

## **Remodelación Integral del Estadio Santiago Bernabeu: Estudio de la sección transversal en los fondos Norte y Sur, un ejemplo de infraestructura viva y adaptable**

*Integral renovation of the Santiago Bernabeu stadium: study of the transversal section on north and south sides, an example of a living and adaptable infrastructure*

### **José Antonio MARTÍN-CARO ÁLAMO**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Ines Ingenieros Consultores, S.L.  
Director Gerente  
[jmc@inesingenieros.com](mailto:jmc@inesingenieros.com)

### **Jose Luis MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Ines Ingenieros Consultores, S.L.  
Director Técnico  
[jimm@inesingenieros.com](mailto:jimm@inesingenieros.com)

### **RESUMEN**

INES forma parte del equipo liderado por L-35/Ribas y GMP que desarrolla el proyecto de remodelación del Estadio Santiago Bernabéu de Madrid. Este proyecto busca restablecer el estadio como un punto de referencia deportivo a nivel mundial. Este nuevo diseño incluye la remodelación integral del estadio actual mediante la construcción de nuevas fachadas asimétricas que rodean la antigua y nueva estructura, la instalación de una nueva cubierta provista de un techo retráctil, la mejora de los usos actuales y accesos, la generación de nuevos espacios y usos, etc. Todas estas intervenciones se integran plenamente en el paisaje urbano. Un factor clave para la factibilidad de este gran proyecto es el mantener como hilo conductor de todo el proceso que la gestión de la construcción se debe de llevar a cabo interfiriendo mínimamente con en el uso actual del estadio. Por ello dentro de los diferentes planteamientos estructurales realizados para las diferentes soluciones se ha visto que es necesario sacar el máximo rendimiento de la estructura existente, haciéndola trabajar, en ocasiones bajo configuraciones de carga y esfuerzos para los que hasta ahora no se había visto sometida. En el proyecto estructural, propiamente dicho, se ha contado con la estructura existente proveniente de los 4 momentos constructivos importantes del estadio: 1947-53, 1980, 1994 y 2004. El aprovechamiento inteligente de los elementos estructurales existentes ha permitido un proceso constructivo factible con el uso del estadio y una eficiencia técnico-económica. En el presente artículo se presenta el estudio realizado para la sección estructural tipo en los lados Norte y Sur que pretende servir de ejemplo de la problemática existente y de la metodología planteada.

### **ABSTRACT**

INES is part of the team led by L-35/Ribas and GMP in charge of the renovation of the Santiago Bernabeu Stadium in Madrid. This project seeks to reestablish the arena as a worldwide sporting landmark. The new design includes the construction of curved asymmetric steel façades surrounding both the old and the new structure, a newly installed retractable roof, the enlargement of the stadium capacity, the renovation and improvement of the current areas and uses, the generation of new spaces, etc. All planned interventions are fully integrated in Madrid's urban

landscape. A key factor for the feasibility of this great project that has been a common thread during the whole process is to ensure a minimal interference to the current use and operation of the stadium during the construction process. Therefore, amongst the different structural approaches studied, it has been proved that taking full advantage of the existing structure is required to make the project succeed; making the existing structure work at some points under load configurations and efforts for which it had not been subjected previously. The structural design has relied on the existing structure that stems from the stadium's four major construction periods: 1947-1953, 1980, 1994 and 2004. The intelligent use of the existing structural elements has allowed a feasible construction process compatible with the normal operation of the stadium and a technically-economically optimal solution. In this paper, the study and analysis of the transversal section in North and South sides is presented, which aims to serve as an example of the existing problems and the methodology proposed.

**PALABRAS CLAVE:** estadio, rehabilitación estructural, cargas de viento,

**KEYWORDS:** stadium, structural assessment, wind loads

### 1. Descripción de la situación actual y problemática existente.

La estructura del estadio Santiago Bernabeu es el fruto de un conjunto de intervenciones que se han ido sucediendo a lo largo de los últimos 70 años. La estructura principal y más antigua data de los años 40 y la más nueva apenas tiene 10 años de antigüedad. Todas las intervenciones estructurales han tenido como principal objetivo la ampliación del estadio y se han ido proyectando de acuerdo con las diferentes normativas, tanto de materiales como de acciones, en vigor en el momento de su construcción. Las actuaciones más significativas llevadas a cabo en el Estadio Santiago Bernabéu y que han afectado a la estructura de hormigón o la cimentación del Estadio Santiago Bernabéu son:

- Construcción y ampliación inicial. Años 1.947 a 1.954
- Actualización de las instalaciones para la celebración de la Copa del Mundo. Año 1.982
- Creación del tercer y cuarto anfiteatros. Años 1.990 a 1.992
- Reestructuración local del lateral Este. Año 2.002

En el momento actual se plantea una nueva remodelación integral que afecta al comportamiento de la mayor parte de elementos estructurales existentes en el Estadio. De entre las numerosas implicaciones que tiene la intervención, uno de los aspectos más condicionantes ha sido el comportamiento de la sección transversal tipo (la existente en los fondos Norte y Sur) tanto en su situación actual como en la situación final, una vez realizada la remodelación.

Para poder proyectar la nueva estructura portante haciéndola trabajar con la existente y hacerla compatible con el uso del estadio, ha sido imprescindible en primer lugar, caracterizar y evaluar la estructura existente para lo que se llevó a cabo una gran cantidad de estudios y ensayos de caracterización. En segundo lugar, analizar de manera desacoplada los diferentes focos de cargas y esfuerzos sobre la sección resistente del estadio actual, conformada por los diferentes anfiteatros (1 y 2 de hormigón armado, 3 y 4 metálicos) y por las grandes costillas exteriores de hormigón armado que forman parte de la fisonomía exterior del estadio actual.



