

Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Obra civil asociada al sistema de automatización del terreno de juego

Renovation of the Santiago Bernabéu Stadium. Fully Automated Pitch Changeover System

Jorge Vizcaya Pérez^a, César Quevedo Galván^b, Miguel Ángel Morales Polo^c,
Ignacio Pita Olalla^d y Javier Salcedo López^d

^a Arquitecto, SENER

^b Director general de Mobility en SENER

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Jefe de Hub Estructuras en SENER

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Ingeniero estructural senior en SENER

Recibido el 22 de noviembre de 2024; revisado el 15 de enero de 2025, aceptado el 27 de mayo de 2025

RESUMEN

Descripción del proyecto de la obra civil asociada al Sistema de Automatización del Terreno de Juego del Estadio Santiago Bernabéu, sistema, diseñado y patentado por la ingeniería Sener. Además de explicar el motivo que justifica la incorporación de este tipo de tecnologías en las infraestructuras deportivas de la actualidad, se hace especial hincapié en los principios de funcionamiento del propio sistema, así como los retos derivados de su implementación en un estadio como el Santiago Bernabéu, con más de 70 años de historia y una configuración de gradas existentes. Dado que el sistema incluye componentes móviles, se presta especial atención a la descripción y explicación de los diferentes modos de uso y sus requisitos de diseño específicos. Además, se desarrolla una descripción técnica de los principales elementos de la obra civil asociada, destacando la cámara subterránea de más de 26 metros de profundidad en el lateral oeste del estadio, denominada Hipogeo, diseñada para el almacenamiento y conservación del césped durante largos periodos de tiempo permitiendo la utilización del estadio para otros usos. También se aborda la reconstrucción del tramo de grada baja en el lateral oeste "en voladizo", respetando su configuración geométrica curva original así como la disposición y capacidad de sus sectores, el sistema de seis bandejas metálicas desplazables que contienen la sección completa de terreno de juego de césped natural, y la tapa metálica de cierre del Hipogeo que garantiza su estanqueidad e independencia necesarias para el correcto mantenimiento del césped y para no afectar el correcto devenir de los potenciales eventos alternativos al fútbol que el estadio pueda acoger. El artículo también explicará de manera resumida el sistema en su conjunto, incluyendo referencias a los mecanismos asociados al desplazamiento y almacenamiento de las bandejas, una breve descripción de los sistemas e instalaciones necesarios para la conservación del césped en los modos evento y partido, así como un breve análisis de los retos de implementación arquitectónica y coordinación técnica interdisciplinar durante el desarrollo del proyecto.

PALABRAS CLAVE: Retráctil, terreno de juego, césped natural, mecanismos.

©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

Description of the civil engineering associated to the Project of the Automated Pitch Changeover System at Santiago Bernabéu Stadium, a system designed and patented by the Spanish Engineering Firm Sener. In addition to explaining the background behind incorporating this type of technology into modern sports infrastructures, special emphasis is placed on the principles of operation of the system itself and the challenges arising from its implementation in a stadium like the Santiago Bernabéu, which has over 70 years of history and an existing grandstand configuration.

Given that the system includes mobile components, particular attention is paid to the description and explanation of the various modes of operation and their specific design requirements. Furthermore, a technical description of the main civil engineering elements is provided, highlighting the underground growth chamber over 26 meters deep on the west side of the stadium, known as the Hypogeum. This chamber was designed for the storage and preservation of the natural grass over long periods, enabling the stadium to be used for other purposes beyond football matches.

The reconstruction of the lower west-side grandstand section, built "cantilevered," is also addressed. This reconstruction respects the original curved geometry as well as the layout and capacity of its sectors. Additionally, the system of six movable steel trays, which contain the full natural grass playing field, is detailed, along with the steel cover of the Hypogeum. This cover ensures the necessary sealing and independence for proper grass care while also preventing interference with other non-football events the stadium may host.

The article will also provide a concise explanation of the system, including references to the mechanisms associated with the trays' movement and storage, a brief description of the systems and installations required for turf preservation in both event and match modes, and a short analysis of the architectural challenges and interdisciplinary technical coordination during the project's development.

KEYWORDS: Retractable, pitch, natural grass, mechanisms.

©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: jorge.vizcaya@mobility.sener (Jorge Vizcaya Pérez)

1. INTRODUCCIÓN PREVIA

Los últimos años del siglo XX y los primeros del XXI marcaron una auténtica revolución en el diseño de estadios. Tragedias como Hillborough, Furiani o Heysel obligaron a las autoridades locales y a las entidades deportivas internacionales a implementar medidas drásticas.

Las normativas nacionales y locales en materia de seguridad se volvieron significativamente más estrictas. Paralelamente, a comienzos del siglo XXI, el auge del negocio de las retransmisiones televisivas en el fútbol llevó a la FIFA a publicar su documento de *Requisitos y Recomendaciones Técnicas* para el diseño y construcción de estadios. Esta normativa no solo estandarizó el diseño de estas infraestructuras, sino que también amplió considerablemente sus prestaciones.

Todas estas circunstancias propiciaron un notable incremento en la calidad del diseño y en la tecnología aplicada a los estadios, lo que a su vez disparó los costes tanto de su construcción como de su operación.

En los últimos años, hemos visto cómo los estadios han dejado de ser simples estructuras para contener personas durante los eventos y se han transformado en edificios modernos, estratégicamente ubicados y equipados con tecnología de vanguardia.

Los propietarios y operadores de estadios han aprovechado esta evolución para diversificar las funciones de estos edificios y así justificar su alto coste de construcción, convirtiéndolos en verdaderos espacios multifuncionales, capaces de albergar una amplia gama de eventos y actividades urbanas, mucho más allá de los encuentros deportivos.

En este nuevo contexto, el terreno de juego con césped natural adquiere una importancia crucial. En el fútbol moderno, la calidad del césped ha alcanzado niveles excepcionales, y no es casualidad. Su estado impacta directamente en la retransmisión televisiva, en el desarrollo del juego y, especialmente, en la seguridad de los jugadores. Esto lo convierte en un elemento clave en los estadios contemporáneos. Como consecuencia, se limita casi por completo la realización de eventos que puedan comprometer su condición durante las competiciones, restringiendo el uso del estadio para actividades masivas no relacionadas con el fútbol a las ventanas estivales entre torneos.

El Real Madrid entendió claramente este cambio de paradigma y desde el principio decidió utilizar la reforma de su estadio no solo para cimentar la idea de un templo del fútbol sino también una infraestructura urbana al servicio del Club y por extensión de la Ciudad de Madrid. Un edificio que fuese capaz de poder acoger todo tipo de eventos masivos de forma segura en cualquier momento del año independientemente de la competición futbolística. En este escenario, una forma de desplazar o proteger el terreno de juego que habilitase el estadio a otros eventos pasó a ser un elemento principal del proyecto.

En el caso del Santiago Bernabéu, a las exigencias de conservación del césped natural impuestas por el propio Real Madrid, se sumaban los retos específicos del estadio: una infraestructura antigua rodeada de edificaciones, con gradas en uso cercanas al terreno de juego, y una línea ferroviaria que atravesaba el estadio de norte a sur, cuya caverna estructural

apenas se separaba unos pocos centímetros del césped en algunos puntos.

Estas circunstancias particulares dificultaban la incorporación de sistemas tradicionales de césped retráctil, como los instalados en los estadios de Sapporo, Arizona, o, más recientemente, en el nuevo estadio del Tottenham en Londres. Todos estos sistemas tenían en común haber sido diseñados, desde inicio, de manera integrada con la estructura de las gradas del estadio, utilizando una tecnología que permitía desplazar lateralmente el terreno de juego desde su posición central hacia un área exterior adyacente al estadio. Una situación de proyecto imposible en el Santiago Bernabéu. Se hacía evidente que se debía disponer de una tecnología diferente que, en este caso, vino desarrollada por parte de la Ingeniería Sener.

