinas, mediante una serie de pórticos apoyados en la corona que sirven de soporte a correas perpendiculares que sirven a su vez como apoyo del forjado colaborante. La distancia entre pórticos es variable y oscila entre los 5 y 10 m aproximadamente.

4.2.3. Skywalk y forjados basculantes

El Skywalk se sitúa, en todo el perímetro del Estadio, en el espacio libre que deja el corte horizontal de la envolvente de fachada en su parte superior (Fachada con visera).

Parte de este itinerario transitable discurre sobre la viga corona del Edificio Este, entre la zona de oficinas hasta los restaurantes. La estructura de soporte de este anillo, cuyo nivel es variable a lo largo de su desarrollo, se apoya en los perfiles de la viga corona (Figura 20).

En función de la posición del suelo terminado del Skywalk respecto a la estructura de viga corona, se distinguen dos soluciones estructurales:

- En las zonas en que hay espacio suficiente entre el Skywalk y el cordón inferior de la corona se disponen vigas principales continuas que apoyan en pilares que nacen, a su vez, en los perfiles de la corona.
- Cuando no hay espacio suficiente las correas se apoyan directamente sobre enanos metálicos que nacen en los perfiles de la corona.

En ambos casos, sobre las correas se ha diseñado como sección mixta disponiendo sobre ellas un forjado de chapa colaborante

Cabe destacar que esta zona, situada en un nivel intermedio de la celosía de corona, se ve fuertemente influenciada por la presencia de las diagonales de esta, lo que hizo necesaria la disposición de correas auxiliares para generar los huecos para el paso de estas diagonales de gran tamaño y a su vez permitir el correcto apoyo del forjado mixto.

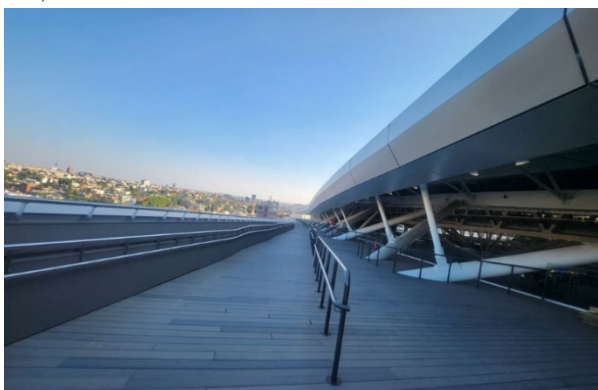


Figura 20. Skywalk. Compatibilidad con diagonales de corona

En la envolvente de la fachada del Estadio existen cuatro grandes juntas verticales que permiten independizar los movimientos relativos entre las nuevas estructuras de los laterales (Este y Oeste) y la cubierta, esta última con importantes movimientos.

Estas juntas tienen desplazamientos verticales y horizontales que afectan a la estructura de fachada y a los forjados del Skywalk, debiendo absorber estos movimientos diferenciales materializando la transición entre las diferentes estructuras. Estas zonas móviles se conocen como forjados basculantes del Skywalk.

Como estructura principal se plantean dos vigas perimetrales que se conectan a la estructura de vigas coronas Este y Oeste en un lado, y en el otro, al Skywalk de cubierta.

Las conexiones de estas vigas principales permiten absorber movimientos en su dirección longitudinal, así como las rotaciones para absorber desplazamientos verticales y transversales.

Para generar una superficie de forjado que pudiera acompañar los movimientos y distorsionarse en su plano, forjando sobre las vigas principales se dispusieron una serie de piezas alargadas a modo de bandejas independientes entre sí (Figura 21).

En la interfaz entre bandejas se dispuso una junta capaz de absorber movimientos de cizalla entre dos piezas consecutivas. De esta forma, se acomodan los movimientos entre estructuras de apoyo por medio de distorsiones de los forjados (Figura 22).

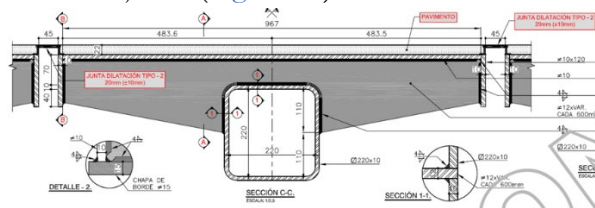


Figura 21. Sección de bandeja de forjado en losas basculantes de Skywalk

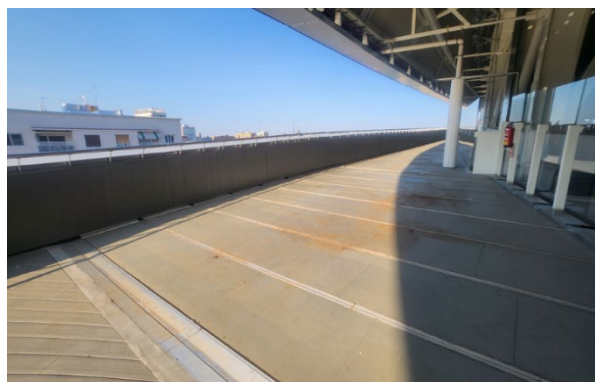


Figura 22. Skywalk. Forjado basculante

Agradecimientos

El diseño y construcción del Edificio Este ha sido posible gracias al esfuerzo conjunto y coordinado de la oficina técnica de obra, la constructora FCC, el taller metálico INBERSA, el diseñador de detalle de arquitectura e instalaciones ARUP, y el diseñador estructural Fhecor.