

Aplicación del postesado en estructuras de edificación singular

Post-tensioning systems in distinctive buildings

Jesús Jiménez Cañas⁽¹⁾, Alejandro Bernabeu Larena⁽²⁾ y Roberto Duque Corroto⁽¹⁾

Recibido | *Received*: 16-12-2008
Aceptado | *Accepted*: 18-03-2009

En recuerdo de Antonio Gimeno, que nos transmitió generosamente su conocimiento y su pasión por las estructuras y el postesado.

Resumen

Las estructuras de edificación singular deben ser capaces de compaginar adecuadamente la escala y la particularidad que la gran magnitud de los esfuerzos y la complejidad de los sistemas estructurales específicos puestos en juego requieren, con los requisitos, características y necesidades propias de la condición intrínseca de la escala de la edificación.

Los sistemas de postesado ofrecen posibilidades sugerentes y eficaces con las que conciliar esta doble naturaleza, permitiendo conjugar y resolver adecuadamente las problemáticas y requisitos procedentes de ambos mundos.

El presente artículo analiza la aplicación del postesado en tres estructuras singulares de edificación de reciente desarrollo y construcción: el teatro y auditorio municipal de Torreveja, el nuevo edificio de juzgados de Ciudad Real y el edificio de Caixaforum Madrid.

A partir de este estudio se busca valorar la aplicación del postesado en las estructuras de edificación singular, apuntando una serie de pautas y criterios que sirvan de orientación y reflexión en el diseño de estas soluciones estructurales en el campo específico de la edificación singular.

Palabras clave: Postesado, edificación singular, muro postesado, losa postesada, losa en voladizo postesada, Caixaforum Madrid, Auditorio Torreveja, Juzgados Ciudad Real.

Abstract

Along with the particularities stemming from the magnitude of structural system stress and complexity, distinctive buildings (understood to be those that entail complexities whose solution calls for unconventional or innovative solutions) should be able to accommodate the requisites, characteristics and needs intrinsic to the scale of the undertaking.

With their suggestive and effective ability to meet these dual demands, post-tensioning systems can suitably combine and solve the problems posed by both worlds.

* *An extensive English language summary of the present article is provided on page 109 of this issue both for the convenience of non-Spanish-speaking readers and inclusion in databases.*

(1) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. NB35 Ingeniería (Madrid, España).

(2) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. NB35 Ingeniería (Madrid, España).

Persona de contacto / *Corresponding author*: abernabeu@nb35.es

The present article analyzes the application of post-tensioning to three recently erected distinctive buildings: the municipal theatre and auditorium at Torre Vieja, the new headquarters for the courts of law at Ciudad Real and the Caixaforum building in Madrid.

In addition, the paper evaluates the application of post-tensioning in distinctive structures, discussing a series of guidelines and criteria to be considered in the design of such structural solutions geared specifically to distinctive buildings.

Keywords: *post-tensioning, distinctive buildings, post-tensioned wall, post-tensioned slab, post-tensioned cantilevered slab, Caixaforum Madrid, auditorium at Torre Vieja, courts of law at Ciudad Real.*

1. INTRODUCCIÓN. EL POSTESADO EN ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN SINGULAR

La utilización de sistemas postesados en edificación en España es en general, y contrariamente a lo que ocurre en otros países como Estados Unidos, Australia, Francia o Alemania, poco significativa desde un punto de vista cuantitativo [1].

Esta situación tiene difícil explicación si consideramos las ventajas constructivas y las posibilidades de optimización económica que bien aplicados estos sistemas ofrecen, y más aún si tenemos en cuenta el interés y la calidad con los que un pequeño grupo de ingenieros españoles ha defendido y potenciado el empleo del postesado en edificación, favoreciendo su implantación y desarrollando posibilidades de gran interés y potencial, como la aplicación a construcciones sin juntas de dilatación [2, 3]. Gracias a ellos la situación en los últimos años ha ido cambiando, aumentando progresivamente la utilización de estos sistemas y su aceptación por parte de los distintos sectores de la construcción, y permite ser moderadamente optimistas de cara al futuro.

Paralelamente al desarrollo y al establecimiento de una cultura constructiva del empleo de los sistemas postesados en edificación convencional, se ha ido produciendo puntualmente la utilización de estas técnicas en lo que podríamos denominar edificación singular. Como tal entendemos, en un sentido amplio, aquella que presenta problemáticas cuya resolución exige la puesta en marcha de sistemas poco convencionales o habituales en edificación, como las derivadas de grandes luces y voladizos, o de geometrías complejas. Dentro de este campo los sistemas postesados ofrecen grandes posibilidades, permitiendo la resolución de algunas de estas problemáticas de manera eficaz.

En estos casos, el planteamiento y la escala de los sistemas estructurales puestos en marcha se aproxima más a los utilizados en obra civil que a los de edificación convencional, debiendo por lo tanto considerarse y aplicarse planteamientos y procedimientos procedentes de ésta. Sin embargo, las estructuras de edificación singular deben ofrecer también una respuesta adecuada a los requisitos y características propias de los proyectos de edificación, derivados tanto de sus condicionantes de uso y funcionalidad como de los propios criterios arquitectónicos que puedan existir en cada caso.

Así, estos sistemas estructurales deben ser capaces de conjugar adecuadamente estos dos mundos, que en ocasiones pueden llegar a resultar prácticamente contrapuestos: adecuarse a la escala y la particularidad que la gran magnitud de los esfuerzos y la complejidad de los sistemas estructurales específicos requieren, pero respetando y cuidando los requisitos, características y necesidades derivadas de la condición intrínseca de la escala de la edificación [4]. Esta doble problemática condiciona así el planteamiento y la definición del sistema estructural, tanto como su proceso constructivo, que debe también abordarse en función de esta doble naturaleza.

El presente artículo analiza, a partir de esta reflexión, la aplicación del postesado en tres estructuras singulares de edificación, de reciente desarrollo y construcción [5]: el teatro y auditorio municipal de Torre Vieja, el nuevo edificio de juzgados de Ciudad Real y el edificio de Caixaforum Madrid. Con este análisis se busca valorar el potencial que la aplicación del postesado tiene en las estructuras de edificación singular, considerando los distintos sistemas de postesado empleados y sus procesos constructivos, con el objetivo de apuntar una serie de pautas y criterios que sirvan de orientación o reflexión en el diseño de estas soluciones estructurales en el campo específico de la edificación singular.

2. TEATRO Y AUDITORIO MUNICIPAL DE TORREVIEJA

En la mediterránea ciudad de Torre Vieja, el Teatro y Auditorio Municipal alberga una gran variedad de eventos musicales, actuaciones y representaciones. El diseño arquitectónico, de Alejandro Zaera (F.O.A. Architects) y Antonio Marqueríe (Arqem Arquitectos), define un edificio que se expande sobre todo el volumen permitido dentro de su parcela. La Plaza de Miguel Hernández, situada frente al teatro, es su punto de acceso, y define uno de los principales objetivos del proyecto: crear un espacio continuo entre el foyer y la plaza (Figura 1). El proyecto se desarrolló en el año 2002, realizándose la construcción de 2004 a 2006.

Durante la fase de proyecto básico arquitectónico, los objetivos fueron disponer de un espacio con una calidad acústica superior, excelente visibilidad de todos los asistentes, áreas adecuadas para el *backstage*, sala de ensayos, y servicios funcionales para el público que hicieran del teatro un lugar atrayente.



Figura 1. Teatro y Auditorio Municipal de Torreveja.

