

Cimentación y estructura de la zona del Claustro

Foundations and structure in the area of the Cloisters

Jesús Jiménez Cañas. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. jjiménez@nb35.es

Eduardo Gimeno Fungairiño. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. egimeno@nb35.es
NB35, S.L.

M^a Mercedes Madrid Ramos. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. mmadrid@dragados.com

Antonio Tabera García. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. atabera@dragados.com
DRAGADOS S.A. (Dirección Técnica)

Resumen: En la ampliación del Museo del Prado se pueden distinguir tres zonas claramente diferenciadas: el Claustro, el Salón de Actos y el Vestíbulo de Acceso. Las obras realizadas en la zona del claustro han sido las más singulares, realizándose una profunda excavación a escasos metros de la Iglesia de los Jerónimos. El artículo que se desarrolla a continuación se centra en los estudios previos, en la tipología estructural y en el proceso constructivo adoptado en la ejecución de la obra.

Palabras Clave: Ampliación del Museo del Prado; Estudios geotécnicos; Tipología estructural; Proceso constructivo

Abstract: Three clearly different areas may be distinguished in the extension to the Prado Museum: the Cloisters, the Auditorium and the Foyer. The work carried out in the area of the cloisters was the most exacting and required deep excavation just a few metres from the Church of Los Jerónimos. This article focuses on the preliminary studies, the structural type and the construction process adopted in the execution of the work.

Keywords: Extension of the Prado museum; Geotechnical studies; Structural type; Construction process

1. Localización de la obra

La Ampliación del Museo del Prado ocupa la cuña de terreno existente entre la espalda del edificio de Villanueva y la calle de Ruiz de Alarcón, incluyendo la superficie correspondiente al antiguo Claustro de los Jerónimos.

El proyecto de estructura ha sido realizado por el estudio NB-35 Ingeniería, que también asumió la dirección facultativa. Las obras han sido ejecutadas por la UTE El Prado (DRAGADOS y Constructora San José).

2. Descripción de las zonas

En la ampliación se pueden distinguir tres zonas claramente diferenciadas tanto por su localización como por la solución estructural adoptada, son las zonas de: Claustro, Salón de Actos y Vestíbulo de Acceso.

Las obras realizadas en la Zona del Claustro han sido las más singulares, tanto por su ubicación; ya que el vaciado se realizaba a escasos metros de la cimentación de la histórica Iglesia de los Jerónimos, como por la gran profundidad de excavación, más de 20 m. Por dichos motivos, este artículo se centra en la descripción de los estudios previos, la tipología estructural y el proceso constructivo adoptados en la ejecución de esta zona.

3. Zona del Claustro

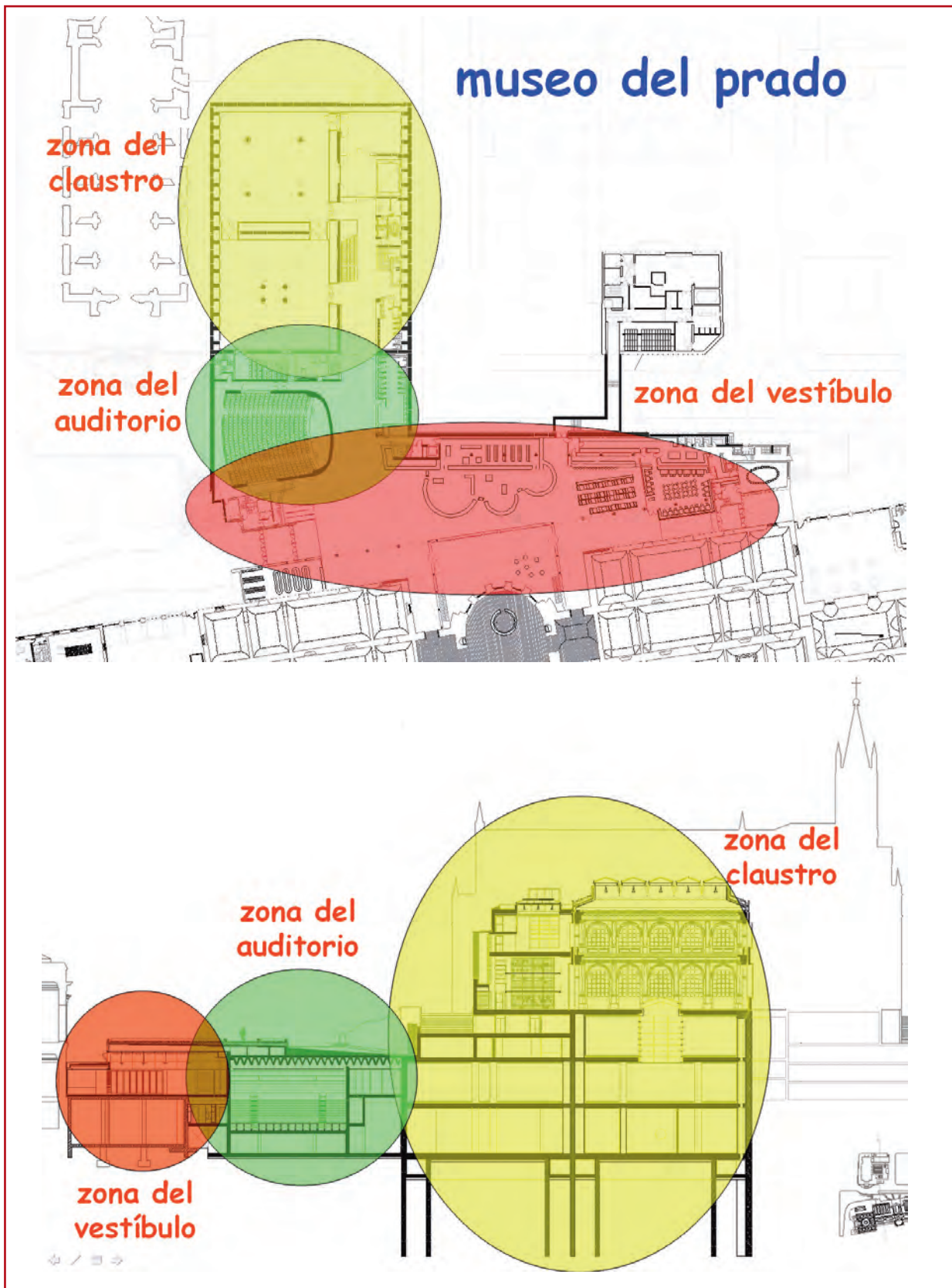
3.1. Estudios geotécnicos

Previamente al desarrollo de las obras de Ampliación del Museo del Prado se realizó un Estudio Geotécnico muy riguroso y exhaustivo por parte del Centro de