2 SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DEL TERRENO DE JUEGO

La solución propuesta se fundamenta en dos premisas clave. En primer lugar, el sistema debe afectar lo menos posible a las gradas existentes, manteniendo el aforo y, no puede ocupar espacios externos al estadio. En segundo lugar, el sistema tiene que ser capaz de desplazar el terreno de juego hacia una cámara donde el césped natural pueda mantenerse, permitiendo así al estadio albergar todo tipo de eventos.

El sistema debe tener dos modos de uso. Durante el *modo-partido*, el terreno de juego se ubicará en su posición natural en el centro del estadio, mientras que en *modo-evento*, se encontrará protegido dentro de la cámara de mantenimiento.

De acuerdo con todo esto, el sistema final desarrollado por Sener divide longitudinalmente el terreno de juego en 6 *bandejas* estructurales iguales de 107 x 11.67 m. Estas *bandejas* metálicas, dotadas de un bastidor estructural inferior, sirven como contenedor de la sección constructiva del terreno de juego de césped natural, incluyendo 30 cm de sección natural y su drenaje inferior a base de celdas de plástico de 85 mm de espesor.

En *modo-partido*, el bastidor estructural se apoya directamente en una losa armada inferior que dispone de una serie de raíles embebidos a modo de guía para un conjunto de *carros de transporte* automatizados que levantan y desplazan cada una de las bandejas desde su posición central hacia la cámara enterrada "*hipogeo*" ubicada en el lateral oeste del estadio.

Para evitar que las *bandejas* se precipiten sobre el *hipogeo*, el sistema despliega una serie de *celosías retráctiles* –alojadas en *cajeras* estructurales embebidas en el terreno bajo la grada baja oeste– que sirven de apoyo temporal mientras el sistema de elevación "*elevador*" sostiene cada *bandeja* para posteriormente desplazarla verticalmente hasta su posición final en la estructura del *almacén*. Esta maniobra se efectúa de manera automatizada por cada *bandeja*.

Una vez liberada la *losa inferior*, una tapa de cierre, alojada en *modo-partido* bajo un tramo "en voladizo" de la grada oeste, se reubica sobre el hueco del *hipogeo* cerrándolo y alineándose con la cota de la *losa inferior* habilitando totalmente el espacio central del estadio para la realización de eventos y aislando el *hipogeo*.

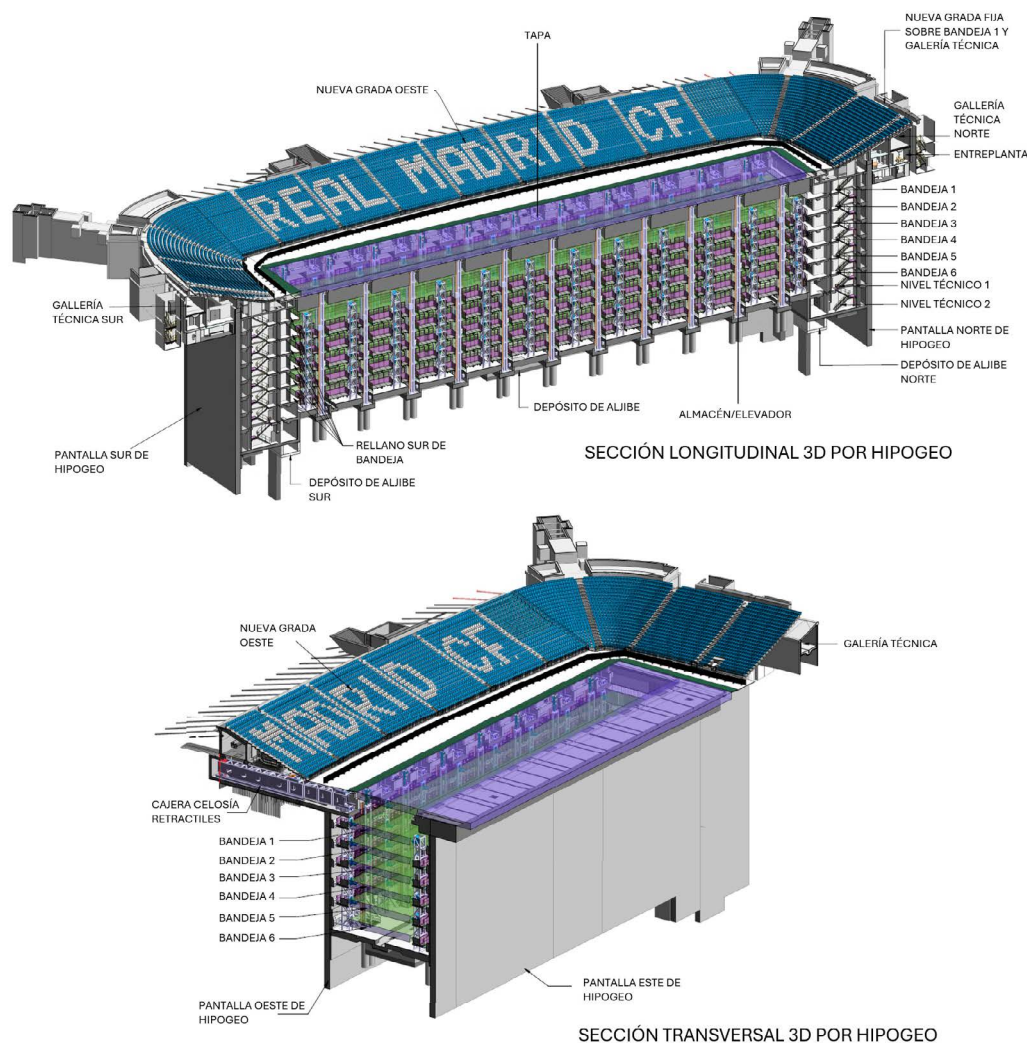


Figura 1. Terminología General de Proyecto.

Las *bandejas* se almacenan en 6 niveles en la zona central del *hipogeo* disponiendo en cada testero, norte y sur, de un núcleo que alberga salas para equipamiento, equipos y sistemas agronómicos, así como montacargas comunicados con la *galería técnica* del estadio. Así, se garantiza el correcto acceso independientemente del evento que pueda acoger el estadio.

El sistema está equipado con una serie de instalaciones y sistemas agronómicos capaces de actuar tanto en *modo-evento* como *modo-partido*, entre los que destacan, sistema de riego/fertiirrigación, calefacción/refrigeración del terreno, ventilación/climatización, etc.

A continuación, se lleva a cabo una explicación más detallada de los componentes estructurales principales del sistema:

2.1. Hipogeo

La ubicación del Hipogeo y del sistema de celosías retráctiles en el lateral oeste del estadio requirió de una intervención estructural muy cercana a la primera alineación de pilares de la grada baja originaria de 1947 apoyada sobre el terreno. Las cimentaciones del Estadio habían sido reforzadas en las anteriores reformas y ampliaciones mediante recalce de mi-

cropilotes y pilotes, salvo la primera y segunda alineación, en las que se mantenía el esquema de cimentación directa. En este escenario, se diseñaron conjuntamente los principales elementos estructurales que conforman el complejo Hipogeo-Galería Técnica considerando el estudio de las deformaciones del terreno y de su efecto en la estructura de la tribuna. Los resultados obtenidos constituyeron la base del plan de monitorización y control realizado durante la ejecución.

