

Disponible en www.hormigonyacero.com
Hormigón y Acero, 2025
<https://doi.org/10.33586/hya.2025.3990>

ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

Remodelación del estadio Santiago Bernabéu.

Estructura de aparcamientos y plaza

Daniel Calleja Morales, Arturo Gonzalez Anchuela, Jaime Salafranca Gamo

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3990>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo debe ser citado así:

Calleja, D., González, A., & Salafranca, J. (2025) Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Estructura de aparcamientos y plaza, *Hormigón y acero*,
<https://doi.org/10.33586/hya.2025.3990>

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2025 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Estructura de aparcamientos y plaza

Renovation of the Santiago Bernabéu Stadium. Parking and square structure

Daniel Calleja Morales^a, Arturo Gonzalez Anchuela^b, Jaime Salafranca Gamo^c

^aArquitecto. FCC Construcción S.A.

^bArquitecto Técnico. Jefe de Obra. FCC Construcción S.A.

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. FCC Construcción S.A.

Resumen

En el marco de la Remodelación del Estadio Santiago Bernabéu, se ha construido un nuevo aparcamiento y la plaza de los Sagrados Corazones entre las calles Padre Damián y Concha Espina, en el espacio previamente ocupado por un centro comercial y un edificio multiusos, incrementando sus niveles de sótano, llegando a cinco en la zona sur y a tres en la zona norte, con cimentación directa y losas de hormigón armado. En la planta primera y en el sótano 1 se emplean sistemas de postesado para controlar la deformación de voladizos y cumplir con las restricciones de espesor, teniendo en cuenta que tienen que soportar cargas elevadas y además se permitirá el acceso de vehículos pesados.

Abstract

As part of the renovation of the Santiago Bernabéu Stadium, a new parking lot and the Sagrados Corazones square have been built under Padre Damián and Concha Espina streets, in the space previously occupied by a shopping center and a multi-purpose building, increasing its basement floors to five in the south area and three in the north area, with direct foundations and reinforced concrete slabs. On the second floor and basement 1, post-tensioning systems are used to control cantilever deformation and comply with thickness restrictions, taking into account that they will support heavy loads and allow access by heavy vehicles.

Palabras clave: Remodelación, cimentación, sistemas de postesado, pantallas de contención, anclajes extraíbles, análisis estructural.

Keywords: Renovation, Foundation, Post-tensioning Systems, Retaining Walls, Removable Anchors, Structural Analysis

Introducción

La Remodelación del Estadio Santiago Bernabéu incluye la construcción de un nuevo aparcamiento entre las calles Padre Damián y Concha Espina. Antes de la remodelación existían dos edificios en esta parcela, un Centro Comercial al sur y un Edificio Multiusos al norte. El nuevo aparcamiento abarca el espacio de ambos edificios y añade nuevas plantas subterráneas.

Descripción de la estructura

La estructura del nuevo aparcamiento está constituida por losas de hormigón armado y postesado de diversos cantos en función de los usos y luces entre pilares de las distintas zonas, las cuales se describen más adelante en detalle. Parte de la superficie en planta se prolonga sobre rasante en el denominado Edificio Este, que cierra dicho lateral del estadio y recibe en su coronación cargas horizontales de la cubierta principal [1]. En la esquina sureste se ubica la ampliación de la Plaza de los Sagrados Corazones.

Para la contención de tierras -necesaria para la creación de los nuevos sótanos- se ejecutó una segunda fila de pantallas de pilotes adosadas al intradós de las existentes, las cuales fueron convenientemente estabilizadas[2] para acometer el proceso de demolición del Centro Comercial. En apartados posteriores se describen detalladamente las citadas pantallas, tanto desde el punto de vista de su cálculo como de su posterior ejecución.

Cimentación

La cimentación se diseñó de tipo directa, transmitiendo al terreno una tensión no mayor a 0.40 MPa (4 kp/cm²)[2]. Se diferenciaron dos tipologías: losa de cimentación en la zona en que se cimentan los pilares que continúan sobre rasante en el Edificio Este[3] (con mayores cargas), y zapatas aisladas bajo los pilares predominantemente pertenecientes al aparcamiento bajo rasante y la plaza. Con carácter general, la losa de cimentación presenta un canto de 1.50 m, incrementándose en aquellos casos en que la magnitud de la carga a cimentar o la disposición poco centrada del pilar dentro de la losa lo requieran.

Cabe destacar la disposición parcial de una losa de cimentación de 3 m de canto que cumplía la función de contrapeso de los tirantes provisionales planteados para el montaje de la viga

sur de la cubierta[1]. Esta losa también sirvió como cimentación de una de las grúas empleadas en obra y de varios pilares definitivos del aparcamiento.



Figura 1 Desniveles sótanos 5, 4 y 3

La disposición de los sótanos sigue un patrón escalonado: la parte sur con cinco sótanos, una pequeña parte del centro oeste con cuatro sótanos, y la zona norte con tres sótanos (Figura 1). La cimentación se adapta a este escalonamiento mediante la ejecución de pantallas de contención de tierras que permiten el cambio entre niveles (Figura 2).

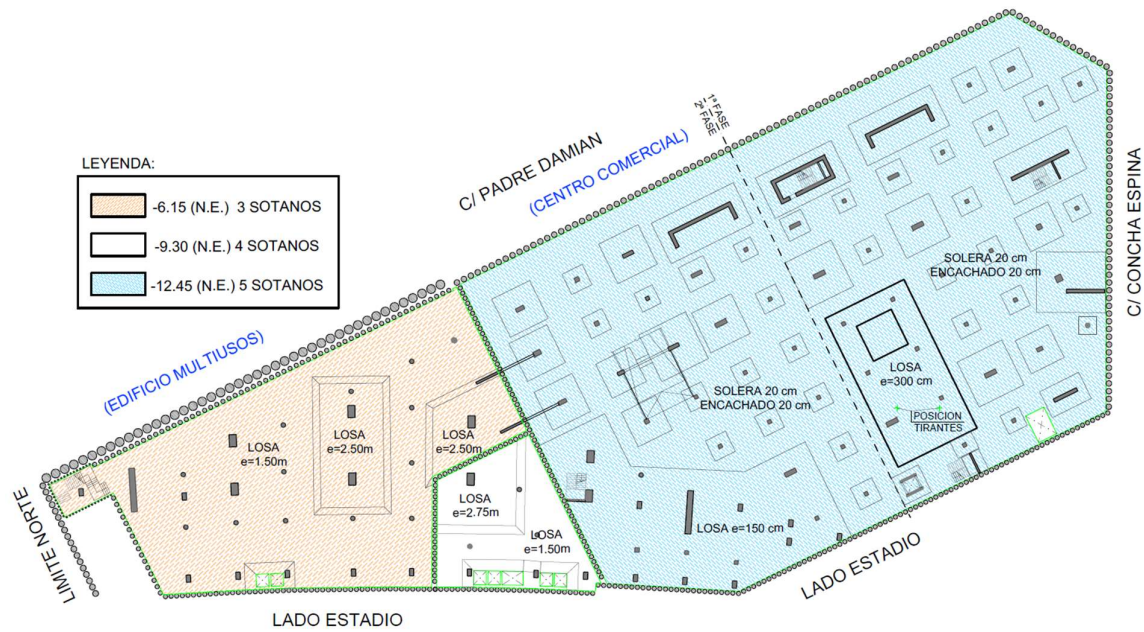


Figura 2. Planta de cimentación.

Plantas de sótano 5 a sótano 2

Como se ha indicado, el número de sótanos varía en la superficie del aparcamiento, llegando hasta el nivel sótano 5 en la zona sur (Figura 3) que coincide con la superficie que inicialmente ocupaba el Centro Comercial demolido. Gran parte de este sótano 5 está cimentado mediante zapatas y sobre ellas se ejecutó una solera de hormigón armado de 200 mm de espesor, manteniendo su cota superior (-12.45m respecto al terreno de juego) uniforme y enrasada con la cara superior de las losas de cimentación.

Los niveles de sótano 4 y 3 (cotas -9.30 y -6.15 respectivamente) están diseñados para el estacionamiento de vehículos ligeros, conviviendo en ellos losas de cimentación y forjados. Estos se resuelven mediante losas macizas de hormigón armado de 250 mm de canto, con la salvedad la zona sur del sótano 3 en la que, debido a las mayores cargas de instalaciones previstas, se amplió a 300 mm.



Figura 3. Sótanos del 5 al 1 ejecutados en lado sur y ejecución del resto de zapatas y pilares del sótano 5 en lado norte.

En el forjado de sótano 2, la necesidad de soportar mayores sobrecargas debido al paso de vehículos pesados, unidades móviles y disposición de instalaciones pesadas (Figura 4), hace necesario que el canto de la losa aumente a 370 mm. Además, se aumenta la altura libre para permitir el paso de estos vehículos. La zona norte, a partir de la sala de prensa, se resuelve con losa de canto de 300 mm.

La estructura de la mayor parte del aparcamiento se ejecuta mediante pilares dispuestos formando una cuadrícula de 7.8 x 7.8 m aproximadamente. Esta cuadrícula se mantiene desde el sótano 5 hasta el sótano 2, donde mueren algunos de los pilares para permitir el paso de los camiones y autobuses.



Figura 4. Paso de camiones en sótano 2

Plantas sótano 1 y primera

La estructura de los niveles de Sótano 1 (+3.30) y Planta Primera (+7.70) se resuelve mediante diversas soluciones tipológicas en función de los usos y de los condicionantes geométricos derivados de la distribución de pilares y muros portantes (la planta del nivel 0 no existe en la zona de intervención, correspondiendo su designación al interior del estadio existente). En la planta Primera se sitúan los accesos del Lateral Este, quedando parte de la losa en el exterior del Edificio. En la Planta Sótano 1 se ubica, en su zona sur, la plaza de acceso público situada en la confluencia de las calles Concha Espina y Padre Damián, y en su zona norte espacios interiores de usos diversos.



Figura 5. Sótano 1 y Planta Primera. Vista general de la plaza pública.

En los espacios exteriores de ambos niveles se debían contemplar cargas elevadas por ocupación y acceso de bomberos, así como la presencia de parterres de dimensiones considerables (Figura 5). En dichos parterres se dispusieron bloques de poliestireno expandido de alta densidad (Figura 6) que permitían el desarrollo de los volúmenes definidos en el proyecto de Urbanización, evitando los incrementos de carga que supondrían espesores excesivos de tierras.



Figura 6. Poliestireno expandido para formación de volúmenes en parterres de Plaza Pública.

Adicionalmente, la línea de pilares que soporta el borde oriental de la Planta primera nace sobre la losa de Sótano 1, lo que también condiciona el planteamiento estructural.

En términos generales se definieron los siguientes sistemas de forjado:

- Planta Primera: losa maciza de 500 mm de canto con postesado no adherente[4] en dos direcciones. Luces máximas del orden de 17.00 metros en sentido N-S y voladizos de hasta 5.00 metros en sentido E-O.
- Planta Sótano 1: Losa aligerada postesada[4] en dos direcciones de 1 m de canto en zona exterior, con luces entre pilares del orden de 24.00 metros en dirección E-O y 16.00 metros en dirección N-S. Resto mediante losa maciza de hormigón armado de 500 mm de canto (luz máxima entre pilares del orden de 16.00 metros) (Figura 7).