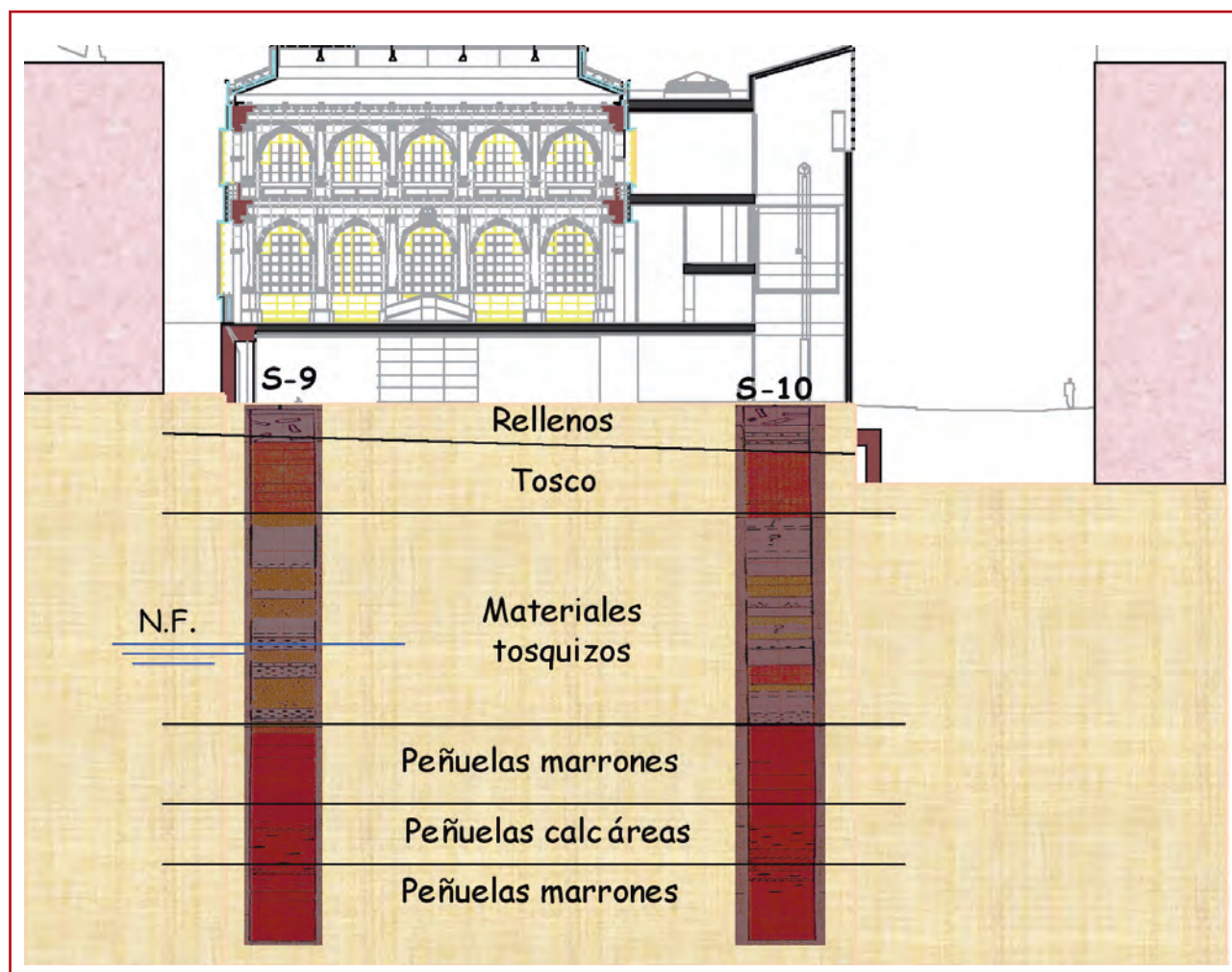
Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de diciembre de 2007 / Recibido: octubre/2007. Aprobado: octubre/2007



Zonas de la
Ampliación del
Museo del Prado.
Planta y sección.



Corte
tipo del
terreno.



Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), en forma de tres informes parciales.

En el primer informe se recogían los resultados de los ensayos presiométricos efectuados, orientados a proporcionar parámetros geotécnicos del terreno y a determinar su estado tensional inicial, valores fundamentales para el dimensionamiento de la contención de tierras.

En el segundo informe se describían y analizaban los trabajos y estudios efectuados en relación con el vaciado a realizar junto a la Iglesia de los Jerónimos. Se analizaba la tipología de muros pantalla, definiendo las sollicitaciones, características, proceso constructivo y seguimiento de los movimientos inducidos por la pantalla,

siempre buscando minimizar la afección de las obras de Ampliación del Museo del Prado sobre la Iglesia de los Jerónimos.

Se realizó una importante campaña de trabajos de reconocimiento con sondeos mecánicos, ensayos de penetración dinámica, ensayos de permeabilidad tipo Lefranc, ensayos presiométricos, gammagrafías, ensayos de laboratorio, georradar, instalación y lectura de piezómetros, etc., que permitieron caracterizar los materiales en la zona afectada por las obras.

El Nivel Freático según los trabajos de investigación se sitúa a 13 m de profundidad respecto a la cota de la plataforma de trabajo en la zona del claustro. Sin embargo, en los cálculos se plantearon dos situaciones: una con el



Nivel Freático a 8 m de profundidad y otra a 13 m, para analizar su influencia en los movimientos inducidos en el terreno.

En relación con los criterios a adoptar para la evaluación del empuje del terreno sobre el muro pantalla se estableció que éste se dimensionara con la distribución de empujes al reposo, para minimizar la descompresión del terreno durante el proceso de ejecución. Se consideró un valor del coeficiente de empuje al reposo de 0,5 para los materiales más superficiales, (rellenos o materiales afectados por la antigua excavación de las cimentaciones de la iglesia), y de 2,0 para el resto de los casos.

En este informe del CEDEX también se sugería la instrumentación mínima necesaria para controlar los posibles movimientos en la iglesia, durante y tras la realización de los trabajos de contención y vaciado. Entre los instrumentos recomendados se encontraban: inclinóme-

tros, extensómetros de varilla, micrómetros deslizantes, hilos de convergencia, escalillas para determinación de posibles movimientos horizontales y verticales, sensores de temperatura y humedad, así como el control e instrumentación de las grietas existentes en las fábricas de la iglesia.

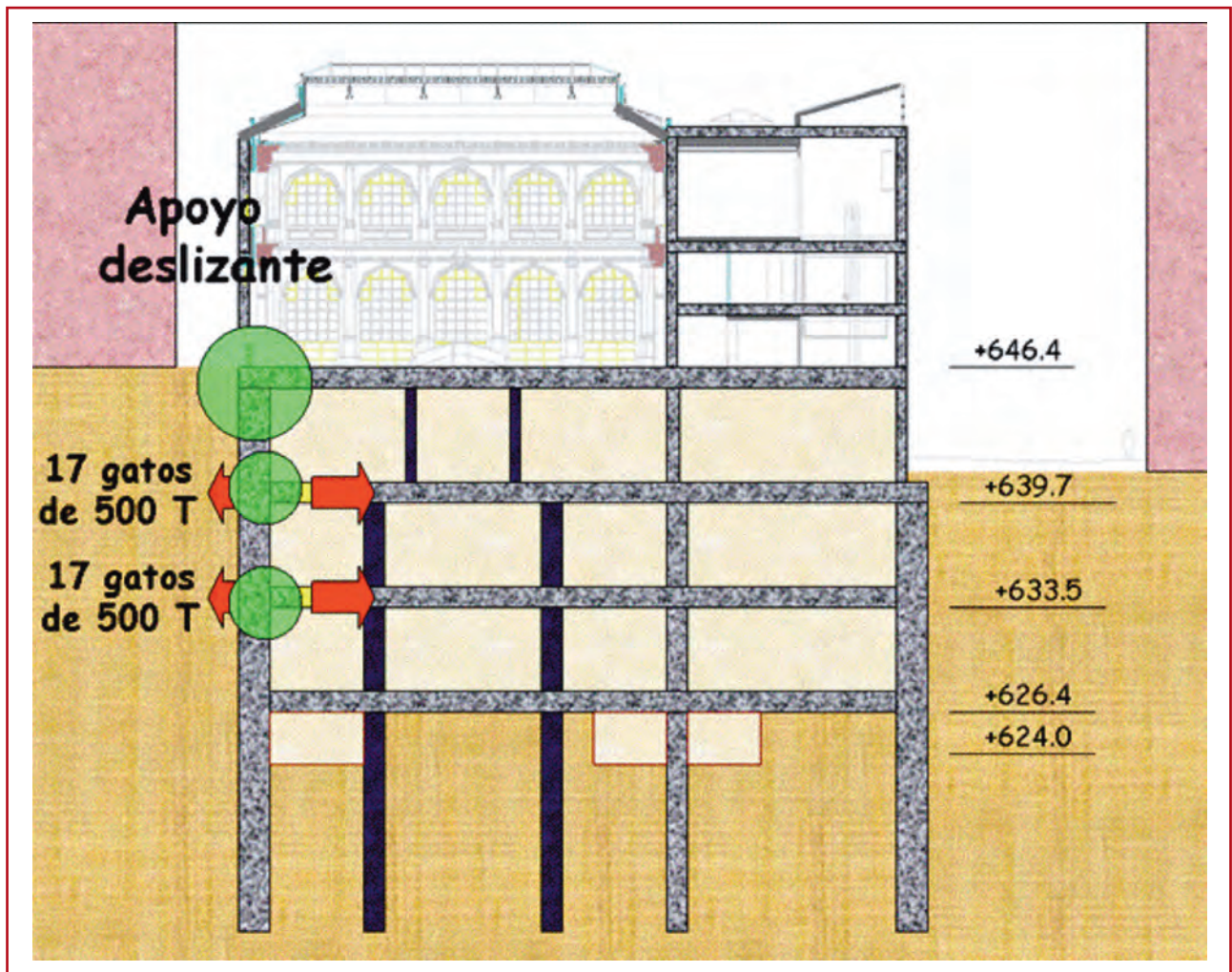
Por último, en el tercer y último informe se analizaba la posibilidad de variar las reacciones de la pantalla sobre los forjados en función de los resultados obtenidos en el seguimiento instrumentalizado. La finalidad de esta medida era asegurar, en cualquier caso y frente a posibles eventualidades, niveles de movimiento acomodados a los de deformación más estrictos que pudieran admitirse. El objeto era el análisis del muro pantalla considerando la presencia de apoyos activos a nivel de los forjados previstos, que permitían limitar los movimientos máximos de la pantalla.