Para conseguir estos objetivos ha sido necesario crear una platea convexa con un techo acústico especialmente desarrollado, junto con un escenario y *backstage* ajustados a las características de la parcela, así como 5 plantas para camerinos, oficinas, salas de prensa y otros usos. Para integrar en un espacio reducido todos estos elementos se situaron las plantas de uso interno sobre el *backstage*, la sala de ensayos sobre la platea, y a su vez, ésta sobre el foyer de entrada desde la plaza pública y sobre la cafetería. En la zona de acceso se crea así un espacio abierto que configura la imagen del proyecto.

2.1. Esquema Estructural

La vista frontal del edificio muestra el gesto arquitectónico de abrir la entrada del auditorio hacia la plaza peatonal. Entrar en el auditorio y descubrir que la losa de la platea se encuentra sobre el visitante sin aparentes apoyos obliga a crear un sistema estructural en el que participa prácticamente todo el edificio [6].

Este sistema estructural recoge uno de los apoyos de la losa de la platea, el que se encuentra en la entrada desde la plaza peatonal, y levanta las cargas hasta una viga apoyada en los dos muros laterales del auditorio (Figura 2).

Uno de estos muros es muro medianero y transmite las cargas directamente al terreno, mientras que el opuesto recibe la carga en el extremo del voladizo que forma este muro, ya que su arista inferior sigue la línea de contacto con la losa de la platea. El apoyo del voladizo se produce cuando la losa de la platea llega a la cota de la rasante de la calle. La sección vertical del muro en este punto soporta el momento flector de la carga recibida en el extremo del voladizo. Este esfuerzo se compensa hacia atrás con el peso propio del edificio y con un pequeño contrapeso situado en el muro opuesto al voladizo, necesario para evitar el despegue en ciertas combinaciones de cargas.

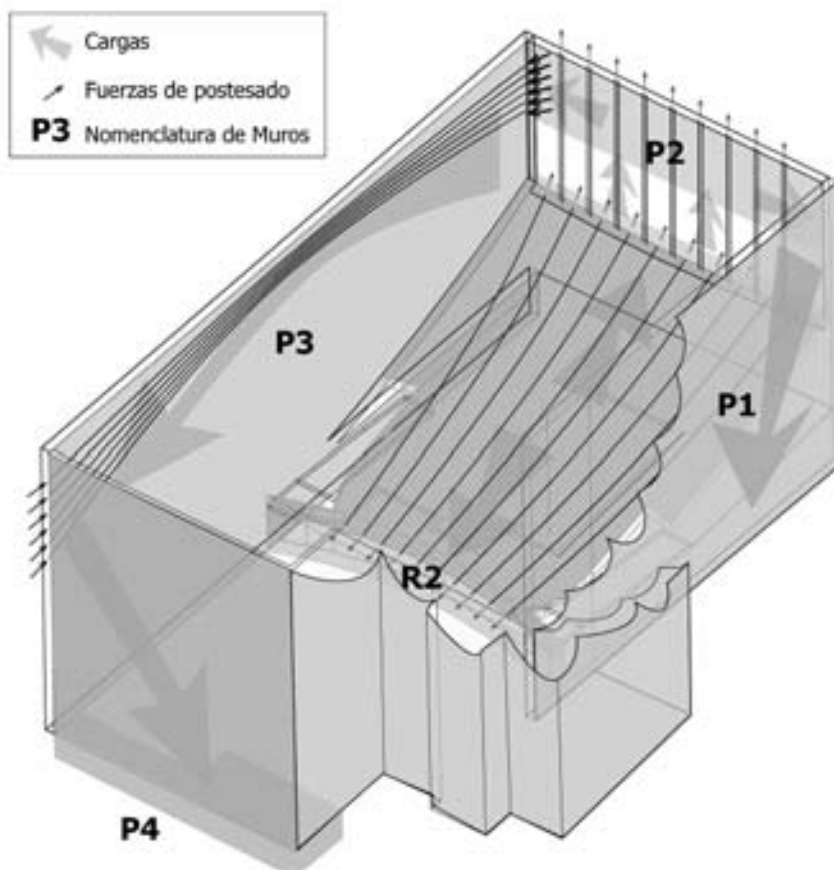


Figura 2. Esquema estructural del Teatro Municipal de Torreveja.



Figura 3. Ejecución de la losa de platea y los muros.

El resto de muros de hormigón armado del edificio proporciona el suficiente arriostramiento para soportar los esfuerzos debidos al viento y al sismo.

2.2. Elementos estructurales

El sistema estructural descrito muestra el camino de las cargas desde la zona de actuación hasta cimentación.

En el momento de desarrollo del proyecto se planteó encontrar la tipología estructural que mejor solventara estas necesidades desde diferentes puntos de vista.

La solución en hormigón encontró grandes ventajas frente a una solución metálica. Los paramentos de los muros tienen grandes dimensiones y sin problemas de canto, con lo que es más sencillo un muro de hormigón que celosías metálicas cubriendo toda la superficie. El sistema constructivo mediante encofrado trepante es sencillo y rápido, ya que en la zona de la platea sólo hay un forjado intermedio (Figura 3). Además, las necesidades acústicas del auditorio demandan masa para conseguir el aislamiento acústico exigido.

En los siguientes apartados se explican detalladamente las características de cada elemento estructural y las valoraciones que se realizaron hasta llegar a una solución con hormigón postesado.

2.2.1. Losa de la platea

La losa de la platea presenta curvatura en dos direcciones, con lo que una estructura metálica con vigas curvas no ofrece ventajas respecto del hormigón, donde la arma-

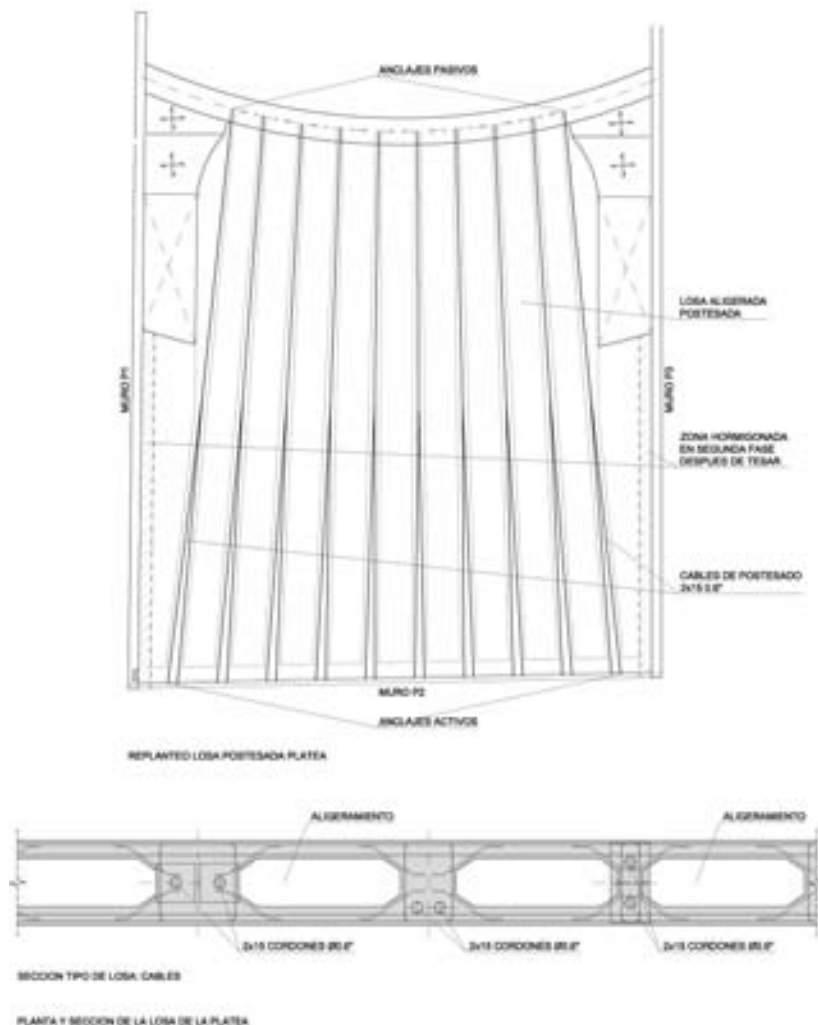


Figura 4. Planta y sección de la losa de platea.