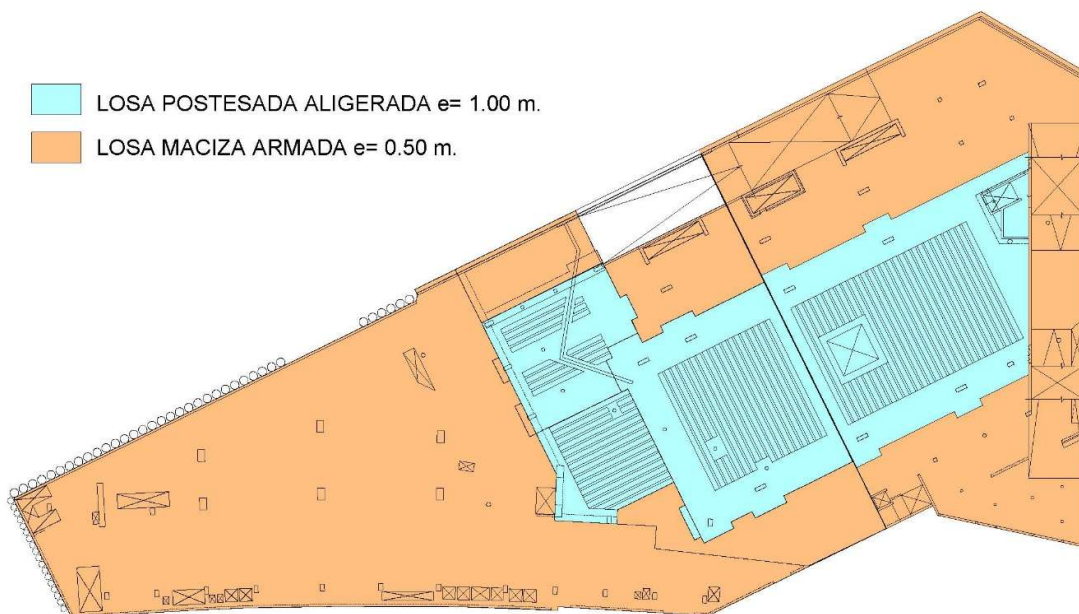


Figura 7. Distribución de tipologías en forjado de sótano 1

Los aligeramientos empleados en la losa postesada bajo la plaza pública están formados por cilindros de porexpan de 700 mm. de diámetro, separados 1 m (Figura 8). Entre aligeramientos se disponían nervios estribados con tendones de pretensado de vaina circular. Perpendiculares a dichos nervios se definieron vigas embebidas, de aproximadamente cinco metros de ancho, en las que se disponían entre cinco y siete tendones de pretensado (Figura 9)

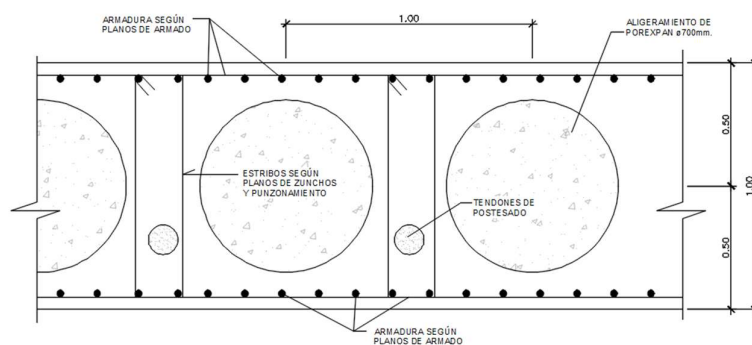


Figura 8 Sección transversal de losa aligerada en sótano 1



Figura 9 Ejecución de losa aligerada

El empleo de sistemas no adherentes de postesado[4] en el nivel de Planta Primera se eligió debido a las restricciones en el canto de la estructura en diversas zonas por problemas de gálibo; restricciones que imposibilitaban el cumplimiento de los límites de fisuración especificados para sistemas adherentes, más exigentes conforme a las prescripciones del Eurocódigo[5] (UNE EN 1992-1-1:2004) y del actual Código Estructural[6]. Tal y como se puede apreciar en la Tabla 7.1N del Eurocódigo, para una clase de exposición XC2 el límite de apertura de fisura es de 0.3 mm. para armaduras activas no adherentes (con la Combinación de cargas Cuasipermanente), mientras que es de 0.2 mm. para armaduras activas adherentes (con la combinación Frecuente).

En la planta primera los cables de tesado se dispusieron únicamente en aquellas alineaciones de pilares que lo requerían, bien por la magnitud de las luces entre pilares (del orden de 16 metros en los vanos centrales), bien para controlar la deformación de los voladizos, situados tanto en la línea de conexión con el edificio existente como en el lateral de la plaza pública (Figura 10).



Figura 10 Detalle de pretensado en forjado de Planta Primera.

Cálculo

Pantallas de contención del centro comercial

El centro comercial existente en la esquina de las calles Concha Espina y Padre Damián disponía de 3 plantas de sótano que se excavaron, en su día, al amparo de una pantalla continua anclada. En el momento de acometer la reforma, esta pantalla se encontraba arriostrada por los forjados de la estructura del aparcamiento. En esta zona se proyectaban 2 plantas de sótano adicionales, para lo que era necesario la ejecución de una nueva pantalla por el intradós de la existente.

Para calcular la nueva pantalla y su interacción con la existente, así como para dimensionar los nuevos anclajes provisionales, se desarrolló un modelo de elementos finitos bidimensional mediante el programa PLAXIS 2D. El terreno se caracterizó con un modelo tenso-deformacional hiperbólico, que permite proporcionar mayor precisión en los procesos de descarga asociados a la excavación [2].

Se consideró una sobrecarga uniforme en superficie de 10 kN/m^2 . Los anclajes se modelaron como elementos de apoyo flexibles exteriores al terreno, con una rigidez elástica equivalente a la longitud libre más medio bulbo.

La carga de los anclajes se determinó de manera que la carga de tesado se incrementara menos de un 15% en las siguientes fases constructivas. Los forjados también se modelaron

con elementos de apoyo externos, asumiendo un punto fijo en el punto medio del forjado entre dos pantallas.

En cuanto a la interacción entre la pantalla existente y la nueva pantalla de pilotes, se supuso que operarían de manera independiente, rellinando el hueco entre ambas con hormigón en masa. Esta situación se modeló mediante un material elástico situado entre la viga de coronación de la nueva pantalla y la pantalla existente.

En las zonas destinadas a la excavación de zapatas para la cimentación de pilares, se añadió una fase de cálculo con el fondo de la excavación a la cota de fondo de zapata, adoptando un enfoque conservador debido al efecto tridimensional de dicha situación.

Se realizó el cálculo para cada una de las secciones en las que, o bien se modificaba alguna característica de la pantalla existente, o bien se producían modificaciones en cotas de excavaciones, forjados, etc., considerando todas las etapas de cada fase.

En los casos en los que se situaban cimentaciones cercanas que pudieran afectar a las pantallas (como los pozos de cimentación de los pilares de la grada del estadio) se incluyó la carga transmitida por estas. Para ello, se realizó una estimación de la carga, de la dimensión de los pozos y de su distancia a la pantalla (Figura 11 y Figura 12). La carga introducida en Plaxis era de tipo uniforme, del mismo ancho que la cimentación, y se modificó de forma que transmitiera el mismo incremento máximo de carga en la pantalla que el equivalente a un pozo más los dos contiguos.

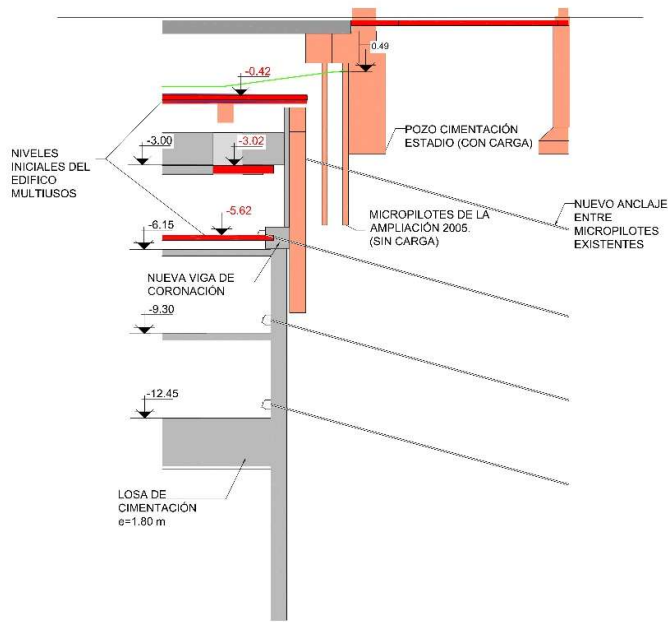


Figura 11 Cimentaciones del estadio junto a pantallas de contención de tierras.

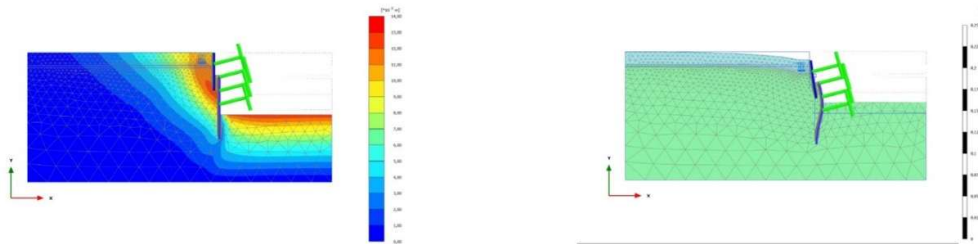


Figura 12 Deformaciones del terreno y de la pantalla. Resultados en Plaxis

Pantalla de contención del edificio multiusos

Se emplearon dos métodos de cálculo según las características del trasdós de las pantallas: un modelo de elementos finitos 2D para aquellas en las que se conservaban pantallas existentes o cimentaciones del estadio (tal y como se hizo en las pantallas del centro comercial) y modelos analíticos elasto-plásticos mediante el programa RIDO 4.22 para las pantallas interiores que delimitaban los niveles de sótanos. En estas últimas se consideró una sobrecarga uniforme de 10 kN/m² en el interior del recinto durante la fase de construcción del aparcamiento, aumentando a 0.4 MPa en el estado definitivo (valor correspondiente a la máxima tensión admisible del terreno para las cimentaciones dispuestas en su trasdós).

Plantas sótano 5 a sótano 2

Como herramienta de cálculo se emplea el programa Cypecad Espacial, versión 2019.e, desarrollado por la casa CYPE Ingenieros (Figura 13).

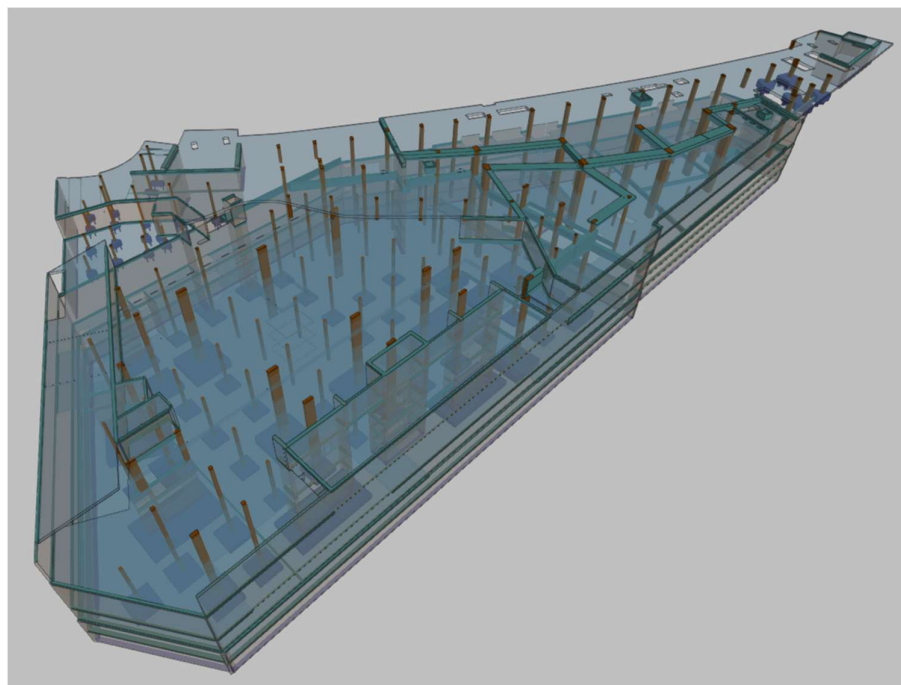


Figura 13 Vista general de modelo en Cypecad

Mediante el programa CEDRUS se analizaron elementos singulares como rampas y la losa de contrapeso de los tirantes mediante el empleo de muelles no lineales. También sirvió para analizar el comportamiento como edificio largo sin juntas.

