

Reforma Estadio Santiago Bernabéu. Estructuras soporte de fachada

Renovation of Santiago Bernabéu Stadium. Façade support structures

Eduardo Romero Rey^a, Elena Hortigüela Páramo^b y Rodrigo Burgos Valverde^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR, S.A. Director de División en Edificación. err@fhcor.es

^b Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR, S.A.

^c Arquitecto. FHECOR, S.A.

RESUMEN

Dentro de la remodelación que el Real Madrid C.F. está haciendo a su estadio una de las actuaciones destacadas es su nueva fachada compuesta por un revestimiento de lamas que continúa estéticamente con la cubierta y que confiere al conjunto una imagen emblemática. El soffito y la fachada inferior se resuelven mediante costillas verticales suspendidas de la cubierta o de las vigas corona y apoyadas inferiormente en los puntales que conforman el soffito. La visera queda totalmente apoyada en cubierta y vigas corona. El gran desafío ha consistido en acompañar con la fachada los diferentes movimientos que presentan las estructuras sobre las que apoya, generándose cuatro grandes juntas verticales.

ABSTRACT

As part of the renovation that Real Madrid C.F. is carrying out on its stadium, one of the standout features is its new façade, consisting of a cladding of slats that aesthetically continues the roof and gives the structure an iconic appearance. The soffit and lower facade are designed with vertical ribs suspended from the roof or the crown beams and supported at the bottom by the struts that form the soffit. The canopy is fully supported by the roof and crown beams. The main challenge has been to allow the facade to accommodate the different movements of the supporting structures, resulting in four large vertical joints.

PALABRAS CLAVE: Estructura metálica, juntas de movimiento, proceso constructivo, elementos colgados

KEYWORDS: Steel structure, movement joints, construction process, hanging elements

1. Introducción

La nueva envolvente del Estadio Santiago Bernabéu se organiza en tres soportes y tres sistemas constructivos diferentes (cubierta fija, estructura de fachada y zócalo). Cubierta fija: lamas de acero inoxidable sobre cubierta ligera tipo Kalzip (cubierta cálida e impermeable). Fachada: lamas de acero inoxidable ancladas a subestructura (cerramiento permeable). Zócalo:

fachada ligera convencional anclada a estructura existente.

El presente artículo se centra en la subestructura de fachada que sirve de soporte a las lamas de revestimiento. La superficie total en desarrollo cubierta por lamas es de 39 218 m² y se desglosa de la siguiente manera (incluyendo soffito):

- Estructura de fachada Norte: 4 707 m²

- Estructura de fachada Sur: 5 353 m²
- Estructura de fachada Este: 15 140 m²
- Estructura de fachada Oeste: 14 018 m²

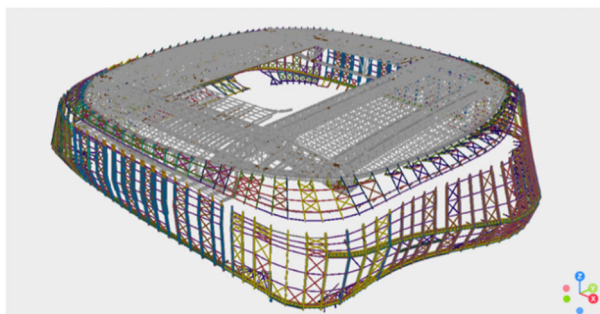


Figura 1. Modelo IFC: Fachada y cubierta. Vista desde S-E



Figura 2. Fachada. Vista desde el Nor-Este.
(Copyright © 2024 Nuevo Estadio Bernabéu)

2. Descripción geométrica de la fachada

2.1 La fachada en altura

La forma de la nueva envolvente de fachada se obtiene a partir del barrido de tres líneas curvas que definen las cuatro áreas principales de la fachada exterior: fachada superior, también denominada visera, fachada intermedia e inferior y sofito. Entre fachada intermedia e inferior se produce un quiebro, “acento”, de altura variable a lo largo del perímetro.

Sofito y fachada intermedia e inferior forman una misma subestructura. La visera constituye una subestructura independiente.

Entre la visera y la fachada intermedia se desarrolla el Skywalk.