dura se puede adaptar más fácilmente. Estudiando la geometría de la losa de la platea, la existencia de dos huecos importantes de acceso aconsejan el planteamiento de una solución apoyada en los dos lados más distantes, trabajando como un sistema unidireccional. La luz entre apoyos es de 22,8 m, por lo que se recurre al empleo del postesado, a fin de evitar los problemas de deformada y cantos excesivos de la alternativa en hormigón armado. La solución adoptada es así una losa aligerada de 70 cm de canto, postesada longitudinalmente en los nervios entre aligeramientos. Los aligeramientos se disponen entre nervios, adaptados a la geometría en planta de la losa, de manera que se cubre mediante un esquema radial toda la superficie. Los cables de postesado siguen en sección un trazado parabólico, pero adaptado en cada caso a la curvatura de la losa. Cada uno de los diez nervios de la losa aligerada contiene 2 cables adherentes de 15 cordones de 0,6", lo que supone una cuantía total aproximada de 18 kg/m² (Figura 4).

En el proceso constructivo el tesado se realiza después de la ejecución de los muros laterales (Figura 3), pero antes del muro de cuelgue de la losa de la platea. Estos condicionantes obligan a independizar la losa de los muros, dejando una banda entre ellos sin hormigonar para que las compresiones del tesado no sean coaccionadas por los muros laterales. También en el momento del tesado, la losa se levanta en el centro del vano sobre el encofrado y descarga sobre los dos extremos. Por ello fue necesario situar una alineación de puntales bajo el muro de cuelgue P2, todavía sin ejecutar, para soportar la carga de la losa. Es en esta zona donde se disponen los anclajes activos de la losa postesada (Figura 5), debiendo compatibilizar su posición con la de los tirantes de cuelgue del muro P2, que posteriormente recogerán el apoyo de la platea, mientras que los anclajes pasivos, accesibles, se sitúan en el extremo inferior de la losa (Figura 6).

2.2.2. Muro de cuelgue de la platea

El muro de la fachada principal debe recoger en su arista inferior la carga de la losa de la platea y transmitirla a los muros laterales. La solución propuesta consiste en una potente viga de 4,80 m de canto y 60 cm de espesor, con tirantes verticales de cuelgue de la carga embebidos. El proceso constructivo más sencillo sugiere ejecutar en primer lugar la losa de platea y posteriormente el muro de cuelgue, formado por la viga superior y por un muro de 25 cm de espesor. Sin embargo, la puesta en carga de los tirantes generaría una elongación en los mismos que, junto con la flecha propia de la viga superior, provocaría desplazamientos inadmisibles. Se requiere por lo tanto plantear un sistema que minimice y controle estos efectos, y el pretensado de los tirantes soluciona eficazmente este problema.

Los nueve tirantes se sitúan entre los anclajes de los nervios de la losa de la platea, estando cada uno de

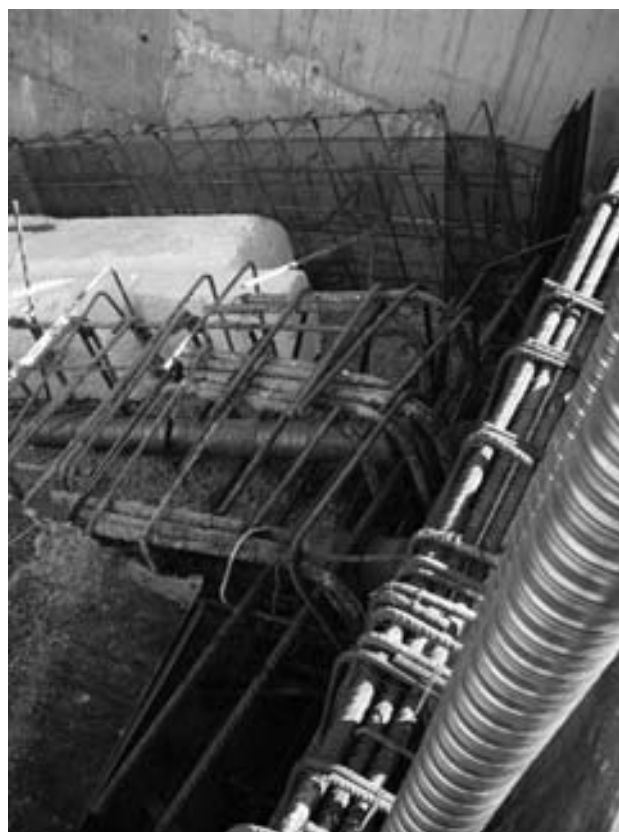


Figura 5. Detalle del anclaje activo.



Figura 6. Detalle del anclaje pasivo.

ellos compuesto por dos cables de 4 cordones de 0,6" (Figura 7). El tesado de los cables se realiza así una vez ejecutada la losa de platea y también el del muro lateral en voladizo, ya que es éste el que debe recoger la carga de apoyo. El postesado se realiza desde el extremo superior de los tirantes de cuelgue (anclaje activo), situándose el anclaje pasivo accesible en el extremo inferior. Una vez tesados, la carga, que hasta este momento estaba actuando sobre una alineación de puntales provisionales de este muro P2, se transfiere a los tirantes, pudiendo retirarse entonces los soportes provisionales.

