

Renovación del estadio Santiago Bernabéu. Estructuras soporte de fachada

Renovation of the Santiago Bernabéu Stadium. Facade Support Structures

Eduardo Romero Rey^{a,*}, Elena Hortigüela Páramo^a y Rodrigo Burgos Valverde^a

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

Recibido el 19 de noviembre de 2024; revisado el 7 de abril de 2025, aceptado el 5 de mayo de 2025

RESUMEN

La estructura de fachada se plantea como soporte de las lamas de revestimiento del perímetro del Estadio, encontrándose dividida en cuatro áreas principales: sofito, fachada inferior, intermedia y superior (visera). Estructuralmente se configura en costillas verticales suspendidas de la cubierta o de las vigas corona y apoyadas inferiormente en los puntales que conforman el sofito. La visera, por encima del Skywalk 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.

PALABRAS CLAVE: Estructura metálica, juntas de movimiento, proceso constructivo.

©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 facade structure is designed to support the cladding slats around the perimeter of the Stadium and is divided into four main areas: soffit, lower facade, intermediate, and upper ("visera"). Structurally, it consists of vertical ribs suspended from the roof or crown beams and supported below by struts that form the soffit. The canopy, located above the Skywalk, 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.

KEYWORDS: Steel structure, movement joints, construction process.

©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., Hortigüela, E., & Burgos, R. (2025). Renovación del estadio Santiago Bernabéu. Estructuras soporte de fachada. *Hormigón y Acero*. 76(307):199-214. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4001>

1. INTRODUCCIÓN

La nueva envolvente del Estadio Santiago Bernabéu se organiza en tres zonas, con soportes y sistemas constructivos diferentes, que ordenadas de arriba a abajo son: 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 un soporte estructural (cerramiento permeable) [1]. Zóca-

lo: fachada ligera convencional anclada a estructura existente (ver [figura 1](#)).

El presente artículo se centra en la estructura de fachada que sirve como soporte para las lamas de revestimiento. La superficie total revestida con lamas alcanza los 39 218 m², incluyendo el sofito, y se desglosa de la siguiente manera:

- 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. Parte de la envolvente y de la Fachada. Vista desde el oeste. (Copyright © 2024 Nuevo Estadio Bernabéu).



Figura 2. Fachada. Vista desde el 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: la fachada superior, también denominada visera, la fachada intermedia e la inferior y el sofito. Entre la fachada intermedia e la inferior se produce un quiebro, o “acento”, de altura variable a lo largo del perímetro (ver [figura 1](#) y [figura 3](#)).

El Sofito, la fachada intermedia y la inferior forman una misma subestructura. La visera constituye una subestructura independiente.

Entre la visera y la fachada intermedia discurre el *Skywalk*.

El revestimiento de lamas de acero inoxidable en forma de ‘V’ con bastidores auto portantes [1] se anclan a los elementos principales de la estructura, la cual está completamente resuelta en acero. La longitud de las lamas es variable, normalmente entre 6,5m y 7,8m.

Los miembros principales de la estructura de fachada son elementos articulados que constituyen las costillas de la visera, las costillas de la fachada y los puntales del sofito. Estos se

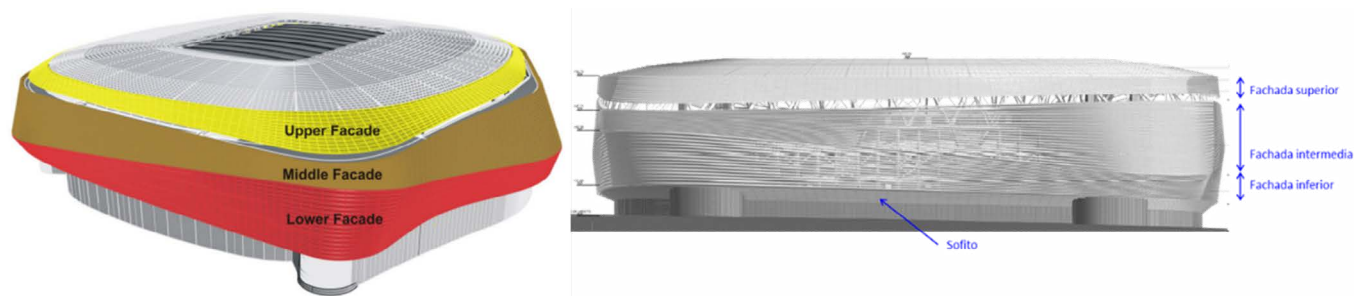


Figura 3. Esquema de las distintas zonas de la fachada.

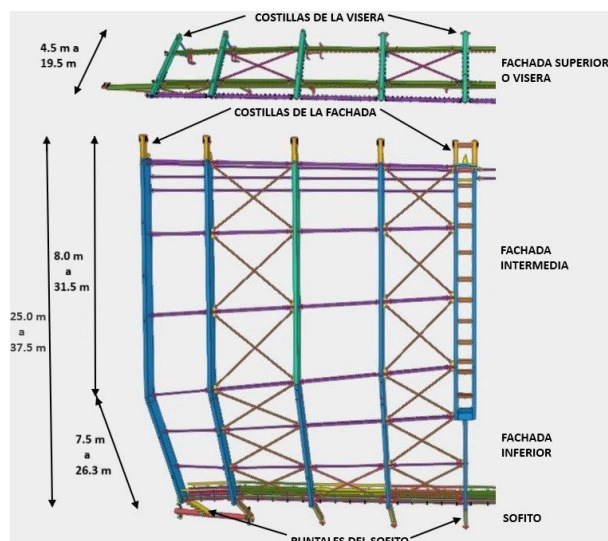


Figura 4. Derecha: Vista de subestructura de la fachada intermedia, inferior y sofito. (Copyright © 2024 Nuevo Estadio Bernabéu) Izquierda: Principales elementos estructurales de la estructura de soporte de la fachada y dimensiones aproximadas.

conectan entre sí por medio de travesaños y tirantes en cruz de san Andrés, que actúan como elementos de arriostramiento entre ellos, en paños alternos.

En planta, las costillas y puntales se organizan de forma casi radial en 118 ejes (ver figura 5).

En general, los ejes de la estructura 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 (ampliado en 1992); con la excepción del lateral este, en el que el nuevo edificio [2] se interpone entre la estructura de fachada y la estructura original.

El motivo de esta coincidencia es que la estructura de fachada se conecta horizontalmente con estas pilas de hormigón en su extremo inferior (el sofito), excepto en el lateral este, donde los ejes de la fachada se sitúan a una distancia promedio de 7.0 m, y el sofito se conecta a los nuevos pilares metálicos del edificio este [2].

La visera actúa como transición entre la cubierta y el resto de la fachada, de ahí su geometría variable en anchura e inclinación a lo largo del perímetro del estadio.

La fachada intermedia e inferior forman una banda de altura variable entre 25.0 m y 37.5 m de altura. Debajo de esta, el sofito conecta la nueva fachada con el edificio existente, el cual también presenta variaciones en dimensiones: 18.5 m en fachada oeste y 4.5 m en fachada de los fondos norte y sur.

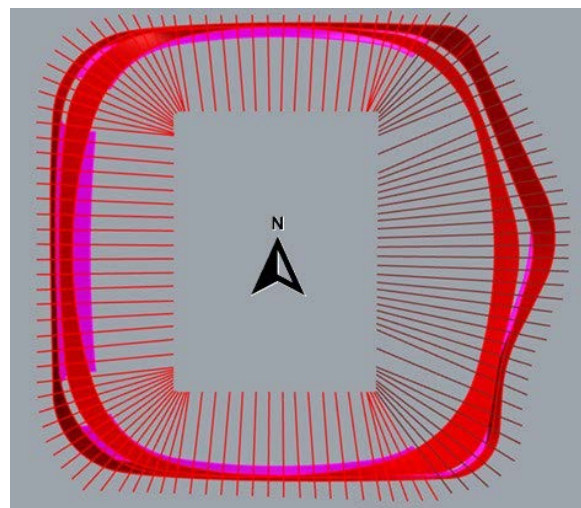


Figura 5. Ejes principales de estructura de fachada.

2.2. Los sectores de la fachada

Además de la división vertical en tres zonas (sofito, fachada inferior, intermedia y visera), la fachada se divide perimetralmente en cuatro sectores, separados por juntas de movimiento (ver figura 6).

La fachada de cada uno de los fondos del estadio está formada por 16 costillas y tiene una longitud en planta de 105 m aproximadamente. El sector este está formado por 44 costillas, con una longitud en planta de aproximadamente 290 m. El sector oeste está formado por 42 costillas y cuenta con una longitud en planta de aproximadamente 270 m.