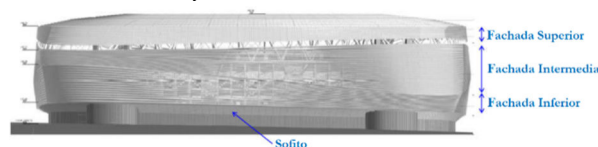


Figura 3. Zonas de fachada



Figura 4. Vista de subestructura de fachada del torreón durante la construcción

El revestimiento de lamas de acero inoxidable en forma de ‘V’ con bastidores auto portantes se anclan a los elementos principales de la subestructura, resuelta en su totalidad en acero. La longitud de las lamas es variable, normalmente entre 6.5m y 7.8m.

Los miembros principales de la subestructura de fachada son elementos articulados que constituyen las costillas de visera, las costillas de fachada y los puntales del sofito. Se conectan entre sí por medio de travesaños y tirantes en cruz de san Andrés, como elementos de arriostramiento entre ellas, en paños alternos.

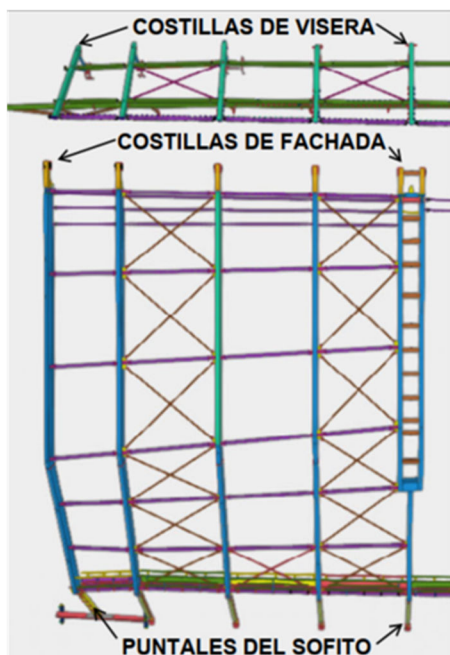


Figura 5. Principales elementos estructurales de la estructura de soporte de la fachada

Las costillas y puntales se organizan radialmente en 118 ejes.

En general los ejes de la subestructura de fachada (a los que corresponde costilla y puntal) se alinean con la posición de las pilas de hormigón de la estructura existente del graderío del estadio (ampliación de 1992, realizada por el Estudio Lamela); con la excepción del lateral Este, en el que el nuevo edificio se interpone entre la subestructura de fachada y la estructura original.

El motivo de esta coincidencia es que la subestructura de fachada se conecta horizontalmente con estas pilas de hormigón en su extremo inferior (sofito), excepto en el lateral Este en que los ejes de la fachada se sitúan a 7.0m de distancia como promedio, y el sofito se conecta a los nuevos pilares metálicos del edificio Este.

La visera actúa como transición entre la cubierta y el resto de la fachada.

La fachada intermedia forma una banda de altura variable entre 25.0m y 37.5m de altura. Debajo de esta, el sofito conecta la nueva fachada con el edificio existente, el cual también presenta variaciones en tamaño: 18.5m en fachada Oeste y 4.5m en fachada de fondos.

2.2 Los sectores de la fachada

Además de la división horizontal en tres zonas (sofito, fachada intermedia y visera), la fachada se divide verticalmente en cuatro sectores, separados por juntas de movimiento (Figura 6).

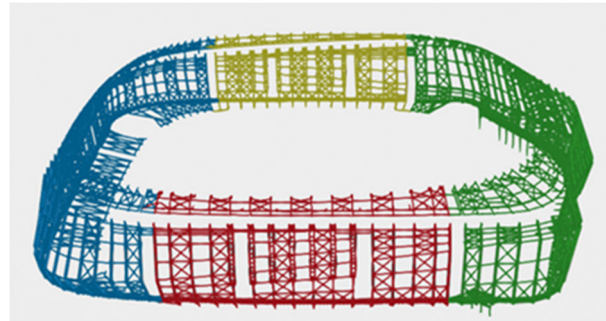


Figura 6. Sub-estructura de fachadas en 3D, mostrando en colores los diferentes "sectores" de la estructura

Cada sector de la estructura de fachada se conecta a subestructuras distintas e independientes entre sí: Edificio Este, Viga corona Oeste, estructura existente de fondos y estructura de Cubierta. Este hecho determina la necesidad de crear juntas de movimiento entre los diferentes sectores de la fachada.