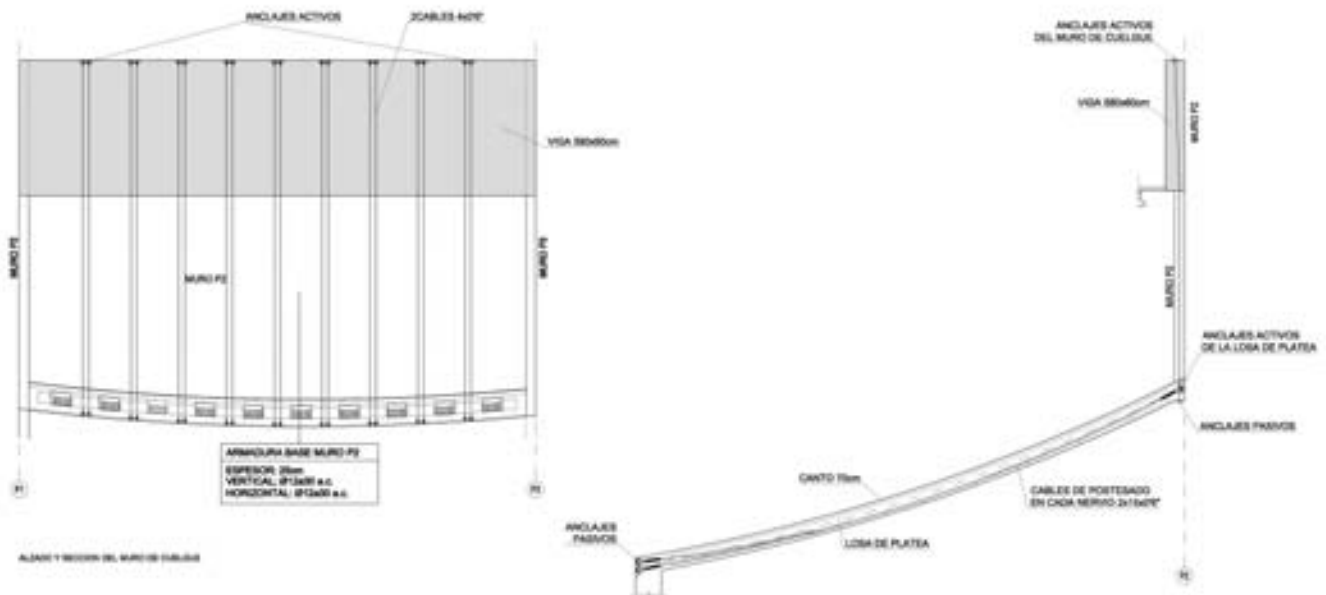


Figura 7. Alzado y sección del muro de cuelgue.

2.2.3. Muro lateral del voladizo

El muro lateral, de 40 cm de espesor, recoge la carga en el extremo de un voladizo de 18 m. La altura del muro, de unos 21,5 m, es suficiente para resistir el momento flector generado. Sin embargo, esta flexión genera unos esfuerzos de tracción en la arista superior del muro que fisurarían el hormigón y reducirían enormemente su rigidez, aumentando la flecha en el extremo del voladizo. Para contrarrestar este fenómeno se introducen compresiones en la zona traccionada mediante la disposición de cables de postesado en el alzado del muro (Figura 8). Además de resolver este problema de fisuración y deformación, el

postesado último disminuye la cuantía de armadura pasiva necesaria para resistir las sollicitaciones en Estado Límite Último.

El sistema de postesado, dispuesto estratégicamente en el alzado del muro, está formado por 6 cables adherentes de 15 cordones de 0,6", que suponen una cuantía aproximada de armadura activa en el conjunto del muro de tan sólo 5,0 kg/m². En el punto central de apoyo, el trazado de los cables se concentra en la zona superior, a fin de aumentar al máximo el brazo, mientras que en los extremos del muro se separan para permitir el adecuado armado de las zonas de anclaje y facilitar las

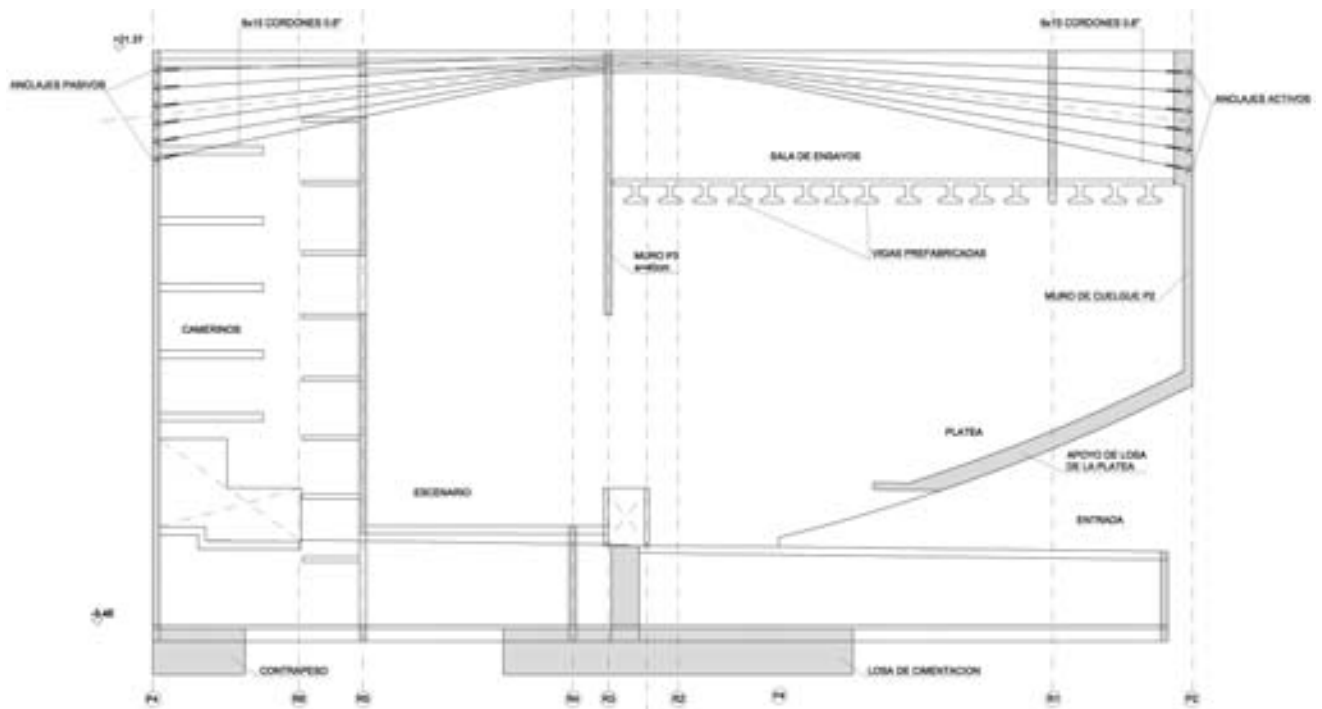


Figura 8. Alzado del muro lateral postesado.

labores de tesado (Figura 9). El tesado se realiza desde el extremo en voladizo del muro, disponiéndose los anclajes pasivos accesibles en el extremo opuesto.

3. NUEVO EDIFICIO DE JUZGADOS DE CIUDAD REAL

El nuevo edificio de Juzgados de Ciudad Real, inaugurado en 2005, resuelve las necesidades del Ministerio de Justicia en cuanto a instalaciones y servicios. El arquitecto Guillermo Vázquez Consuegra ha diseñado un edificio funcional con una primera zona de acceso y distribución en la parte frontal y dos módulos laterales donde se sitúan las oficinas y las salas de vista (Figura 10).

La estructura del nuevo edificio de Juzgados presenta dos estructuras singulares dentro de un conjunto convencional de forjados y pilares de hormigón armado. Estas estructuras son las pasarelas que unen los dos módulos, en diferentes alturas y posiciones en planta, y la losa en voladizo sobre la entrada principal, a modo de visera (Figura 11).

3.1. Pasarelas

Las pasarelas tienen más de 15 m de luz entre apoyos y, por condicionantes arquitectónicos, resultaba necesario mantener los 35 cm de canto del resto del forjado, de



Figura 9. Vainas y armadura del muro lateral.



Figura 10. Nuevo edificio de Juzgados de Ciudad Real.



Figura 11. Planta y sección longitudinal del edificio.