**Figura 1. Infografía de la propuesta final del Estadio.**

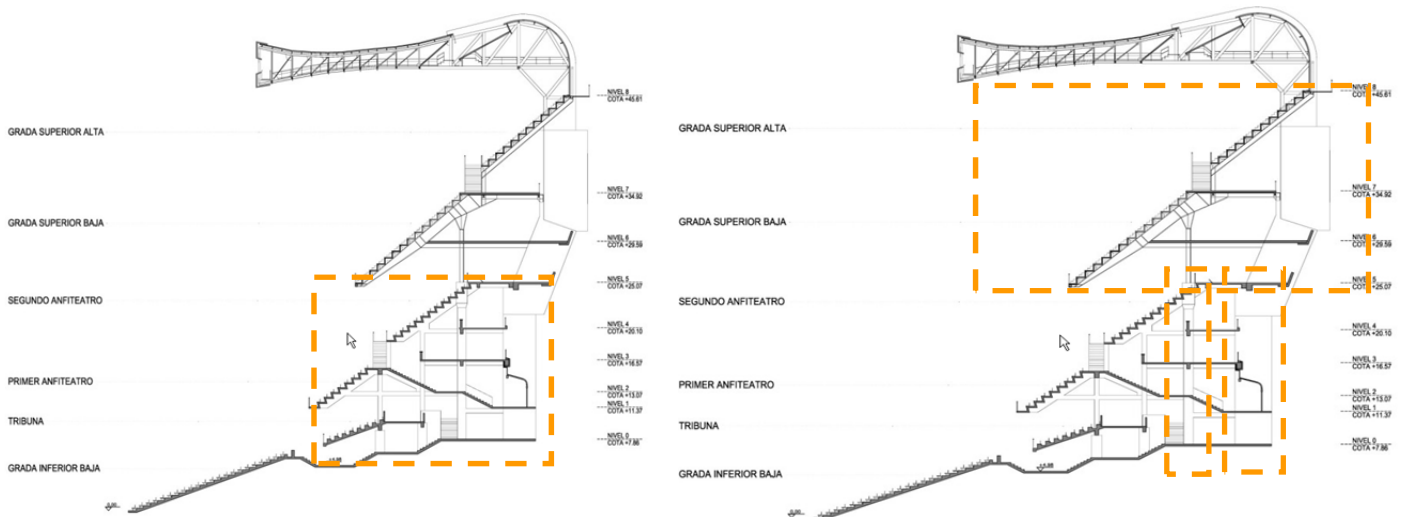
**Estructura existente.** En los fondos Norte y Sur se ha previsto apoyar la cubierta proyectada sobre las costillas exteriores de la estructura existente una vez liberadas estas del peso de la cubierta actual. La cota de apoyo de la futura cubierta estará aproximadamente 18 m por encima de la cota de apoyo de la cubierta actual. Adicionalmente se dispondrá un cerramiento excéntrico hacia el exterior del estadio con una excentricidad variable que se apoyará sobre la costilla exterior de la estructura existente. Además, sobre esta nueva fachada actuará el viento que por consiguiente también gravitará sobre nuestras costillas.

La estructura resistente de los fondos norte y sur a día de hoy dispone de idéntica tipología estructural, diferenciándose principalmente por la cota de arranque sobre los encepados de la cimentación de las costillas exteriores. La cota del terreno en la ubicación del estadio desciende de Norte a Sur, por lo que las costillas exteriores del fondo sur tienen alrededor de 4 m más de altura. Se disponen en ambos lados de pórticos principales longitudinales conectados entre sí mediante vigas transversales y los propios forjados así como los graderíos. Dependiendo de la zona del estadio se disponen de juntas de dilatación cada 3,4 o 5 pórticos, tratándose en todos los casos de juntas de forjado, sin duplicarse nunca los pilares.

Se pueden diferenciar dos tipologías dentro de cada uno de los pórticos, que corresponden con diferentes fases de ejecución de la estructura.

La parte inferior de los pórticos, se trata de una estructura monolítica de hormigón armado proyectada en los años 50, con los códigos de diseño de la época y ejecutada con materiales con prestaciones estructurales más bajas que los materiales empleados a día de hoy. Se dispone de cuatro alineaciones de pilares, vigas principales donde descansan los forjados de los niveles

horizontales, vigas inclinadas que soportan de los graderíos del primer y segundo anfiteatro. Los forjados horizontales se resuelven con losas macizas de 12 cm de espesor. Se dispone de vigas de atado transversal entre pórticos consecutivos para todos los niveles que dan acceso a los graderíos de éstos anfiteatros. Las bancadas de los graderíos están a su vez ejecutadas en hormigón armado, formando todo el conjunto de la estructura entre juntas una estructura monolítica.



**Figura 2. Sección transversal existente.**

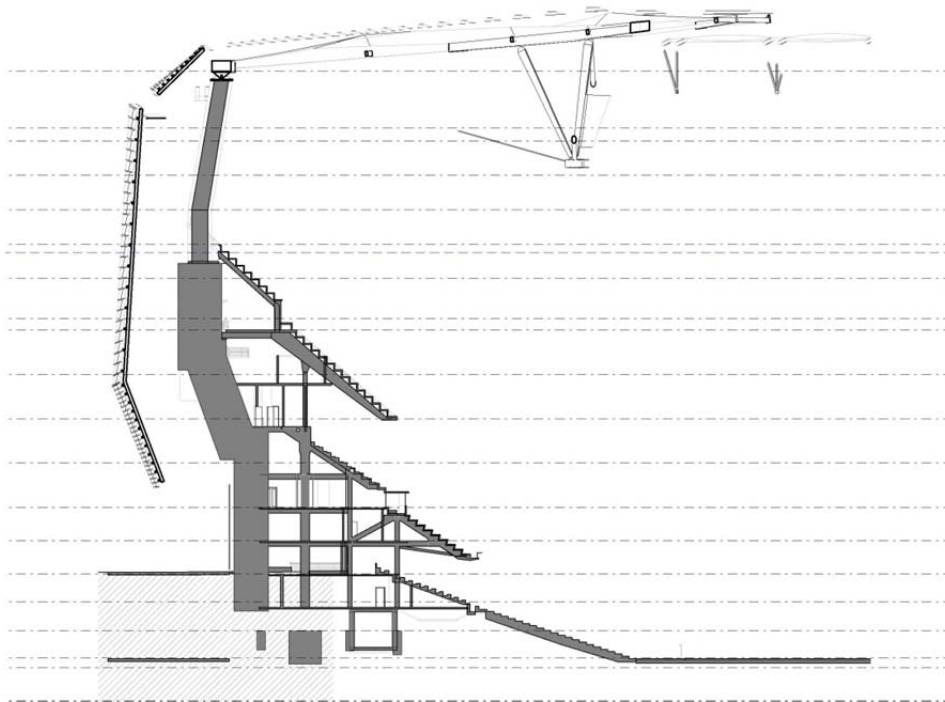
La estructura que da soporte al tercer y cuarto anfiteatro se corresponde con una intervención de principios de los 90. Se trata de una construcción modular, donde las vigas de los pórticos principales son elementos metálicos con uniones soldadas, que debido a la disposición de cartelas en las uniones permiten garantizar la rigidez de los nudos. Los forjados que dan acceso a los graderíos se resuelven con placas alveolares, mientras que las gradas de los anfiteatros son elementos prefabricados de hormigón. Se diferencian dos ejes principales de apoyo. Por un lado se dispone de un pilar metálico coincidiendo en su replanteo en planta con el de la tercera alineación de pilares de los pórticos originales, que descarga en la cota más alta de la estructura original sobre el pilar existente de la tercera alineación.