Plantas sótano 1 y primera

El análisis estructural de los niveles Sótano 1 y Planta Primera se realizó mediante diversos modelos de cálculo para contemplar los distintos aspectos involucrados en su diseño.

El estudio de las acciones gravitatorias se realizó mediante el programa CEDRUS. En estos modelos de cálculo se contemplaban las fuerzas de desvío debidas a las acciones de tesado, con las pérdidas por rozamiento, penetración de cuñas, etc. También se definía la posición de los acopladores de cables entre las distintas fases de ejecución.

Debido a la irregularidad geométrica de estas plantas, la distribución de las fuerzas axiales del postesado (fundamental para el correcto análisis de tensiones, fisuración, etc.) se determinó con un modelo de cálculo de Elementos Finitos adicional mediante el programa ETABS (Figura 14), en el que se reproducía toda la estructura bajo rasante del Aparcamiento.

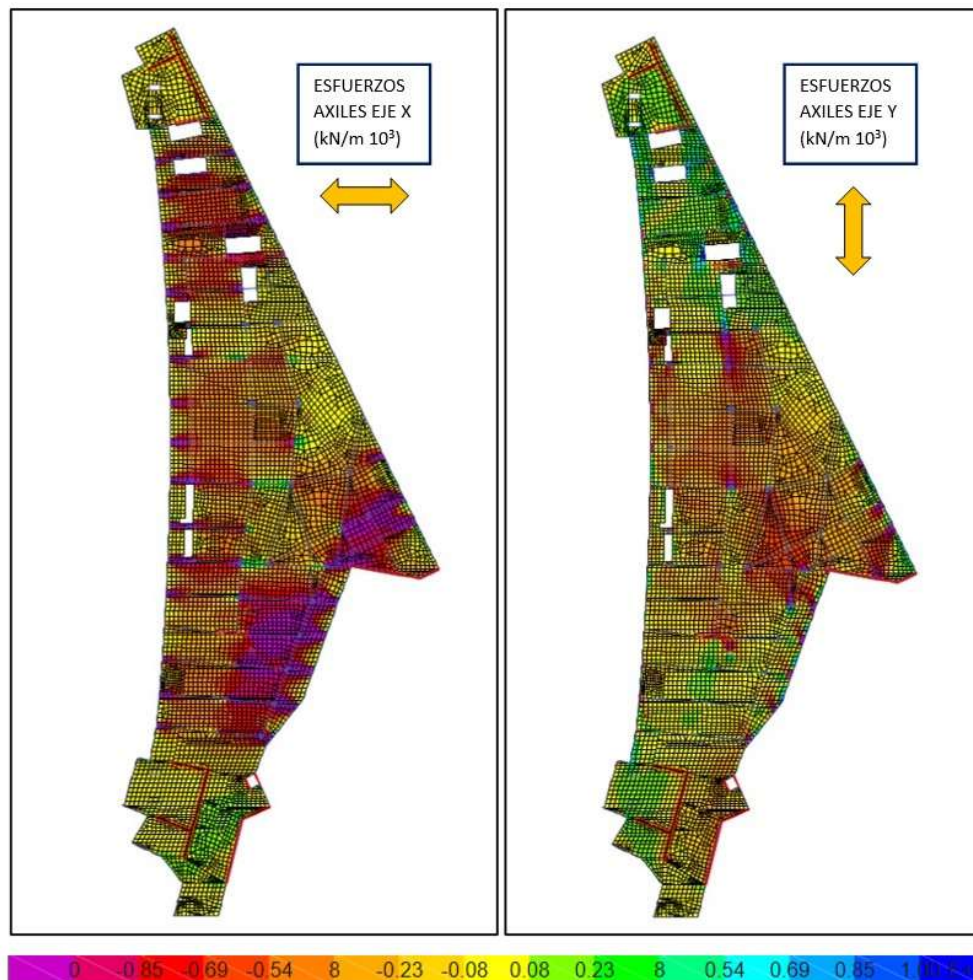


Figura 14 Esfuerzos axiales debidos al pretensado en ejes X e Y en Planta Primera (modelo ETABS).

En la planta Sótano 1 se plantearon dos familias de tendones: una en la dirección de los nervios aligerados y otra perpendicular, en la que se desarrollaban las vigas principales (Figura 15). El trazado de los tendones estaba condicionado por las restricciones en el espesor de la losa (de 1 m. de canto) y las interferencias entre cables perpendiculares. Se estableció como familia principal la de las vigas en dirección norte-sur, de forma que los tendones en dirección este-oeste cruzaran siempre por encima de los anteriores. Esta circunstancia limita la excentricidad del trazado de los cables en las vigas, reduciendo su efectividad, lo que hizo necesario disponer cuantías elevadas de postesado en algunos casos.

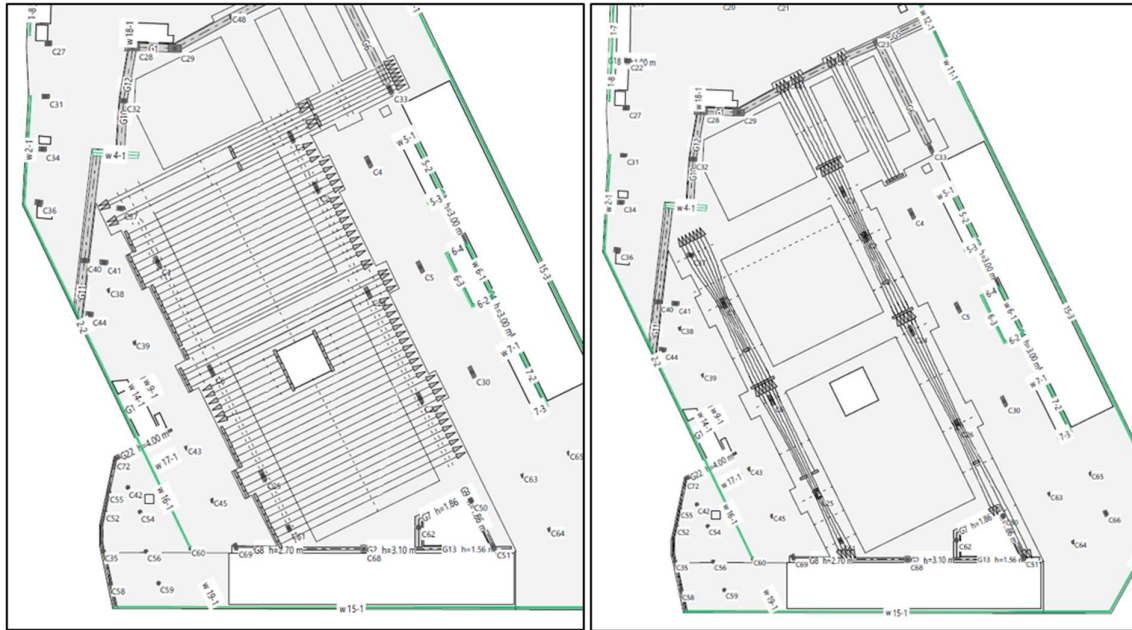


Figura 15 Distribución de tendones de postesado en losa de Sótano 1.

En los nervios dirección este-oeste se dispusieron tendones simples de acero Y 1860 S7 en vaina corrugada circular, con sección variable entre 6 y 24 cables $\varnothing 0.6''$ (ajustando el dimensionamiento a los esfuerzos de cada tramo). Las vigas principales llegaban a tener, en el peor caso, siete tendones de 31 cables.

En la losa del nivel 1 se plantearon también dos familias de tendones (Figura 16). El empleo aquí de un sistema no adherente de cables monocordón[4] permitía mayor flexibilidad en el trazado y en la realización de ajustes en obra, sin que los cruces entre las distintas familias redujeran la efectividad de los tendones de forma reseñable.

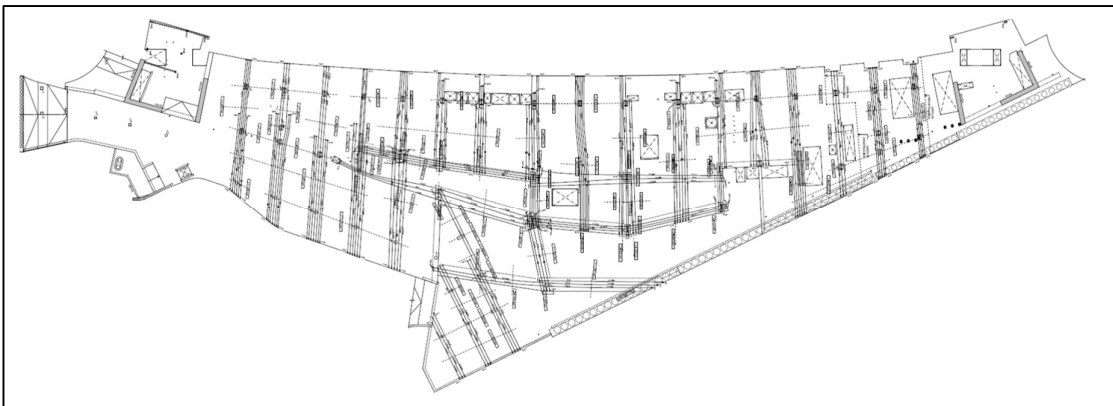


Figura 16 Distribución de cables de pretensado en losa de Planta Primera.

Tal y como se explica más adelante en el apartado del proceso de Ejecución, la zona central de la losa postesada del Sótano 1 se hormigonó y tesó previamente a la realización del resto de la losa. Esto suponía un cambio de las condiciones de contorno que afectaba a la distribución de la fuerza de tesado a largo plazo debido a los efectos de la fluencia. El análisis de esta transferencia de carga del tesado entre las distintas fases de ejecución de la losa de la plaza se realizó mediante la expresión del Coeficiente de Envejecimiento del artículo 25.2 de la EHE-08[7] y un cálculo por etapas de la estructura.

$$S_{\infty} = S_0 + (S_c - S_0)(\varphi(\infty, t_0) - \varphi(t_c, t_0)) / (1 + X\varphi(\infty, t_c))$$

Conforme a la formulación de la EHE-08, se combinan los esfuerzos obtenidos en los modelos de cálculo de las fases provisionales y de la estructura completa (Figura 17), ponderándose sendos valores con los coeficientes derivados de la fluencia del hormigón, según las edades de ejecución.

A la vista de los cálculos realizados, se consideró suficientemente aproximada la siguiente expresión para todas las fases:

$$S_{\infty} = 0.45 * S_0 + 0.55 * S_c$$

Siendo S_0 la distribución de fuerzas calculada en la fase inicial de tesado y S_c la obtenida con la estructura completa.