Además de las cuatro juntas de movimiento principales, la subestructura de fachada se divide en juntas térmicas, formando paños de 5 o 6 costillas (40.0m a 45.0m).

En las siguientes imágenes se muestra la posición de las juntas de dilatación en las diferentes fachadas, en rojo las principales entre edificios y en azul las dispuestas entre módulos.

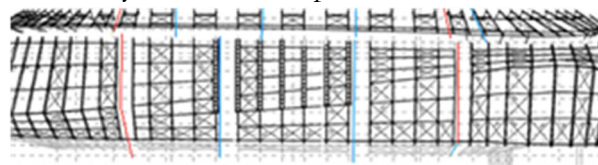


Figura 7. Juntas de dilatación en fachada Sur



Figura 8. Juntas de dilatación en fachada Oeste

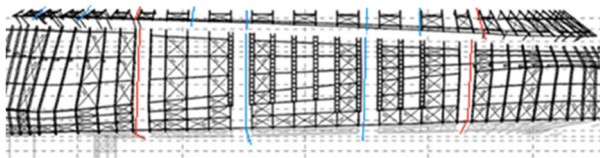


Figura 9. Juntas de dilatación en fachada Norte

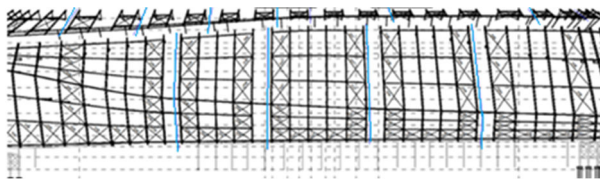


Figura 10. Juntas de dilatación en fachada Este

2.3 Relación de la fachada con las estructuras colindantes del Estadio

2.3.1. Puntos de apoyo en diferentes sistemas estructurales

El factor más decisivo en el diseño de la subestructura de fachada es el hecho de que, en cada uno de los cuatro sectores descritos en el apartado anterior, las costillas que forman los elementos principales apoyan (o cuelgan) en diferentes sistemas estructurales.

La fachada se relaciona con todo el perímetro del edificio, nuevo o existente, y en su diseño ha sido fundamental la colaboración tanto de la oficina de obra como los Servicios Técnicos de FCC.

Las 44 costillas de la fachada Este cuelgan de la estructura de “corona” del Este. Esta estructura de corona del Este sirve para conformar el lateral Este del Skywalk, para atar en dirección Norte-Sur la estructura de cubierta, y para apoyar las subestructuras de visera y fachada en su extremo superior.

Las 42 costillas de la fachada Oeste apoyan en la estructura de “corona” del Oeste, estructura puente que salva la luz entre las dos nuevas torres del Oeste y sirve de apoyo a la “viga museo” y a la visera y fachada el Oeste.

Las 16 costillas de las fachadas Norte y Sur apoyan (o cuelgan) directamente de la estructura de cubierta fija. Concretamente, las subestructuras de visera de fondos apoyan en las cerchas de fondos de la cubierta, mientras que las costillas de fachada cuelgan de sendas vigas

de borde voladas desde las cerchas de fondo para formar el Skywalk Norte y Sur.

Las dos estructuras de corona (Este y Oeste) y los dos fondos de la estructura de cubierta son estructuras completamente independientes entre sí. Únicamente la cubierta y corona del Oeste comparten entre sí los puntos de apoyo verticales (torres del Oeste), pero son estructuras independientes en todo lo demás.

La estructura de fachada tiene que acomodarse en servicio al distinto comportamiento estructural de cada una de las estructuras en las que apoya, que presentan diferentes movimientos (verticales y horizontales) para cargas permanentes y sobrecargas de uso, térmico y viento.

Este criterio de apariencia: conseguir una envolvente continua a partir de una subestructura apoyada en estructuras diferentes, junto con la incertidumbre en la posición exacta en que cada una de las estructuras de apoyo va a quedar finalmente ejecutada, constituye uno de los principales retos de la fachada.