Para soportar el incremento de carga que se produce como consecuencia de la ejecución del tercer y cuarto anfiteatro, se ejecutó un recrecido sobre el pilar existente en la tercera alineación, teniendo en la actualidad sección cuadrada de 90 x 90 cm. Por otro lado el eje principal de apoyo se materializa sobre una gran costilla exterior. Se trata de un elemento de hormigón armado dividido en tres tramos, el tramo intermedio quebrado, de tal forma que la estructura se retranquea hacia el exterior en su parte más alta. A día de hoy la diferencia de cota más alta entre el nivel superior de las costillas y la cimentación es de 37 m. Los tres tramos de la costilla tienen alrededor de 4 m de canto según la dirección del pórtico. El pilar de la cuarta alineación de la estructura original queda embebido dentro de la costilla exterior. No existe conexión entre ambos elementos por lo que no es posible garantizar la transmisión de esfuerzos entre ambos elementos.

Esta sección, ya de por sí compleja, ya que se trata de un estadio “encima” de otro parcialmente conectados, debe de absorber ahora, una vez liberada de las cargas de la cubierta actual, las

cargas de la nueva cubierta, de la nueva fachada y de un viento aumentado, tanto por que la superficie de exposición ha aumentado (mayor altura de estadio) tanto porque las cargas de la normativa relacionadas con el viento ha variado sustancialmente desde los años 90.

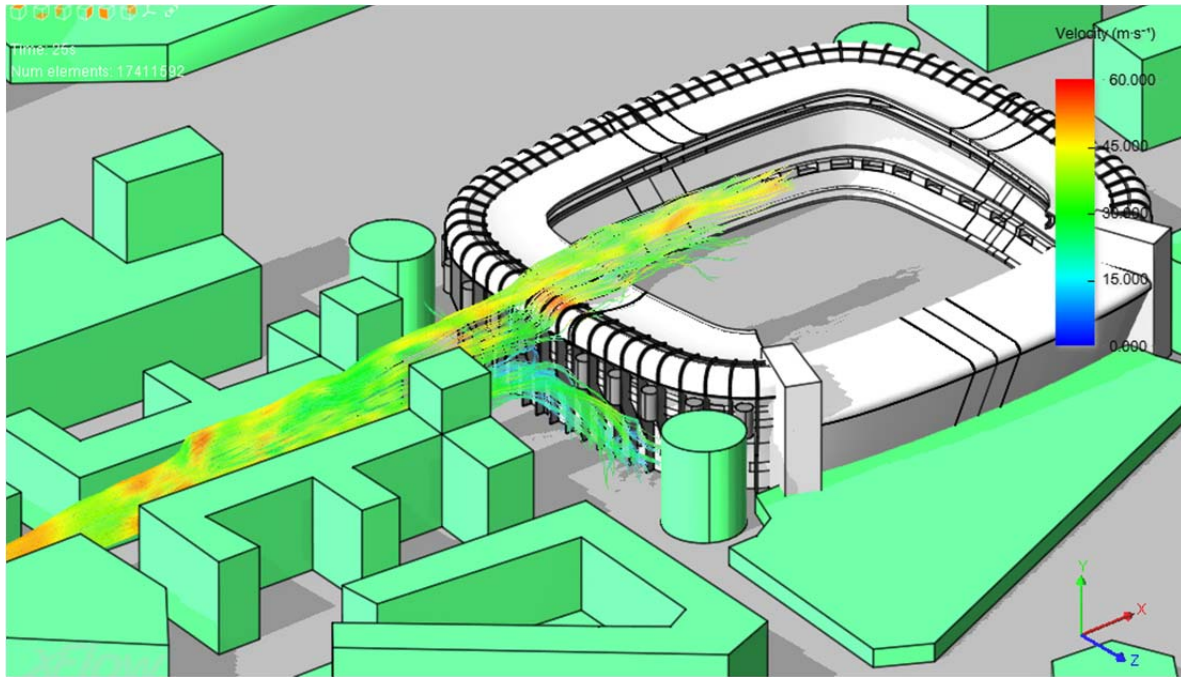
**Estructura resultante tras la intervención.** Se eliminará la cubierta existente y se dispondrá de una nueva cubierta cuyo punto de apoyo se materializará 18 m por encima de la estructura existente. Para posibilitar el apoyo se ejecutará una extensión metálica, que arrancará en la cota superior de la costilla y servirá como apoyo de la nueva cubierta en su punto más alto. Además se prevé ejecutar una envolvente que se apoyará sobre las propias costillas exteriores, con una ligera excentricidad hacia la parte exterior del estadio.