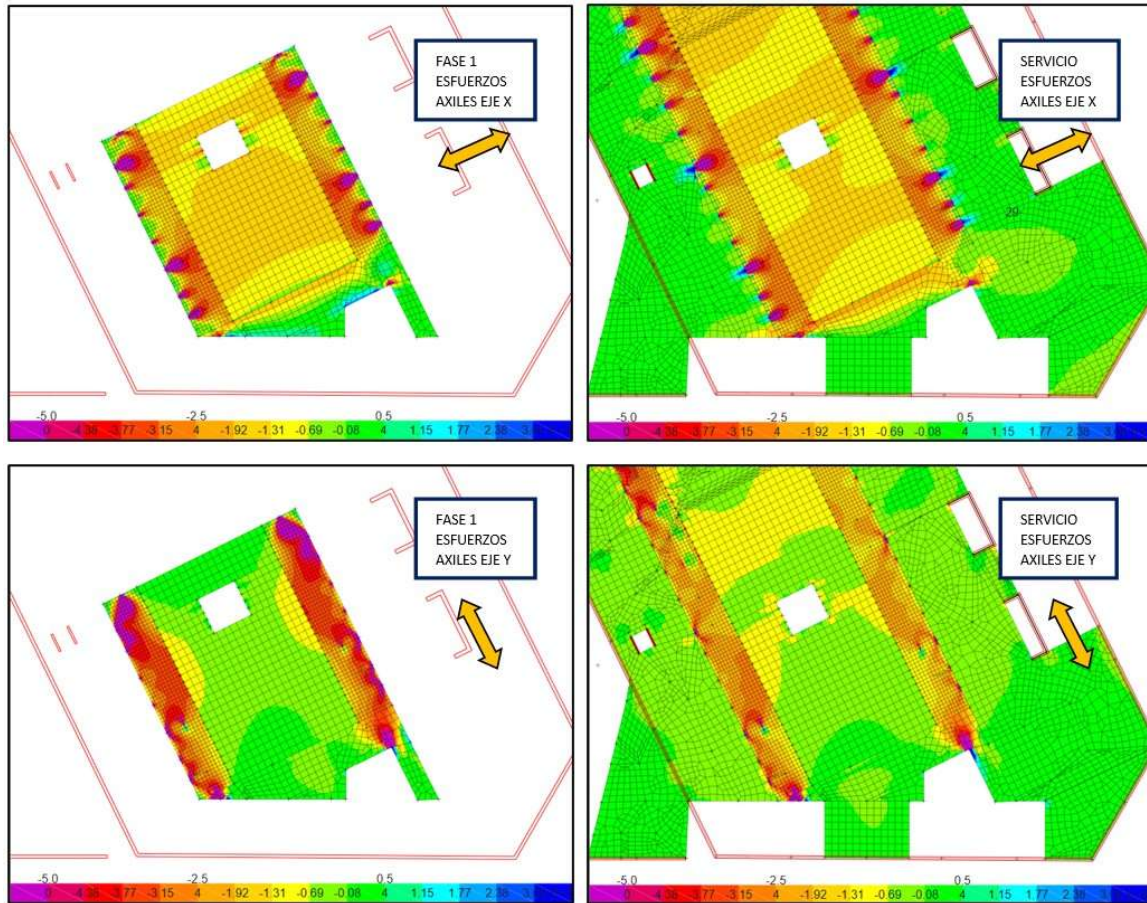


Figura 17 Variación de los esfuerzos axiales en la losa de Sótano 1 entre la etapa inicial de ejecución y el estado final, en ambas direcciones (modelo ETABS).

Dadas las dimensiones de las losas y la ausencia de juntas de dilatación, en las losas armadas de 500 mm. de espesor se dispuso una cuantía mínima de armadura de flexión del 4‰ ($\#16/0.15/0.15$ superior e inferior) con objeto de disipar la fisuración producida por efectos de la temperatura y la retracción. Esta cuantía es la establecida en diversos artículos académicos al respecto [8].

Ejecución

- Demolición del Centro Comercial.

Inicialmente existía bajo la rasante del Centro Comercial un aparcamiento con tres plantas de sótano, que se ha incrementado en dos (una de las cuales con doble altura para permitir el paso de camiones y autobuses). El vaciado del Centro Comercial (Figura 18) ha provocado un

cambio del nivel más profundo, inicialmente situado a cota -5.0 (-5.62 en la referencia del proyecto del Centro Comercial) que pasa a la cota -12.90, excavando 7.90m.

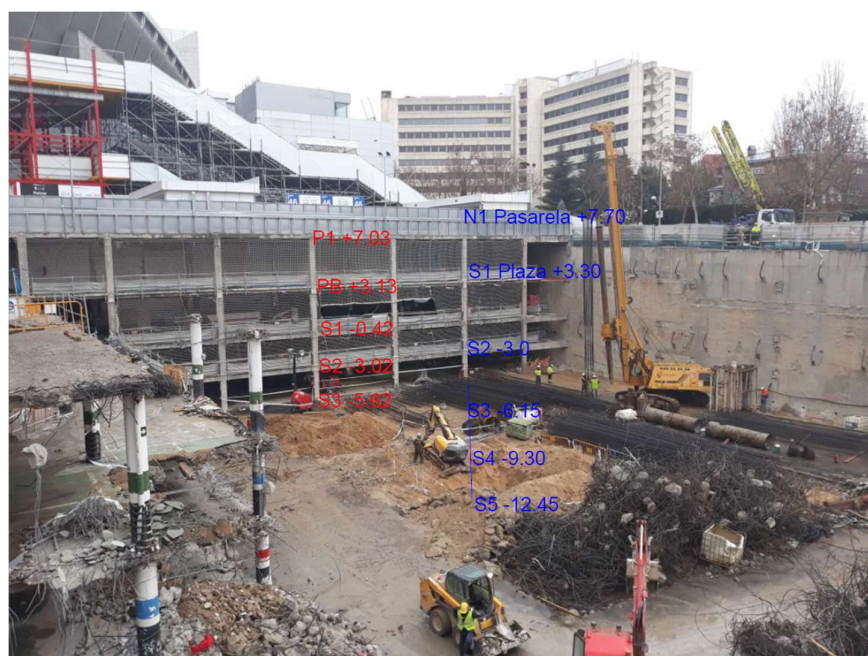


Figura 18 Demolición del lado sur del centro comercial

Se diseñó una solución en la que se respetaba el perímetro de muros pantallas continuas existentes de 600mm de espesor, los cuales se estabilizaron durante la demolición de la estructura existente para, posteriormente, profundizar el recinto mediante pantallas de pilotes adosadas a las anteriores.

La demolición de los forjados del aparcamiento del centro comercial implicaba la instalación previa de anclajes provisionales en la pantalla existente, liberando a los forjados de la responsabilidad de transmitir los empujes del terreno y manteniendo así la estabilidad de la misma. Se conseguía, de este modo, ejecutar la obra inferior sin el constreñimiento que implicaría la existencia de parte de dichos forjados.

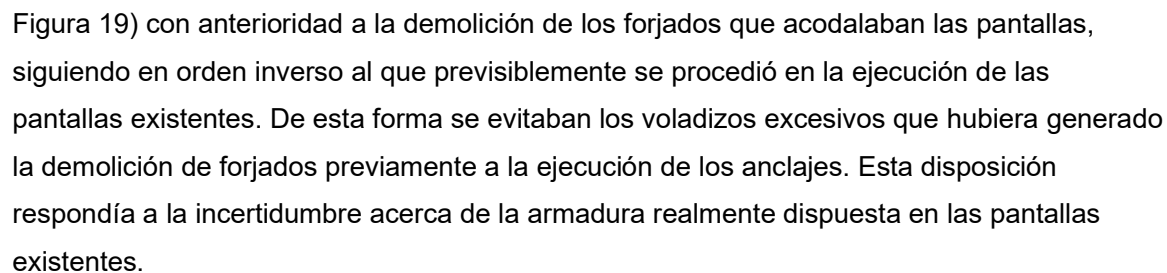
Se recopiló la información disponible de la construcción en el año 1990 del Centro Comercial, al tiempo que se realizó una campaña de calas en el intradós de las pantallas para poder cotejar las armaduras realmente dispuestas. Desafortunadamente, se comprobó que la información de los planos disponibles no se correspondía con la realidad observada.

Una vez retirada la cámara de fábrica de ladrillo del Centro Comercial se observó que los anclajes en algunos tipos de pantallas no se correspondían con los que aparecían en los planos disponibles (en alguna zona existían marcas de dos niveles de anclajes pero en planos sólo figurara uno, la armadura de planos no siempre correspondía con la observada en las calas, etc.). Estaba claro que la gestión documental de la época era mejorable. En la Revista Cauce 2000 nº 61 de enero/febrero 1994 existía una imagen de estas pantallas intercalada en el artículo escrito por J.M Fernández Alvarez sobre la Ampliación del Estadio Santiago Bernabéu[9]. Esta imagen fue de gran ayuda al igual que un croquis de obra referente a ancho de módulos, profundidades y fuerzas de anclajes facilitado por TERRATEST.

Se propuso un proceso de anclajes de las pantallas existentes previo a la demolición del Centro Comercial, contemplando los siguientes aspectos:

1. Disponer la separación de los anclajes en función de la longitud de los módulos de pantallas existentes, buscando, en la medida de lo posible, el equilibrio en cada uno de los módulos sin recurrir a la colaboración de los adyacentes.

3. Disponer la cota de los anclajes para que se realizara con maquinaria ligera desde el forjado de Planta Baja (en las zonas donde existía este forjado) y desde el forjado del sótano.