La subestructura de fachada no solo apoya en estructuras diferentes en cada uno de los cuatro sectores en que se divide, sino que, además, cada pareja de costilla y puntal de la fachada intermedia apoya en su extremo superior e inferior en dos estructuras diferentes: la estructura de cuelgue (coronas o cubierta) y la estructura de los pilares de hormigón del graderío existente en su extremo inferior.

2.3.2. Interferencias con edificio existente

Otro de los principales retos de la subestructura de fachada es la limitación de espacio entre la nueva envolvente proyectada y el resto del estadio. Esta limitación de espacio condiciona la subestructura de fachada, siendo particularmente determinante en las fachadas de los fondos.

En las fachadas Norte y Sur, es necesario que las costillas se desdoblén en dos secciones cajón conectadas entre sí, en una disposición de “diapasón”, “encajadas” en las pilas de

hormigón del edificio; de manera que, en sección transversal, la subestructura de fachada ocupa el mismo espacio que la estructura existente del graderío (Figura 11).



Figura 11. Izado de costillas “diapasón”

3. Fachada Intermedia y Sofito

3.1 Descripción de la solución general: costillas de fachada y puntales de sofito

En general la estructura de fachada está formada por parejas de costilla-puntal en cada uno de los ejes verticales, conectadas entre sí por travesaños y cables de arriostramiento.

3.1.1. Costillas

Las costillas o montantes verticales se resuelven con secciones armadas de acero S-355 J2 con geometría cerrada en cajón tipo de 300mm de anchura y canto de 750 mm. En los fondos, el canto de algunas costillas llega a ser de 900 mm e incluso 1 000 mm.

A estas costillas se conectan, por su cara frontal los bastidores de lamas de fachada mediante tornillos mecánicos (hollo bolts).

Todas las costillas presentan geometría diferente, ya que los puntos de apoyo se producen a diferentes alturas, la posición del acanto de las costillas también es variable y

finalmente la dimensión y posición del sofito también.

3.1.2. Sofito

Los puntales de sofito son secciones SHS de 400 mm también en acero S-355 J2, que conectan el extremo inferior de cada costilla con la estructura del edificio: pantallas de hormigón del edificio existente en las fachadas de fondos y Oeste; estructura metálica del nuevo edificio del Este en la fachada Este.

En su cara inferior del sofito también se conectan los bastidores de revestimiento de lamas.

Excepcionalmente, en las cuatro esquinas del edificio (donde la estructura de fachada rodea los torres (nuevas y existentes), la configuración de la estructura de sofito se altera y se explica con más detalle en el [apartado 3.5](#) de este documento.



Figura 12. Detalle de conexión de puntales de sofito

3.2 Fondos Norte y Sur

Fondos Norte y Sur presentan el mismo sistema estructural: costillas colgadas de la estructura de cubierta en su extremo superior donde se transmite la totalidad de las cargas verticales y parte de las horizontales, y conexión de los puntales de sofito en su extremo inferior a los pilares de hormigón para acciones horizontales.