La excavación de la grada oeste se realizó protegida por una pantalla de micropilotes anclada provisionalmente en la parte superior y limitada en sus dimensiones por el gálibo vertical de la propia tribuna superior (segundo anfiteatro actual). A resguardo de ésta se construyeron sucesivamente –de arriba abajo–, la *galería técnica* perimetral prevista en la remodelación del estadio, los pilares de apoyo de la nueva grada oeste en voladizo –cuya nueva definición respetó la geometría original– y las *cajeras* que alojan las *celosías retráctiles*. Todos estos elementos trabajan conjuntamente para evitar el desplazamiento de los pilares de la tribuna una vez se destesaron los anclajes inicialmente ejecutados.

El esquema funcional del sistema requirió la prolongación de las *cajeras* más allá de la proyección de la *galería técnica*, en un nivel inferior, y su ejecución y diseño tuvieron que

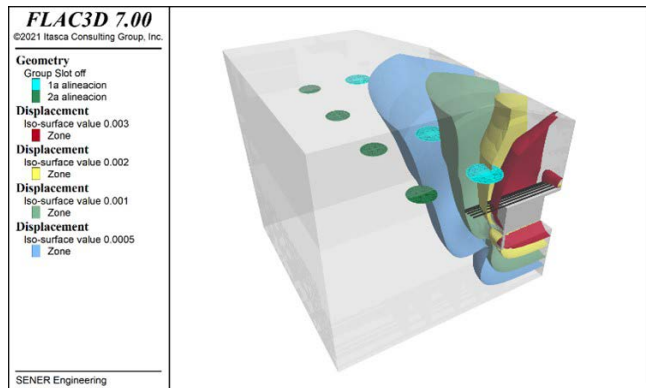


Figura 2. Cimentaciones del estadio en el contexto de isosuperficies de desplazamientos totales.

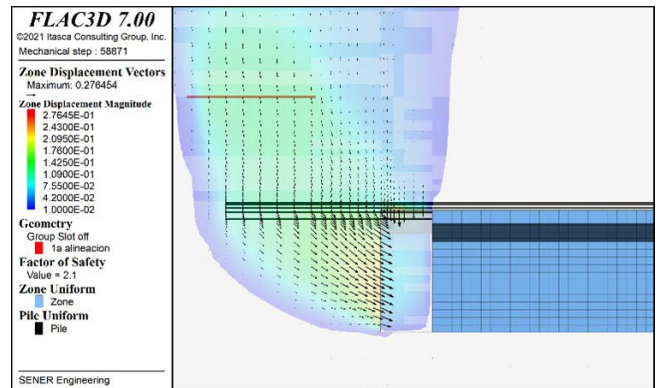


Figura 3. Mecanismo de rotura del cálculo de estabilidad del frente de las galerías de celosías retráctiles.

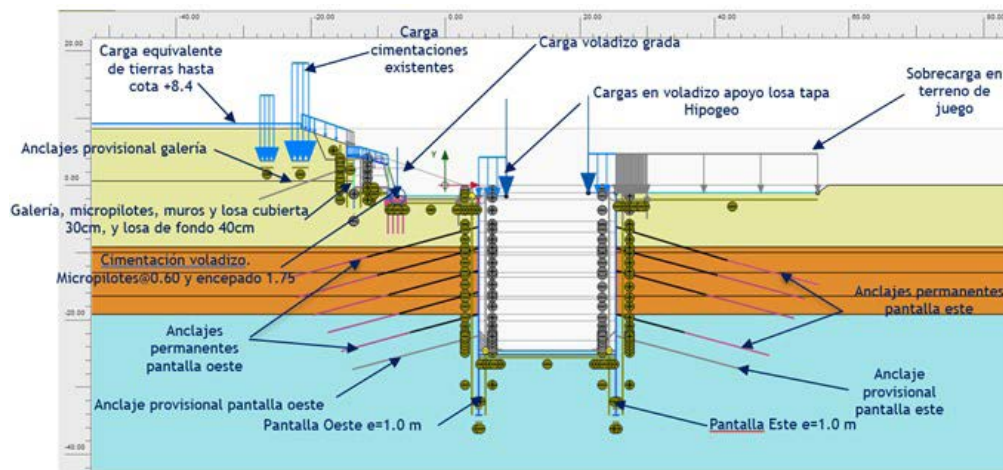


Figura 4. Sección de cálculo en Plaxis 2D del Hipogeo.

ser compatibles con el funcionamiento posterior del estadio (mantenimiento de cotas, núcleos de comunicación con vomitorios de gradas, accesos de mantenimiento, geometría de grada, etc.). Para ello se previó una excavación en mina en dos fases de avance y protegida mediante paraguas de micropilotes, cerchas metálicas y proyectado de hormigón.

El *hipogeo* constituye el recinto principal que aloja el sistema. A sus muros se anclaron los sistemas de almacenamiento y elevación de las 6 bandejas. En la parte superior se ubicaron voladizos –tanto en el lado este como el oeste, a modo de prolongación de las *cajeras* de las celosías retráctiles– que permiten el anclaje de las mismas durante las maniobras y que, además, constituyen el apoyo de la *tapa* que cierra el *hipogeo*.

La estructura de muros-pantalla y anclajes permanentes se diseñó para resolver los límites de deformabilidad requeridos por el propio sistema y las cimentaciones de la grada y permitió que la excavación del interior fuese compatible con el funcionamiento del estadio.

Las pantallas tienen una profundidad de 34.2 m, siendo su altura libre de 25.20 m y por lo tanto empotrando 9 m en el estrato tosco. Se necesitó de 5 niveles de anclajes permanentes dispuestos cada 2.25 m, y otro nivel de anclajes provisionales.

En los testeros norte y sur la reconstrucción de la grada baja del estadio se realizó puentada sobre los propios muros

del *hipogeo*. Los forjados de esos testeros acodalan los muros pantalla siguiendo una construcción tipo *top-down* en el caso del testero norte y *bottom-up* en el sur, con empleo provisional de vigas perimetrales y puntales metálicos, debido a necesidades derivadas de la extracción de tierras. Con esta solución se independizó la estructura interior del hipogeo y se eliminó cualquier potencial impacto de la construcción en el aforo del estadio.

2.2. Losa inferior

El diseño de la *losa inferior* que se extiende bajo las bandejas se fundamentó en tres requisitos: alojar con límites estrictos de deformabilidad los railes embebidos por los que transitan los carros de transporte horizontal, servir de apoyo a las bandejas en *modo-partido* y servir de base sobre la que organizar los eventos alternativos. Las reducidas tolerancias requeridas y el estrecho plazo de construcción (escasamente 6 semanas) necesitaron de un estudio detallado del procedimiento de ejecución.

Además, es importante destacar el importante impacto que tuvo en su diseño y su posterior construcción el túnel ferroviario que conecta Atocha con Chamartín que discurre en el lateral este del terreno de juego. La estructura de las tribunas norte y sur se diseñó originalmente puentando el túnel y que la parte baja de la grada este afectada, excavada

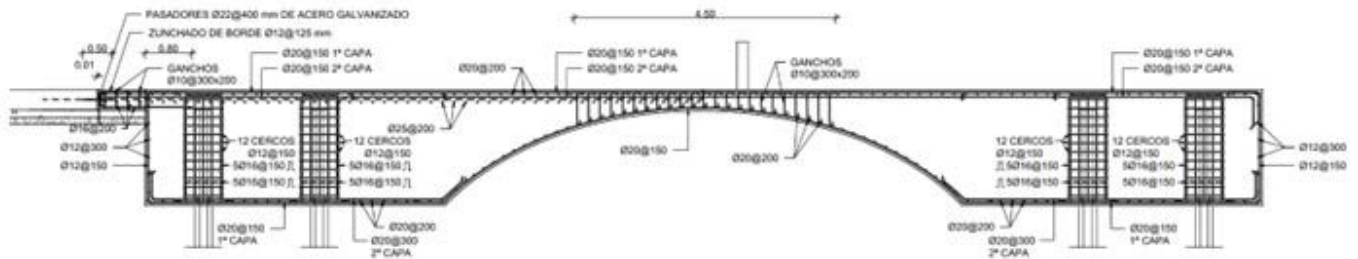


Figura 5. Detalle de armado de la losa inferior sobre la bóveda del túnel.