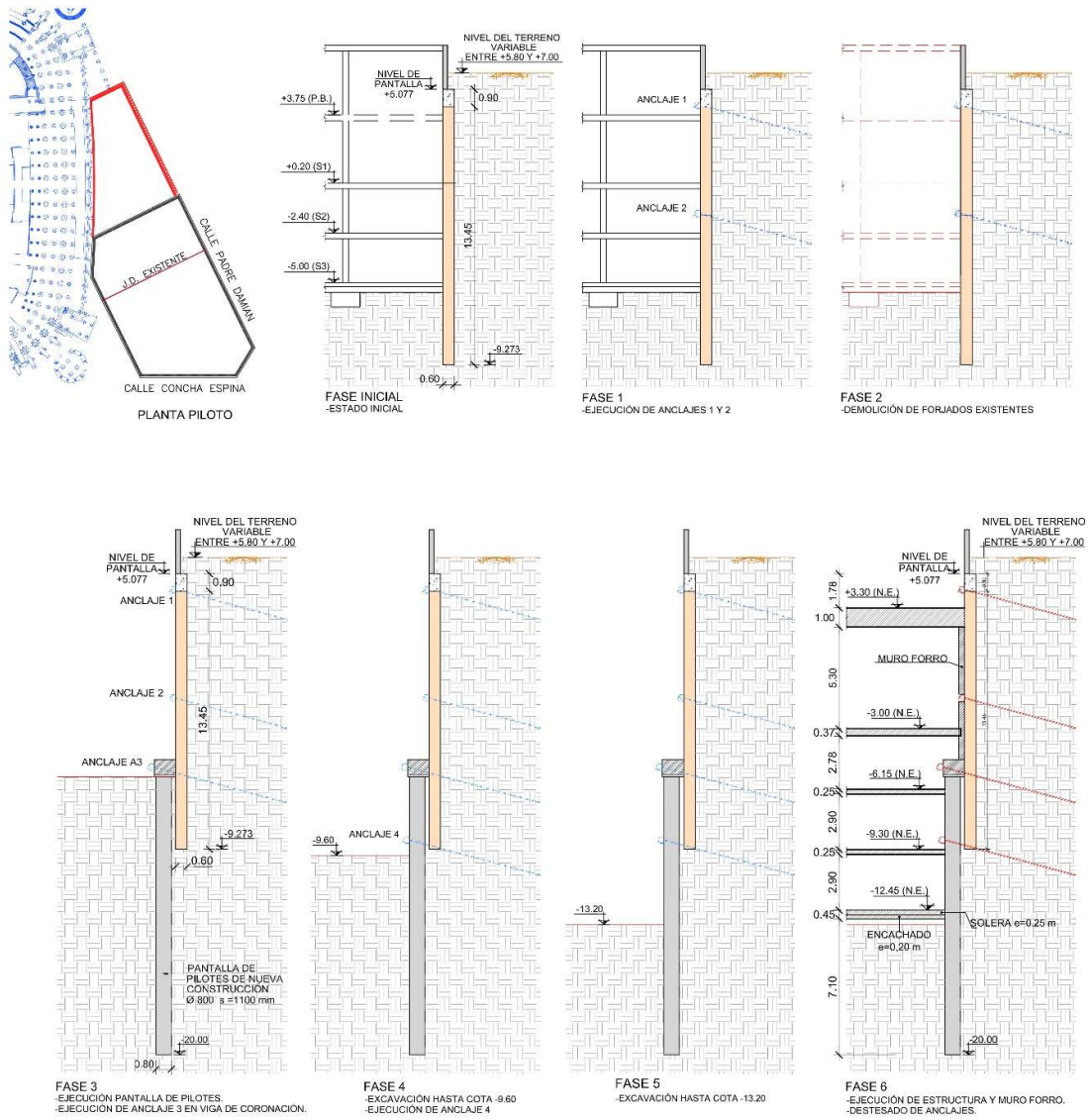




Figura 20 Ejecución de pilotes en intradós de pantalla existente

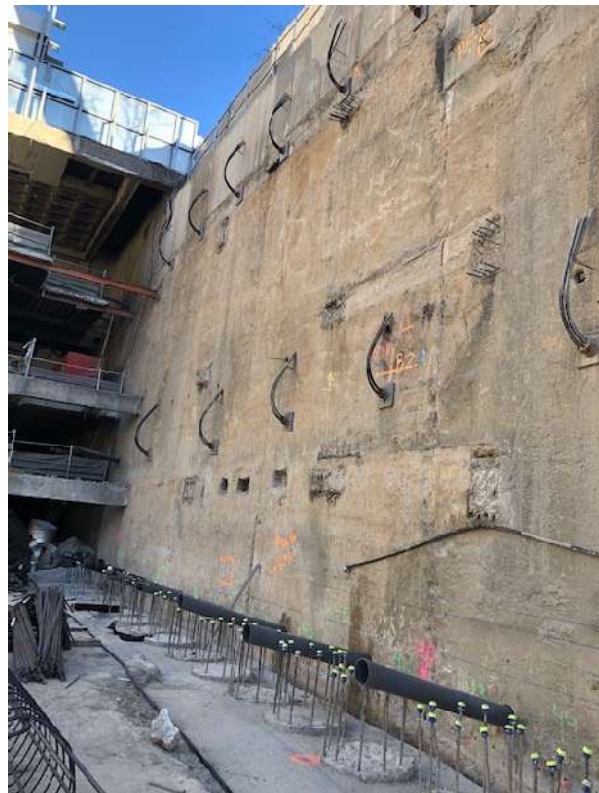


Figura 21 Vista de los pilotes ejecutados

El edificio existente presentaba una junta de dilatación, mediante doble pilar, que delimitaba lo que serían las distintas fases de organización de la obra.

En una primera fase únicamente se demolió completamente la estructura al sur de la junta de dilatación, conservando la cimentación y los forjados bajo rasante de la zona norte, más cercana al edificio multiusos. Una vez puestos en carga los anclajes sobre las pantallas existentes, se eliminaron los forjados, pilares y cimentaciones, para proceder a la ejecución de la nueva pantalla de pilotes (Figura 21 y Figura 20), su viga de coronación y la ejecución (Figura 22) y tesado de los anclajes situados sobre ella. Posteriormente se realizó la excavación del terreno contando con filas intermedias de anclajes.



Figura 22 Ejecución de anclajes al terreno.

En el caso en que la nueva altura entre forjados sometía a la pantalla existente a esfuerzos mayores que los que resistió antes de la remodelación, se procedió al refuerzo de la misma. El refuerzo consistió en la creación de un “forro” de hormigón, adecuadamente armado, por el intradós de esta. Por facilidad de ejecución, se concibió desconectado estructuralmente de la pantalla existente y se realizó en la fase final de la construcción, justo antes de eliminar todos los nuevos anclajes provisionales, dejando unas ventanas en el muro para su posterior destesado y retirada (Figura 23).



Figura 23 Destesado y retirada de anclajes con muro forro.

Por otro lado, los nuevos anclajes fueron ejecutados, en sus filas superiores, con anclajes extraíbles que se retiraron del terreno una vez destesados. Esta es la primera obra en la que se han empleado anclajes recuperables en España, ejecutándose esta operación con éxito.

Durante el proceso de redacción del proyecto constructivo de las pantallas se realizó una campaña de investigación de las posibles afecciones de los anclajes. Las afecciones detectadas eran a servicios en uso o abandonados, estructuras existentes (en general cimentaciones del estadio) y futuras cimentaciones que, en el momento de redacción del proyecto, no estaban completamente definidas al estar a su vez en proceso de diseño.

Tanto en servicios afectados, como en las futuras cimentaciones, debió considerarse simultáneamente el control espaciotemporal al tratarse de anclajes provisionales, por lo que podía ser que existiera interferencia geométrica en el espacio que, al no coincidir en el tiempo, no resultara relevante. El empleo de tecnología BIM[10] ayudó a resolver las posibles interferencias que se pudieron ocasionar

Los servicios afectados detectados fueron:

- CI/ Padre Damián.

Existe una galería de pluviales en servicio que, discurre paralela a la pantalla. Esta galería ha obligado a reconsiderar los ángulos de los anclajes superiores forzados a pasar bajo ella al tiempo que producían interferencia con la segunda fila, que se ha resuelto disponiéndose al tresbolillo.

- CI/Concha Espina.

Una galería de aguas pluviales en un tramo en la esquina Concha Espina con Padre Damián. El futuro desvío del colector, que inicialmente discurría por el interior del aparcamiento, se estudió llevarlo paralelo a la pantalla de Concha Espina, pero la dificultad del encaje de los anclajes entre la galería existente y la futura hizo que se optara por desplazarlo cruzando por la calle Concha Espina y alejándolo de los anclajes.

- Lado estadio.

El estudio de las interferencias con las estructuras del lado este del estadio se realiza mediante el modelo BIM[10] del mismo, tanto en su estado actual como con las futuras cimentaciones. Se buscó minimizar las posibles interferencias considerando las cimentaciones que se encuentren trabajando en cada momento. Estas consideraciones obligan a que, durante la obra, se deban controlar las múltiples afecciones, desde un punto de vista global, de las distintas actuaciones que se acometen en la remodelación del Estadio.

- **Demolición del Edificio Multiusos.**

El edificio Multiusos, ejecutado en año 2004, contaba con mayor calidad de la documentación de su proyecto, incluyendo tanto los planos como los cálculos de las pantallas de contención de tierras (Figura 24). En este caso se trataba de tres tipos de pantallas de pilotes, según profundidades de excavación y muros de hormigón del lado del estadio. Los diferentes tipos se diferenciaban en el armado y diámetro de los pilotes, pero coincidían en que en todos los casos se trataban de pantallas trabajando en voladizo, incluso en el estado definitivo, dado

que se habían dispuesto apoyos deslizantes con los forjados mediante neoprenos.

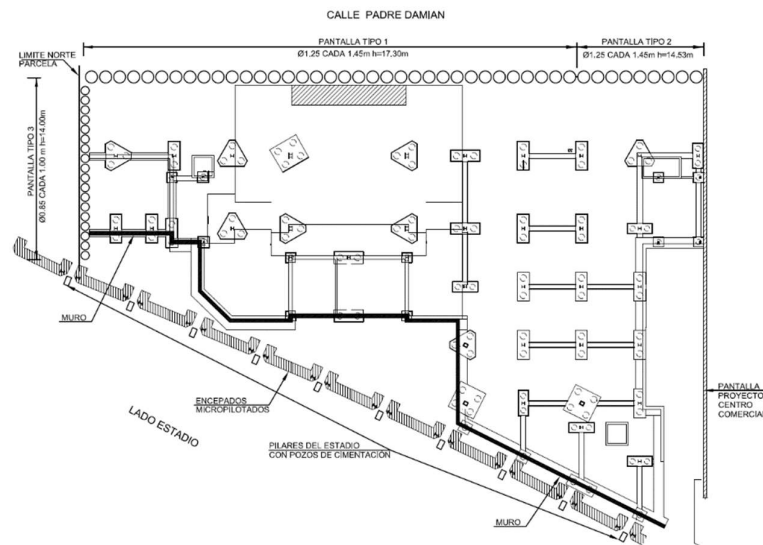


Figura 24 Cimentación existente del edificio multiusos

En este edificio existían dos plantas de sótano, de las que la más profunda ocupaba parcialmente la superficie entre el contorno exterior de las pantallas existentes. Con la remodelación estaba previsto incrementar el número de sótanos; hasta sótano 3 en la mayor parte de la superficie del mismo, hasta sótano 4 en su esquina suroeste y al sur del edificio, y en lo que fue el Centro Comercial, llegar hasta sótano 5. Se pasaba de la cota de cara superior de encepados existente a la -1.30, hasta la nueva profundidad de -6.15, excavando del orden de 4.85 m. más la diferencia de cantos de cimentaciones.

Debido a que las pantallas existentes se encontraban trabajando en voladizo, la demolición de los forjados pudo acometerse directamente sin comprometer la estabilidad de estas. Se evitaba así la disposición de anclajes en las pantallas existentes y su posible interferencia con el mástil de la pilotadora que ejecutaría las nuevas pantallas, lo que obligarían a una reducción de la superficie útil del aparcamiento al tener que aumentarse la separación entre ellas.

Una vez se llegó a las cotas del terreno natural, se procedió a la ejecución de las nuevas pantallas de pilotes en el intradós de las existentes y al anclaje a la cota de su viga de coronación, permitiendo continuar excavando hasta las cotas en las que ejecutar una nueva fila de anclajes, y así sucesivamente hasta llegar a la excavación final.

Para las nuevas pantallas de pilotes de lados Norte y Oeste se buscó una composición que permitiera disponer los anclajes de las distintas filas sin interferir con los pilotes existentes en su trasdós (Figura 25).

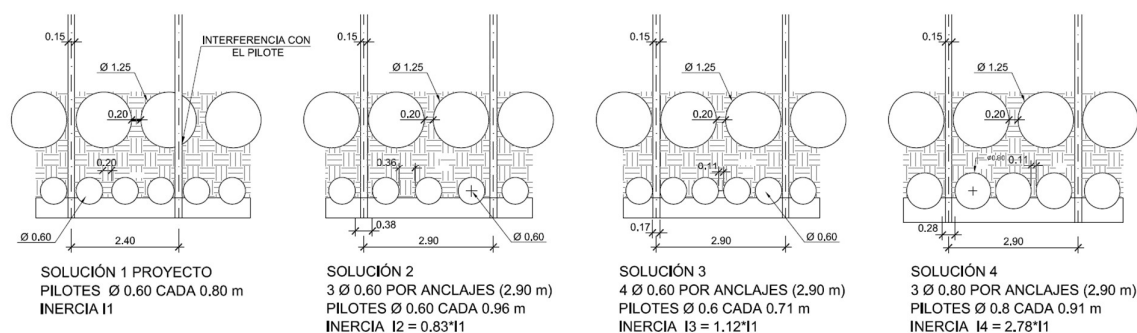


Figura 25 Estudio interferencias anclajes edificio multiusos.

En el lado este del estadio se demolieron los muros de contención de tierra existente y se reemplazaron por una pantalla de pilotes que permitiera aumentar la profundidad de la excavación. La alineación de la nueva pantalla de pilotes pasa por delante de los pilares de hormigón de la ampliación del estadio de 1954, con cimentación mediante pozos, así como de los pilares metálicos y sus cimentaciones mediante micropilotes, dispuestos en forma de U entre los pozos, que se añadieron en la posterior ampliación del graderío de 2005.

La ampliación del 2005 se desmontó antes de la ejecución de la pantalla, dado que estaba previsto que el nuevo edificio Este ocupara su lugar, pero sus micropilotes quedaban en el terreno y era necesario esquivarlos en el trazado de los nuevos anclajes provisionales (Figura 26).