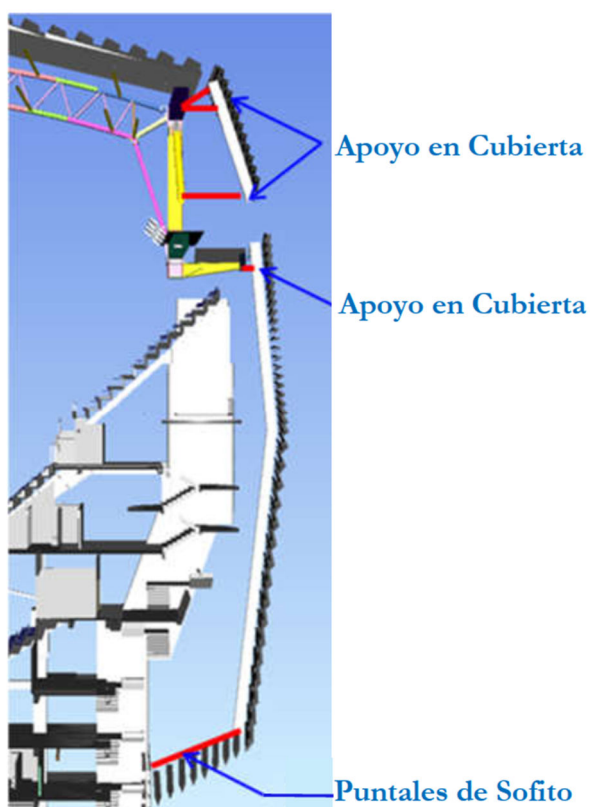


Figura 13. Puntos de apoyo de fachada en fondos

Para poder entender los movimientos de los paños de fachada de los fondos, es necesario analizar las condiciones de contorno de cubierta fija, de donde cuelga.

La cubierta fija presenta cuatro apoyos principales para acciones verticales, las dos torres del Oeste y los dos péndulos en el Edificio Este.

En horizontal, en dirección Este-Oeste, las torres son apoyos fijos y los péndulos del Este deslizantes. Esto significa que los movimientos térmicos de cubierta se incrementan paulatinamente hacia el Este.

En dirección Norte-Sur los cuatro apoyos de cubierta son deslizantes, situándose los puntos fijos en el eje del campo mediante apoyos en las coronas del Este y Oeste. Esto implica que en los fondos también existen movimientos hacia el exterior e interior del edificio existente.

Consecuentemente, los movimientos esperados de la estructura de cubierta debido a acciones variables en puntos de cuelgue de costillas de fachada se pueden resumir como sigue:

- **En dirección vertical**, ante la acción de cargas verticales en la cubierta.
Estos movimientos, tanto de **ascenso como de descenso**, se encuentran en torno a **25 cm** sin tener en cuenta el ascenso producido por el despliegue de la cubierta móvil. Solo desplegar ésta última para el cierre del estadio supone **un ascenso de casi 15 cm adicionales**.
- **En dirección Norte-Sur**, ante la acción de cargas laterales sobre cubierta y acciones térmicas.
Como orden de magnitud, en el punto de cuelgue de la fachada, el desplazamiento es de unos **40 cm hacia el interior** y de algo menos de **25 cm hacia el exterior**.
- **En dirección Este- Oeste**, ante la acción de cargas térmicas y cargas laterales sobre cubierta, así como el viento que incide en la superficie del edificio Oeste, pues es absorbido por las torres que constituyen los apoyos fijos de cubierta. Como orden de magnitud el movimiento **acumulado en el Este es de unos 15 cm**.

Por otro lado, los apoyos del sofito en los pilares de hormigón se pueden considerar como fijos en las tres direcciones.

Por tanto, las estructuras de fachadas de fondos conectan puntos fijos con puntos móviles lo que nos obliga a que se permita el movimiento relativo entre ambos puntos de apoyo en todas las direcciones. Esto se ha resuelto mediante el diseño de una estructura isostática.

Esta condición isostática implica que el conjunto de cada costilla-puntal permite el desplazamiento libre de sus puntos de apoyo, concretamente de su cuelgue superior de fachada, variando su geometría, por medio del giro en tres rótulas (dos situadas en los apoyos y una tercera en la conexión entre costilla y puntal); sin que estos desplazamientos induzcan esfuerzos en la estructura de fachada.

En la [Figura 14](#) se representa, a modo de ejemplo, los giros en torno a los puntos de articulación (1), (2) y (3), y desplazamientos

resultantes, en dos de estas costillas. Estos giros y desplazamientos vienen impuestos por los movimientos de la estructura de cubierta.