**Figura 3. Sección transversal tras la intervención.**

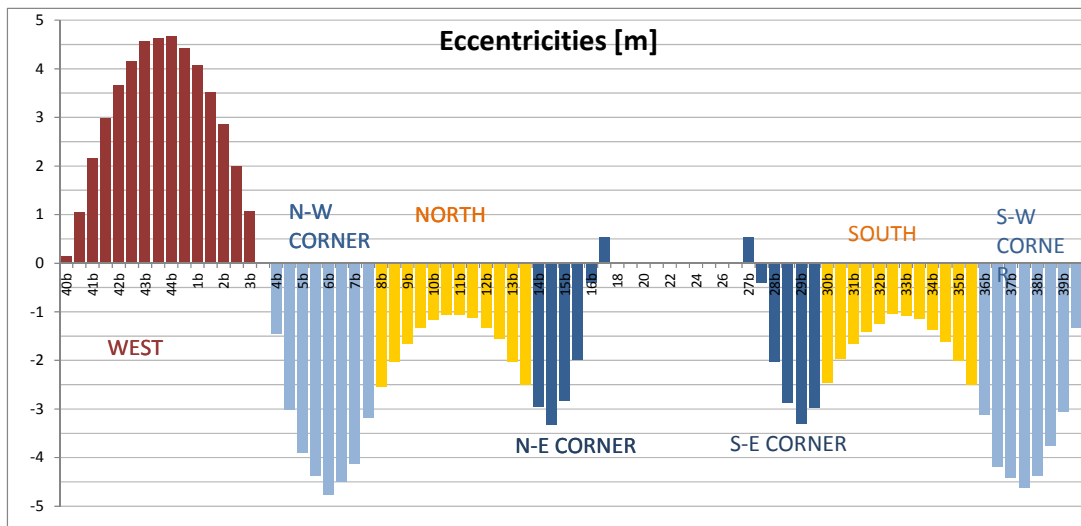
La nueva configuración de los elementos de cerramiento (tanto fachada como cubierta), implica una variación significativa de los esfuerzos resultantes sobre los elementos resistentes de la estructura existente respecto al estado actual. Se describen a continuación los aspectos fundamentales que alteran las sollicitaciones.

- La elevación de 18 m de la cota de apoyo de la cubierta implica un aumento sustancial de las cargas de viento. El incremento del empuje horizontal implica un incremento del momento de empotramiento que se produce en la cimentación de la costilla exterior que debe de ser soportado por la cimentación dispuesta.



**Figura 4. Vista de un análisis de viento mediante CFD del Estadio en situación actual.**

- La cubierta proyectada no funciona en ménsula tal y como lo hace la cubierta existente, se trata de una variante del esquema estático “rueda de bicicleta” de tal manera que sus apoyos móviles tan solo transmiten carga vertical a los elementos donde descansan. Los puntos de apoyo son excéntricos respecto al punto superior de la costilla existente, siendo el valor de la excentricidad variable en función de la costilla.



**Figura 5. Excentricidades en el apoyo de la nueva cubierta con respecto a las costillas.**

Las cargas verticales que la nueva cubierta transmite a las costillas son también variables en función del pódico donde se apoyan, siendo en la mayoría de los casos de mayor valor que las cargas que la actual cubierta transmite a la estructura existente.

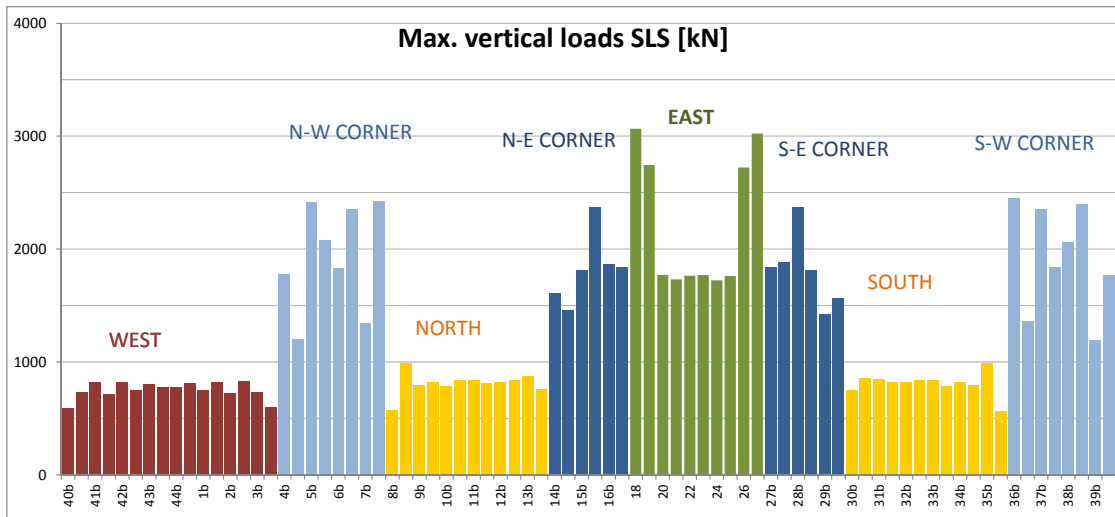


Figura 6. Valor de las reacciones verticales de la nueva cubierta.

- El cerramiento a ejecutar es excéntrico respecto a las costillas exteriores, teniendo distintas excentricidades en función de los puntos de apoyo. La disposición de la fachada implica no sólo un aumento de carga vertical a soportar por la costilla, sino también un momento adicional debido a la gran excentricidad entre estos elementos.