Colocación de jaulas de armadura en la pantalla contigua a los Jerónimos.



Localización de gatos.



3.2. Condicionantes

La zona del Claustro tenía un condicionante fundamental: el vaciado se situaba tan sólo a una distancia de unos 4 m de la cimentación de la Iglesia de los Jerónimos.

Por otra parte, es de señalar el gran desnivel existente entre la calle Casado del Alisal (cota variable entre 640 y 643) y la Iglesia de los Jerónimos (cota 646).

Los informes previos ponían de manifiesto la elevada sensibilidad de la iglesia a los movimientos, tanto horizontales como verticales, provocados por la excavación. Por este motivo, entre las diversas alternativas de contención que se estudiaron; ejecución de pantallas continuas de hormigón o refuerzo del terreno mediante tratamientos

de inyecciones armadas, se optó por la primera alternativa por ser la que permitía un mejor control de los daños durante la construcción.

3.3. Estructura bajo rasante

Geometría

La zona del Claustro presenta en planta una geometría prácticamente cuadrada de unos 47x40 m². El proyecto planteaba la construcción de tres sótanos situados a las cotas; 640, 634 y 627 y una galería de instalaciones a cota 624. Al encontrarse la plataforma de la iglesia a la cota 646, la pantalla adyacente a la iglesia y la más pró-



xima al edificio de las dependencias parroquiales situado al noreste de la parcela, se iniciaron desde dicha cota y la pantalla más próxima a la calle Casado del Alisal, y a la calle Ruiz de Alarcón así como todas las pantallas interiores del recinto del Claustro se ejecutaron desde la cota 640, dejando las pantallas ya construidas funcionando con 6 m en voladizo. La máxima excavación de vaciado en la zona del claustro tenía unos 22 m de profundidad.

Contención de tierras

La magnitud de los empujes a transmitir y la limitación de las deformaciones por la presencia de la iglesia, requerían que la pantalla de contención tuviera una rigidez muy superior a la que podía lograrse con una pantalla de espesor uniforme. Esto motivó la adopción de una geometría especial, con módulos en forma de T, en la zona adyacente a la iglesia y en el lado opuesto. Finalmente, la geometría adoptada por criterios estructurales fue integrada en el proyecto de arquitectura.

La pantalla se proyectó para trabajar como una gran viga continua apoyada horizontalmente en los forjados y transmitir los esfuerzos producidos por los empujes del terreno tanto a las pantallas longitudinales, (paralelas a la calle Ruiz de Alarcón), como a la pantalla de fondo, (paralela a la calle Casado de Alisal).

La geometría definitiva tuvo que sufrir alguna modificación con respecto a la definida en proyecto, adecuándose a las dimensiones de las cucharas disponibles. La pantalla se ejecutó mediante bataches de 2,75 m de ancho y 0,80 m de espesor. Cada batache debía tener forma de T y el alma de dicha T se definió sólo con 2,00 m de canto; como la cuchara empleada para la ejecución de alas y alma de la T era la misma, en cada alma de la T se hacía una sobreexcavación de 0,75 m. Este exceso de geometría se resolvió armando el batache con las dimensiones de proyecto y colocando un tablero fenólico sujeto a la jaula de armadura, que separaba la zona innecesaria. Durante la fase de excavación se eliminaba el tacón de 0,75 m sobrante.

La ejecución de este tipo de pantallas, (con bataches en forma de T), de uso poco frecuente en España, oca-

sionó multitud de problemas, debido a los riesgos de desprendimiento del terreno en los encuentros de las dos mordidas (una perpendicular a la otra) de la cuchara perforadora, y a la hora de introducir la jaula de ferralla de más de 200 kN en una perforación de 32 m de profundidad. Por otra parte, las pantallas iban fuertemente armadas; en el extremo del alma de la T podían encontrarse hasta 24 barras de $\varnothing 32$.

Para no incrementar la densidad de armaduras en las zonas de solape de barras verticales, se utilizaron manguitos roscados de acero. El izado de las armaduras de los bataches se realizó mediante de una grúa de cadenas de 5000 kN de capacidad. La grúa debía ser capaz, con la utilización simultánea de dos cabrestantes, de izar la jaula sin dañarla, trasladarse con ella hasta la perforación realizada por la cuchara, e introducir la jaula con precisión.

Las pantallas de los otros dos lados, es decir, el paralelo a la calle Ruiz de Alarcón y su opuesto, se ejecutaron con módulos de canto constante de 0,80 m.

Para la contención del terreno durante la ejecución de la pantalla se utilizaron lodos tixotrópicos. Su empleo se recomendaba en los informes previos ya que de este modo se garantizaba la contención de las paredes de la excavación frente a posibles inestabilidades, se limitaba la degradación y la variación del contenido de humedad del terreno adyacente y se minimizaba la relajación del estado tensional del terreno, lo que podía ocasionar movimientos del mismo.

Sistema de arriostamiento

En los informes previos se analizaron diferentes técnicas de arriostamiento de las pantallas de contención; mediante elementos de anclaje, apuntalamientos provisionales o adopción de la técnica de construcción descendente, utilizando los propios forjados de la nueva estructura.

La primera alternativa; anclajes, no se consideró conveniente como consecuencia de la magnitud de los esfuerzos y porque los bulbos de anclaje debían pasar bajo la cimentación de la iglesia, pudiendo provocar movimientos en la misma e incluso problemas de carácter legal.