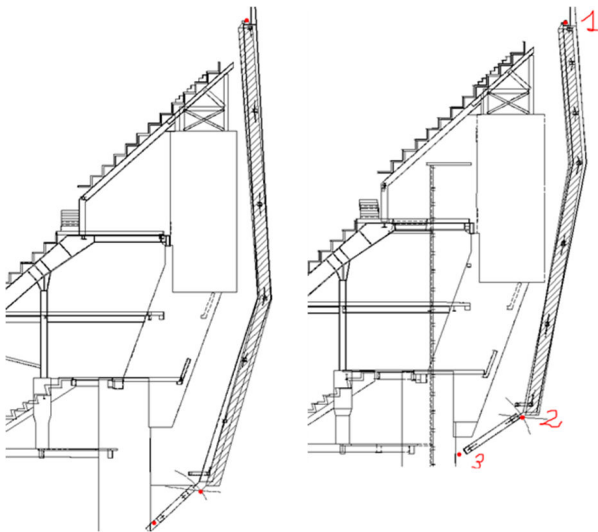


Figura 14. Fachada: Esquema de desplazamientos y giros en costillas y puntales de fachadas N-S

En el plano de la fachada (dirección Este-Oeste) los apoyos superiores de las costillas se mueven con la cubierta siendo necesario que el sofito se distorsione pues uno de sus apoyos es fijo en la costilla de hormigón existente y el otro acompaña a las costillas en su movimiento Este-Oeste.

Además, hay que tener en cuenta que las 16 parejas de costilla y puntal de cada fachada de fondo no están dispuestas en planos paralelos sino en abanico. Por lo tanto, también para movimientos Norte-Sur y verticales el sofito tiene que estar formado por puntales independientes y biarticulados en planta además de en alzado.

Para permitir el movimiento ‘libre’ de las fachadas Norte y Sur en dirección E-O, acompañado los movimientos de la estructura de cubierta en esta misma dirección, se incluyen en los puntales de sofito rótulas esféricas radiales en sus dos extremos bulonados, con una capacidad de giro de hasta 6°.

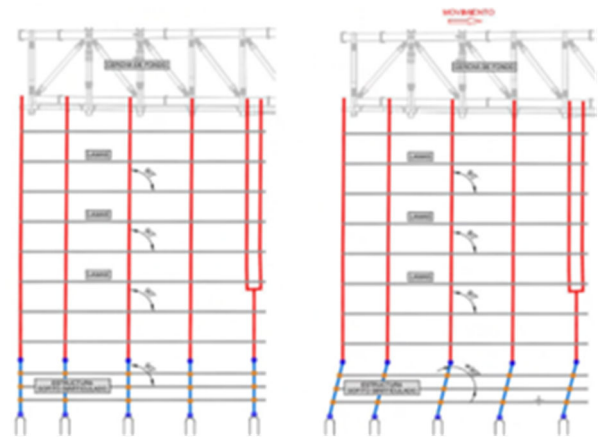


Figura 15. Fachada: Esquema de desplazamientos de fachadas N-S en dirección E-O

Los movimientos inducidos por el cuelgue de cubierta también implicaron un estudio pormenorizado de colisiones con la estructura existente. Por la propia configuración del sistema de costilla y puntal de sofito, todo movimiento vertical del punto superior de cuelgue implica también un desplazamiento horizontal variable en la altura de la costilla, tanto mayor cuanto mayor es la inclinación del sofito respecto a la horizontal.

Otra de las consecuencias de los desplazamientos de los puntos de cuelgue en cubierta es que la separación entre las costillas desdobladas debe permitir, con cierta holgura, el movimiento Este-Oeste de la cubierta (viento en fachada Oeste y cubierta y térmicas acumuladas hacia el Este) sin colisionar con los pilares de hormigón existentes.

3.3 Lateral Este

En el lateral Este las costillas cuelgan de la estructura de corona del Este transmitiendo las acciones gravitatorias. Inferiormente se conecta a los puntales del sofito y, adicionalmente, en algunos casos, se disponen apoyos intermedios a diferentes alturas. Todos los apoyos permiten trasladar las acciones horizontales sobre fachada a la estructura del Edificio Este.

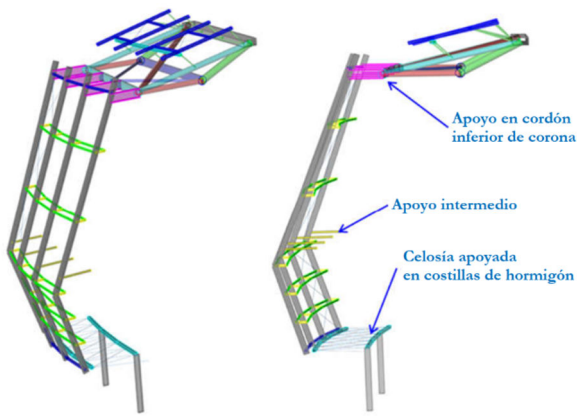


Figura 16. Puntos de apoyo de fachada Este

En este caso los movimientos de la corona son muy bajos y no son esperables desplazamientos relativos significativos, lo que simplifica notablemente la solución estructural.