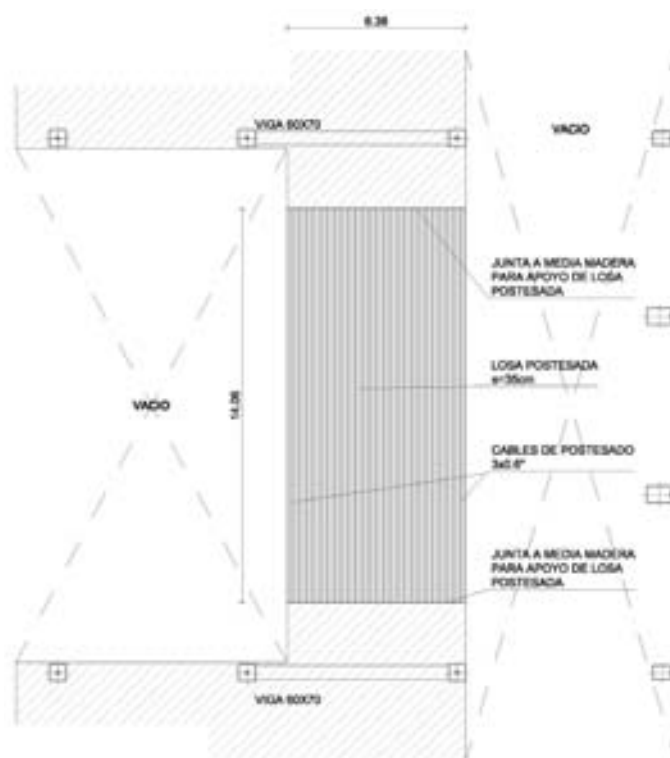


Figura 12. Pasarelas postesadas. Vista exterior y planta.

luces más pequeñas y resuelto con losa maciza de hormigón armado. La solución propuesta consiste por lo tanto en postesar la zona de las pasarelas, controlando los esfuerzos de flexión y la deformada de la misma, lo que permite ajustar el canto hasta los 35 cm requeridos. Sin embargo, el hecho de que las pasarelas conecten dos zonas separadas por una junta de dilatación obliga a independizar la pasarela en los apoyos extremos, permitiendo desplazamientos. Para reducir ligeramente la luz entre estos apoyos se aprovecha el empotramiento de la losa armada por el vano contiguo, prolongando el forjado a modo de balcón con la carga del apoyo de la pasarela en el extremo. El esquema estructural de la losa postesada se convierte por lo tanto en el de una viga biapoyada, de unos 6,50 m de ancho y 14 m de luz, apoyada permitiendo la dilatación en los extremos, con una junta a media madera (Figura 12). Los apoyos a media madera con neopreno de los extremos permiten así los movimientos diferenciales entre la pasarela y los dos módulos laterales debidos a dilataciones y deformaciones reológicas, respetando la junta de dilatación existente.

El sistema de postesado de las pasarelas está formado por cables adherentes de 3 cordones de 0,6" cada 25 cm, uniformemente distribuidos en planta, con una cuantía aproximada de 14,5 kg/m². La posición en planta de la pasarela y la necesidad de resolver los apoyos en junta de dilatación a media madera impide tesar los cables desde los dos extremos, con lo que la solución adoptada consiste en tesar los cables en la cara superior del forjado desde el anclaje activo, dejando el anclaje pasivo embebido en la pasarela, no accesible. Esta disposición de anclajes activos y pasivos se alterna de sentido en planta, de forma que junto a un anclaje activo que-

den dos pasivos, obteniéndose así mayor espacio en el cajeadado necesario para el tesado.

3.2. Voladizo de cubierta

El elemento arquitectónico y estructural que caracteriza el nuevo edificio de los Juzgados de Ciudad Real es el



Figura 13. Vista lateral del voladizo de cubierta.

voladizo situado sobre la entrada principal. La posición esviada del edificio respecto de la calle configura un vuelo variable, desde 3,75 m hasta 21,5 m. La imagen del resto del edificio en hormigón sugería una solución con este material, a pesar de no ser el más idóneo en cuanto a ligereza. Por ello se hacía indispensable el empleo del postesado, para un voladizo de dimensiones tan importantes (Figura 13).

La geometría de la cubierta en planta es un trapecio. Los apoyos siguen la cuadrícula del edificio inferior con luces de unos 7,5 m x 6,4 m, aunque en la zona central, que separa los dos bloques de oficinas unidos por las pasarelas anteriormente descritas, tiene una luz de 19 m. El voladizo, como se ha comentado, se sitúa en la cara no ortogonal del trapecio, llegando a tener un vuelo máximo desde la alineación de pilares de 21,5 m (Figura 14). Debido a la diferencia de longitud entre el vuelo y las alineaciones de pilares interiores se decidió no apoyar la losa en la primera alineación inmediatamente posterior al apoyo del voladizo, ya que se generaban tracciones de considerable magnitud, por lo que es la segunda alineación desde el apoyo la que se encarga de contrarrestar el momento del voladizo con el peso del edificio.

El canto de la losa postesada es variable, siguiendo una disposición de cubierta a cuatro aguas, con el punto más alto de 1,0 m de canto, y las limahoyas llegando a cada uno de los vértices. Este esquema se interrumpe en el perímetro, ya que cuando el canto de la losa disminuye hasta llegar a 50 cm deja de disminuir y se mantiene constante en esta zona. La distribución de cantos es por lo tanto como una losa de 50 cm que en la zona central aumenta hasta 1,0 m, según un esquema de cuatro aguas.

El canto de la losa es muy ajustado y el trazado del postesado debe contrarrestar la ley de momentos generada en un voladizo, por lo que parte desde el extremo en el centro del canto para llegar al punto más alto en la primera alineación de pilares y volver a bajar hasta el punto medio de la losa.

El cálculo del postesado fue muy preciso en cuanto a las tensiones que se generaban en todas las secciones del trazado, ya que los cantos no tienen una variación constante a lo largo de este trazado, por la geometría a cuatro aguas, y en los puntos de quiebro en la cara superior de la cubierta se producen unas variaciones en el canto a lo largo del trazado que no siguen un aumento pro-