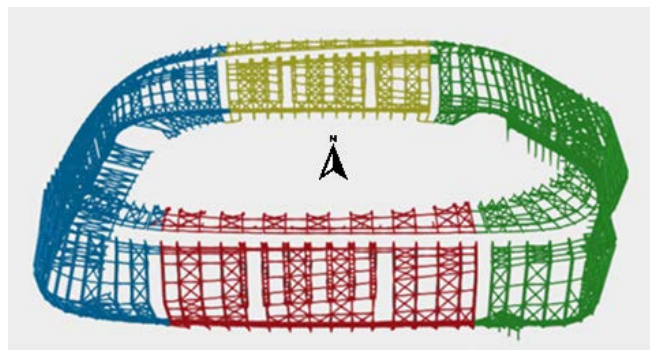


Figura 6. Estructura de la fachada, mostrando en colores los diferentes "sectores" de la estructura.

En la [figura 6](#), se puede observar la fachada norte en color amarillo, la fachada sur en color rojo, la fachada oeste en azul y, finalmente, la fachada este en verde.

Cada sector de la estructura de fachada se conecta a estructuras distintas e independientes entre sí: El edificio este [\[2\]](#), la viga corona del oeste [\[3\]](#), la estructura existente de los fondos [\[4\]](#) y la estructura de la cubierta [\[5\]](#). 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 estructura de fachada se divide en juntas de dilatación térmica, formando paños de 5 o 6 costillas (40,0m a 45,0m).

En la siguiente imagen se muestra la posición de las juntas de dilatación en las diferentes fachadas: en rojo, las principales entre edificios; en azul, las dispuestas entre módulos.

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 estructura 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 se apoyan (o se cuelgan) en diferentes sistemas estructurales del estadio.

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

Las 44 costillas de la fachada este cuelgan de la estructura de la "corona" este [\[2\]](#). Esta estructura se sitúa sobre la estructura de forjados y graderíos del edificio este; sirve de apoyo el lateral este del Skywalk, de arriostramiento para la estructura de cubierta en dirección norte-sur, y como soporte para las estructuras de la visera y el extremo superior de la fachada.

Las 42 costillas de la fachada oeste se apoyan en la estructura de la "corona" del oeste [\[3\]](#), una estructura tipo puente que salva la luz entre las dos nuevas torres del oeste [\[6\]](#) y sirve de apoyo a la "viga museo", así como a la visera y fachada del oeste.

Las 16 costillas de las fachadas norte y sur se apoyan o se

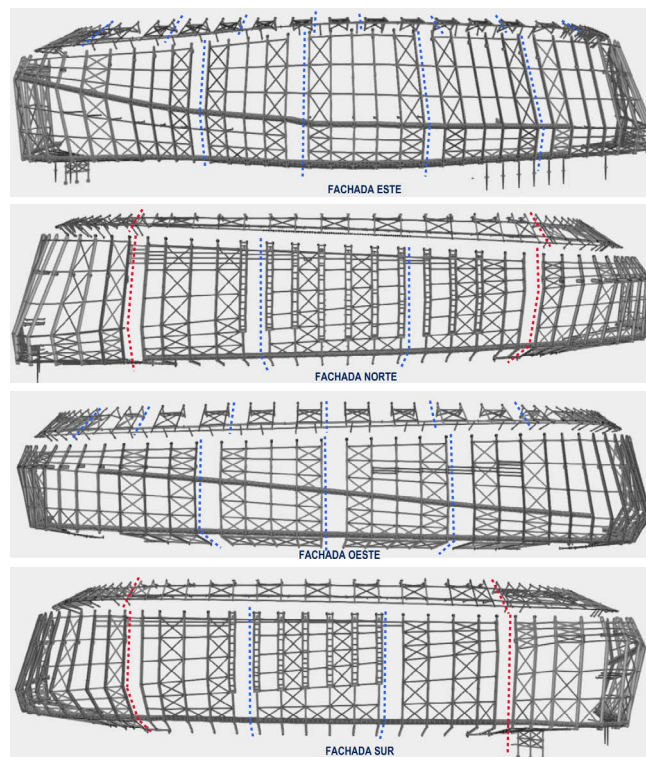


Figura 7. Juntas de dilatación en la fachada. en rojo, las principales entre edificios; en azul, las dispuestas entre módulos.

cuelgan directamente de la estructura de cubierta fija [\[5\]](#). Concretamente, las estructuras 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 dichas cerchas, sobre las que se sitúa el Skywalk del norte y del 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 independientes en todo lo demás.

La estructura de fachada tiene que acomodarse, en servicio, al distinto comportamiento estructural de cada una de las estructuras sobre las que se apoya, las cuales presentan diferentes movimientos (verticales y horizontales) debidos a cargas permanentes, sobrecargas de uso, efectos térmicos y viento.

Además, en fase de obra, la estructura de fachada debe ajustar su geometría entre los distintos sectores a la posición final que se haya situado cada una de las estructuras de apoyo, de manera que la envolvente sea visualmente continua y sin quiebras apreciables, bajo cualquier combinación de servicio.

Este criterio de apariencia –lograr una envolvente continua a partir de una estructura apoyada en estructuras diferentes–, junto con la incertidumbre sobre la posición exacta en que finalmente quedará ejecutada cada estructura de apoyo (dada la magnitud de las tolerancias por la escala del conjunto), constituye uno de los principales retos de la fachada (ver [apartado 6](#), Proceso constructivo).

La estructura 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 del sofito apoyan, en sus extremos superior e interior, en dos estructu-

ras distintas: la estructura de cuelgue (coronas o cubierta) y la estructura de los pilares de hormigón del graderío existente en su extremo inferior.

Por tanto, cada pareja de costilla y puntal, así como el conjunto de costillas arriostradas de cada paño de fachada, deben ser elementos estructurales capaces de permitir el movimiento entre sus puntos de cuelgue superior y apoyo inferior, es decir, deben ser estructuras isostáticas por sí mismas.

2.3.2. Interferencias con edificio existente

Otro de los principales retos de la estructura de la fachada es la limitación de espacio entre la nueva envolvente proyectada y el resto del estadio. Esta condición condiciona el diseño estructural de la 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 tipo cajón, conectadas entre sí, en una disposición de “diapasón”, “encajadas” en las pilas de hormigón del edificio; de manera que, en sección transversal, la estructura de fachada ocupa el mismo espacio que la estructura existente del graderío (ver figura 8 y figura 9).

Para evitar interferencias entre una y otra, ha sido necesario analizar los desplazamientos relativos de ambos elementos para cada una de las situaciones posibles.

Entre las dos costillas desdobladas se disponen perfiles horizontales donde se anclan los bastidores de las lamas.

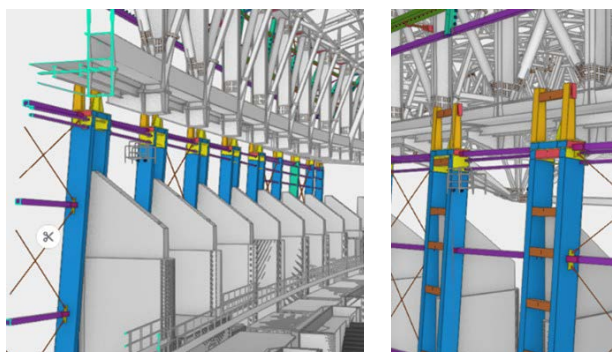


Figura 8. Modelo IFC: Fachada sur. Costillas en “diapasón” coordinadas con pilares de hormigón del graderío existente.



Figura 9. Izquierda: Izado de costillas “diapasón”. Derecha: Costilla diapasón abrazando costilla de hormigón existente.

Entre las pilas de hormigón de las fachadas norte y sur, además, existen escaleras voladas hacia la fachada, cuya posición debe coordinarse con los elementos horizontales entre costillas (travesaños y cables de arriostramientos), para evitar interferencias en cualquier combinación de carga.

3.

FACHADA INTERMEDIA, INFERIOR 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.

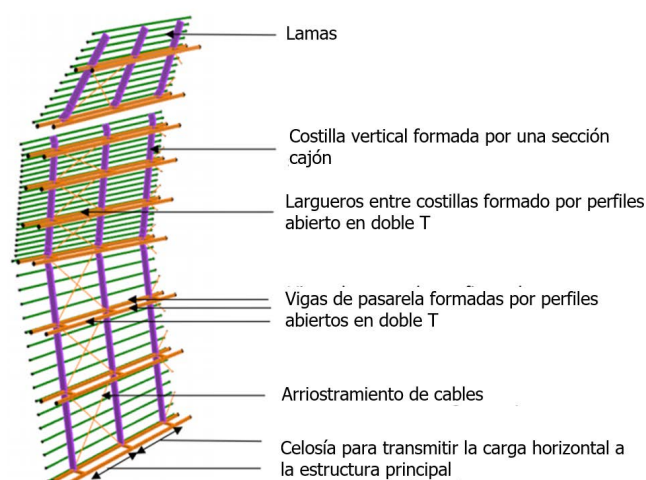


Figura 10. Elementos estructurales de la fachada

3.1.1. Costillas

Las costillas o montantes verticales tipo se resuelven con secciones cajón o montantes verticales tipo se resuelven con secciones cajón armadas de 300 mm de anchura y canto de 750 mm en acero S-355 J2. En los fondos, el canto de algunas costillas aumenta su altura, llegado hasta los 1 000 mm. Las costillas en diapasón están compuestas por dos cajones separados 1 600 mm, de 900 o 1 000 mm de canto por 300 mm de ancho.