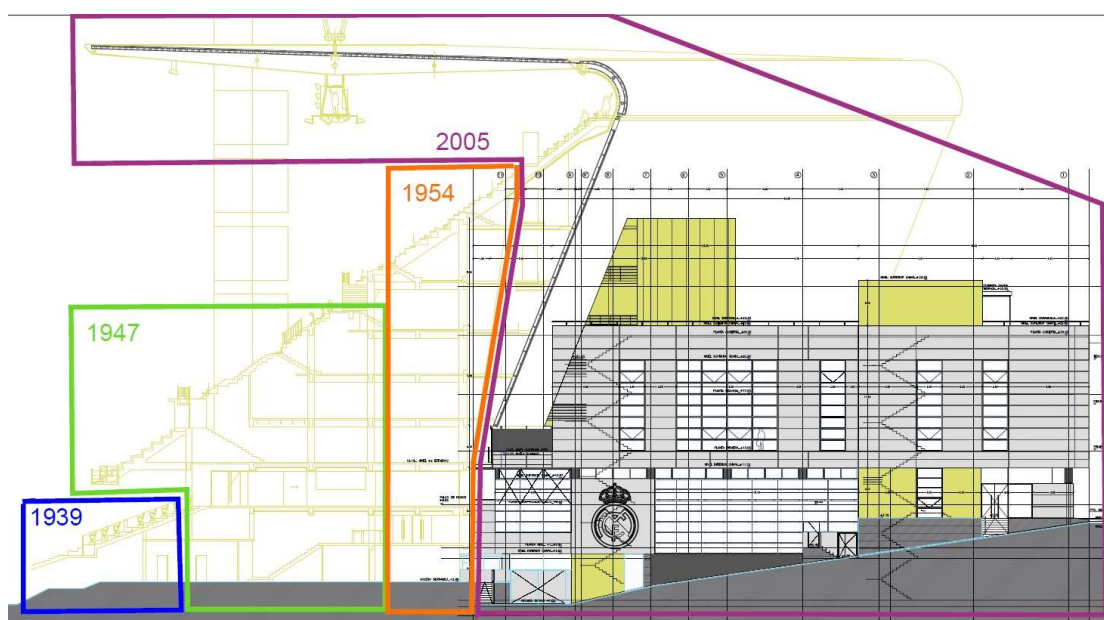


Figura 26 Esquema de distintas intervenciones históricas en el estadio.

Nuevamente la tecnología BIM[10] (Figura 27) fue de gran ayuda en esta tarea de esquivar micropilotes y pozos, así como para minimizar las posibles interferencias con las futuras cimentaciones (Figura 28) del Edificio Este o del Túnel Logístico en función de los plazos de ejecución de los distintos elementos.

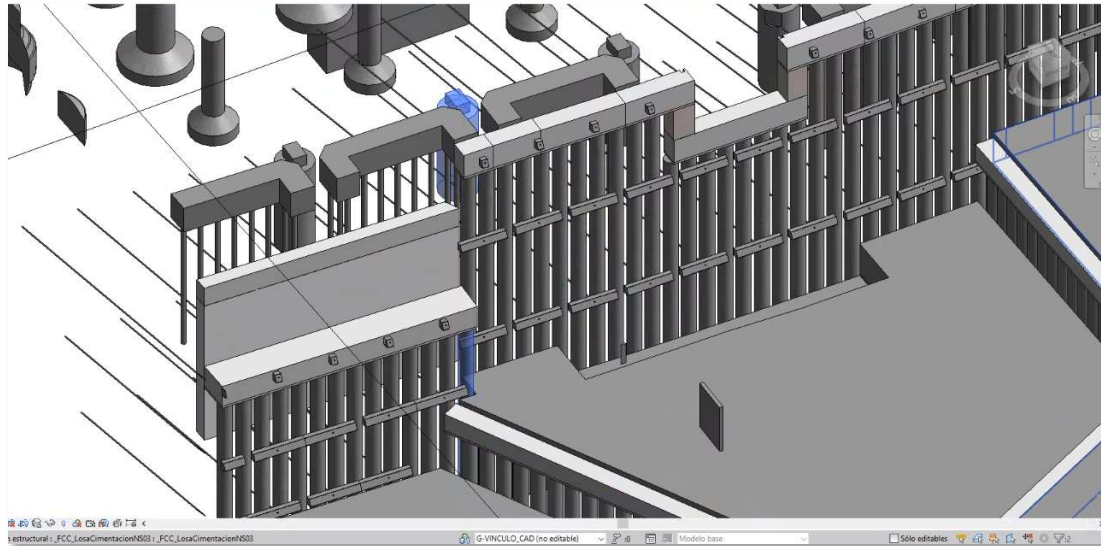


Figura 27 Estudio en BIM interferencias anclajes lado estadio.

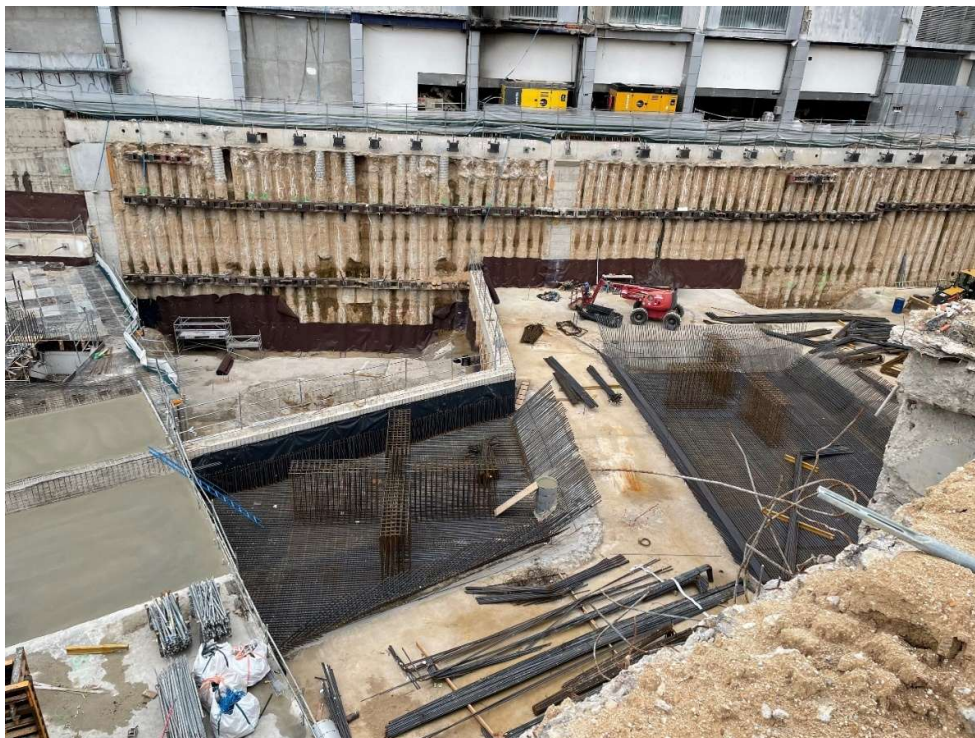


Figura 28 Vista de la realización de anclajes lado estadio.

En el lado Sur, hacia el Centro comercial, se quería mantener la diferencia de altura entre el sótano 5 y el sótano 3 en la mitad Este y del Sótano 4 al Sótano 5 en la Oeste. Inicialmente existía una pantalla continua de 600 mm de espesor con altura variable perteneciente al centro comercial (Figura 29).

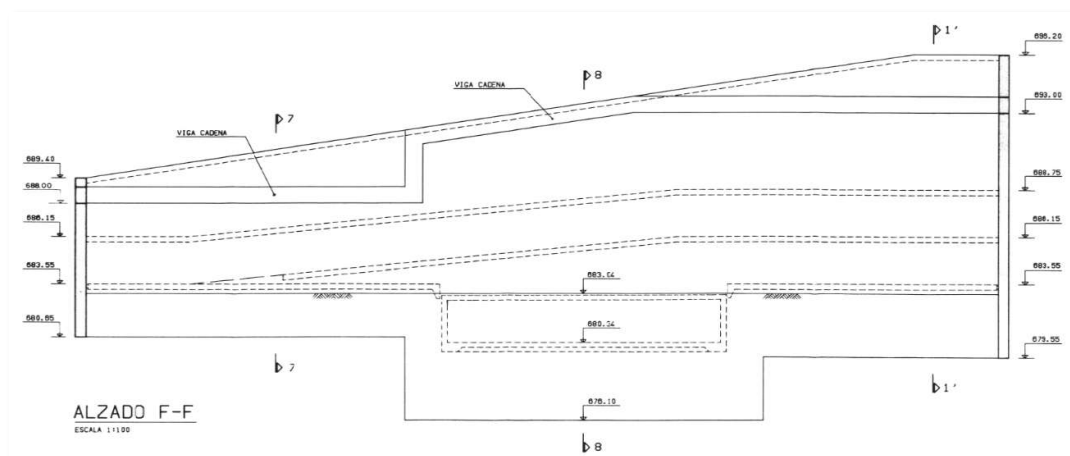


Figura 29 Pantalla del centro comercial medianera con el edificio multiusos

Para reducir plazos se estudió la viabilidad de, en primer lugar, demoler los forjados del centro comercial, posteriormente excavar el trasdós de la pantalla existente hasta los nuevos niveles de sótano y finalmente demoler la citada pantalla. Dado que esta pantalla fue concebida en su día para una altura de tierra en su trasdós que más adelante fue modificada con la ejecución del edificio multiusos y que éste contaba con cimentación profunda, y la mayor parte de él retranqueado con respecto a la medianera, se comprobó la estabilidad de la misma mediante cálculos con las consideraciones anteriores, permitiendo llegar a nivel de solera del centro comercial con la pantalla trabajando en voladizo. Desde este nivel de solera del centro comercial se pudieron ejecutar los pilotes de las nuevas pantallas que remplazarían a la existente salvando los desniveles desde sótano 5 a sótano 3 y de sótano 5 a sótano 4 respectivamente. Ambas fueron diseñadas para poder realizar la excavación de los sótanos en voladizo, aunque necesitaban encontrarse acodadas con los forjados para resistir las tensiones que transmiten al terreno las respectivas losas de cimentación que se situaron en los respectivos trasdosos.

Ejecución de sótanos del aparcamiento.

Una vez realizadas las demoliciones, la ejecución de los sótanos del aparcamiento se llevó a cabo en dos fases, comenzando por ejecutar hasta el nivel sótano 1 la zona sur y continuando en segunda fase la ejecución de la zona norte (

Figura 30). Se aprovechó para mantener abierta, el mayor tiempo que la planificación general lo permitió, una junta provisional de retracción entre ellas, con intención de reducir las tensiones

inherentes a un edificio largo sin juntas como del que se trata (Figura 31).



Figura 30 Ejecución de zapatas en extremo norte del sótano 5

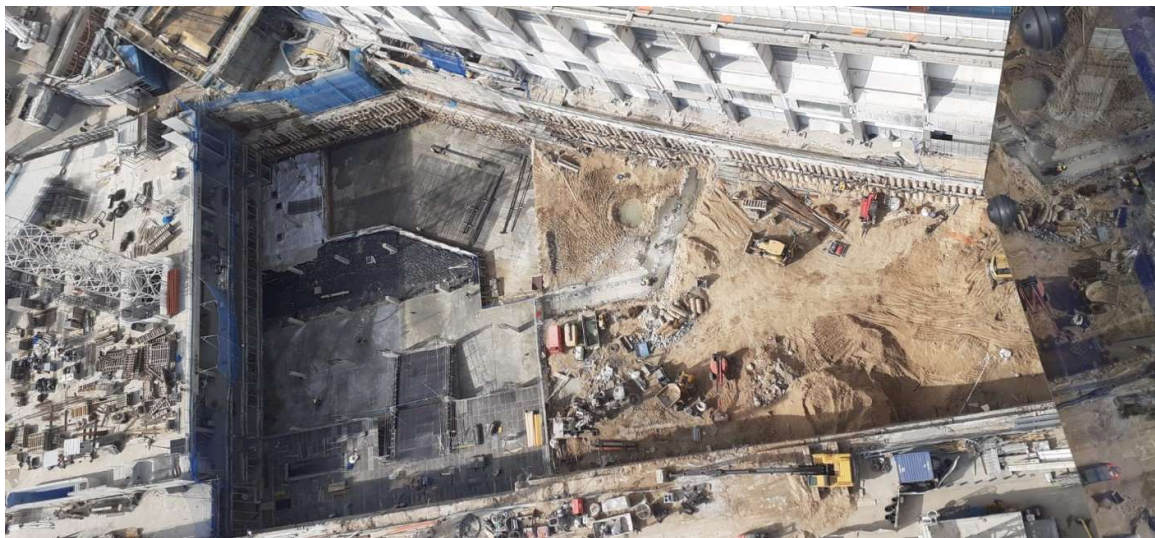


Figura 31 Vista desde el este del inicio de la segunda fase.