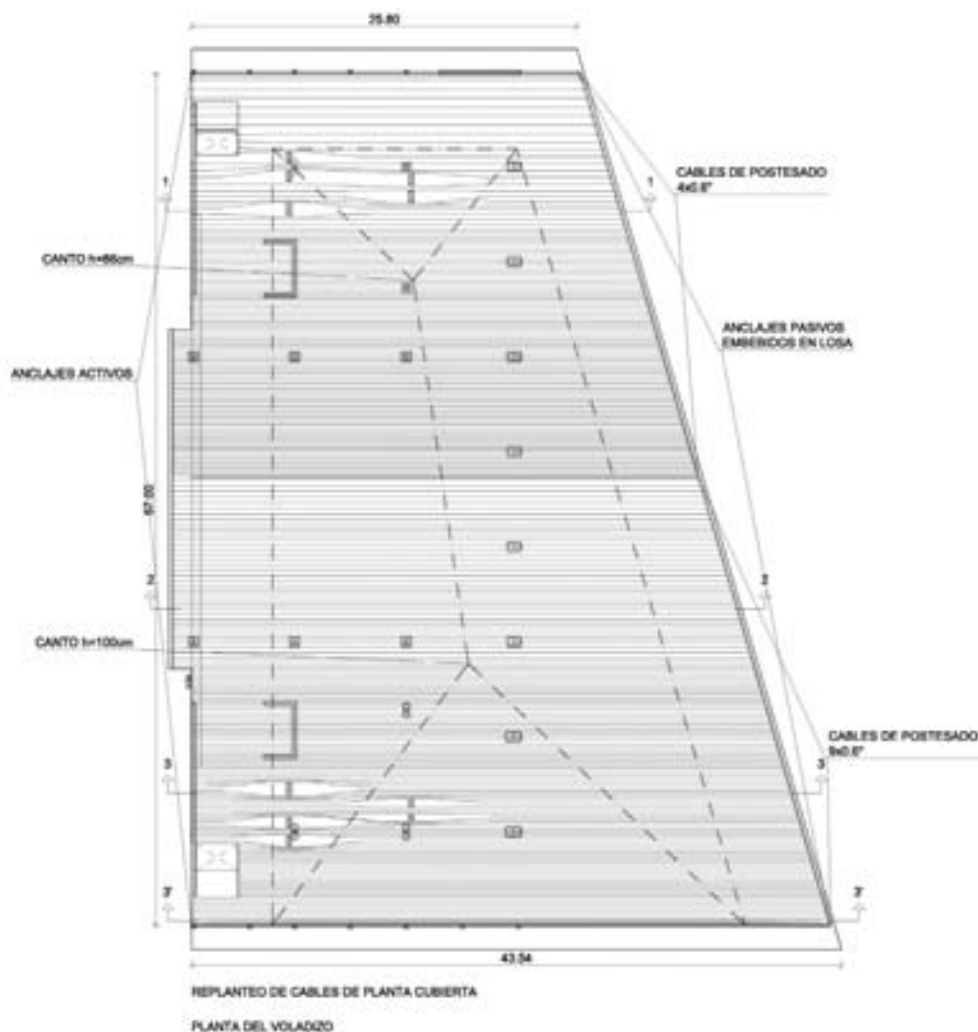


Figura 14. Planta del voladizo de cubierta.

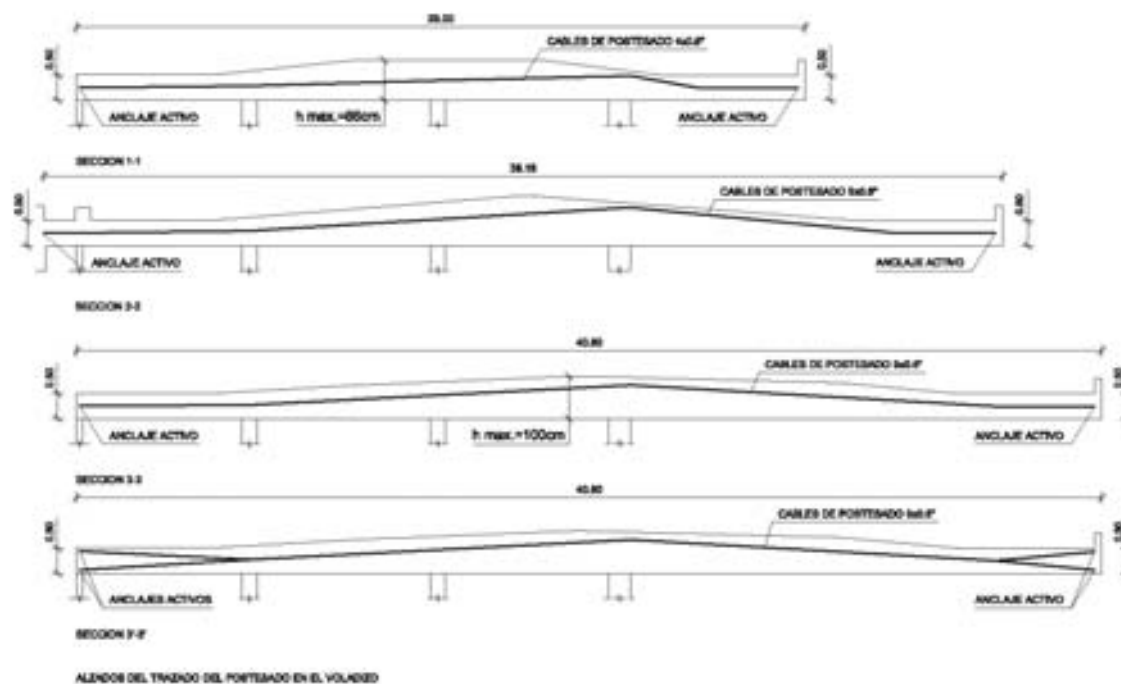


Figura 15. Alzado del trazado del postesado en el voladizo.

porcional del canto según se acerca hacia el apoyo (Figura 15).

La variación constante del voladizo obliga a aumentar de forma progresiva el efecto del postesado. En el vuelo menor se emplean cables adherentes de 4 cordones de 0,6", separados 60 cm inicialmente y disponiéndose a menor distancia a medida que el vuelo aumenta, hasta una separación mínima de 26 cm. Cuando ya no es posible colocar los anclajes de 4 cordones más juntos se pasa a cables adherentes de 9 cordones de 0,6", colocándose inicialmente a una distancia entre anclajes de 40 cm, y juntándolos progresivamente hasta una distancia mínima de 26 cm en el punto de mayor vuelo. La cuantía total de postesado es de aproximadamente 28,5 kg/m².

El extremo del voladizo es de hormigón visto, con lo que en este punto se sitúa el anclaje pasivo embebido en la



Figura 16. Detalle de anclajes activos de la losa en voladizo.

losa, y no accesible por lo tanto. El anclaje activo se sitúa en el extremo opuesto, interior, donde se tuvieron que dejar reservas de losa armada sin hormigonar, para poder tesar apoyándose en el canto del forjado (Figura 16).

4. CAIXAFORUM MADRID

Rehabilitación y ampliación de la antigua central eléctrica del Mediodía, construida en 1899 por el arquitecto Jesús Carrasco y Encina, el edificio Caixaforum Madrid alberga el nuevo centro social y cultural de la Fundación la Caixa en Madrid.

Situado estratégicamente en el Paseo del Prado, frente al Jardín Botánico y junto al Museo del Prado, el Museo Thyssen-Bornemisza y el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, Caixaforum Madrid se enmarca dentro del proyecto de reordenación del eje Prado – Recoletos, y se suma a la impresionante oferta cultural que se concentra en esa zona de Madrid.

El proyecto fue realizado por los arquitectos suizos Herzog & de Meuron, con el apoyo de los arquitectos locales Mateu i Bausells, de 2001 a 2003, realizándose la construcción en un período aproximado de 52 meses, de Septiembre de 2003 a Enero de 2008.

4.1. Planteamiento arquitectónico y concepto estructural

La escasez de espacios públicos en una zona de Madrid especialmente congestionada y abigarrada y el interés



Figura 17. Caixaforum Madrid.

por que el edificio ofrezca una imagen sugerente y llamativa, que actúe como foco de atracción y punto de referencia, definen los planteamientos arquitectónicos principales del edificio (Figura 17).

Por una parte se busca conectar el edificio al Paseo del Prado, mejorando su visibilidad y revalorizando la zona, para lo cual se dispone del solar contiguo, antiguamente ocupado por una gasolinera, y que se transforma ahora en un espacio público, prolongación del Paseo del Prado hasta el nuevo edificio (Figura 18). Este espacio público, esta plaza, se prolonga hasta ocupar la práctica totalidad de la huella de la antigua central eléctrica, lo que se consigue gracias a un único y potente gesto arquitectónico, consistente en eliminar la base inferior del muro perimetral existente, de manera que el volumen del edificio quede "suspendido" en el aire [7].

El corte del zócalo inferior del muro transforma además irremediabilmente la función de los pesados muros de ladrillo del edificio, que dejan de ser elementos portantes para convertirse, en la nueva situación estática, en un mero "revestimiento", una piel, modificándose así radicalmente la percepción del nuevo volumen, que parece levitar ahora sobre la plaza pública en un aparente desafío a la ley de la gravedad.