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

Las costillas se agrupan entre sí en conjuntos de 5 o 6 por medio de travesaños SHS 220 de acero S-355 J2 y arriostramientos de cables en ‘X’ tipo Dywidag dispuestos en “calles” verticales entre costillas.

Las costillas están, en general, sujetas en dos puntos (salvo edificio este): cuelgue superior y apoyo lateral en el puntal del extremo inferior. Salvan luces entre apoyos, en vertical, de hasta 30.0 m.

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 400 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 la 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, como se explica con más detalle en el [apartado 3.5](#) de este artículo.



Figura 11. Detalle de conexión de puntales de sofito con las pantallas del edificio existente.

3.2. Fondos norte y sur

Los 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, donde se transmite el resto de acciones horizontales.

Los puntos de cuelgue de las costillas de los fondos a la cubierta están situados sobre la viga de borde de la estructura de cubierta, que vuela desde las cerchas de los fondos. Las cerchas de los fondos, apoyan a su vez en los extremos volados de las cerchas atirantadas principales de cubierta, dispuestas en dirección este-oeste. Para más detalles, véase la referencia [5].

Para poder entender los movimientos de los paños de fachada de los fondos, es necesario analizar las condiciones de contorno de cubierta fija [5], de donde se suspende.

La cubierta fija presenta cuatro apoyos principales para acciones verticales: las dos torres situadas en el oeste y los dos péndulos en el edificio del este.

En sentido horizontal y en dirección este-oeste, las torres actúan como apoyos fijos, mientras que los péndulos del este son deslizantes. Esto significa que los movimientos térmicos de la cubierta se incrementan progresivamente hacia el este.

En dirección norte-sur, los cuatro apoyos de cubierta son deslizantes, ubicándose los puntos fijos en el eje del campo mediante apoyos en las coronas de los edificios este y oeste. Esto implica que en los fondos también se producen movimientos hacia el exterior e interior del edificio existente.

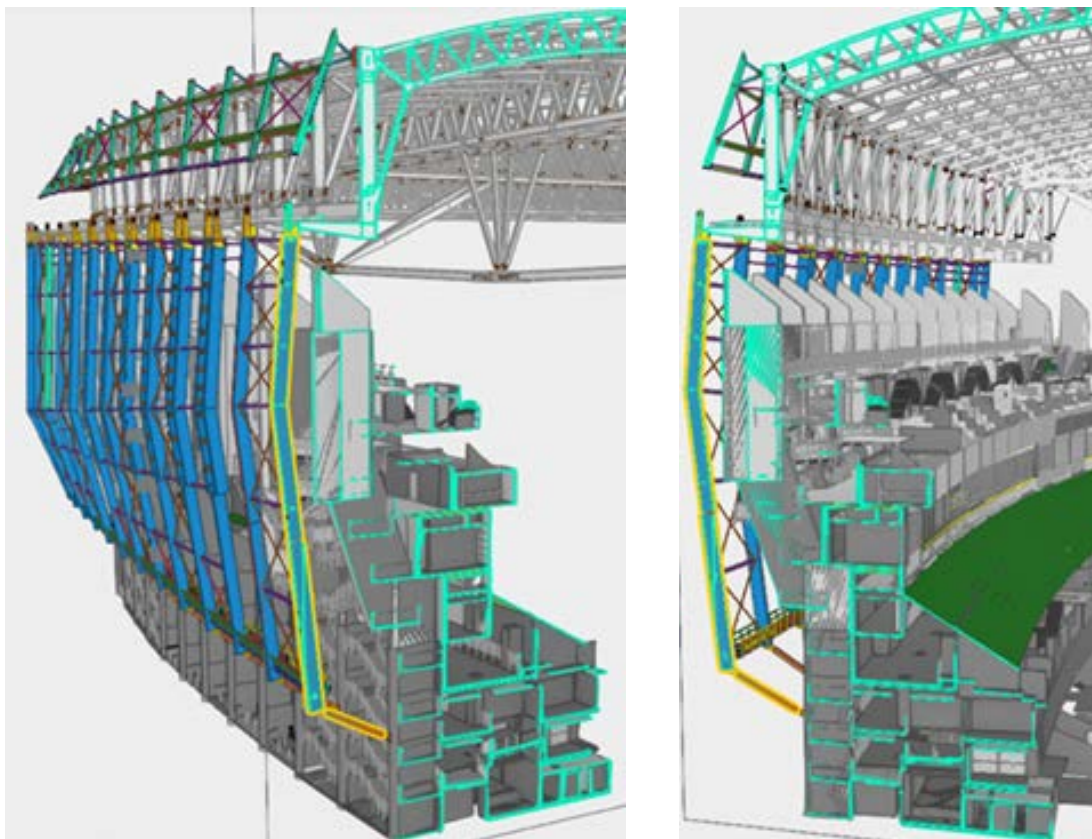


Figura 12. Costilla "colgada" de estructura de cubierta y puntal conectado a pilares de graderío existente (Modelo BIM de coordinación).



Figura 13. Puntos de apoyo de fachada en los fondos.

Consecuentemente, los movimientos esperados de la estructura de la cubierta en puntos de cuelgue de las costillas de la fachada se pueden resumir de la siguiente manera:

- **Desplazamientos en dirección vertical**, debido a las cargas verticales en la cubierta, como el movimiento de apertura y cierre de la cubierta retráctil y acciones variables (presión y succión de viento, nieve, etc.).
- Estos movimientos, **tanto de ascenso como de descenso**, se sitúan en torno a **25 cm**, sin considerar el ascenso adicional producido por el despliegue de la cubierta móvil [7]. Solo desplegar ésta última para el cierre del estadio supone un **ascenso de casi 15 cm adicionales**.
- **Desplazamientos horizontales en dirección norte-sur**, ante cargas laterales sobre la cubierta (viento) y acciones térmicas (punto fijo en eje del campo). Como orden de magnitud, en los puntos de cuelgue de la fachada, el desplazamiento es de aproximadamente **40 cm hacia el interior** y de algo menos de **25 cm hacia el exterior**.
- **Desplazamientos horizontales en dirección este-oeste**, debido a la carga térmica y a cargas laterales sobre la cubierta (viento), así como el viento que incide en la superficie del edificio oeste, absorbido por las torres que constituyen los apoyos fijos de cubierta. Como orden de magnitud, el movimiento acumulado en el **lado este es de aproximadamente 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, la estructura de fachada de los fondos conectan puntos fijos con puntos móviles, lo que nos obliga a permitir el movimiento relativo entre ambos puntos de apoyo en todas las direcciones. Esto se ha resuelto mediante el diseño de

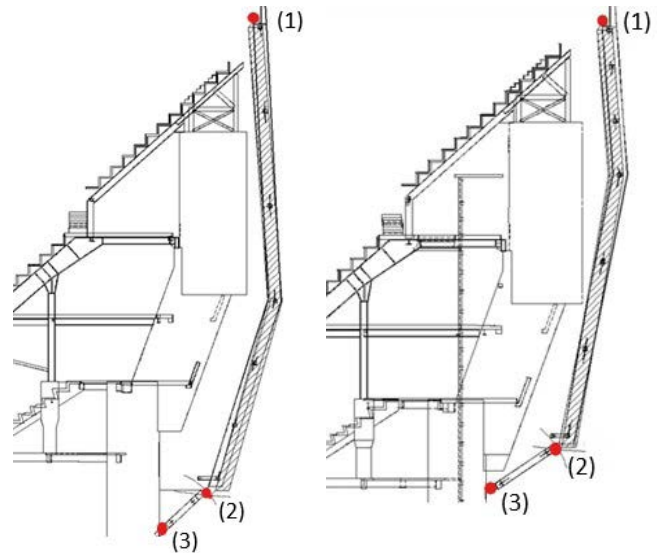


Figura 14. Esquema de desplazamientos y giros en costillas y puntales de fachadas N-S.

una estructura isostática, de forma que el conjunto de cada costilla-puntal permite el desplazamiento libre de sus puntos de apoyo, concretamente de su cuelgue superior, 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 representan, a modo de ejemplo, los giros en torno a los puntos de articulación o rótula (1), (2) y (3), y los desplazamientos resultantes, en dos de estas costillas. Estos giros y desplazamientos vienen impuestos por los movimientos de la estructura de cubierta.

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 longitudinalmente, 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 este-oeste, acompañando 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°.

Los movimientos de la estructura de fachada, inducidos por el cuelgue de cubierta también implicaron un estudio pormenorizado de colisiones con la estructura existente. Debido a la propia configuración del sistema de costilla y puntal de sofito, cualquier 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.