Ejecución de sótano 1 y planta primera

Además de los condicionantes impuestos por las fases establecidas por el avance de la obra, en el caso de la estructura del nivel de Sótano 1 -en que coexisten zonas armadas y zonas postesadas- se estableció una secuencia de ejecución específica (Figura 32) para la introducción efectiva de las acciones del postesado, determinando el tiempo mínimo que debía transcurrir entre el hormigonado de las distintas zonas para minimizar la pérdida de fuerza de tesado por efecto de la fluencia.

En general, los tiempos transcurridos en la ejecución de la estructura fueron mayores a los estimados en el cálculo estructural, lo que implica un incremento de los coeficientes de seguridad al quedar en las losas postesadas un remanente de compresión en servicio mayor que el previsto en el diseño.

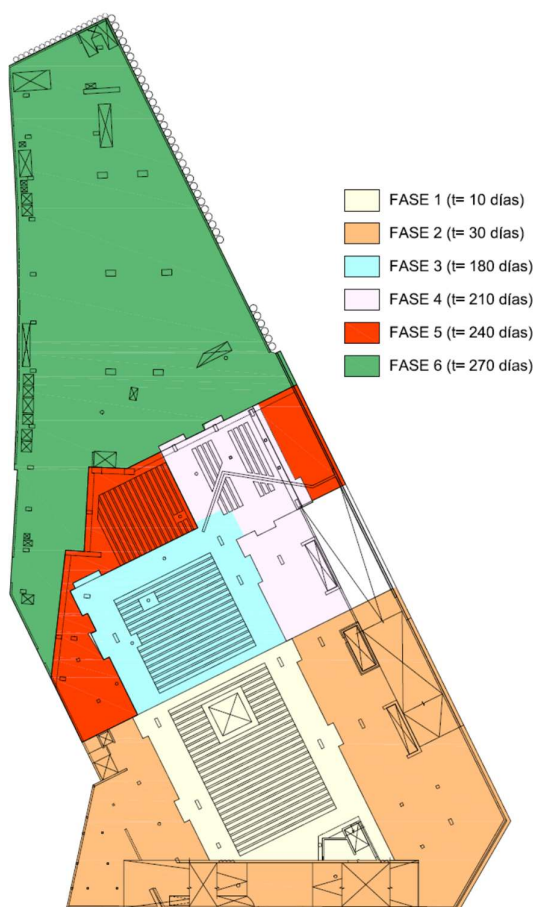


Figura 32 Fases de ejecución establecidas para la losa de Sótano 1.

Respecto a la losa del nivel 1 (con una dimensión de aproximadamente 180 metros en dirección norte-sur), además de las disposiciones adoptadas relativas a las cuantías de armado para controlar los efectos de fisuración por la ausencia de juntas de dilatación (comentado anteriormente), se definieron dos bandas de hormigonado diferido (*Figura 33*) para reducir los esfuerzos de tracción debidos a fenómenos reológicos, ya que los extremos de este nivel se encuentran conectados a los muros de los torreones, de gran rigidez frente a esfuerzos horizontales, lo que impedía la dispersión de tensiones de tracción de la losa.

Estas bandas se hormigonaron con un desfase del orden de seis meses respecto al resto de la losa.



Figura 33 Situación de bandas de hormigonado diferido en losa de Planta Primera.

En la zona colindante con la calle Padre Damián se dispusieron fieltros deslizantes para garantizar la correcta transmisión a la losa de la fuerza de compresión en el tesado (que, de otra forma, se hubiera distribuido parcialmente en la pantalla de pilotes) rellenándose posteriormente las vainas[4] previstas y sus conectores con mortero sin retracción (*Figura 34*).

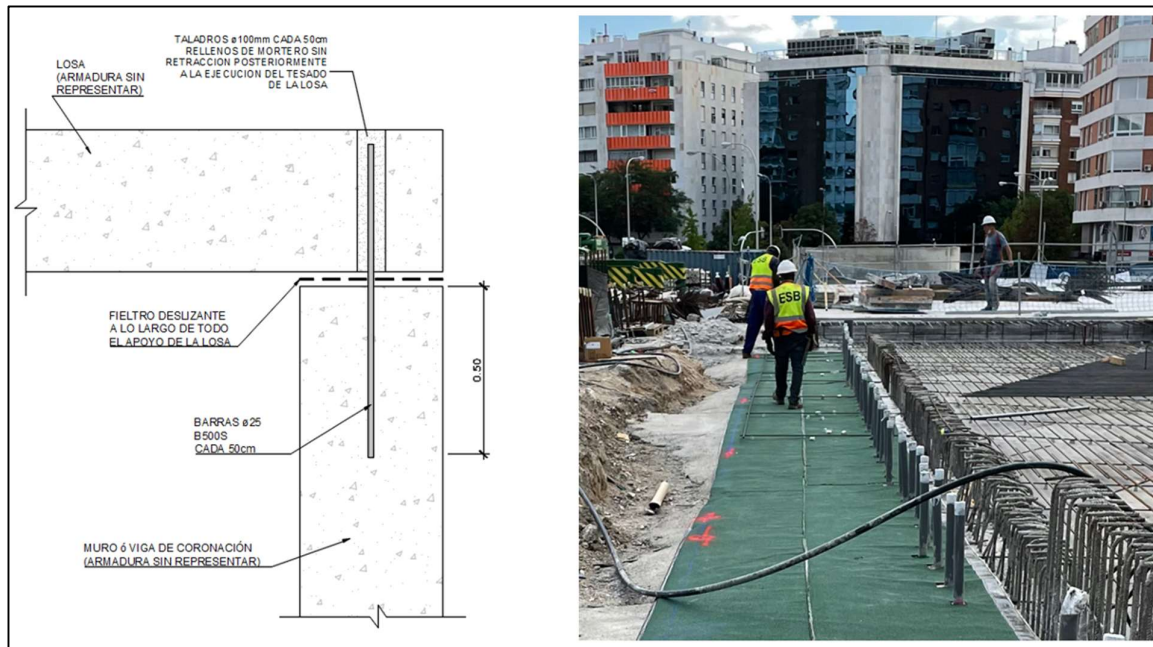


Figura 34 Detalle de conexión de muro perimetral a losa de Planta Primera.

En la losa de Sótano 1, debido al cruce de familias de cables con trazado perpendicular, se separaron las zonas de anclaje para evitar interferencias en las zonas de mayor densidad de armado, cercos y espirales de refuerzo bajo placas. Se realizaron análisis gráficos 3D (Figura 35) de los nudos más comprometidos para verificar la viabilidad de la disposición del armado.

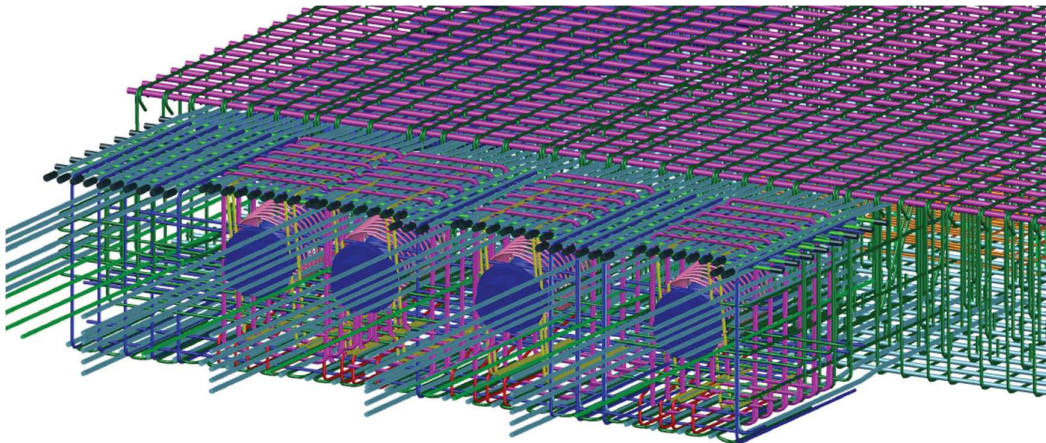


Figura 35 Ejemplo de modelo gráfico 3D en zonas de anclaje de tendones de postesado de la losa de Sótano 1.

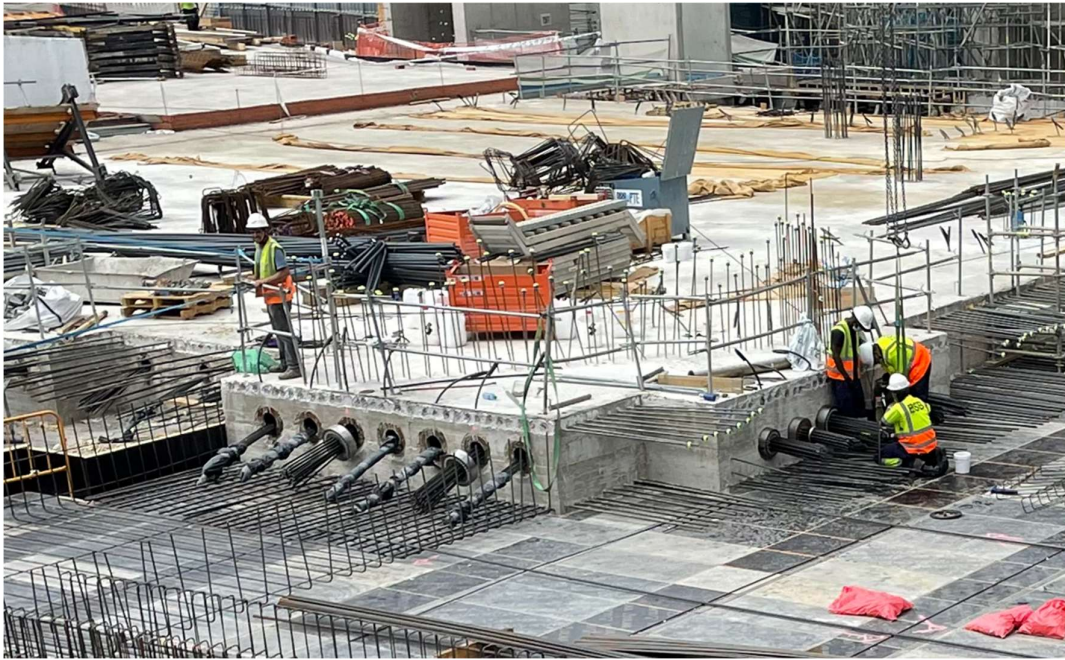


Figura 36 Ejecución de zonas de anclaje de postesado en losa de Sótano 1.

Los tendones de las vigas postesadas se plantearon con trazado ligeramente variable en planta, de forma que se concentrasen sobre los pilares (evitando la introducción de esfuerzos verticales de punzonamiento indeseables) y se separasen en las zonas de acopladores y anclajes, que requieren habilitar un espacio mayor para su disposición (Figura 36). Para acomodar la colocación de las armaduras transversales de las vigas a estos desvíos de los tendones se definieron en proyecto como horquillas independientes que permitieran libertad de colocación en obra.