3.4 Lateral Oeste

En la fachada Oeste las costillas se suspenden de la estructura de corona de esta zona, y se anclan en su extremo inferior a la estructura de hormigón existente mediante los puntales de sofito, ubicados por debajo de la huella de la 'viga museo'.

Los puntales de sofito son especialmente esbeltos en esta fachada (18.5m) y resueltos con la misma sección SHS 400, a la que ha sido necesario aplicar contraflecha para no afectar a la apariencia.

En esta fachada no son esperables grandes movimientos debidos a los apoyos en la viga corona.



Figura 17. Puntales de sofito Oeste. Montaje parcial, previamente a la colocación de arriostramientos en su plano

3.5 Torres

En las cuatro esquinas de la envolvente, la solución estructural de la fachada cambia, dado que el extremo inferior de las costillas no puede conectar directamente mediante puntales a las pilas de hormigón del graderío existente.

Entre la fachada y el graderío se interponen las dos torres existentes en las esquinas Este y las dos torres nuevas en las esquinas Oeste.

Aquí las costillas de fachada apoyan en su extremo inferior en un elemento en forma de arco en planta que puentea las torres y conecta con la estructura de sofito a ambos lados.

Para las dos torres existentes del Este, la estructura horizontal de arco se conecta con el sofito del Este y se apoya en nuevos pórticos verticales situados en los extremos Norte y Sur.



Figura 18. Detalle de estructura de sofito junto a torre

4. La Visera

La subestructura de visera está organizada en costillas resueltas con perfiles en cajón de acero S-355 J2 en los mismos ejes que la fachada. Entre ellas, se disponen largueros o travesaños también con sección cajón que transmiten las cargas

perimetrales a los módulos rigidizados mediante cruces de San Andrés.

Las costillas de visera apoyan en dos puntos cada una, por medio de un apoyo en dos puntales en “V” y otro apoyo inferior en puntal simple, de manera que cada costilla forma una estructura isostática en su plano.

Los apoyos de la visera se disponen sobre las diagonales y tubos de coronación de las coronas de Este y Oeste y sobre los montantes y cordón superior de las cerchas de fondo en Norte y Sur.

El apoyo superior triangulado siempre apoya sobre un cordón continuo bien de cubierta o de corona, mientras que, a nivel inferior, la disposición de montantes y diagonales de estructura principal no coinciden con la distribución de costillas de visera. Por ello, es necesario disponer un perfil perimetral de apoyo de costillas que permiten la transición de la carga entre la posición de la costilla y la de su apoyo en estructura principal.