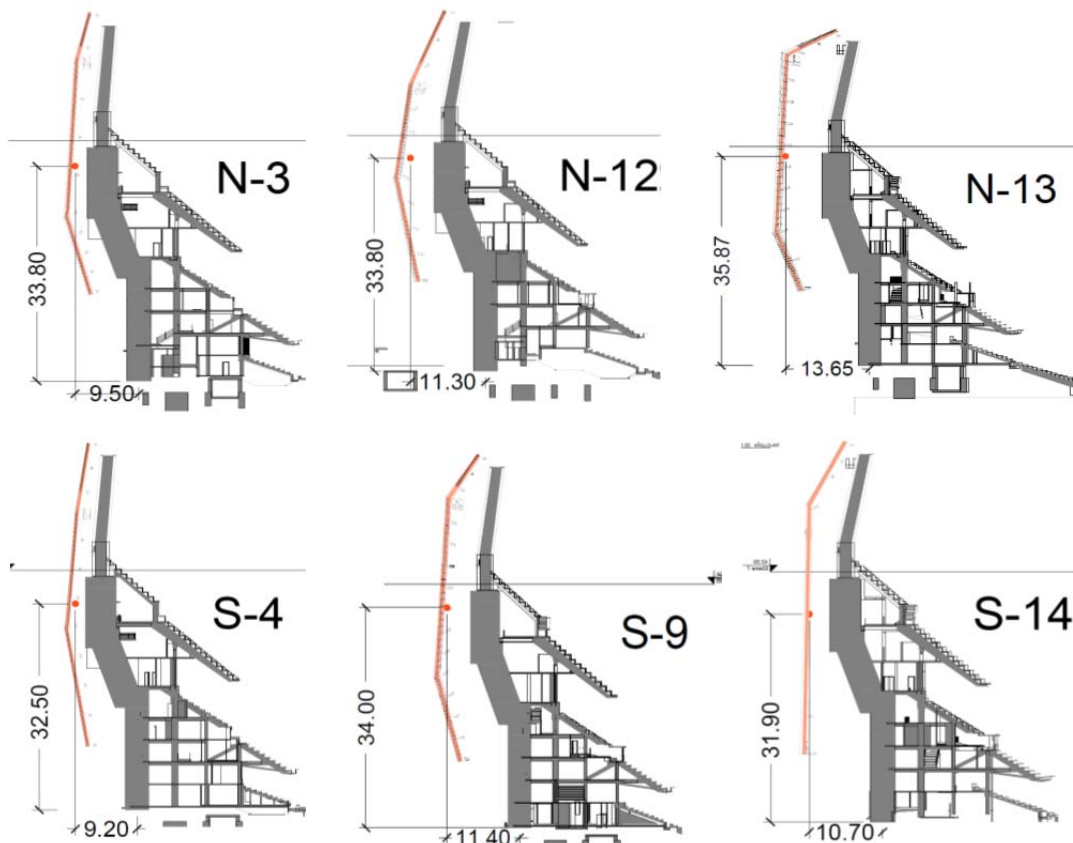


Figura 7. Diferentes secciones en los lados norte y sur donde se puede ver la nueva fachada.

## 2. Criterios de proyecto y estudio preliminares

Teniendo en cuenta la estructura existente y las actuaciones necesarias, se ha decidido como criterio de proyecto, aprovechar al máximo de su capacidad las costillas existentes (actualmente están trabajando sólo al 60%, muy limitadas por la capacidad de su cimentación). De esta manera, sobre las costillas recaerán los esfuerzos provenientes, por una parte, de las cargas transmitidas por el anillo de compresión de la cubierta (es decir de las reacciones verticales indicadas en la figura 6), por otra parte, las cargas provenientes del peso de la nueva fachada excéntrica y del viento actuante sobre ellas.

Por otra parte, se decidió que las cargas horizontales transmitidas por la nueva cubierta, fundamentalmente debidas a la acción del viento sobre ella, fueran resistidas por una nueva estructura.

De entre los estudios preliminares realizados el del viento cobró una importancia especial, los cambios en la normativa vigente hacían que las cargas eólicas sean ahora muy superiores a las previstas por la normativa en el momento de construcción de la última gran ampliación (1994-1997). Esto llevó a realizar un estudio virtual de túnel de viento mediante el empleo de un CFD para entender mejor cuales podían ser las presiones reales de viento en la fachada actual y en la futura, menos permeable. Al tiempo que prever cuales iban a ser las situaciones de confort cuando se desmonte la cubierta actual y todavía no se hubiera montado la final. De estos análisis se puede concluir que las presiones previsibles eran ligeramente inferiores a las propuestas por la normativa, el encajonamiento urbano del Estadio ayudaba especialmente en los fondos Norte y Sur