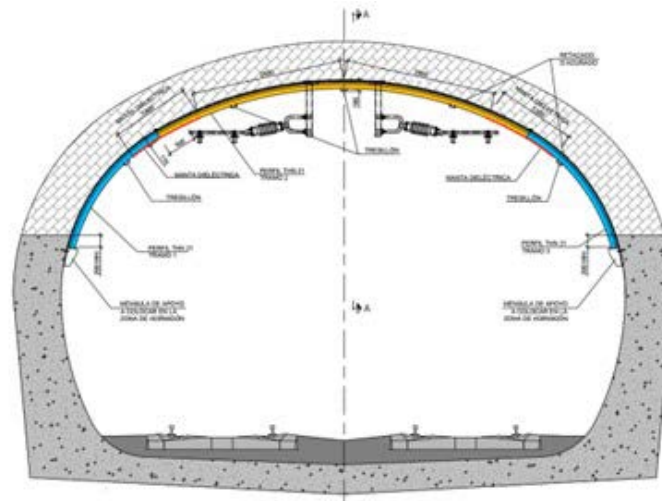


Figura 6. Sección tipo transversal del refuerzo del túnel.

sobre el terreno, apoya parcialmente en la bóveda del mismo. La profundización del nivel del terreno de juego para alojar las *bandejas* suponía una modificación del comportamiento de la estructura del propio túnel, por lo que fue necesario su refuerzo.

Inicialmente la bóveda se reforzó por el interior (figura 5) mediante cerchas y proyectado de hormigón. Con el tráfico ferroviario restablecido, se actuó en el exterior construyendo la protección diseñada.

2.3. Tapa

La tapa del *hipogeo* se resolvió con una estructura metálica que cubre una superficie de 108 m x 13.3 m. Su diseño estuvo condicionado por varios factores. En primer lugar, por el hecho de tratarse de una estructura móvil. En segundo lugar, por los condicionantes geométricos propios de una obra con numerosos interfaces. En tercer lugar, por el dispar uso que de la misma se puede hacer y, en cuarto, por los condicionantes constructivos.

Además de los modos principales de uso del sistema, *modo-evento* (figura 7) y *modo-partido* (figura 8), el diseño de la tapa debe considerar uno adicional, *modo-abierto*. A estas posiciones fijas hay que sumar dos posiciones en movimiento: elevación y traslación horizontal. Esto se traduce en cuatro esquemas estructurales distintos y muy diversos puntos de apoyo.

En el *modo-evento*, con las bandejas de césped ubicadas en el interior del *hipogeo*, la tapa apoya sobre los voladizos de hormigón de la coronación de las pantallas del *hipogeo*,

quedando su superficie enrasada con la losa. El esquema estructural en esta situación es la de vigas biapoyadas de 12.8 metros de luz.

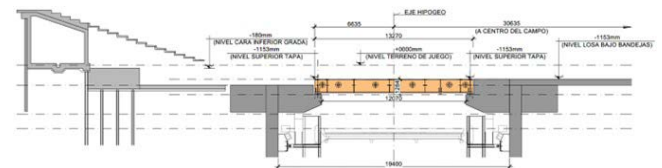


Figura 7. Sección entre cajeras. *Modo Evento*.

En el modo-abierto, la tapa se ubica parcialmente bajo la grada en voladizo y permite la entrada y salida de las bandejas en el hipogeo. En esta posición el esquema estructural es idéntico al de la posición cerrada, con vigas biapoyadas de 12.8 metros de luz.

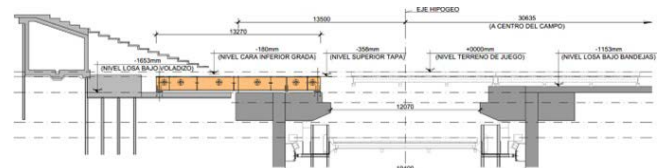


Figura 8. Sección entre cajeras. *Modo Abierto*.

En el modo-partido la tapa cubre parcialmente el hipogeo y queda adosada a la bandeja lateral oeste, que apoya sobre las celosías retráctiles. En esta situación, los apoyos quedan separados 10,3m, con un voladizo de 2.74 metros.

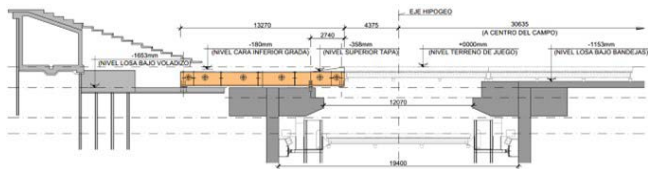


Figura 9. Sección entre cajeras. *Modo Partido*.

Durante el movimiento de elevación de la tapa, ésta apoya sobre el elevador. Durante su movimiento de traslación horizontal, sobre los carros de transporte. Hay también que disponer zonas rigidizadas para una futura sustitución de apoyos. Por tanto, en total nos encontramos con 4 tipos distintos de apoyos (hormigón, elevadores, carros y cambio de apoyos), que no pueden ser coincidentes.

La estructura se conforma por 36 vigas armadas en I. Sin embargo, se eleva en tan solo 11 alineaciones (22 puntos de elevación) y se traslada en 12 alineaciones (24 puntos de traslación/carros). Esto implica que, en las maniobras de elevación y traslación, la estructura adopte el esquema estructural propio de un emparrillado, trabajando en las dos direcciones.

Por un lado, la tapa debe permitir la circulación de los carros de transporte por debajo de la misma. Por otro, ha de quedar emplazada y ser transportada por debajo de la grada en voladizo. Ambos condicionantes implican que los cantos estructurales disponibles en los carriles de circulación sean muy reducidos (220 mm).

Dado que en modo-evento, la tapa, junto con la losa, forma parte del espacio útil para la realización de actividades, se diseñó para poder acoger un espectro muy amplio de las mismas. Quedando descartada una losa de hormigón por los reducidos cantos disponibles, así como para evitar incrementar el peso a soportar por carros y elevadores, se opta por una solución de chapa ortótropa, que pueda absorber cargas locales elevadas como ruedas de camión, apoyo de escenario, etc.

Igualmente, la tapa se diseñó y calculó para garantizar el confort de los usuarios en sus diferentes modos de uso, evitando vibraciones que resulten molestas. Se verificó que las frecuencias propias de vibración, incluso con una masa oscilante igual a la carga permanente más una eventual carga muerta de 400 kg/m², fuera superior a 8Hz, valor mínimo que establece el Código Técnico de la Edificación, parte 2 DB SE [3], para es-