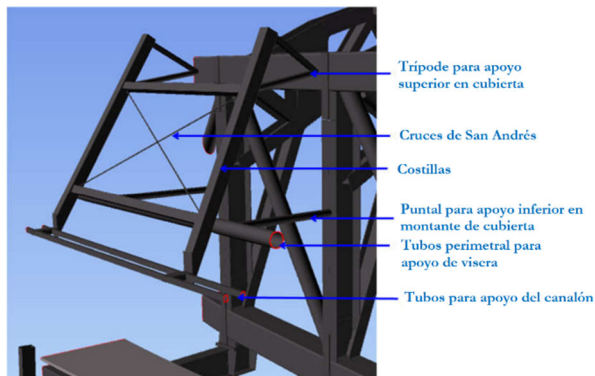


Figura 19. Configuración de módulo de visera en fondos Norte y Sur

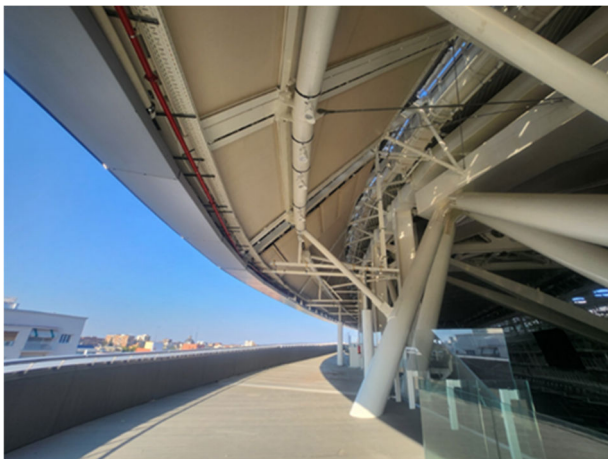


Figura 20. Subestructura de visera

5. Las juntas entre sectores

5.1 Las juntas en el soffito y fachada intermedia

En la fachada intermedia, entre las costillas extremas de las subestructuras de laterales y la de los fondos se dispone de una calle “limpia” sin travesaños ni diagonales que conecten las costillas entre sí (excepto en el extremo inferior donde se dispone una pasarela, biarticuada en planta y alzado), de manera que las subestructuras a ambos lados son completamente independientes.



Figura 21. Vano de junta de fachada previamente a la colocación de lamas especiales

5.2 Las juntas en la visera

En la visera no es posible eliminar elementos transversales entre las costillas extremas de las subestructuras de laterales y las de fondos, pues en estos vanos de junta se disponen cerramientos acústicos que necesitan estructura de apoyo.

Para su soporte se disponen una serie de travesaños que presentan extremos articulados en la dirección del plano de visera y en la perpendicular. Adicionalmente, en la dirección del plano de visera, la conexión de uno de los externos está rasgada para liberar este movimiento longitudinal.

6. Proceso constructivo

El proceso constructivo no solo de la propia fachada sino también de los elementos donde apoya, principalmente los que cuelgan de la cubierta, también ha constituido un hito en el diseño y un fuerte condicionante para la ejecución.

Como se ha explicado previamente, la posición de la envolvente de fachada dependía enormemente de la posición de las diferentes estructuras, de naturalezas totalmente distintas, sobre las que apoya. Todo esto, sumado a las estrictas tolerancias para la colocación de las lamas (± 20 mm) y a la escasa holgura de contacto con la estructura existente, supuso un gran condicionante constructivo para la fachada.

Las primeras costillas que se comenzaron a izar fueron la de los fondos, debido a necesidades de obra, es decir, las que quedan suspendidas del Skywalk de cubierta.

En ese momento quedaban todavía por realizar varias importantes maniobras en la cubierta (colocación de la retráctil, el videomarcador y los DAC) que implicaban grandes movimientos en vertical. Además, su carga muerta todavía estaba parcialmente colocada, de tal manera que todavía quedaba una parte significativa de contraflecha por recuperar (en torno a unos 50 cm), incluyendo la inducida por el peso de la propia fachada.

Por tanto, la fachada tenía que ser montada en una posición por encima de su teórica e ir descendiendo a medida que se recuperara la contraflecha.

Es precisamente en estos fondos donde el sofito se encuentra más inclinado, lo que genera que cualquier movimiento vertical del apoyo superior de la costilla se traduzca en un movimiento horizontal significativo.

Si este apoyo se encuentra más alto de la posición teórica, el sofito empuja la costilla hacia el interior del Estadio. Para evitarlo, se decidió sustituir la estructura de sofito por puntales provisionales sensiblemente horizontales hasta

que la fachada recuperara su posición teórica, momento en que se podría montar el sofito definitivo y retirar estos puntales provisionales.



Figura 22. Detalle de apoyo de costillas de fondo en puntales provisionales

La última maniobra realizada en cubierta que permitió la ejecución del sofito fue la colocación de los dispositivos de apoyo controlado de cubierta (DACs), que levantaron la posición de los puntos de cuelgue de fachada en aproximadamente 35 cm. Es decir, previamente a que los DACs entraran en carga, los paños de fachada de los fondos se encontraban 35cm por debajo de su posición teórica.

Agradecimientos

El diseño y construcción de la fachada 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 las lamas ARUP, y el diseñador estructural Fhecor.