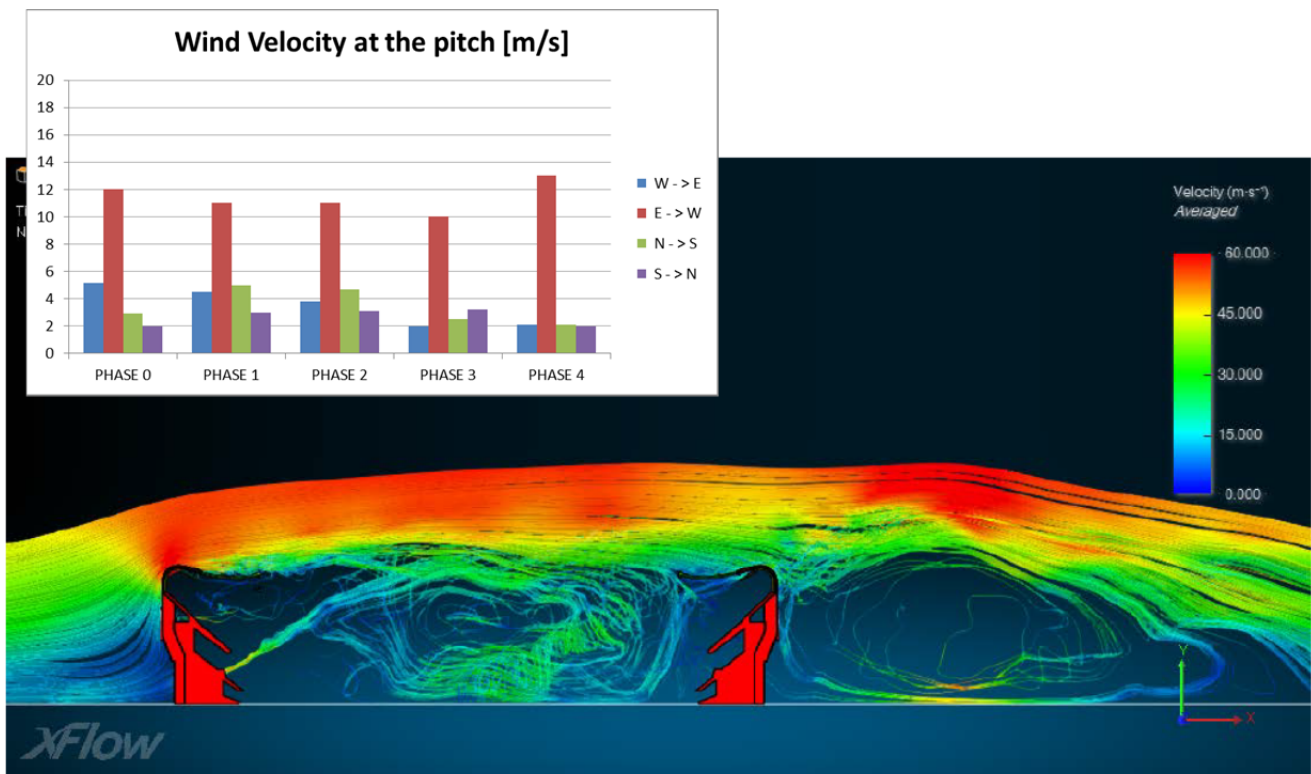
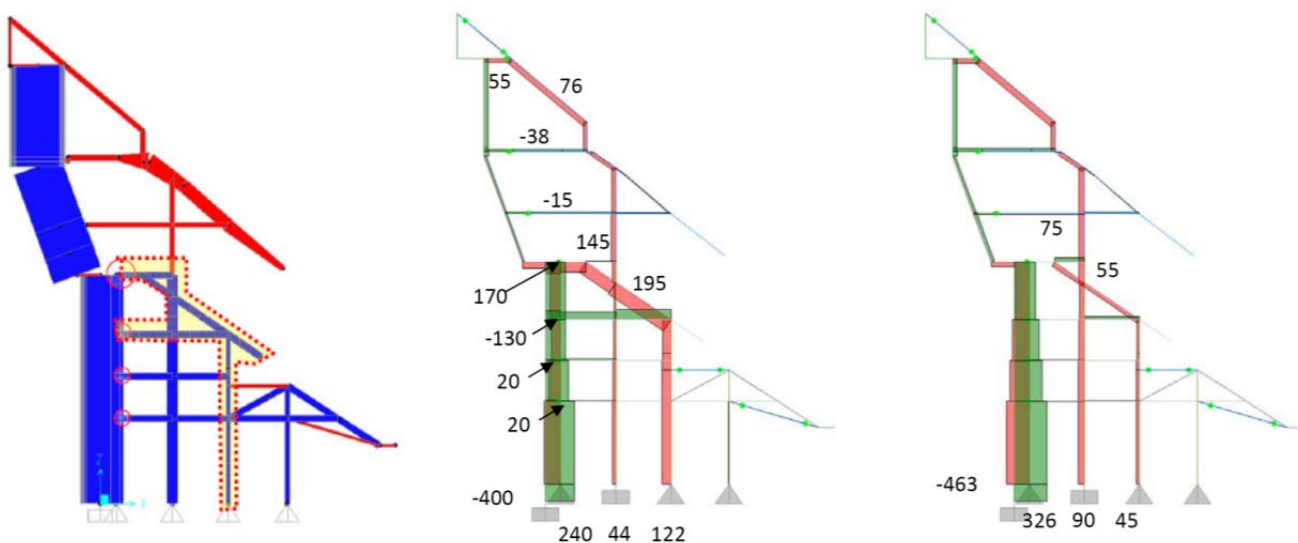


Figura 8. Velocidades de viento registradas en las simulaciones en el Estadio actual



Por otra parte, se decidió que se conectaría la estructura de hormigón proveniente de 1947, es decir el 1 y 2 anfiteatro, a la costilla de hormigón ejecutada en la obra de 1997. Si bien es verdad que esta conexión generaba nuevos esfuerzos en los elementos de hormigón que formaban parte de estos anfiteatros y que en alguna ocasión derivaba en refuerzos estructurales en ellos, aliviaba los esfuerzos en la costilla y por tanto en su cimentación. Por otra parte, está operativa era compatible con la explotación del estadio ya que permitía acometer obras de refuerzo específicos en periodos de 3-4 días.

En la figura siguiente se puede ver la diferencia en la distribución de esfuerzos axiales que tenía conectar ambas estructuras (figura izqda.) o no conectarlas (figura drcha.) ante una carga horizontal unidad aplicada en la sección superior de la costilla. Como se puede comprobar, la conexión permite aliviar el esfuerzo axial en la base de la costilla en un 40%.