A partir de este planteamiento arquitectónico, el requerimiento principal de la estructura consiste en plantear un sistema capaz de recoger la totalidad de las cargas del volumen sobre rasante y transmitir las a cimentación sin interferir con el espacio público de la plaza, manteniendo la discontinuidad producida por el corte del zócalo inferior del muro.

Para ello se planteó un macrosistema estructural formado por un muro perimetral continuo adosado interior-

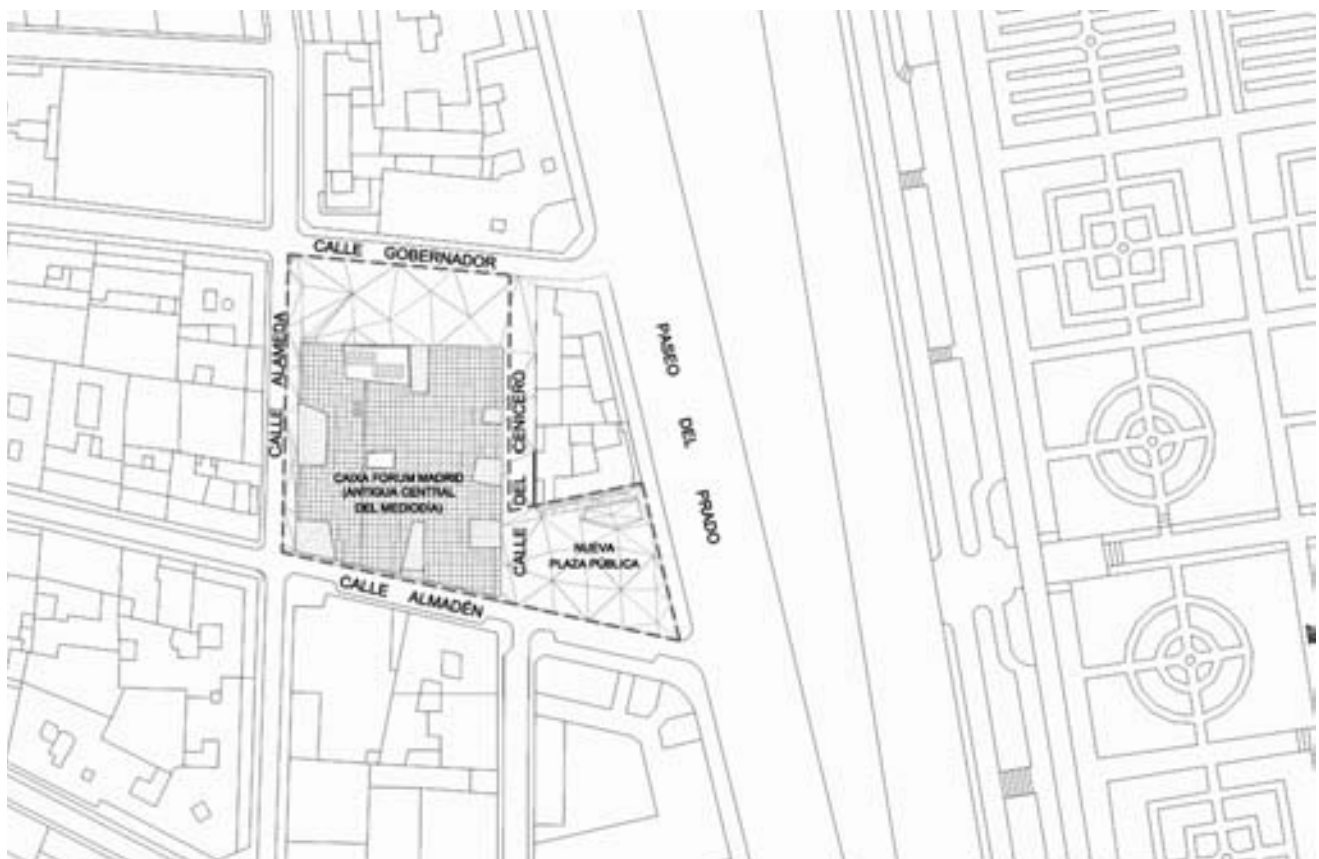


Figura 18. Planta de situación, conexión del nuevo edificio con el Paseo del Prado.

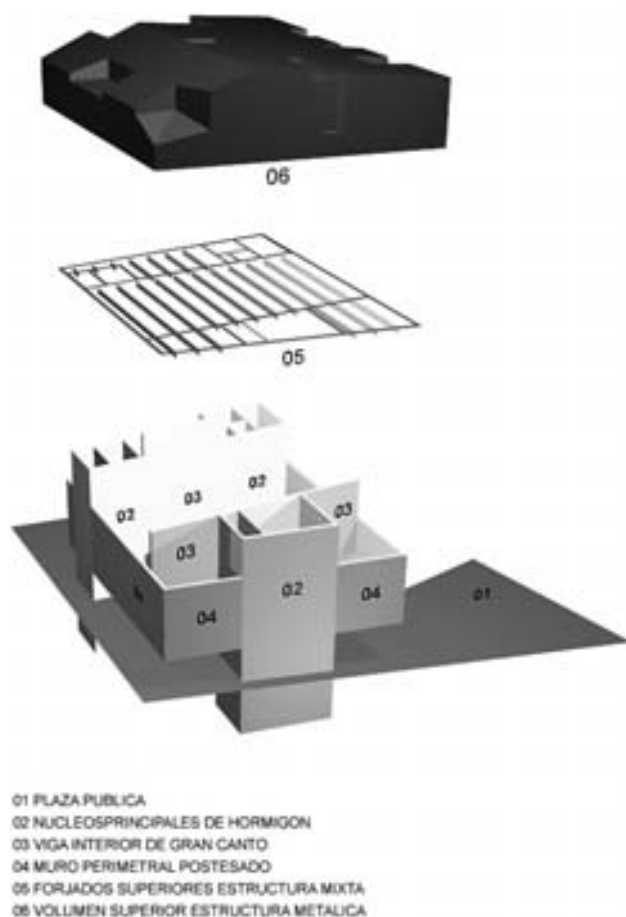


Figura 19. Concepto estructural.

mente a la fachada de ladrillo, tres potentes núcleos de hormigón estratégicamente situados en el perímetro, y dos paredes estructurales interiores de gran canto que conectan los núcleos con el muro perimetral. De acuerdo con este sistema los forjados superiores y la estructura de cubierta apoyan directamente en el nuevo muro de hormigón, que recoge además el peso del muro existente de ladrillo, y en las paredes interiores de gran canto, apoyándose todo el sistema en los tres núcleos principales, que transmiten la totalidad de las cargas a cimentación (Figura 19). El volumen del edificio queda así soportado exclusivamente en estos tres núcleos de hormigón, que actúan también como núcleos de comunicación vertical del edificio (escaleras, ascensores e instalaciones) y le confieren la necesaria rigidez y estabilidad horizontal.

A partir de este macrosistema estructural la ordenación de los niveles superiores queda definida por un espacio central diáfano de importantes dimensiones y tres espacios laterales de menor tamaño, anexos a los núcleos. Estos forjados se resolvieron con estructura mixta, muy ligera, reduciendo así las cargas que deben soportar el muro perimetral y los núcleos principales [8].