Por otra parte, la coronación de las armaduras de pilares en las vigas postesadas (

Figura 37) se planteó a mitad de losa para evitar la interferencia con tendones y simplificar la ejecución del armado.

En términos generales, para dar continuidad a las armaduras pasivas en las distintas etapas de ejecución se dispusieron manguitos roscados, con lo que se redujeron los excesos de armadura que hubiera supuesto el empleo de empalmes por solape, con el consiguiente riesgo de coqueras y deficiencias de hormigonado.

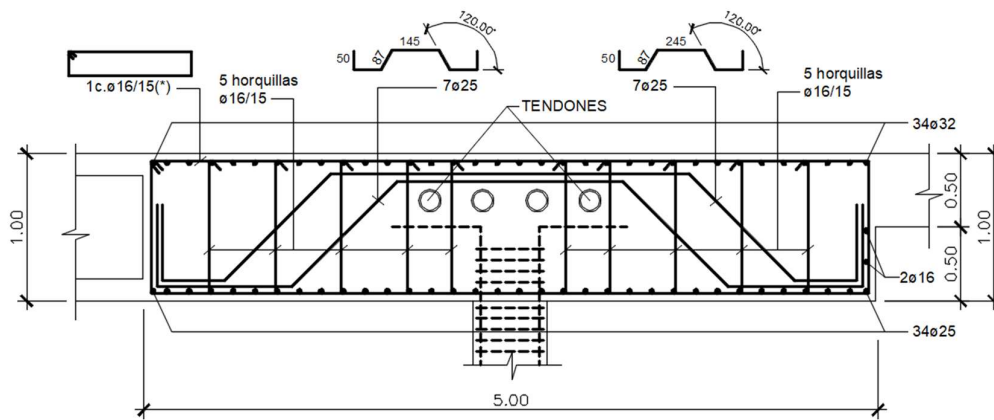


Figura 37 Ejemplo de esquema de armado en vigas postesadas de Sótano 1.

Sobre la losa del nivel 1 se produce el arranque de la estructura metálica del Edificio Este. Para evitar interferencias y simplificar el detalle de transición (Figura 38), los pilares superiores metálicos se plantearon en cálculo articulados en la base. De esta forma se reducía el número de pernos en espera y se limitaba su compromiso estructural, admitiéndose también el anclaje de las armaduras del pilar inferior a mitad de losa, al ser los momentos flectores en coronación menos relevantes.

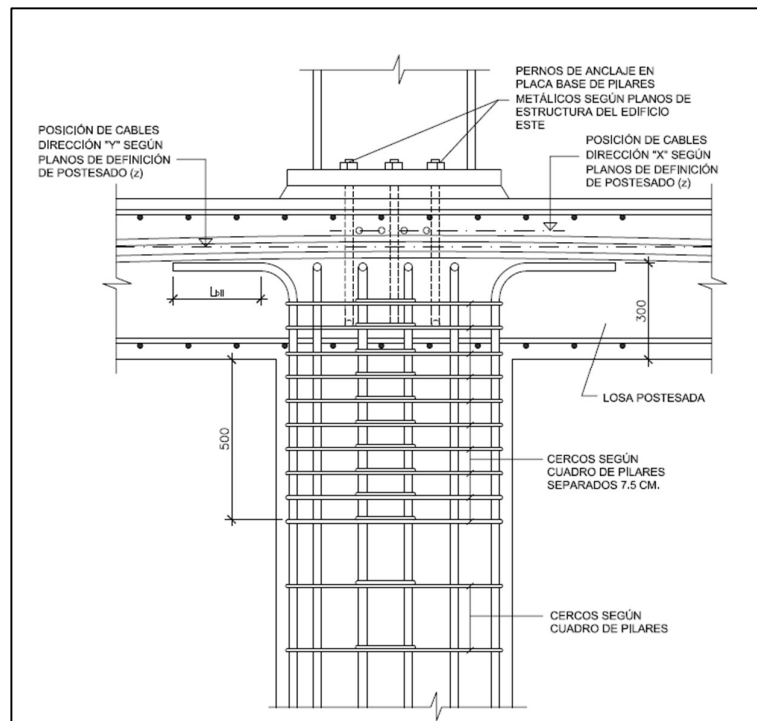


Figura 38 Detalle de armado en transición de pilares de hormigón y metálicos en la losa de Planta Primera.

La distribución de cables del nivel 1 (Figura 39) también se ajustó tomando en consideración la transferencia de carga vertical entre las placas base de los pilares metálicos y la estructura de hormigón inferior, disponiéndose los cables en dirección norte-sur en grupos verticales para mantener una mayor sección de hormigón que, en caso contrario, habría sido insuficiente para resistir los esfuerzos locales de compresión.

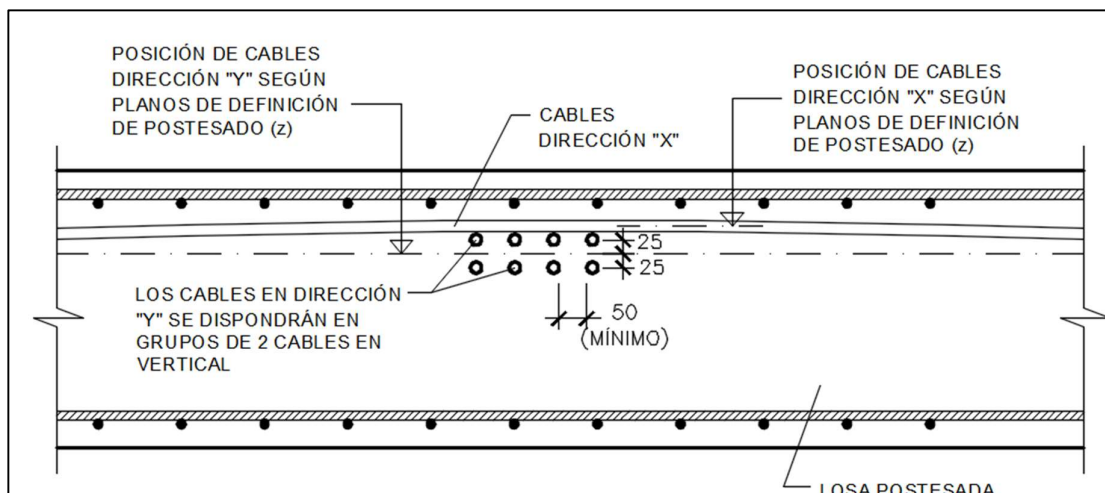


Figura 39 Detalle tipo de disposición de cables de pretensado en losa de Planta Primera.

Conclusiones. Rendimientos y cuantías

En los muros pantalla se ejecutaron 8.037 metros lineales de anclajes, de los cuales 1.081 eran recuperables y 6.956 no recuperables. Se realizaron 6.413 metros lineales de pilotes (2.491 en el Edificio Multiusos y 3.922 en el resto). Se dispusieron 31.173 m² de encofrado en forjados y losas. El volumen de hormigón fue de 7.903 m³ en cimentaciones (zapatas y losas) y 3.992 m³ en muros. La cuantía total de acero corrugado fue de 1.258.151 kg en Cimentación y 5.530.073 kg en el resto de estructura. La cantidad dispuesta de acero pretensado fue de 56.734 kg en los tendones adherentes (Sótano 1) y 19.488 kg en los no adherentes (Planta Primera). En términos generales, los rendimientos de ejecución fueron de 160.000 kg de acero y 815 m³ de hormigón en cada mes.

Figuras

Figura 1 Desniveles sótanos 5, 4 y 3.....	3
Figura 2. Planta de cimentación.	4
Figura 3. Sótanos del 5 al 1 ejecutados en lado sur y ejecución del resto de zapatas y pilares del sótano 5 en lado norte.	5
Figura 4. Paso de camiones en sótano 2	6
Figura 5. Sótano 1 y Planta Primera. Vista general de la plaza pública.	7
Figura 6. Poliestireno expandido para formación de volúmenes en parterres de Plaza Pública.	8
Figura 7. Distribución de tipologías en forjado de sótano 1	9
Figura 8 Sección transversal de losa aligerada en sótano 1.....	9
Figura 9 Ejecución de losa aligerada.....	10
Figura 10 Detalle de pretensado en forjado de Planta Primera.	11
Figura 11 Cimentaciones del estadio junto a pantallas de contención de tierras.	13
Figura 12 Deformaciones del terreno y de la pantalla. Resultados en Plaxis.....	13
Figura 13 Vista general de modelo en Cypecad	14
Figura 14 Esfuerzos axiales debidos al pretensado en ejes X e Y en Planta Primera (modelo ETABS).	15
Figura 15 Distribución de tendones de postesado en losa de Sótano 1.	16
Figura 16 Distribución de cables de pretensado en losa de Planta Primera.	16

Figura 17 Variación de los esfuerzos axiles en la losa de Sótano 1 entre la etapa inicial de ejecución y el estado final, en ambas direcciones (modelo ETABS).....	18
Figura 18 Demolición del lado sur del centro comercial.....	19
Figura 19 Proceso constructivo pantallas C/ Padre Damián	22
Figura 20 Ejecución de pilotes en intradós de pantalla existente.....	23
Figura 21 Vista de los pilotes ejecutados	23
Figura 22 Ejecución de anclajes al terreno.....	24
Figura 23 Destesado y retirada de anclajes con muro forro.....	25
Figura 24 Cimentación existente del edificio multiusos	27
Figura 25 Estudio interferencias anclajes edificio multiusos.	28
Figura 26 Esquema de distintas intervenciones históricas en el estadio.	28
Figura 27 Estudio en BIM interferencias anclajes lado estadio.....	29
Figura 28 Vista de la realización de anclajes lado estadio.....	29
Figura 29 Pantalla del centro comercial medianera con el edificio multiusos.....	30
Figura 30 Ejecución de zapatas en extremo norte del sótano 5	32
Figura 31 Vista desde el este del inicio de la segunda fase.....	32
Figura 32 Fases de ejecución establecidas para la losa de Sótano 1.....	33
Figura 33 Situación de bandas de hormigonado diferido en losa de Planta Primera.	34
Figura 34 Detalle de conexión de muro perimetral a losa de Planta Primera.....	35

Figura 35 Ejemplo de modelo gráfico 3D en zonas de anclaje de tendones de postesado de la losa de Sótano 1.	35
Figura 36 Ejecución de zonas de anclaje de postesado en losa de Sótano 1.....	36
Figura 37 Ejemplo de esquema de armado en vigas postesadas de Sótano 1.....	37
Figura 38 Detalle de armado en transición de pilares de hormigón y metálicos en la losa de Planta Primera.	37
Figura 39 Detalle tipo de disposición de cables de pretensado en losa de Planta Primera.....	38

Referencias

- [1] J. Martínez Salcedo, S. del Río, Estructura de Cubierta Fija, Hormigón y Acero, Vol. ESTE NÚMERO
- [2] J. A. Leira, Aspectos Geotécnicos de la Reforma, Hormigón y Acero, Vol. ESTE NÚMERO
- [3] E. Romero, El Nuevo Edificio del Este, Hormigón y Acero, Vol. ESTE NÚMERO
- [4] ETA-06/0147, BBR VT CONA CMI internal post-tensioning system with bonded or unbonded strands
- [5] Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación (UNE EN 1992-1-1:2004), AENOR, 2004
- [6] Código Estructural (R.D. 470/2021), Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, Secretaría General Técnica, Madrid, 2021.
- [7] Instrucción de hormigón estructural (EHE-08), Ministerio de Fomento, Secretaría General Técnica, Madrid, 2008.
- [8] J. Cámara y R. Luis, Structural response and design criteria for imposed deformations superimposed to vertical loads.
- [9] J. M. Fernández Álvarez, Equilibrio en el Aire, CAUCE 2000, Nº61, (ENERO-FEBRERO 1994).
- [10] Laura Aldea, La Utilización del BIM en el Proyecto, Hormigón y Acero, Vol. ESTE NÚMERO