La segunda alternativa; apuntalamientos metálicos provisionales contra la pantalla opuesta, se desestimó porque la distancia existente entre ambas pantallas, unos 37 m, y el elevado valor de los empujes, producirían unas deformaciones de los elementos de arriostramiento que obligarían a introducir elementos "activos" para corregir paulatinamente los movimientos durante el proceso de ejecución. Esta opción también se descartó por motivos constructivos y económicos.

La alternativa finalmente elegida para la ejecución de la zona del claustro consistió en la utilización de los propios forjados como elementos de arriostramiento entre pantallas de contención. Esto obligó a utilizar el sistema descendente como proceso constructivo, aunque finalmente, para acelerar la obra, se ejecutó la zona del claustro con un método ascendente-descendente.

La elección de este sistema de arriostramiento presentaba la ventaja de permitir compensar, al menos en parte, los empujes del terreno. Sin embargo, debido a la magnitud de los esfuerzos que debían soportar las losas, las deformaciones elásticas, de fluencia y de retracción en el hormigón se estimaron del orden de unos 3 cm. Para minimizar estos movimientos y los asientos del terreno y de la iglesia asociados a ellos, se diseñó un sistema de compensación de deformaciones mediante gatos hidráulicos.

El apoyo de las pantallas en las losas de las plantas 640 y 634 se realizó a través de 17 gatos activos de 5000 kN, en cada una de ellas, enfrentados a las almas de los bataches en T, contiguos a la iglesia.

Para acelerar el proceso mientras se realizaba la excavación bajo las losas, con los gatos actuando, se iniciaron los forjados sobre rasante. Como consecuencia de los movimientos producidos por la acción de los gatos, los apoyos de las losas 643 y 646, en la pantalla límite con los Jerónimos, se tuvieron que diseñar deslizantes, para permitir los movimientos de compensación.

Sistemas de conexión y apoyo de forjados

Los forjados situados bajo rasante en la Zona de Claustro comparten tipología estructural a base de losas

macizas de canto constante, de 0,40 m de espesor, apoyadas perimetralmente en las pantallas de contención, e interiormente en módulos de pantalla de 0,80 m de canto y en pilas-pilote de 1 m de diámetro.

La conexión entre losas y pantallas presenta diferentes tipologías en función de la zona;

- En la pantalla en T contigua a la iglesia la conexión se ejecutó por medio de unas vigas de hormigón unidas a las almas de la pantalla mediante pernos conectadores.
En estas vigas apoyaban las losas de planta, dejando una junta entre viga y losa. Para materializar dicha junta en cada viga se colocaron dos pasadores deslizantes que servían de apoyo a la losa, (transmitían carga vertical), y liberaban el movimiento en la dirección de su eje, permitiendo la actuación de los gatos.
- En la pantalla en T junto a la calle Casado del Alisal la conexión se realizó con pasadores anclados con resina en las almas y en la cabeza de la pantalla, y mediante pernos conectadores en los extremos de las almas de la pantalla.
- En el resto de pantallas perimetrales, de espesor constante, la conexión se ejecutó de modo convencional, mediante pasadores anclados con resina.
- En los módulos de pantalla interiores la conexión se realizó por medio de barras pasantes, ancladas con resina.
- La unión entre losas y pilas-pilote también se ejecutó con pernos conectadores. En las pilas-pilote se dejaron embebidas unas chapas con pernos soldados en su interior y, en el momento de hormigonar cada losa, se colocaron pernos conectadores por el exterior para formalizar la conexión.

Proceso constructivo

En primer lugar, tras las excavaciones arqueológicas practicadas para recuperar los restos del claustro primitivo, se realizó una excavación general de 1,00 m para crear la primera plataforma de trabajo.





Vista general tras la ejecución de la pantalla contigua a la iglesia.

Desde dicha cota (645,50) se ejecutaron las pantallas más próximas a la Iglesia de los Jerónimos y al edificio de las dependencias parroquiales situado al noreste de la parcela.

A continuación se excavó hasta la cota 639,50, dejando las pantallas ya construidas en voladizo. Desde esta nueva plataforma se construyó la pantalla más próxima a la Calle Casado del Alisal, y a la Calle Ruiz de Alarcón, así como todas las pantallas interiores del recinto del Claustro.

También desde esta cota se ejecutaron las pilas-pilote que sirven de soporte a las losas inferiores de la Zona de Claustro.

Como fase previa a la ejecución de las losas y como datos de seguimiento para la auscultación de movimientos de las pantallas, se dispusieron bases de control en coronación de las mismas, efectuándose un registro, durante esta primera fase, de las deformaciones en éstas y del terreno para compararlas con los valores teóricos estimados y determinar parámetros más ajustados al comportamiento real.

En primer lugar se procedió al hormigonado de la losa de primer sótano, la del nivel 640. Para ello se realizó una excavación hasta la cota 639,65, se procedió al compactado y nivelado de terreno a dicha cota, con un error

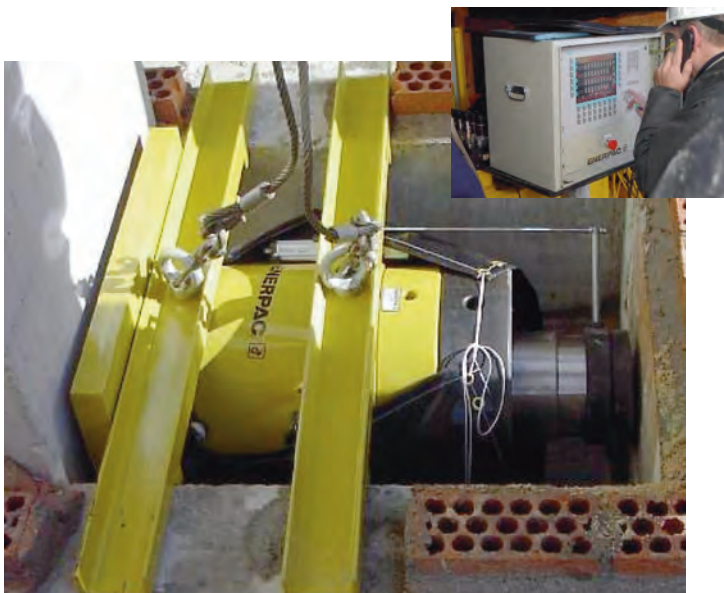
máximo de nivelación en el total de la losa inferior a 1 cm. Sobre el terreno compactado y nivelado en las condiciones anteriores, se colocaron unos rastreles de madera y se nivelaron, a continuación se vertió mortero entre los mismos y posteriormente se colocó una lámina de polietileno y un tablero fenólico de 18 mm, clavado a los rastreles.

Junto a la pantalla paralela a la Iglesia se dejaron los huecos necesarios para la posterior colocación de los gatos de empuje.

Una vez hormigonada la losa, cuando el hormigón adquirió una resistencia de 20-25 N/mm², se procedió al montaje y puesta en carga de los gatos correspondientes a esta planta (17 gatos activos de 5000 kN). Todos los gatos eran controlados por una sola central donde se podía conocer, en tiempo real, la fuerza actuante y el desplazamiento de cada uno de los cilindros, pudiendo actuar y controlar los gatos de manera individual o por grupos, tanto para la medición de los parámetros como para aplicar activamente las cargas o los desplazamientos requeridos.

Cada gato hidráulico empleado tenía una carrera (posibilidad de desplazamiento del cilindro) de 100 mm. Cada cilindro hidráulico disponía de un transductor para medir la posición del pistón y una sileta giratoria inclina-





Detalle de colocación gatos hidráulicos y central de control.

ble para compensar las fuerzas radiales provocadas por cargas no centradas. En cada grupo de 17 cilindros hidráulicos había seis equipados con células dinamométricas para la medición de la carga aplicada, con una precisión del 0,1%.