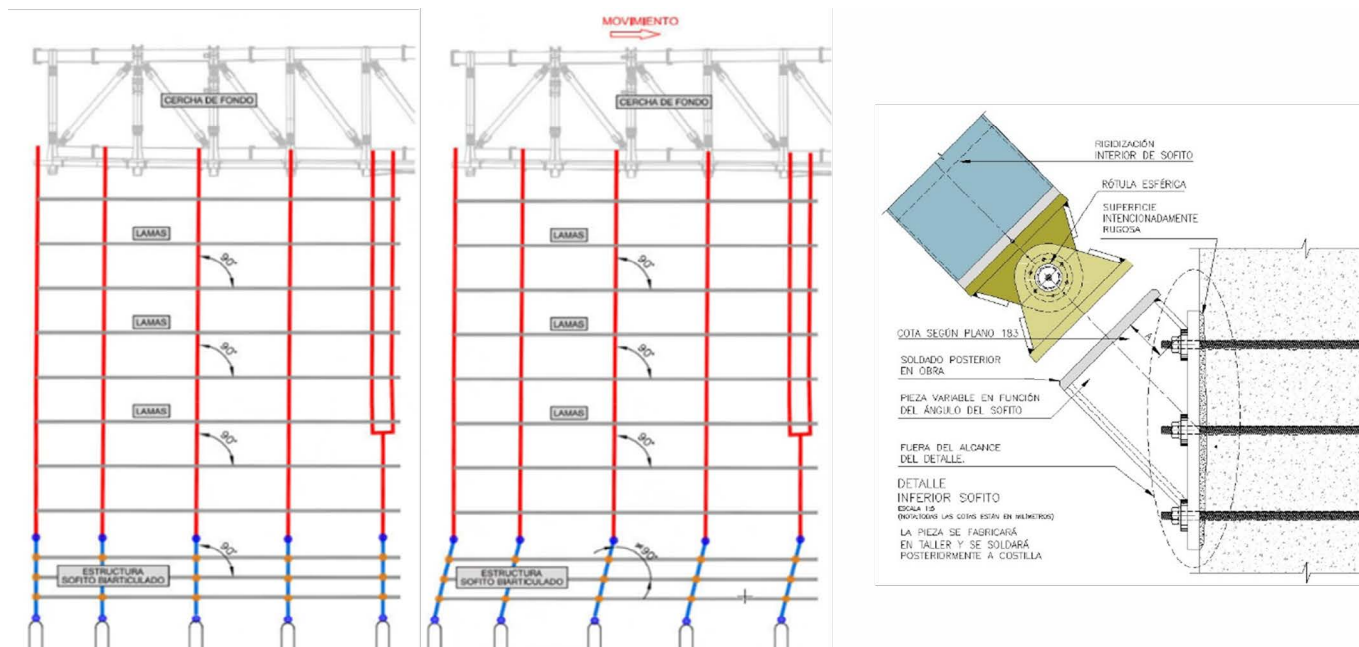


Figura 15. Izquierda: Esquema de desplazamientos de fachadas N-S en dirección E-O. Derecha: Conexiones tipo puntal sofito a pantallas hormigón.

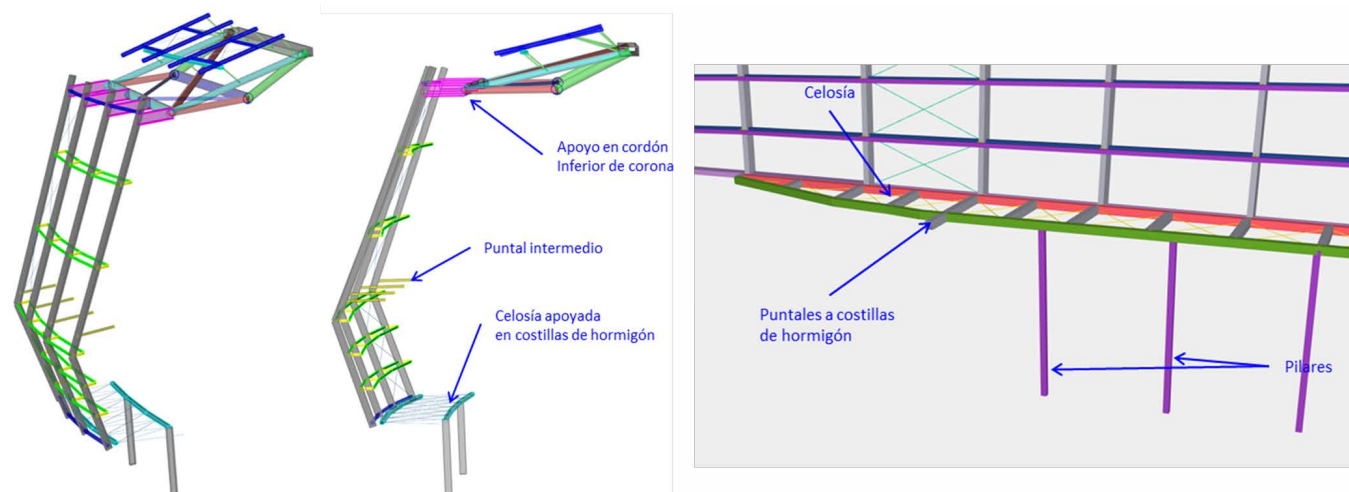


Figura 16. Puntos de apoyo de fachada este.

Así, un desplazamiento vertical ascendente del punto de cuelgue de cubierta provoca que la estructura de fachada se mueva hacia el estadio, mientras que un descenso del punto superior de apoyo provoca un movimiento de la fachada hacia el exterior.

La restricción de espacio en las costillas de los fondos con respecto al edificio existente, donde las costillas diapasón (desdobladas) se encuentran ya encajadas a ambos lados de las costillas de hormigón existentes, supuso que todos estos movimientos condicionaran enormemente la disposición de los elementos horizontales que las conectan. Estos elementos horizontales se disponen para el apoyo de bastidores de las lamas, que siempre se realiza en coincidencia con los ejes de costillas de hormigón.

El replanteo de estos elementos puede parecer caótico, pero procede de un estudio pormenorizado de movimientos en cada plano de costillas diapasón para evitar colisiones con la estructura existente.

Otra de las consecuencias de los desplazamientos de los puntos de cuelgue en la 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 (calle Padre Damián).

En el lateral este, las costillas cuelgan de la estructura de la corona del este, transmitiéndole las acciones gravitatorias. Inferiormente se conectan a los puntales del sofito y, adicionalmente, en algunas costillas, se disponen apoyos intermedios a diferentes alturas. Todos los apoyos permiten transmitir las acciones horizontales de la fachada a la estructura del edificio este [2].

En este caso los movimientos de la corona son muy bajos y no son esperables desplazamientos relativos significativos,

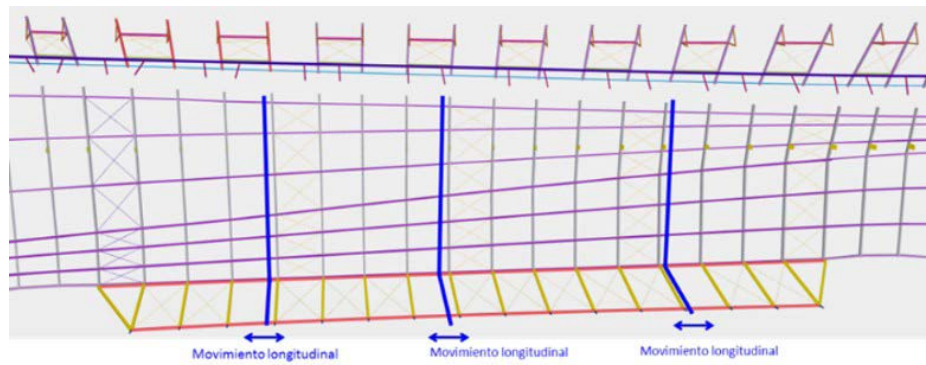


Figura 17. Izquierda: Puntos de sofito oeste. Montaje parcial, previamente a la colocación de arriostramientos en su plano. Derecha: Arriostramientos y juntas de movimiento en sofito oeste.