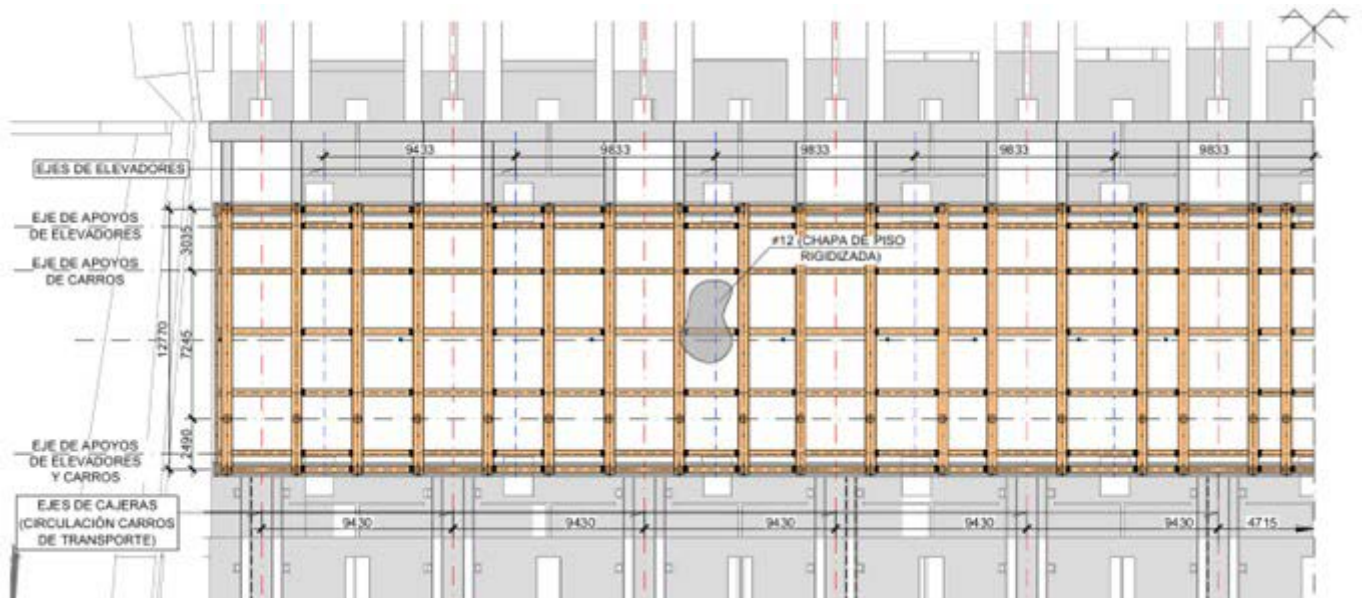


Figura 10. Semi-planta. *Modo Evento*.



Figura 11. Montaje de módulos de tapa.

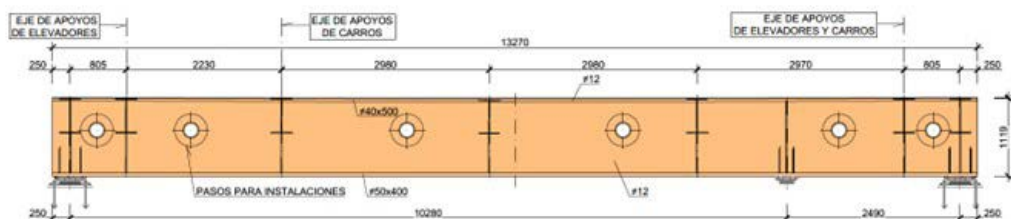


Figura 12. Sección transversal de bandeja por viga principal.

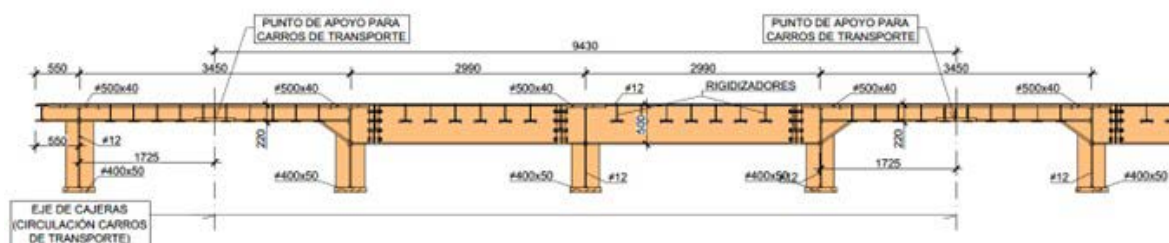


Figura 13. Sección longitudinal de bandeja por vigas transversales.



Figura 14. Aproximación de bandeja a hipogeo.

tablecer que una estructura de gimnasios o polideportivos es lo suficientemente rígida para descartar este tipo de fenómenos.

Por lo que respecta a los condicionantes constructivos, el acceso de las estructuras al estadio se tuvo que realizar a través de pasos relativamente angostos. Fue por ello necesario transportar la estructura despiezada (figura 11). Por otro lado, dado que los plazos de ejecución eran muy ajustados se decidió diseñar una estructura modular atornillada cuyas únicas uniones soldadas a realizar in-situ fueron las de la chapa de piso, dada la necesidad de asegurar la estanqueidad del hipogeo.

Debido a los condicionantes anteriormente descritos, la tapa se conformó con 36 vigas principales, armadas en I (figura 12), de 1,10 m de canto aproximadamente y vigas transversales, también en I, de 500 mm de canto, salvo en las zonas de circulación de los carros (figura 23), donde el canto disponible fue de tan solo 220 mm. La formación de piso se realizó mediante una chapa de 12 mm rigidizada. Se descartaron los rigidizadores cerrados tipo bulbo para favorecer la resolución de los detalles, particularmente en los encuentros entre las vigas transversales de 220 mm de canto y la propia rigidización.

2.4. Bandejas

El diseño de las 6 bandejas en las que se divide el terreno de juego estuvo determinado por los mismos condicionantes des-

critos para la tapa: estructura móvil y condicionantes geométricos, constructivos, así como los propios de su uso final.

De esta manera, las *bandejas* pueden presentar dos posiciones fijas y dos posiciones en movimiento.

Las posiciones fijas se corresponden, por un lado, con el *modo-evento*, con las *bandejas* guardadas en el *hipogeo* y soportadas por las torres del almacén. Por otro lado, con el *modo-partido*, con las *bandejas* fuera del *hipogeo* conformando el terreno de juego.

En el *modo-partido*, las *bandejas* apoyan sobre la *losa inferior*, salvo la bandeja más occidental, que, al quedar sobre la vertical del *hipogeo*, apoya sobre las *celosías retráctiles*. Esto hace que esta bandeja presente una configuración estructural distinta a las demás.

Las posiciones móviles se refieren a la posición de elevación, con las *bandejas* soportadas sobre los elevadores, y a la posición de transporte, con las *bandejas* apoyadas en los *carros de transporte* (figura 23).

Es decir, las *bandejas* están sometidas a cuatro esquemas estructurales distintos. Al igual que sucedía en la *tapa*, el limitado número de elevadores y carros implica la necesidad de que la estructura trabaje en las dos direcciones en una configuración estructural de emparrillado. Se dispone de un entramado de vigas principales, ubicadas en las dos direcciones, sobre las que apoya otro entramado de vigas secundarias