Los 34 cilindros del sistema podían sincronizarse mediante la medición de la carrera del pistón o con la de la carga del mismo (en el caso de ser un gato con célula), y se controlaban mediante un ordenador con pantalla táctil. La pantalla mostraba en tiempo real las carreras totales, las carreras relativas y las cargas de cada cilindro. Existían alarmas para señalar si la carrera de algún cilindro alcanzaba un nivel prefijado (umbrales).

El proceso de puesta en carga se realizó en cuatro escalones, hasta llegar al 20 % de la máxima carga prevista (1000 kN), realizando un seguimiento de los desplazamientos absolutos de la pantalla y de los relativos pantalla-losa, comparándolos con los teóricos.

Comenzó la excavación bajo la losa de la 640 manteniendo una berma, junto a la pantalla de la iglesia, a la vez que se iniciaba la construcción de los muros y pilares que arrancaban sobre ella. Simultáneamente se controlaban los gatos y se hacían ajustes en la carga de los mismos, en caso de necesidad.

Para permitir la ejecución del claustro en sentido ascendente y mantener una junta provisional que permitiera

a los gatos permanecer activos y actuar en cualquier momento de la obra antes de su retirada definitiva, fue necesario definir juntas deslizantes en los apoyos de las losas 643 y 646 con la pantalla adyacente a la iglesia de Los Jerónimos.

Alcanzada la resistencia de proyecto (30 N/mm²) se inició la segunda fase de puesta en carga de los gatos, aumentando, progresivamente, su carga en cuatro escalones hasta llegar al 60 % del valor máximo (3000 kN). Finalmente se terminó la excavación bajo la losa, hasta el nivel 633,50, retirando la berma y ajustando la carga hasta el 90 % del total (4500 kN), y comprobando, al mismo tiempo, los desplazamientos absolutos y relativos para compararlos con los teóricos.

A continuación se hormigonó la losa correspondiente a la cota 634, efectuándose las operaciones de curado y ubicación de los gatos similares a las realizadas en el forjado anterior. Alcanzada la resistencia prevista de 20-25 N/mm², se produjo un primer escalón de carga, el 20 % de la máxima (1000 kN), ajustándose seguidamente la carga de los gatos de la planta 640 al 90 % del total, y comenzando la excavación bajo la losa del nivel 634, manteniendo una berma junto a la pantalla y controlando en todo momento los desplazamientos.

Cuando se alcanzó la resistencia de proyecto (30 N/mm²), comenzó la segunda fase de puesta en carga, aumentándola hasta llegar al 60 % de la máxima (3000 kN), y ajustando la 640 al 80 % (4000 kN). Posteriormente, tras comprobar los desplazamientos, se terminó la excavación bajo la losa hasta el nivel 626, ajustándose la carga de la losa 634 hasta el 90 % y realizando los ajustes necesarios en la 640 para garantizar un valor del 80 % (4000 kN).

La última fase del proceso constructivo bajo rasante fue el hormigonado de la losa de fondo. Tras la ejecución de dicha losa se realizaron las galerías de instalaciones, controlándose en todo momento la carga de los gatos y los desplazamientos, hasta proceder a su eliminación.

La retirada definitiva de los gatos hidráulicos se realizó aproximadamente un año después de su colocación.

Se diseñó una retirada escalonada de los gatos; uno de cada cuatro del nivel 640 y uno de cada cuatro del nivel 634, según un sencillo protocolo. Antes de quitar los





Colocación de rastreles para hormigonado de losa de cota 634.



+ 640.1

+ 634.0

+ 626.7

Excavación en mina bajo la losa de cota 634.



Excavación en mina bajo la losa de cota 640.



primeros gatos se aumentaba la carga de los restantes hasta los 4500 kN por gato, se suprimían los que marcaba el procedimiento, y se controlaban los movimientos durante los siguientes dos días. A continuación se realizaba el hormigonado de los huecos donde habían estado alojados los gatos.

Tras la limpieza de la junta entre la losa y la zona de contrafuertes se comprobó que ésta no se había abierto lo suficiente como para inyectarla y bloquearla con lechada. A este hecho contribuyeron todas las medidas tendentes a minimizar en lo posible la retracción de las losas, tomadas durante la realización de las obras.

Instrumentación y control de ejecución

En el año 2002 el CEDEX elabora un Informe Técnico de Instrumentación de las obras de Ampliación del Museo del Prado junto a la Iglesia de los Jerónimos. En dicho

informe se define el plan de instrumentación de la iglesia y la pantalla contigua y se establecen los umbrales de riesgo en base a los cuales realizar o no actuaciones especiales.

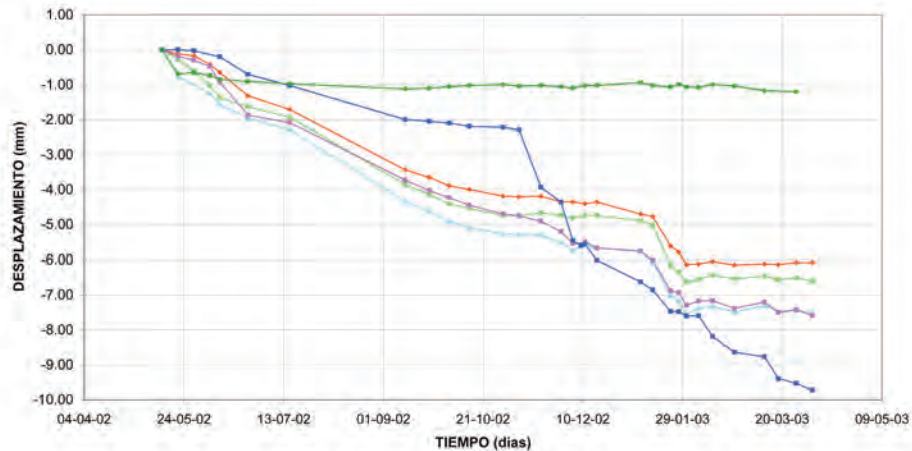
Como se ha comentado anteriormente, antes del comienzo de las obras se tomaron algunas medidas para evaluar la precisión de los instrumentos de medida y detectar posibles movimientos ajenos a la ejecución, como por ejemplo las deformaciones debidas a efectos térmicos.

La instrumentación utilizada se puede dividir en dos tipos de elementos; los dispuestos en la Iglesia de los Jerónimos y los colocados en la pantalla o junto a la excavación adyacente a la misma.