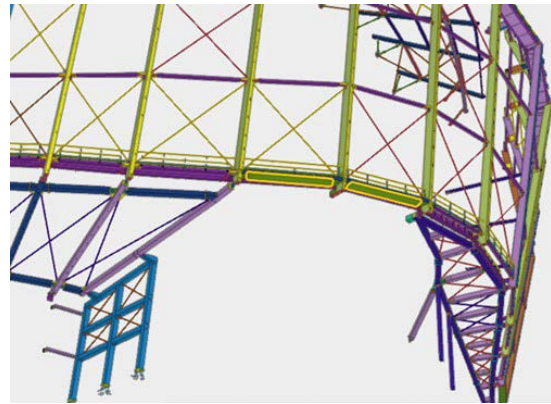
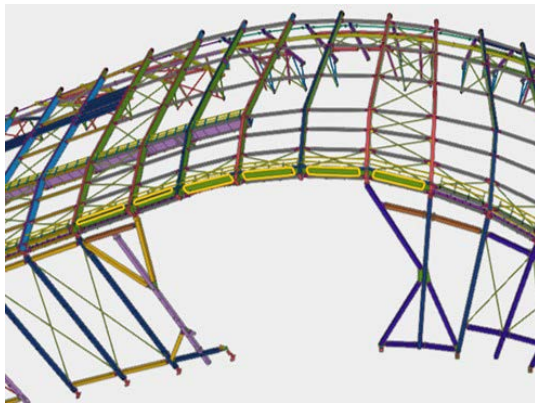


Figura 18. Modelo de taller (INBERSA): Izquierda: Estructura de sofito en torno a torres del oeste Derecha: Estructura de sofito en torno a torres del este.

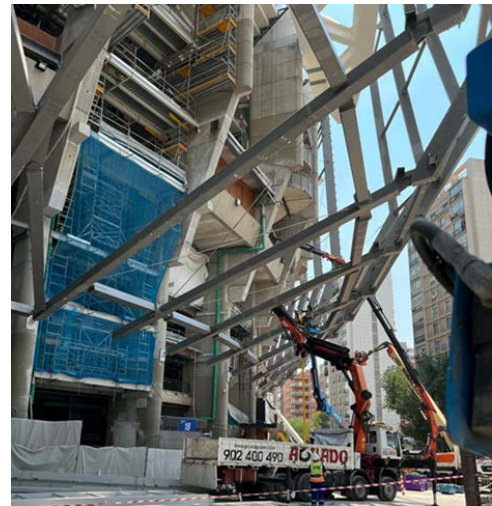
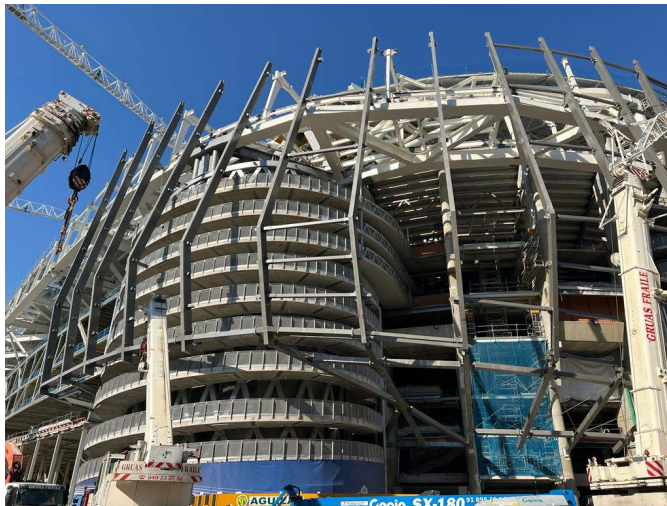


Figura 19. Izquierda: Torre B. Estructura de sofito rodeando la torre. Derecha:Detalle de estructura de sofito junto a torre.

lo que simplifica notablemente la solución estructural, especialmente la del sofito.

3.4. Lateral oeste (Paseo de la Castellana).

En la fachada oeste, las costillas se suspenden de la estructura de corona de esta zona [3], 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 zona, pues, con una longitud de hasta 18.50 m se han resuelto con la misma sección que el resto, SHS 400, por lo que ha sido necesario aplicar contraflecha para no afectar a la apariencia.

En esta fachada no se esperan grandes movimientos debidos a los apoyos en la viga corona, de tal manera que los módulos rectangulares del sofito se rigidizan en su plano mediante cruces de San Andrés. En los módulos donde se dispo-

nen las juntas de dilatación se prescinde de estos elementos de arriostramiento para poder realizar la materialización de la junta mediante taladros rasgados que permiten el movimiento longitudinal entre módulos.

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 existente.

Entre la fachada y el graderío se interponen las dos torres existentes en las esquinas este, y las dos nuevas torres en las esquinas oeste.

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

En el caso de las torres del oeste, la estructura horizontal del arco del sofito apoya en dos puntales triangulados en planta en cada lado, para resistir los esfuerzos horizontales del arco.

Para las dos torres existentes del este, la estructura horizontal del arco se conecta con el sofito del este y se apoya en nuevos pórticos verticales situados en los extremos norte y sur.

4.

LA VISERA

La visera es la franja de envolvente sobre el *Skywalk* que actúa como transición entre la fachada intermedia y la cubierta.

Su estructura está organizada en costillas formadas con perfiles SHS 350 de acero S-355 J2, alineadas con los mismos ejes que el resto de la fachada, con longitudes comprendidas entre 4.3 m y 19.8 m, e inclinaciones también variables. Entre ellas se disponen largueros o travesaños, también de sección cajón, que transmiten las cargas perimetrales a algunos módulos rigidizados mediante cruces de San Andrés.

Estos módulos se disponen en uno de cada dos vanos y se resuelven mediante barras macizas dispuestas entre costillas y larguero, de forma que rigidizan perimetralmente el conjunto (ver figura 20).

Las costillas de la visera apoyan en dos puntos cada: un apoyo superior mediante dos puntales en "V", y otro apoyo inferior mediante 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 el tubo superior de la corona del este y oeste, así como sobre los montantes y cordón superior de las cerchas de fondo norte y sur.

El apoyo superior triangulado siempre apoya sobre un cordón continuo bien de la cubierta o de la corona, mientras que, a nivel inferior, la disposición de los montantes de apoyo no coincide con las alineaciones de las costillas de la visera, ya que las diagonales de la estructura principal no coinciden con estas. Por este motivo, es necesario disponer un perfil perimetral de apoyo de las costillas que permita la transmisión de la carga entre la posición de la costilla y su apoyo en estructura principal. Este tubo perimetral tiene continuidad en todo el perímetro, con la excepción de las cuatro juntas de dilatación principales, donde se dispone una unión rasgada para permitir los movimientos diferenciales esperados entre las distintas estructuras de apoyo.

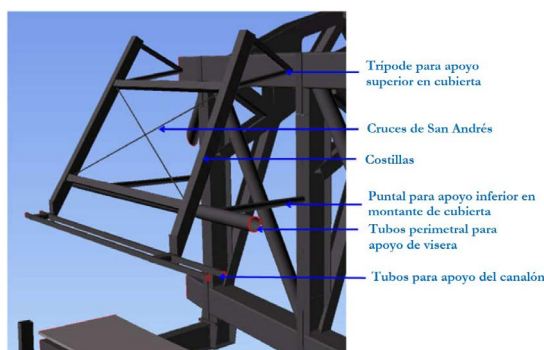
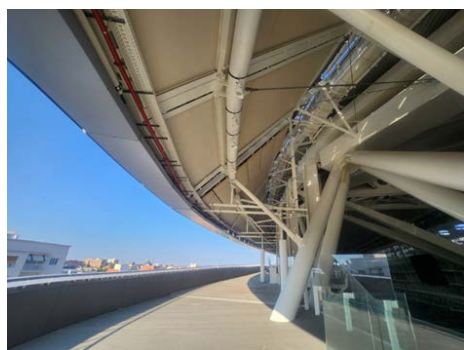


Figura 20. Izquierda: Configuración de módulo de visera en fondos norte y sur. Derecha: Estructura de visera y *skywalk*.

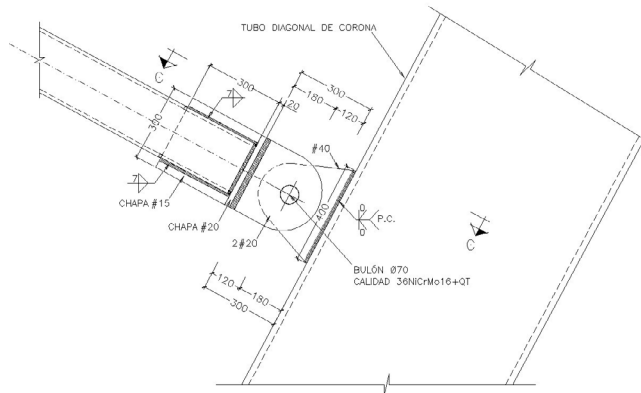
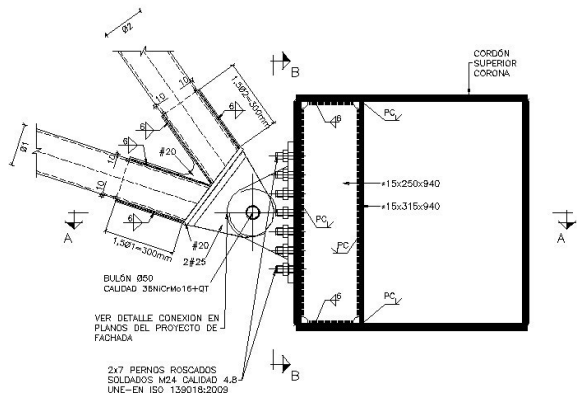


Figura 21. Visera: Izquierda: Detalle de apoyo superior en tubo de corona. Derecha: Detalle de apoyo inferior en diagonal de corona.