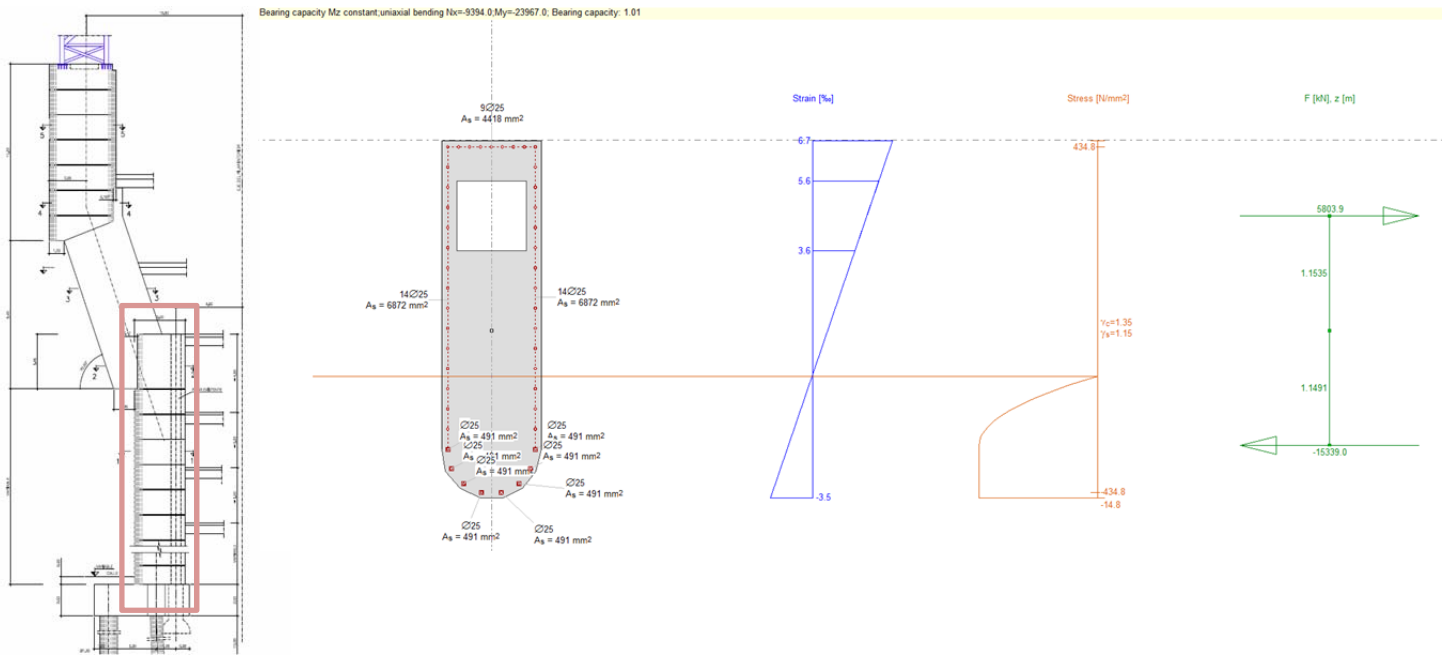


**Figura 9. Esquema de la sección tipo con los puntos de conexión y de los esfuerzos axiales en la sección transversal existente ante una carga horizontal unidad en la coronación de la costilla.**

### 3. Comprobaciones y dimensionamiento

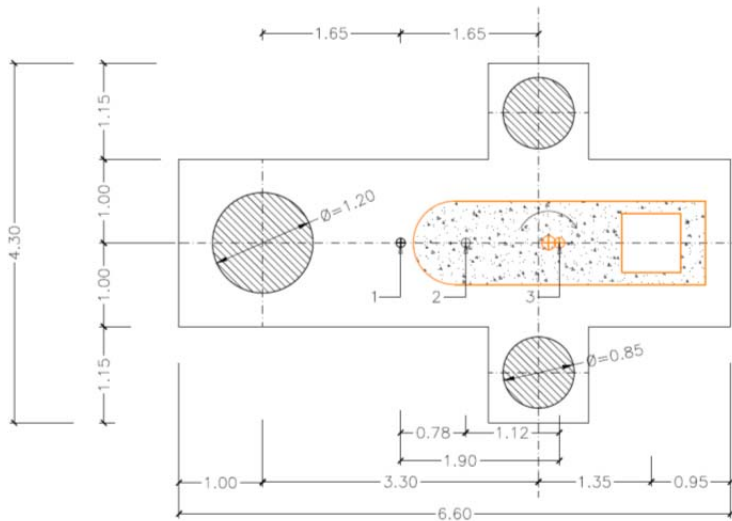
Una vez establecida la configuración estructural final, de haber cuantificado las cargas actuantes y de haber analizado las diferentes combinaciones de cargas, se llevaron a cabo las comprobaciones estructurales en los elementos existentes, tanto durante su situación final como constructiva. Es obligado resaltar que debido a la especial configuración estructural de la actual sección transversal, con desplomes importantes en su geometría, la acción del viento era en ocasiones beneficiosa para las comprobaciones realizadas.

A modo de resumen es posible concluir que de los análisis llevados a cabo era necesario reforzar el pilar de la segunda alineación y las vigas pertenecientes al segundo anfiteatro (ver primer esquema de la figura 9), por otra parte, las costillas se llevaban hasta el 100% de su capacidad pero no fue necesario acometer refuerzo alguno en las mismas. Cosa contraria pasaba con sus cimentaciones donde su capacidad era menor y debían ser recalzadas.



**Figura 10. Resultados de la comprobación de la sección de empotramiento de la costilla existente.**

Para el estudio de los axiles resultantes en los pilotes se tuvo en cuenta la configuración geométrica de los pilotes, como se muestra a continuación, de forma que se puede relacionar el par de esfuerzos N-M (en servicio o agotamiento) en la base de la costilla con los axiles en los pilotes, teniendo en cuenta el peso del encepado.



**Figura 11. Planta del encepado tipo y de los 3 pilotes.**

- 1: Centro de gravedad mecánico de los pilotes
- 2: Centro de gravedad del encepado (h=2.00 m, peso=800 kN)
- 3: Centro de gravedad de la sección bruta de la costilla

El axil total sobre los pilotes,  $N_{cap}$ , y el momento calculado a la altura de la cara inferior del encepado,  $M_{cap}$ , y referido al punto (1) se obtienen a partir del axil sobre la costilla y el momento

sobre la costilla, calculado en el punto (3) a la cota de la cara inferior del encepado y a partir del peso del encepado, aplicado en el punto (2):

$$N_{\text{cap}} = N + 800$$

$$M_{\text{cap}} = M + N \cdot 1.90 + 800 \cdot 0.78 = M + 1.90N + 622$$

Las reacciones sobre los pilotes  $\varnothing 120$  y  $\varnothing 85$  se obtienen de  $N_{\text{cap}}$  y  $M_{\text{cap}}$ :