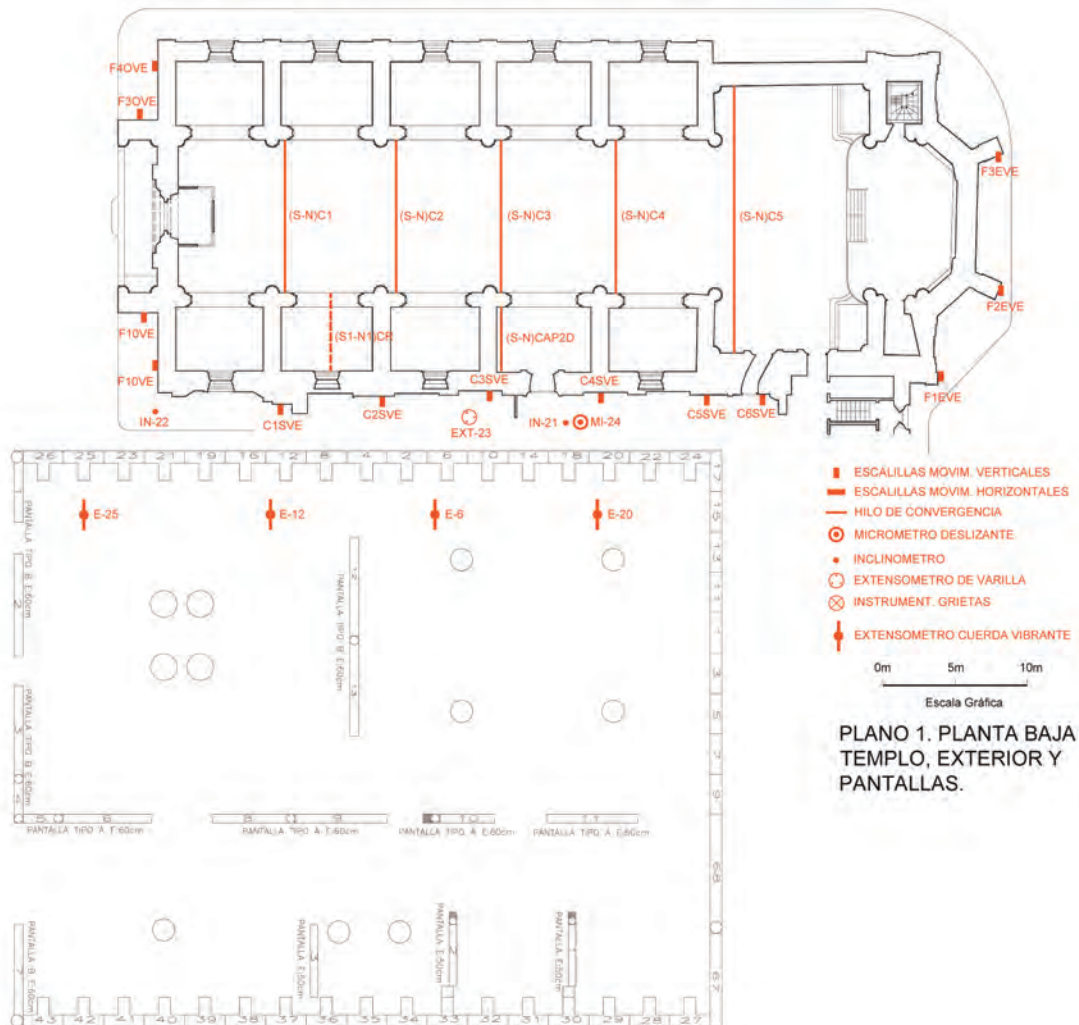
En la iglesia se consideró necesario controlar: convergencias con registro continuo, convergencias manuales, control de fisuras manuales, movimientos verticales y horizontales con topografía en coro y corredores, control exterior con topografía, temperatura y humedad.



CONTROL DE CONVERGENCIAS. INTERIOR DE LA IGLESIA. NAVE CENTAL. VALOR + ACORTAMIENTO. VALOR - ALARGAMIENTO



(S-N)C1 (S-N)C2 (S-N)C3 (S-N)C4 (S-N)C5 (S-N)CAP2D



Gráficos para seguimiento de la instrumentación de control y esquema de localización.

Tanto en el interior como en el exterior de la iglesia se colocaron escalillas para el control de movimientos verticales, su lectura se realizaba mediante nivelación de precisión. Para el seguimiento de movimientos horizontales también se emplearon escalillas en las que la lectura se efectuaba con una plomada óptica. La medida manual y automatizada de convergencias se hizo con hilos de ínvar, colocados en distintas zonas del interior de la iglesia. También se dispusieron equipos para medida de apertura de fisuras en nueve grietas localizadas en el interior de la iglesia. Por último, para el control de la temperatura se colocaron termómetros e higrómetros para el de la humedad.

En el exterior de la iglesia se dispusieron; inclinómetros para controlar los cambios de inclinación en sondeos (se pusieron 2 de 45 m entre pantalla e iglesia, 6 en la pantalla contigua a la iglesia y 2 en la pantalla opuesta), extensómetros de varillas manuales para medir movimientos relativos entre la boca de un sondeo y varios puntos situados en el interior, anclados solidariamente al terreno (se colocaron 1 de 3 puntos entre pantalla e iglesia, 2 inclinados de 3 puntos y de 30 m y 2 en pilotes para control de levantamiento de fondo), trivec o micrómetro deslizante para determinar desplazamientos verticales en sondeos y control topográfico.

Los datos proporcionados por la instrumentación se recogían en forma de tablas y gráficos, en los que siempre se reflejaban los niveles de alarma establecidos para una apreciación más clara de los rangos de las lecturas.

En el informe del CEDEX se estableció un protocolo con la frecuencia de lecturas a realizar para cada uno de los equipos en cada una de las fases de la obra, (durante la ejecución de las pantallas contiguas a la iglesia, en fase de excavación y a lo largo de la obra). No obstante, se dejaba abierta la posibilidad de modificar las pautas inicialmente previstas en función de la evolución de las medidas.

Para cada tipo de lecturas se definió un rango de valores, identificado mediante colores, que representaba el umbral de riesgo o una situación de alarma creciente:

Verde: Valores que no señalaban una situación de riesgo.

Ámbar: Registros de una cierta entidad, que exigían tomar medidas previas según un plan de actuación previamente desarrollado.

Rojo: Registros próximos a los valores considerados como límites en el estudio, que exigían tomar medidas definidas en el plan de actuación previamente desarrollado.

Es de destacar el buen funcionamiento del sistema de instrumentación y control dispuesto, así como los buenos resultados obtenidos a lo largo del proceso de seguimiento, que concluyó con la ejecución de la Zona de Claustro sin causar apenas afección a la Iglesia de los Jerónimos.

3.4. Estructura sobre rasante

Descripción

En la Zona de Claustro, sobre rasante, se levantan cuatro plantas, situadas a cotas 646,50, 649,98, 654,16 y 656,47 y la cubierta a la cota 659,71, dejando el claustro propiamente dicho, diáfano desde su arranque, a cota 646, hasta cubierta.

Como se ha comentado anteriormente, durante el proceso constructivo y para no retrasar los trabajos, se simultaneo la construcción descendente con la ascendente. Para ello fue necesario estudiar y modificar los detalles de conexión entre la pantalla adyacente a la Iglesia de Los Jerónimos, la entreplanta 643 y la planta 646, transformándolos en apoyos deslizantes que evitaran la aparición de coacciones no deseadas que pudieran interferir con la actuación de los gatos activos situados en las plantas de sótano, independientemente de la construcción de las plantas sobre rasante.

La planta situada a cota 646 coincide con el nivel de la iglesia y del antiguo claustro. Estructuralmente la tipología de esta planta está constituida por una losa de 0,45 m de canto, apoyada perimetralmente en las pantallas de contención que delimitan la zona del claustro y/o en muros que arrancan sobre dichas pantallas. Interiormente la losa se apoya en la linterna y en módulos de pantalla.





Estructura sobre rasante.

Sobre esta planta arrancan muros y pilares metálicos que sirven de apoyo a las plantas superiores.

En el centro de la losa, que coincide con la posición del antiguo claustro, se abre un hueco de $6 \times 6 \text{ m}^2$ en el que muere la estructura de la linterna. En el borde de dicho hueco terminan unos pilaretes metálicos de sección rectangular y dimensiones $300 \times 60 \text{ mm}$ que arrancan en la losa de la cota 640 y soportan las cargas correspondientes de la losa de la 646.

La siguiente planta sobre rasante está situada a la cota 649, realmente es una entreplanta porque no abarca la superficie total, sino que se extiende en el espacio exterior que envuelve al antiguo Claustro. Se trata de una losa de $0,40 \text{ m}$ de canto que discurre entre uno de los extremos de la camisa y la calle Casado del Alisal. Está apoyada perimetralmente en muros y en tiran-

tes metálicos que cuelgan de la planta inmediatamente superior.