Figura 22. Vano de junta de fachada previamente a la colocación de lamas especiales.

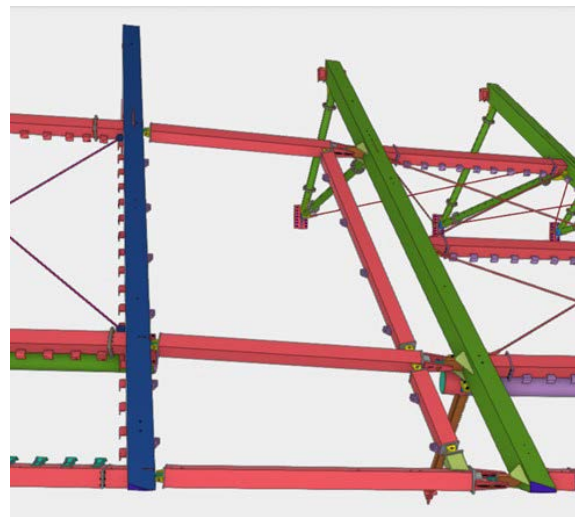


Figura 23. Modelo de taller (INBERSA) de visera: Paño de junta de dilatación entre sectores en el que se aprecia los distintos tipos de uniones.

5. LAS JUNTAS ENTRE SECTORES

5.1. Las juntas en el sofito y fachada intermedia

En la fachada intermedia, entre las costillas extremas de las estructuras de los laterales y las 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, biarticulada en planta y alzado), de manera que las estructuras a ambos lados son completamente independientes.

Las lamas de fachada en estas cuatro calles están diseñadas con un bastidor especial que permite el giro y los movimientos relativos entre ambos apoyos extremos [1].

5.2. Las juntas en la visera

En la visera no es posible eliminar elementos transversales entre las costillas extremas de las estructuras de los laterales

y las de los fondos, pues en estos vanos de junta se disponen cerramientos acústicos que requieren estructura de apoyo.

Para su soporte, se disponen una serie de travesaños que presentan extremos articulados en la dirección del plano de la visera y en la perpendicular. Adicionalmente, en la dirección del plano de visera, la conexión de uno de los extremos está rasgada, con el fin de materializar una junta de dilatación de 410 mm de recorrido.

6. BASES DE DISEÑO.

A continuación, se incluye un resumen de las bases de diseño empleada en el cálculo de la estructura de soporte de la fachada.

6.1. Normativa de referencia

Para el diseño de la estructura se han empleado las siguientes normativas:

TABLE 1.
Normativa de aplicación en el proyecto

ACCIONES	
CTE. DB SE Código Técnico. Documento Básico Seguridad Estructural	Abril 2009*
CTE. DB SE-AE Código Técnico. Documento Básico Seguridad Estructural Acciones en la Edificación	Abril 2009*
EUROCÓDIGO 0. Bases de cálculo de estructuras UNE-EN:1990	Junio 2010
EUROCÓDIGO 1. Acciones en estructuras UNE-EN:1991	2003-2013
(*) En la aplicación del Código Técnico de la Edificación se tienen en cuenta las modificaciones de 2013 a la parte I.	
ESTRUCTURAS DE ACERO Y MIXTAS	
EAE. INSTRUCCIÓN DE ACERO ESTRUCTURAL	2011
EUROCÓDIGO 3. PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ACERO	2005-2013
EUROCÓDIGO 4. PROYECTO DE ESTRUCTURAS MIXTAS	2004-2011
SEGURIDAD FRENTE A INCENDIO	
CTE. DB SI. Código Técnico. Documento Básico Seguridad en caso de incendio. Con comentarios del Ministerio de Fomento	2019

TABLA 2.
Tabla 2.1 del EN 1990

Categoría de vida útil de proyecto	Vida útil de proyecto indicativa	Ejemplos
1	10	Estructuras temporales (1)
2	10 a 50	Partes de estructuras reemplazables, por ejemplo: vigas de rodadura, aparatos de apoyo
3	15 a 30	Estructuras agrícolas y similares
4	50	Estructuras de edificios y otras estructuras comunes
5	100	Estructuras de edificios monumentales, puentes y otras estructuras de ingeniería civil.

(1) Estructuras o partes de estructuras que puedan desmontarse con la intención de volver a usarse no deberían considerarse como estructuras temporales.

TABLA 3.
Tabla B1 en el Anexo B de la EN 1990

Clases de consecuencias	Descripción	Ejemplos de edificios y obras de ingeniería civil
CC3	Consecuencia grave de pérdida de vidas humanas; o consecuencias económicas, sociales o medio ambientales muy importantes	Estadios, edificios en que las consecuencias de un fallo son graves (por ejemplo, una sala de conciertos)
CC2	Consecuencia moderada de pérdida de vidas humanas; o consecuencias económicas, sociales o medioambientales considerables	Edificios residenciales y de oficinas, edificios públicos donde las consecuencias de un fallo son moderadas (por ejemplo, un edificio de oficinas)
CC1	Consecuencia leve de pérdida de vidas humana y consecuencias económicas, sociales o medioambientales mínimas o despreciables	Edificios agrícolas en los que la gente no entra normalmente (por ejemplo, almacenes) invernaderos

6.2. Vida útil y durabilidad

La vida útil para la fachada se ha obtenido de acuerdo con la Tabla 2.1 de la EN 1990 y del CTE DB-SE (2009), Capítulo 1.1 (4), donde se establece que "a falta de indicaciones específicas, se adoptará un período vida útil de servicio de 50 años".

Para la definición de la protección contra la corrosión de la estructura metálica se ha tenido en cuenta la tabla 1 de la norma EN ISO 12944-2, en que se establece para la fachada un ambiente C4.

Para este tipo de ambiente y considerando una durabilidad alta (High) para más de 15 años, según la EN-ISO 12944-5 se establecido el tipo de protección a aplicar.

6.3. Clase de consecuencia y gestión de la fiabilidad

Las clases de consecuencia se determinan de acuerdo con las siguientes normas y regulaciones:

- EN 1990: 2002 + A1: 2005 - Bases del diseño estructural.
- EN 1991-1-7: 2006 + A1: 2014 - Acciones en estructuras. Acciones generales. Acciones accidentales.

De acuerdo con la Tabla B1 en el Anexo B de la EN 1990, hay tres clases de consecuencias:

La estructura de la fachada se considera Clase de consecuencias CC2.

Para una clase de consecuencias CC2, debe adoptarse una clase de fiabilidad RC2, según se indica en el Anexo B de EN 1990. En la tabla B3 del apartado B.3.3 de dicho Anexo, relativo a las medidas relacionadas con los coeficientes parciales, se establece un $K_{Fi}=1.0$.

Tabla 4. tabla B3 del apartado B.3.3 de dicho Anexo B de la EN 1990

6.4. Acciones consideradas

6.4.1. Acciones gravitatorias

Aparte del peso propio de la estructura de soporte, se consideró el peso de la envolvente de lamas, que, dependiendo de la proximidad de sus elementos, estaba comprendido entre 70 kg/m² y 110 kg/m².

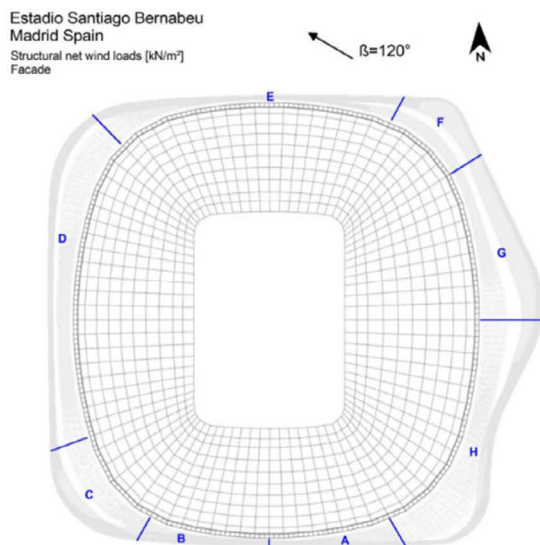
Adicionalmente, se ha considerado el peso propio de los paneles acústicos dispuestos en la visera y en la parte superior de la fachada intermedia de los fondos norte y sur.

De forma más localizada, se han tenido en cuenta las cargas correspondientes a la iluminación del acento, los canalones y las pasarelas de mantenimiento.