$$N_{\varnothing 120} = N_{\text{cap}} / 2 - M_{\text{cap}} / 3.30$$

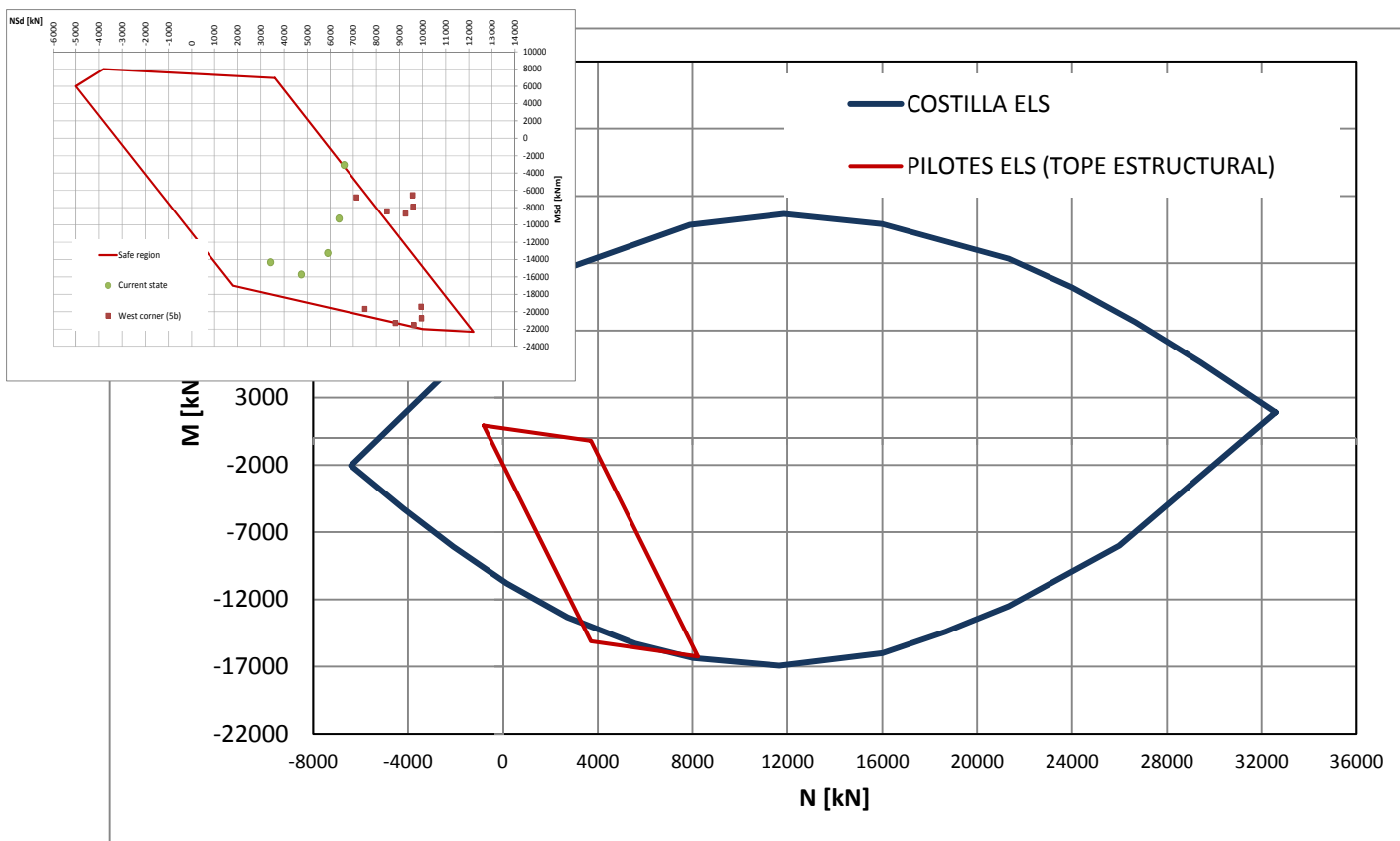
$$N_{2 \times \varnothing 85} = N_{\text{cap}} / 2 + M_{\text{cap}} / 3.30$$

Por último se escribe la relación entre  $N_{\varnothing 120}$  y  $N_{\varnothing 85}$  con  $N$  y  $M$ :

$$N_{\varnothing 120} = -0.076N - 0.303M + 222$$

$$N_{2 \times \varnothing 85} = 1.076N + 0.303M + 588$$

Los diagramas de interacción de costilla y pilotes obtenidos a partir del planteamiento anterior se representan en conjunto en la figura siguiente:



**Figura 12. Diagrama de interacción para la costilla y para los pilotes. Zoom del diagrama de interacción de los pilotes con varias situaciones analizadas fuera del diagrama (verde: situación actual, roja: situación futura).**

Los axiles son sobre la costilla y son positivos para compresiones. Los momentos son sobre la costilla, aplicados en su centro de gravedad y a la cota de la cara inferior del encepado. Los momentos tienen signo negativo cuando comprimen la cara interior del estadio (comprimen los pilotes  $\varnothing 85$ ). Los valores del diagrama de interacción en ELS para la costilla son los valores de agotamiento (ELU) divididos por un coeficiente global de 1.40.

Es evidente que la resistencia está limitada por la cimentación y no por la sección de la costilla. Además, los diagramas anteriores deben limitarse posteriormente para tener en cuenta el fallo del encepado, que en general no está dimensionado para agotar la capacidad resistente de los pilotes, sino probablemente para los esfuerzos solicitantes de la situación existente con algún margen adicional. En la figura se presentan dimensiones y armado del encepado.

#### **4. Conclusiones finales**

Cada vez es más frecuente intervenir en grandes infraestructuras que sin haber cumplido todavía su vida útil requieren de una adecuación funcional integral. El Estadio Santiago Bernabeu es un perfecto ejemplo de infraestructura viviente que ha ido cambiando su fisonomía y estructura en función de las necesidades que el Estadio ha ido teniendo a lo largo de los 70 años de historia.

Con el estudio de los fondos Norte y Sur recogido en este artículo se ha pretendido mostrar lo importante que es analizar en profundidad la capacidad y versatilidad de los diferentes elementos estructurales disponibles en el momento de proyecto. Solo desde el conocimiento de estos elementos se puede plantear un diseño no sólo eficaz sino eficiente.

Este ejemplo es solo una muestra de los diferentes problemas que plantea la remodelación de una infraestructura en permanente uso y que además, debe de estar en todo momento operativa.

También se ha querido resaltar lo importante que es cuantificar correctamente las cargas de viento en una estructura de este tipo.