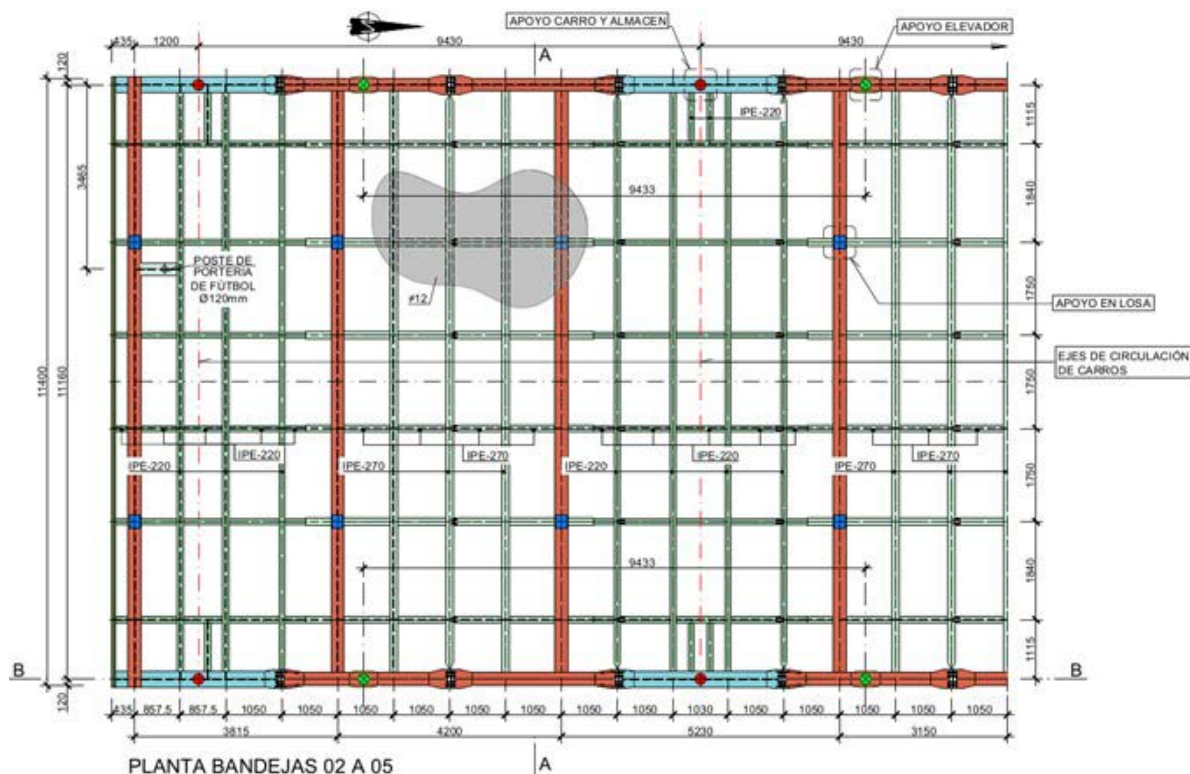


Figura 15. Planta de bandejas 2-5.

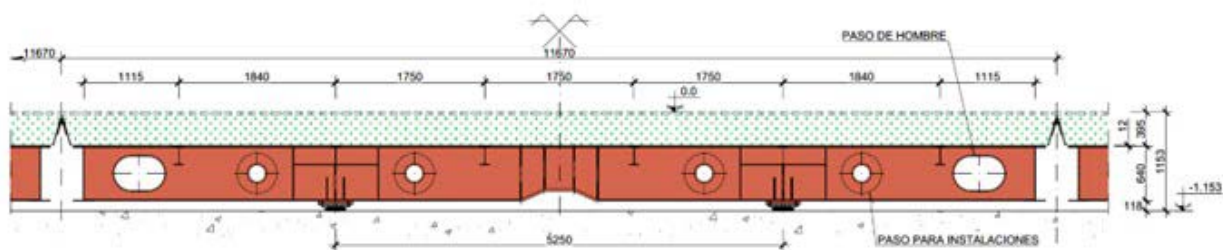


Figura 16. Sección transversal. Bandejas 1-5.

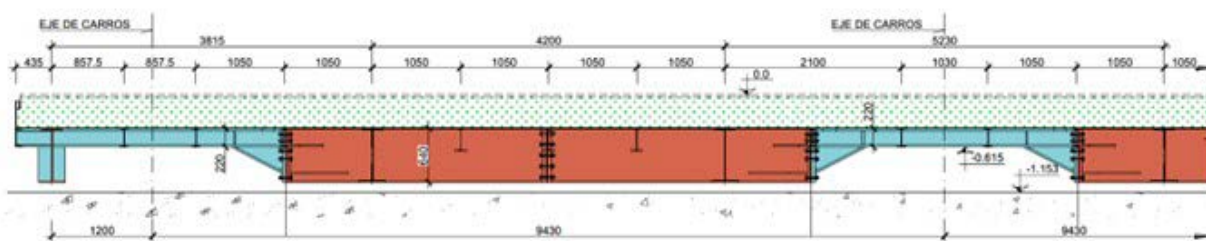


Figura 17. Sección Longitudinal. Bandejas 1-5.

a modo de correas, formando en conjunto su bastidor estructural inferior.

El canto estructural de las bandejas estaba limitado, tanto por arriba como por debajo. Por arriba, porque la cota de césped no se pudo alterar, ya que suponía una merma en la capacidad del estadio. Por debajo, porque la cota superior de la losa no se podía bajar, debido a la cercanía del túnel del tren de cercanías.

A la distancia entre estos dos límites, 1153 mm, había que restar el espesor del paquete agronómico, de 385mm, así

como la separación necesaria entre cara inferior de estructura y losa inferior, de 118 mm. Así, el canto estructural disponible resultante fue de 652 mm. Las vigas principales, armadas en I, tuvieron un canto de 640mm y, sobre ellas, se dispuso la chapa de 12 mm de espesor, sobre la que directamente se apoya el paquete agronómico.

Por otro lado, las bandejas son desplazadas por los carros de traslación, que han de poder circular por debajo de ellas. Esto implicó que, en las calles de circulación de los carros, el canto estructural disponible fuese de tan solo 220 mm.

Al igual que en el caso de la tapa, los condicionantes constructivos (gálibos de acceso al estadio y necesidad de un rápido montaje), determinaron que las bandejas fueran configuradas de forma modular y atornillada. Las únicas soldaduras a realizar en obra fueran las de la chapa continua superior, para evitar eventuales filtraciones.

Dado que el uso principal de las bandejas es el de la práctica del fútbol, fue imprescindible garantizar el confort óptimo de los jugadores. En particular, se tuvo que estudiar que las vibraciones no interfirieran con la práctica deportiva.

Por esta razón, era importante que las frecuencias de vibración de la estructura fueran elevadas, alejándose, no sólo de la frecuencia máxima de un jugador corriendo (alrededor de 3.5 Hz), sino también de su segundo armónico (7,0 Hz). De esta manera se evitaban posibles fenómenos de acople o resonancia. En particular, la frecuencia propia de vibración de las bandejas supera los 8 Hz, valor mínimo que establece el Código Técnico de la Edificación, parte 2 DB SE [3], para establecer que una estructura de gimnasios o polideportivos es lo suficientemente rígida ante acciones dinámicas.

Adicionalmente, se obtuvieron las aceleraciones provocadas por las vibraciones, para verificar que éstas estuvieran dentro de los rangos admisibles de confort, no siendo percibidas por los futbolistas como molestas.

Se realizaron modelos de cálculo en SAP2000 en los que se incluyeron, tanto la estructura metálica portante (elementos tipo “barra” para las vigas y elementos tipo “shell” para la chapa superior) como las tierras sobre ella (elemento tipo “solid”). El incremento en la masa oscilante que suponen las tierras reduce las frecuencias de vibración, pero también contribuye a una reducción de las aceleraciones y a un incremento del amortiguamiento. En el modelo de la bandeja oeste se incluyeron también las celosías retráctiles sobre las que se apoya.

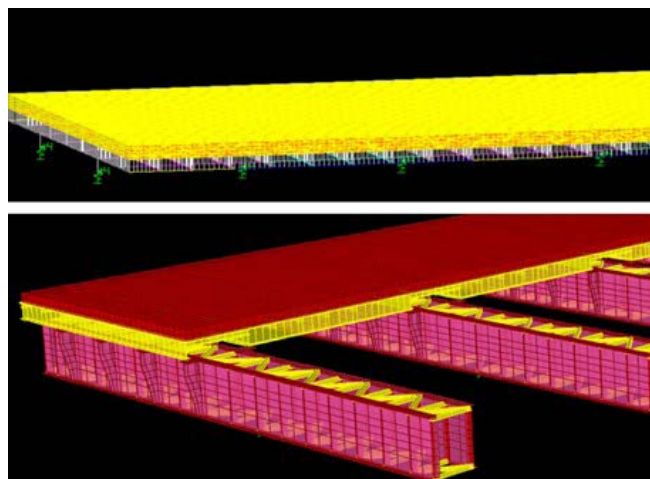


Figura 18. Modelos de cálculo dinámico para bandeja tipo y bandeja 6.