A continuación se encuentra la planta de cota 654, al igual que la planta anterior tampoco ocupa la superficie total, abarcando sólo el espacio exterior al claustro. Se trata de una losa de $0,40 \text{ m}$ de canto que discurre entre uno de los extremos de la camisa y la calle Casado del Alisal. Perimetralmente está apoyada en el muro de la camisa del claustro y en algún muro de fachada, e interiormente en pilares de hormigón y muros. Como se ha comentado anteriormente, de esta planta cuelga parte de la planta inferior, mediante unos tirantes constituidos por barras tipo Dywidag de 32 mm , tesados a 90 y 60 kN y enfundadas en vainas de 65 mm de diámetro, que posteriormente se rellenaron con mortero de inyección.





Lucernario de la cubierta del claustro.

Sobre esta planta también nacen pilares metálicos que sirven de apoyo al altillo de restauración, situado a la cota 656; y constituido por una losa de reducidas dimensiones en planta y de canto 0,15 ó 0,30 m, según las zonas.

La planta de cubierta está situada a la cota 659. Se distinguen dos zonas; la parte que cubre el claustro, propiamente dicho, y la parte exterior. La cubierta del claustro está constituida por un gran lucernario acristalado apoyado en cuatro vigas metálicas armadas en forma de Y, que salvan una luz de unos

17,50 m y están separadas entre sí 3,60 m. Estas vigas descansan en una viga-anillo perimetral de hormigón armado.

La parte de cubierta exterior a la camisa está constituida por una losa maciza de 0,40 m de canto constante, apoyada tanto perimetralmente como interiormente en muros.

En la estructura sobre rasante existen dos elementos que por su significación arquitectónica y estructural merecen una consideración específica: la linterna y la camisa del claustro.





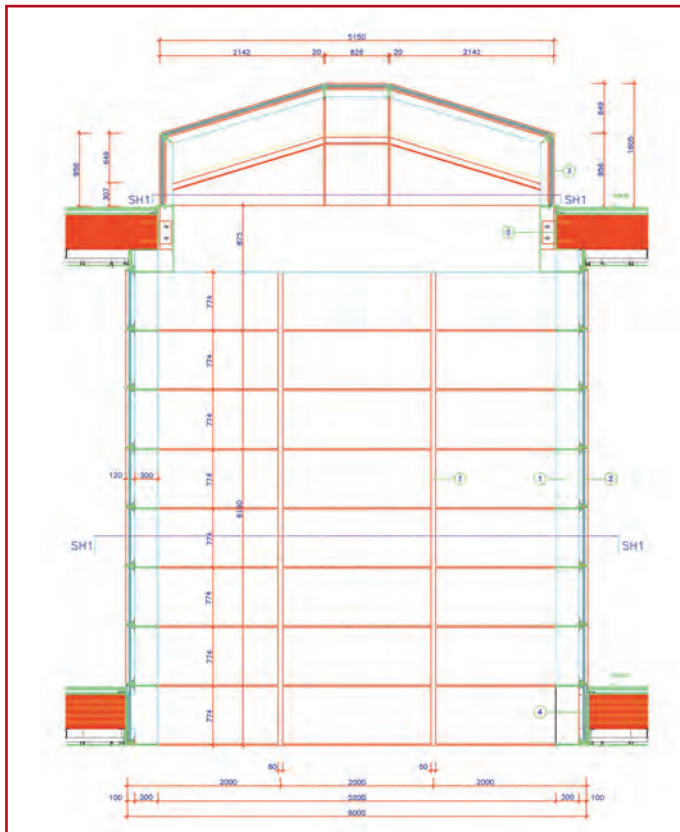
Estructura de la linterna.

Linterna

La linterna es una estructura singular constituida por acero y forrada de vidrio, que se sitúa en el centro del antiguo claustro, entre las losas de las cotas 640 y 646. En ambas losas se ha dispuesto un hueco de $6 \times 6 \text{ m}^2$ en la zona central donde se aloja esta estructura, que sirve de apoyo a la losa superior y permite el paso de luz natural desde el lucernario de cubierta hasta la losa de la planta 634, ya que, como se comentó anteriormente, el interior del claustro es diáfano entre cubierta y la planta 646.

El apoyo central de la losa de la planta 646 se realiza en 8 pilaretes metálicos de la estructura de la linterna, de dimensiones $300 \times 60 \text{ mm}$ y unos 6 m de altura, que arrancan del borde del hueco de la planta 640. La linterna se encarga de transmitir parte de la carga de la losa 646 al zuncho perimetral del hueco de $6 \times 6 \text{ m}^2$ de la losa 640, que a su vez la transmite a 4 pilas pilote que mueren en ella. Los pilaretes metálicos de la linterna están soldados en su arranque a una chapa de 15 mm de espesor recibida en el canto perimetral del hueco y están arriostrados horizontalmente mediante pletinas metálicas de 300×20





Linterna (Sección).

mm separadas cada 774 mm, creando unos marcos rígidos horizontales que impiden su pandeo.

La principal singularidad de esta estructura es que va terminada en vidrio, por lo que ha sido necesario disponer elementos que eviten una posible rotura de este material ocasionada por la transmisión de movimientos estructurales.

Camisa del Claustro

En la misma posición ocupada por el antiguo claustro, el proyecto contemplaba la reconstrucción de la cantería conservada y restaurada y, como contenedor de la misma, el levantamiento de una serie de muros que la revisten hacia el exterior y sirven de apoyo a la cubierta, con amplio lucernario, que cierra el nuevo claustro y lo protege, convirtiéndolo en la pieza central en torno a la que se desarrolla toda la estructura de las obras de ampliación. Este contenedor es el que se denomina "camisa" del claustro.

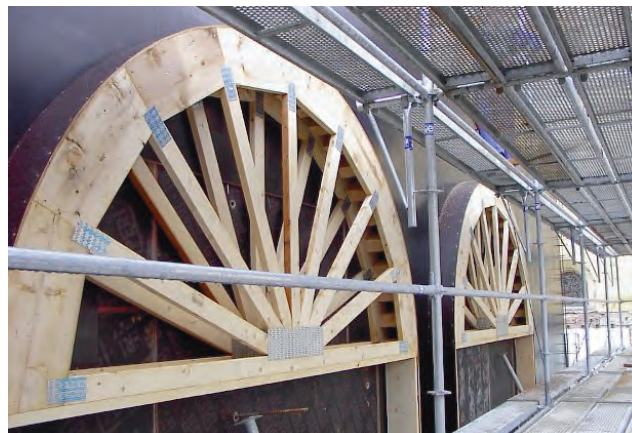
Estos muros de hormigón reproducen la geometría en alzado del claustro, incluidos los arcos. El espectador desde el interior es incapaz de percibir la existencia de dichos muros, ya que quedan ocultos por la estructura de piedra del antiguo Claustro de los Jerónimos.

El muro-forro tiene un espesor variable, entre 15 y 35 cm, y una geometría muy compleja que reproduce las arcadas de piedra, con molduras y resaltos. El armado resulta sumamente complicado por la densidad de barras en zonas de cargaderos y la concentración de armaduras de refuerzo en los machones. Además el muro de hormigón es visto por el exterior y de color, esto agravado con los numerosos cambios de espesor, y la presencia de elementos de sección muy reducida. Se decidió realizarlo con hormigón autocompactante y aditivos colorantes y antiflorescentes.

La camisa se ejecutó antes de proceder al montaje de los sillares del claustro ya que ambos quedaban separados por escasos centímetros que impedían la colocación de un encofrado por la cara interior de la camisa, con las piedras



Detalle de encofrado y ferrallado de la camisa de claustro.