6.4.2. Sobrecarga de uso

Para las pasarelas de mantenimiento se han considerado las siguientes sobrecargas:

- Para el diseño global de la fachada 1.00 kN/ml



$\beta=120^\circ$	A	B	C	D	E	F	G	H
Upper Facade	-1.20/ +0.70	+/-0.50	-0.60	-0.25	-0.50	-0.80	-1.10	-1.30
Middle Facade	+0.60	+/-0.40	-1.00	-0.30	-0.55	-1.25	+0.60	+1.25
Lower Facade	+0.60	+/-0.40	-1.00	-0.30	-0.55	-1.25	+0.60	+1.25

Notes:

(1) The given loads are unfactored 50-year wind loads.

(2) A wind-induced friction load of $w_{\text{fr}} = 0.035 \text{ kN/m}^2$ has to be considered for the facade surface.

Fig. 6.3: Unfactored 50-yr effective static wind loads [kN/m²] for the design of the main supporting structure of the facade of the stadium

$\beta = 120^\circ$

Figura 24. Valores del tunel de viento para 120°.

TABLE 5.

Valores limites para comprobaciones en ELS.

	Eje X (perimetral)	Eje Y (transversal)	Eje Z
Deformación de la estructura de soporte de fachada derivada de cargas de viento.	L/400* (máx. 20mm entre costillas)	L/200* (máx. 40mm entre costillas)	Es despreciable
Deformación de la estructura soporte de la fachada por sobrecarga de uso de mantenimiento y peso propio de elementos posteriores al montaje de lamas	L/1000* (máx. 7mm entre costillas)	L/800* (máx. 10mm entre costillas)	L/700* (máx. 14mm entre costillas)
Deformación de la estructura de soporte de fachada por acciones térmicas	L/1500* (máx. 5mm entre costillas)	L/1500* (máx. 5mm entre costillas)	(Inferior a 3mm)
Deformación derivada de movimiento por sobrecargas de uso (combinación pésima de viento, nieve, uso, térmica) en la estructura principal	Edificio este y oeste (1/1000*) (7mm entre costillas)	Edificio este y oeste (1/1000*) (7mm entre costillas)	Edificio este y oeste (1/1000*) (7mm entre costillas)
	Cubierta norte y sur (1/400) (18 mm entre costillas)	Cubierta norte y sur (1/400) (18 mm entre costillas)	Cubierta norte y sur (1/400) (27 mm entre costillas)
Asentamientos de cimentación	Despreciable	Despreciable	L/1000* (máx. 7mm entre costillas)
Distorsión máxima total	50 mm	60 mm	50 mm

* L se considera la luz entre apoyos de costillas consecutivos.

**En las zonas de las esquinas la componente del viento se divide en los dos ejes.

- Para el análisis local se considera adicionalmente una sobrecarga puntual en el punto más desfavorable de 2.0 kN

En cuanto a los canalones, se ha considerado una carga de agua uniformemente repartida de 0.7 kN/ml.

6.4.3. Sobrecarga de nieve

Se considera una sobrecarga de nivel de 0.60 kN/m² (de acuerdo con el CTE), en la proyección vertical de la fachada superior y en parte de la fachada intermedia.

6.4.4. Sobrecarga de viento

Los valores de carga de viento utilizados en el diseño han sido los extraídos del ensayo en túnel de viento realizado para tal

fin. En dicho documento se establecen los valores netos de presión y succión, discretizados por zonas para direcciones de viento cada 30°.

En el informe del túnel de viento también se indica la necesidad de considerar una carga de fricción de 0.035 kN/m², inducida por el viento que actúa paralelamente a la superficie de la fachada en la dirección del viento.

En la Figura 24 se muestra un ejemplo de resultados del túnel de viento.

6.4.5. Acciones térmicas.

Se ha considerado una variación térmica positiva de +48° C y negativa de -28° C.



Figura 25. Izado de primera costilla en el fondo sur.

6.5. Aptitud al servicio

A continuación, se incluye un cuadro resumen con los valores límite adoptado para el cumplimiento de los estados límite de servicio de la fachada:

Además, se ha comprobado que, en todos los casos, la frecuencia natural de la estructura principal de la fachada es superior a 1.5 Hz. Esta consideración es coherente con los resultados del túnel de viento, que ya tienen en cuenta los fenómenos aeroelásticos.

7. PROCESO CONSTRUCTIVO

El proceso constructivo de la fachada y de los elementos de los que cuelga esta –fundamentalmente en los fondos norte y sur–, ha condicionado fuertemente el diseño de la secuencia de montaje y de los medios auxiliares necesarios para su ejecución.

Tanto la fabricación como el montaje de la estructura metálica de soporte de la fachada fueron realizados en su totalidad por INBERSA estructuras metálicas S.L.

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

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

Como se puede observar en la [figura 25](#), las costillas se izaron una a una mediante grúa. La carga máxima por costilla fue de 9.0 toneladas, a una altura máxima de 45 metros.

En ese momento, todavía quedaban por realizar varias actuaciones importantes en la cubierta (colocación de la retráctil, el videomarcador y los DAC) que implicaban grandes movimientos verticales. Además, su carga muerta no estaba completamente colocada, de tal manera que todavía quedaba una parte significativa de la contraflecha de las cerchas de cubierta por recuperarse (en torno a 50 cm), incluyendo la inducida por el peso de la propia fachada.

Por tanto, la fachada debía montarse en una posición por encima de la teórica, descendiendo progresivamente a medida que se recuperara la contraflecha.

Es precisamente en los fondos donde el sofito presenta mayor inclinación, lo que provoca que cualquier movimiento vertical del apoyo superior de la costilla se traduzca en un movimiento horizontal significativo.

Si dicho apoyo se encuentra por encima de su posición teórica, el sofito empuja la costilla hacia el interior del estadio. Este movimiento resulta inasumible, ya que, como se explicó anteriormente, las costillas de los fondos se encuentran muy próximas a la estructura existente del estadio, lo que generaría importantes colisiones.

Para evitarlo, se decidió sustituir la estructura de sofito por puntales provisionales casi horizontales hasta que la fachada alcanzara su posición teórica. En ese momento se podría montar el sofito definitivo y retirar dichos puntales.

Se dispusieron puntales telescópicos que permitían tener un rango de ajuste de la posición de fachada de ± 90 mm en cada extremo. De este modo, se podía separar ligeramente las costillas de la estructura existente durante la ejecución y, posteriormente, contar con un elemento de regulación en el

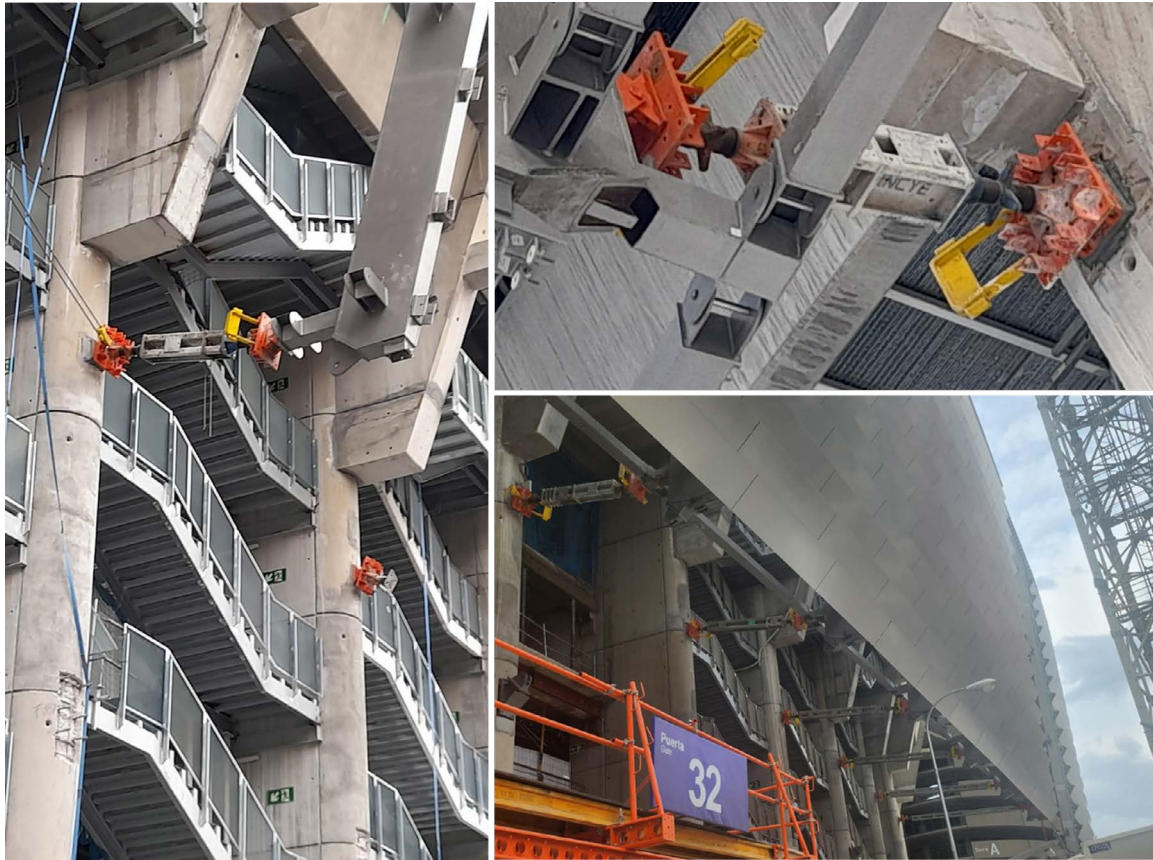


Figura 26. Detalle de apoyo de costillas de los fondos en puntales provisionales.