Se analizaron las bandejas bajo cargas impulsivas, de acuerdo con las normas ISO 10137-2007 – Serviceability of buildings and walkways against vibrations [7] y ISO 2631-1 – Evaluation of human exposure to whole-body vibration [6]; y bajo cargas periódicas de acuerdo con la JRC-ECCS-Design of lightweight footbridges for human induced vibration [8].

Para las cargas periódicas o armónicas, se estudiaron diversos escenarios (partido de fútbol, evento previo, invasión de aficionados, etc.), y se tuvo en cuenta tanto la capacidad de

sincronización en función de la carga (mayor sincronización para menor número de personas) como el acople de la misma a la frecuencia natural de la estructura. El amortiguamiento estructural para condiciones de servicio se estimó en 1.2%. Las aceleraciones de pico obtenidas estuvieron en todos los casos dentro de los límites del máximo confort.

Para las cargas impulsivas se estudiaron tres situaciones distintas, con una modelización de saltos o caídas de jugadores desde 0.2 m, 0.4 m y 0.8 m. Se obtuvieron las aceleraciones promediadas y ponderadas (RMS), teniendo en cuenta la distinta sensibilidad humana a cada rango de frecuencia y resultando todas ellas inferiores a las aceleraciones admisibles.

Grada oeste en voladizo

Dado que el sistema requiere desplazar la tapa fuera del recorrido que realizan las bandejas hacia el hipogeo, hubo que rediseñar el tramo bajo de la grada oeste de tal manera que permitiese poder ubicar la tapa bajo ella.

La existencia de la galería técnica perimetral del estadio impedía la disposición de los habituales pórticos transversales al terreno de juego, ya que éstos quedarían interrumpidos. Adicionalmente, para una mayor comodidad de los espectadores, la grada del Santiago Bernabéu forma una curva en planta, que se tuvo que respetar. Esto introdujo una complicación geométrica adicional, ya que en esta zona también debían incluirse, en un nivel inferior, las cajas para las celosías retráctiles. Es decir, hubo que compatibilizar la alineación ortogonal de las celosías / cajas con la geometría curva de la grada.

Por todo ello, se optó por diseñar unas columnas de hormigón (figura 19) que evitasen cualquier interferencia. En ellas se empotraron unas ménsulas metálicas de canto variable, que seguían la geometría curva de la grada. Sobre las ménsulas metálicas se dispusieron los prefabricados de grada.



Figura 19. Columna de hormigón para apoyo de vigas metálicas en voladizo.

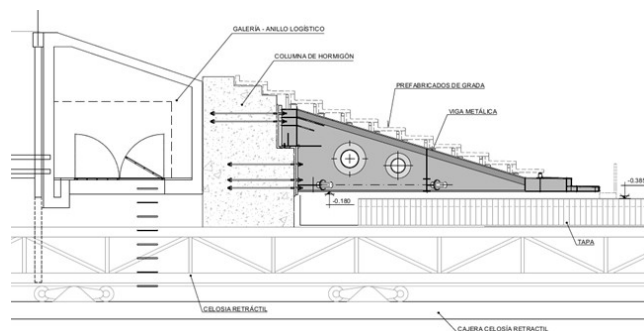
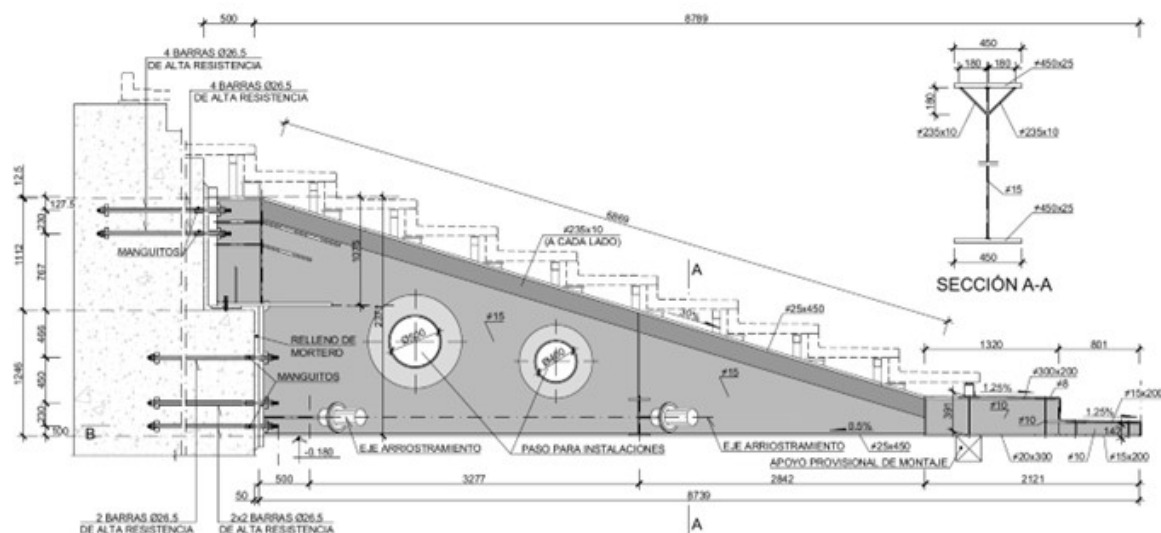
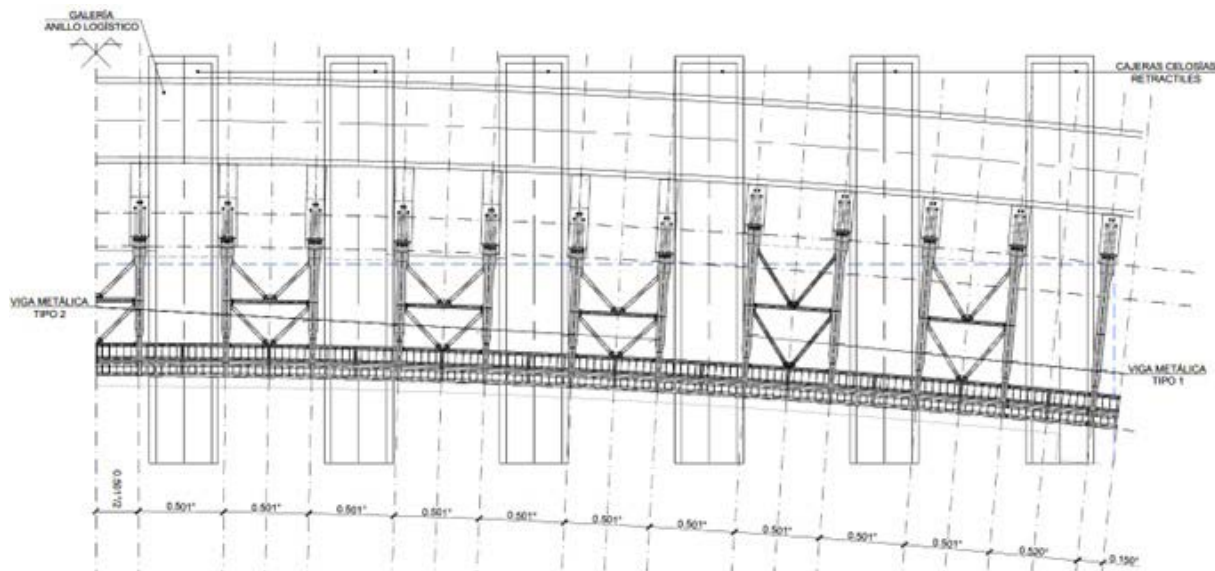


Figura 20. Sección de viga metálica de grada en voladizo.