Detalle de encofrado de arcadas de la camisa de claustro.



ya puestas. El replanteo del muro requería gran precisión, por este motivo se diseñó el muro con datos fotogramétricos tomados antes del desmontaje de la cantería original. Antes de comenzar las obras, para corregir posibles diferencias de nivel en los arranques y marcar las diagonales de la planta cuadrada, se realizó un premontaje de las dos primeras hiladas en una nave ajena a las obras. Finalmente el claustro quedó reconstruido exactamente en su posición original tanto en planta como en cota de nivel.

El proceso de ejecución de la camisa del claustro, su curado y desencofrado se estudiaron cuidadosamente para reducir al máximo la posibilidad de aparición de juntas y fisuras de retracción.

El encofrado se realizó con paneles metálicos forrados por el interior con tableros fenólicos. Las presiones ejercidas por el hormigón autocompactante sobre el encofrado

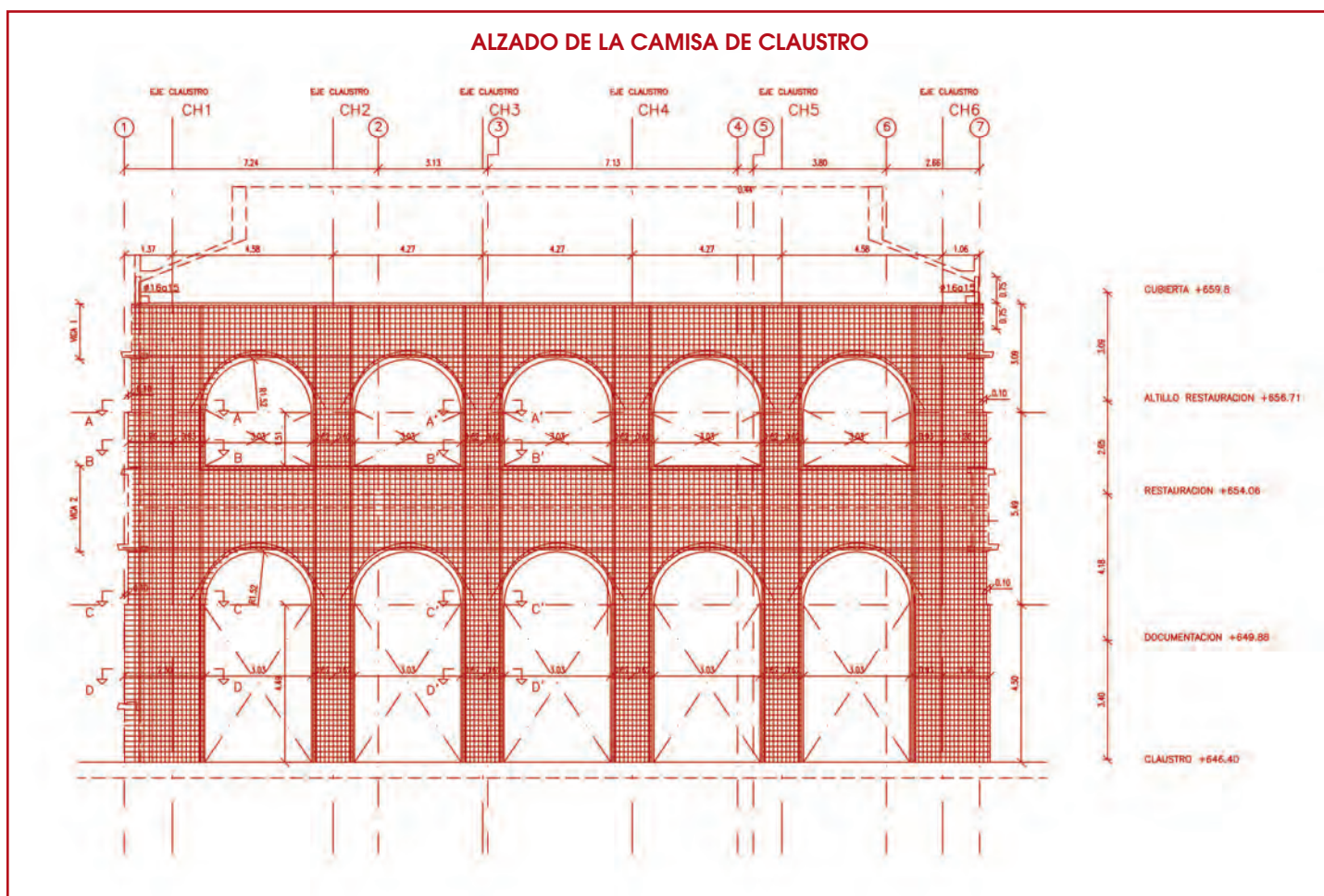
eran muy altas en primera fase, (tramo de 7.26 m altura), debido a la mayor liquidez y densidad de este hormigón.

Para cuidar al máximo la junta madera-madera de los encofrados, los cortes de los tableros fenólicos se hicieron en un taller de ebanistería excepto en las zonas en contacto con los forjados y los muros que se ejecutaron en obra por una cuadrilla de ebanistas.

El encofrado se completaba con cimbra en los huecos de pasos y ventanas, a base de arcos portantes en estructura de madera. Todos los arcos fueron forrados de tablero contrachapado fenólico.

La parte inferior de los encofrados se selló con silicona para evitar que la posible pérdida de lechada produjera coqueas en la parte inferior del muro.

El ferrallado del muro se inició una vez terminada la colocación del tablero fenólico de la cara exterior y los arcos.





Vista del interior del claustro terminado, con el lucernario de cubierta.

El proceso de armado se realizó de manera muy cuidadosa para evitar arañazos en el tablero fenólico.

Para conseguir la mayor uniformidad posible de color entre los sucesivos hormigonados, se ordenó a la planta de hormigón que procediera a acopiar todos los áridos necesarios para el volumen total, antes de realizar el hormigonado de la primera fase.

El hormigón se realizó con cemento blanco (para llegar al color deseado más fácilmente), lo que obligó a controlar estrictamente el tiempo de espera de los camiones hormigonera para evitar el endurecimiento excesivo del hormigón, debido al mayor poder calorífico de este cemento.

El hormigón se colocó mediante bombeo debido a la utilización de hormigón autocompactante y para evitar la aparición de juntas no deseadas en el hormigón visto. Aunque el uso de hormigón autocompactante resultaba ideal para rellenar perfectamente zonas de alta densidad de armado debido a su elevada fluidez y cohesión, el bombeo tenía el riesgo de producir segregaciones en el inicio del hormigonado y cada vez que se cambiaba de camión

hormigonera. Para evitar riesgos se realizó un vibrado de superficie y, además, se vertía fuera del encofrado el inicio de cada hormigonera. Por otra parte, para evitar problemas debidos a la altura de vertido del hormigón, se utilizaron tubos de PVC similares a los tubos "tremie" utilizados en el hormigonado de los muros de contención.

El tiempo de curado del hormigón es de 28 días. Se regaba cada día a primera hora de la mañana, al mediodía y a última hora de la tarde. No se aplicaba presión a la manguera y se vertía directamente el agua sobre el hormigón, con un ángulo de 45°, desde la parte superior del muro hasta la parte inferior.

Una vez terminado el hormigonado de la camisa del claustro se procedió a ejecutar el recercado de los arcos, mediante un encofrado de madera de una sola puesta, ya que al desencofrar era necesario destrozarlo por completo. El hormigonado se realizaba mediante unas canaletas de madera que vertían el hormigón por un agujero del encofrado en la clave del arco. Para asegurar la salida del aire se hicieron unas pequeñas ventanas en las jambas y en los umbrales. ♦