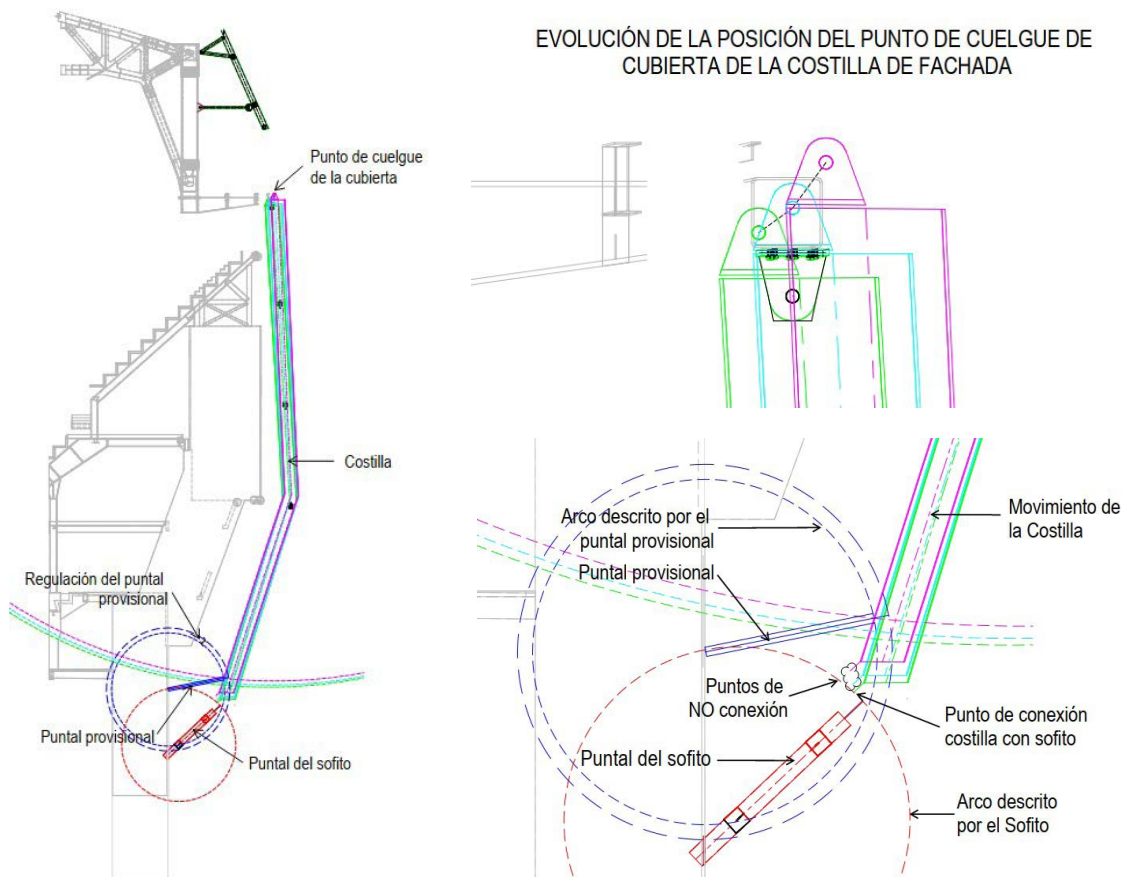


Figura 27. Analisis de desplazamiento de cubierta necesario para conexión del sofito con la costilla.

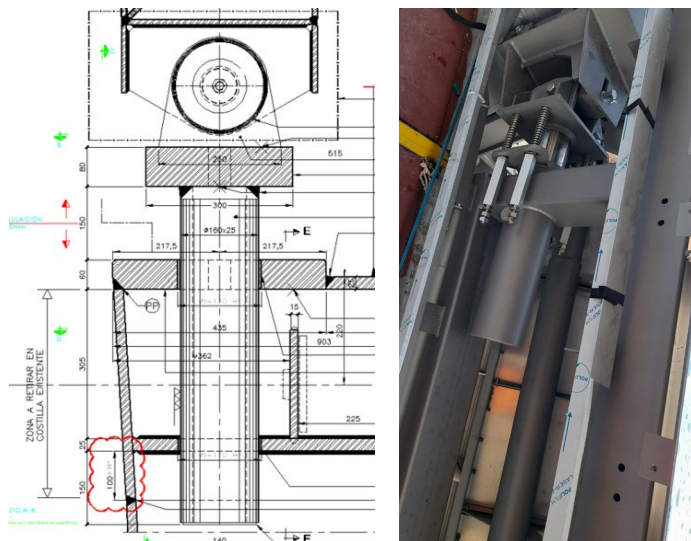


Figura 28. Dispositivo de regulación de altura de costillas de junta.

momento de realizar el traspaso de carga desde los puntales provisionales al sofito, una vez éste pudiera ejecutarse.

Igualmente, el hecho de disponer estos puntales casi horizontales permitió que los grandes movimientos verticales esperados durante la construcción de cubierta (en torno a medio metro) no se tradujeran en desplazamientos horizontales significativos que pudieran generar colisiones con la estructura existente.

La conexión definitiva entre el sofito y la costilla solo podía realizarse cuando la circunferencia trazada por el eje de la rotula de conexión de sofito con las pantallas de hormigón, se cruzara con la circunferencia descrita por la costilla desde su punto de cuelgue.

Si bien la posición de la costilla era ligeramente ajustable mediante los puntales telescópicos, ese margen no era suficiente, por lo que no fue posible ejecutar la conexión hasta que se instalaron los DACs.

En definitiva, el sofito solo podía conectarse cuando el punto de cuelgue de la fachada alcanzaba aproximadamente su posición teórica. En ese momento, ambas circunferencias se cruzaban y era posible realizar la transferencia de carga de los puntales provisionales al sofito.

Esta maniobra resultaba especialmente compleja, ya que en ese momento la práctica totalidad de las lamas de las costillas ya estaban colocadas y la carga en los puntales era considerable.

Hasta que no se realizara esta conexión, no podía iniciarse la ejecución de las lamas del sofito.

La última maniobra realizada en la cubierta que permitió ejecutar el sofito fue la colocación de los Dispositivos de Apoyo Controlado (DACs), que elevaron la posición de los puntos de cuelgue de la 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.

Otro punto especialmente sensible era la posición de las costillas junto a las cuatro juntas de movimiento, frontera entre los fondos “móviles” y los laterales “fijos”. Si bien las tolerancias de ejecución estaban condicionadas por la escasa tolerancia de colocación de las lamas, cada uno de los cuatro grandes sectores se había montado de manera independiente, y era necesario garantizar la continuidad visual en estos puntos.

Para permitir el ajuste final, se dejaron sin montar dos costillas por junta (una de los fondos y una de los laterales, 4x2=8 en total).

Una vez se terminó de montar la cubierta, incluida la cubierta retráctil, se realizaron mediciones topográficas de las costillas extremas en las juntas, a partir de las cuales se definió la posición de los puntos de cuelgue de estas ocho costillas para asegurar una continuidad visual tanto en su parte superior como inferior, tanto en posición de retráctil aparcada como cerrada.

Esta regulación se hizo mediante dos mecanismos que se habían dejado previstos:

- Un elemento de ajuste en la pieza de cuelgue de la costilla, que se cortaba y soldaba en el último momento,
- y unos dispositivos de regulación en altura, que mediante gatos permitían hacer un ajuste final tras la colocación de las lamas de la junta.

Referencias

- [1] 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):215-324 <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3984>
- [2] Romero, E., Haro, J. M., & Hortigüela, E. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. El nuevo edificio del este. *Hormigón y Acero*. 76(307):153-173 <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4010>
- [3] Martínez, J., Yustres, A., Curbelo, A., & del Río, S. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. El edificio oeste: las torres - la corona - la viga museo. *Hormigón y Acero*. 76(307):131-152. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3987>
- [4] Martínez, J., & Martín-Caro, J. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Convivir con el pasado: evaluación y refuerzo de la estructura preexistente. *Hormigón y Acero*. 76(307):271-280. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4004>
- [5] 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>
- [6] Bartalotta, P., & Ladrón de Guevara, G. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Aspectos estructurales relevantes en los torreones del lado este y en las nuevas torres de acceso del lado oeste. *Hormigón y Acero*. 76(307):97-110. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4006>
- [7] Martínez, J., & del Río, 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>