Dada la configuración radial de las ménsulas y rectangular de la tapa, y para evitar la interferencia de los núcleos de hormigón con la tapa, las ménsulas presentan una mayor longitud en su posición más alejada del centro del campo (más longitud en fondos norte/sur que en centro de campo). Para uniformizar la solución, se adoptaron dos únicas geometrías, de longitudes aproximadas de 8.7 m y 6.9 m.

Las ménsulas metálicas, que tienen un canto máximo de 2.4 m y un canto mínimo de 0.14 m, se empotraron en el hormigón a través de barras de anclaje de alta resistencia, postesadas. Las cargas verticales se introducen a través de un esquema tipo *media madera*. Para absorber las cargas horizontales y aportar rigidez horizontal, las ménsulas se arriostraron dos a dos. La separación aproximada entre costillas es de 4.7 m, por lo que, en el ala superior se dispusieron células que podían trabajar a torsión y evitar las flexiones laterales del ala.

2.5. Mecanismos del sistema

Además de la obra civil y el conjunto de instalaciones asociadas al mantenimiento del césped natural, el sistema se basa en el funcionamiento automatizado de un conjunto de mecanismos integrados en el sistema de manera coordinada.

Los mecanismos, diseñados para asegurar la mayor fiabilidad, se pueden dividir en tres grandes grupos.

En un primer lugar se encuentran el conjunto de los carros de transporte (figura 23) horizontal que operan sobre la losa inferior guiados por los railes embebidos. El sistema de carros está compuesto de 12 parejas de carros de transporte (carro máster más carro esclavo) que operan de manera totalmente automatizada y que fueron diseñados para elevar cada bandeja, unos pocos milímetros sobre la losa, para luego proceder con su desplazamiento horizontal en cada maniobra.

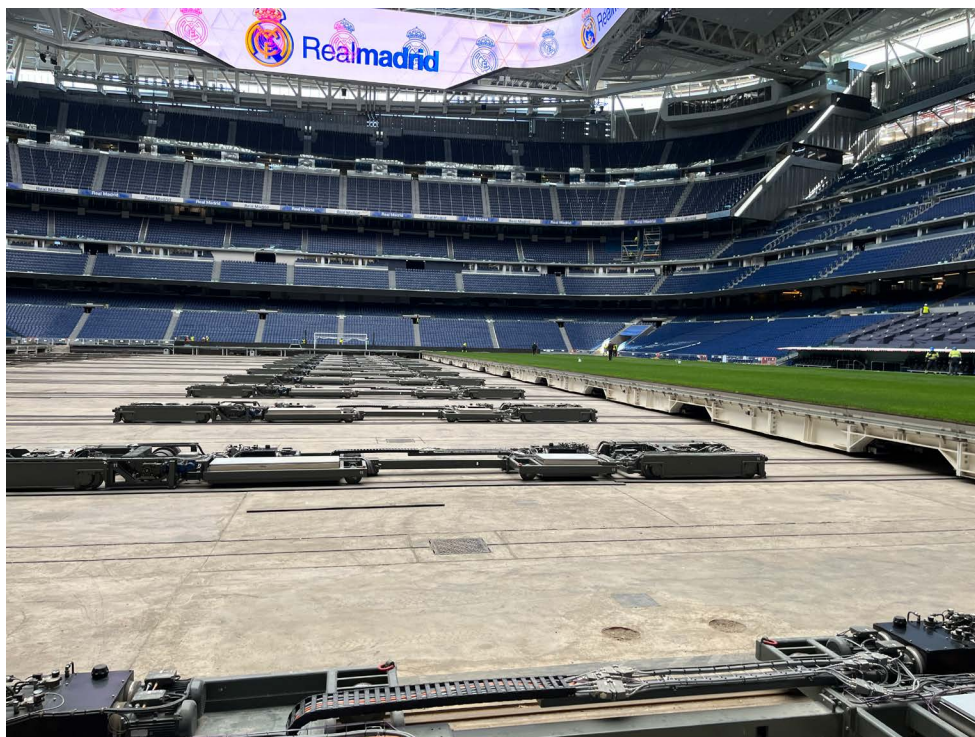


Figura 23. Carros de Transporte.



Figura 24. Celosías Retráctiles.

En segundo lugar, se encuentra el conjunto de 12 celosías retráctiles (figura 24) de apoyo de las bandejas sobre la vertical del hipogeo. Estas celosías metálicas que deslizan por las cajas anteriormente descritas sirven de breve apoyo temporal a las bandejas en cada maniobra de salida y entrada del hipogeo y, sobre todo, de apoyo permanente en operación a la bandeja 6 en modo-partido. Para ello, cada celosía dispone de mecanismos de despliegue y anclaje especialmente diseñados

para garantizar la seguridad de cada maniobra, así como la total estabilidad del conjunto en modo-partido.

Para terminar, el sistema dispone del conjunto formado por el elevador (figura 25) y almacén ubicados dentro del hipogeo y formados por un sistema de torres construidas a base de celosías metálicas ancladas a las pantallas del mismo que, a su vez, integran los diferentes mecanismos de ménsulas de apoyo de cada una de las bandejas en sus niveles específicos,



Figura 25. Elevación de Bandeja.

así como los mecanismos de elevación y descenso de las mismas durante cada maniobra.

En este punto cabe hacer especial mención que el proyecto constituyó un verdadero reto de coordinación interdisciplinaria entre muy distintas ramas de la arquitectura y la ingeniería con dinámicas de funcionamiento muy diferentes. En este sentido, el hecho de que todas las disciplinas de diseño se encontrasen integradas dentro del paraguas del mismo diseñador (Sener) favoreció sustancialmente el proceso dotándolo de mucha mayor agilidad y garantizando una mejor y más eficaz interlocución y transmisión de la información. De esta manera, no solo se obtuvo una óptima coordinación técnica, sino que se dotó al sistema de la máxima fiabilidad

exigida por el Real Madrid y, sobre todo, se consiguió cumplir con los comprimidos plazos de entrega mucho más tensionados, si cabe, por motivos derivados de la pandemia.

3. CONCLUSIONES

La implementación del sistema de automatización del terreno de juego en el Estadio Santiago Bernabéu representa un hito en la ingeniería aplicada a infraestructuras deportivas. El desarrollo de una cámara hipogea de más de 26 m de profundidad, la reconstrucción de la grada oeste en voladizo, el diseño de bandejas estructurales móviles y la integración de mecanismos automatizados exigieron una coordinación interdisciplinaria sin precedentes. La solución adoptada permitió compatibilizar la preservación del césped natural con la transformación del estadio en un espacio multifuncional, superando condicionantes geométricos, estructurales y constructivos singulares de un edificio histórico. Este proyecto demuestra la capacidad de la ingeniería contemporánea para responder a exigencias técnicas extremas mediante soluciones innovadoras, eficientes y completamente integradas en la operación del estadio.

Referencias

- [1] Eurocódigo 0- UNE EN 1990_2003_Bases de cálculo de estructuras.
- [2] Eurocódigo 1- UNE EN 1991-2_2004_Cargas de tráfico en puentes.
- [3] CTE- Código Técnico de la Edificación_2006 Parte 2 DB SE.
- [4] CTE- Código Técnico de la Edificación_2006 Parte 2 DB SE-A.
- [5] CTE- Código Técnico de la Edificación_2006 Parte 2 DB SE-C.
- [6] UNE-ISO 2631-1-2008- Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero.
- [7] ISO 10137-2007 Bases design structures-Serviceability buildings and pedestrian walkways vibration.
- [8] JRC-ECCS- Design of lightweight footbridges for human induced vibration.
- [9] SETRA- Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading
- [10] Hivoss- Vibration Design of floors.
- [11] Hivoss- Design of footbridges.
- [12] FIB bulletin 32- Guidelines for the design of footbridges.
- [13] IABSE-Bachmann- Vibrations in Structures Induced by Man and Machines.