Finalmente la estructura bajo rasante se resolvió, en líneas generales, con un sistema convencional de apoyos verticales (muros y pilares) y losas macizas de hor-

migón, ajustado a la geometría y los requisitos de cada zona. Es importante destacar sin embargo la zona correspondiente a los espacios bajo rasante del auditorio y del hall principal, con luces de aproximadamente 15,0 metros, cargas elevadas y requisitos estrictos de canto del forjado.

4.2. Necesidad y planteamiento del postesado. Descripción del sistema y proceso constructivo.

A partir del planteamiento estructural indicado, el control deformacional y tensional de determinados elementos de la estructura aconsejaron el planteamiento de soluciones postesadas, en particular en el forjado sobre el auditorio y en el nuevo muro perimetral, constituyente del macrosistema estructural.

4.2.1. Losa postesada sobre auditorio

En primer lugar, en el forjado correspondiente a la cubierta del auditorio y del hall principal, la importante luz a cubrir, de aproximadamente 15,0 metros, y las elevadas cargas a soportar (plaza pública con posibilidad de acceso de bomberos), unidos a la necesidad de mantener el canto de la estructura en dimensiones moderadas, aconsejaron el planteamiento de una solución tradicional de losa postesada. Esta solución resuelve así la problemática de luces y cargas importantes con un canto del forjado ajustado (50 cm), mucho menor que el que hubiera requerido otras alternativas posibles en hormigón armado o en estructura metálica.

En este caso, la marcada direccionalidad del forjado sugiere una disposición uniforme de los cables en una única dirección, resolviendo los esfuerzos en la dirección perpendicular, de mucho menor envergadura, con armadura pasiva. Por otra parte el trazado de los cables debe ajustarse en las distintas zonas a la diferente configuración de los apoyos, que hace que en los laterales se comporte como un vano isostático, apoyada en sus extremos, mientras que en la zona central la existencia de dos muros interiores de apoyo muy próximos entre sí, hacen que su comportamiento se asemeje al de una viga continua de dos vanos (Figura 20). De acuerdo con estas indicaciones se adopta una distribución unidireccional de cables adherentes de 12 cordones de 0,6", ajustando su separación uniformemente en los distintos tramos (isostáticos o continuos). La cuantía total de acero activo en la losa postesada es de 18,5 kg/m².

Por otra parte, desde un punto de vista constructivo, la gran rigidez de uno de los núcleos principales, que sirve de apoyo a la losa postesada, obligó a disponer una junta de hormigonado que independizara temporalmente ambos elementos, a fin de evitar posibles coacciones horizontales que hubieran reducido el efecto del postesado (Figura 21). Así mismo, el apoyo de la

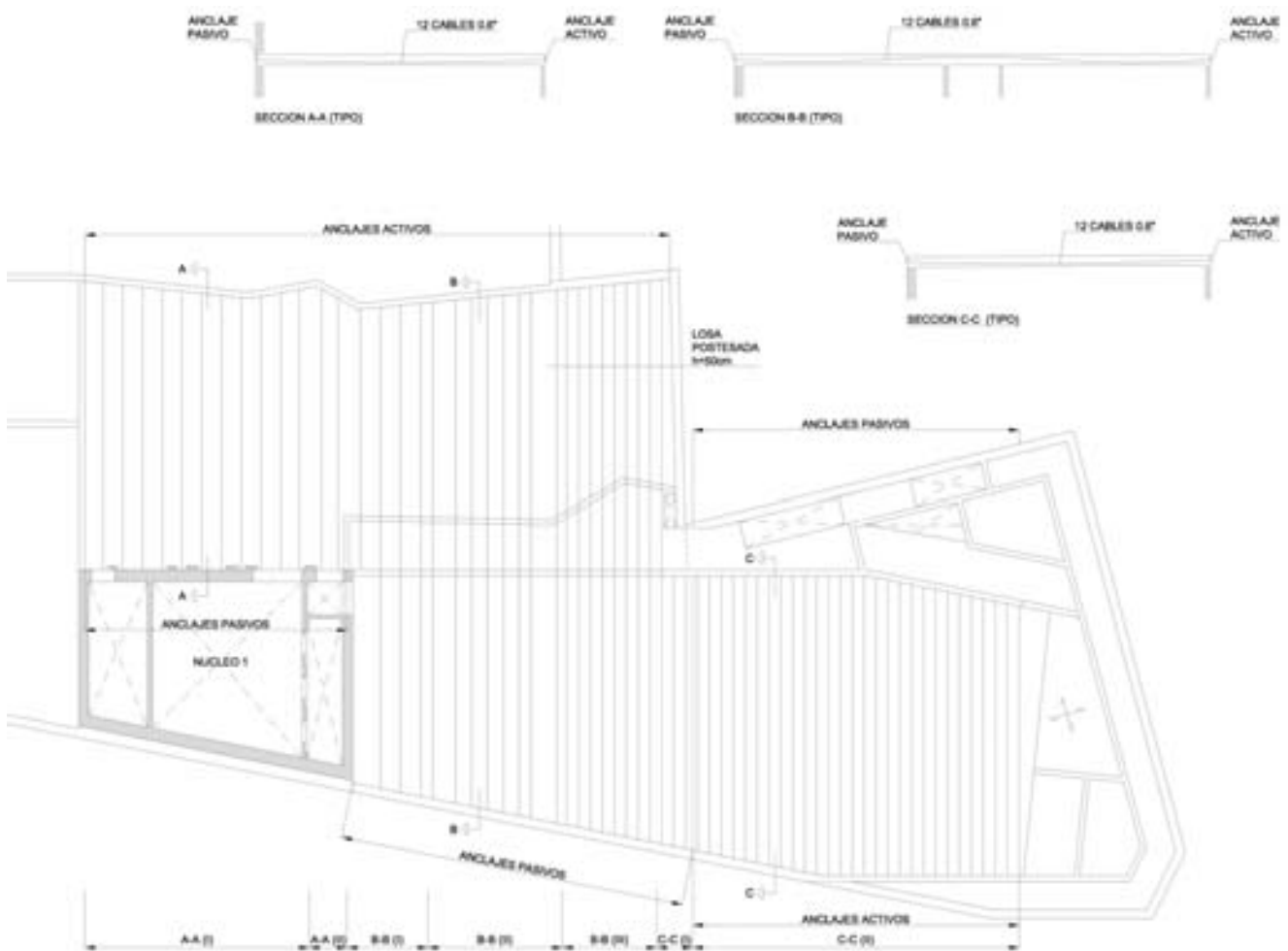


Figura 20. Losa postesada sobre auditorio. Planta y trazado de los cables.

losa en los muros perimetrales se resolvió mediante apoyos provisionales de neopreno, que permitían un ligero desplazamiento horizontal de la losa durante el proceso de tesado, evitando también cualquier coacción que pudiera afectar la acción del postesado. Una vez completado el proceso de tesado se materializó el apoyo de la losa en el núcleo y se rigidizó la conexión con los muros de contención, impidiéndose el desplazamiento horizontal de la losa, que actúa así como arriostamiento frente a las empujes horizontales del terreno.

4.2.2. Muro perimetral postesado

Mucha mayor complejidad y singularidad presentan la decisión de utilizar una solución postesada en el muro perimetral de hormigón adosado al muro de ladrillo, y la definición tipológica y constructiva de su aplicación.

Como ha quedado expuesto en el planteamiento del macrosistema estructural, el muro perimetral, junto con las dos paredes interiores de gran canto, recoge la totalidad de las cargas sobre rasante del edificio y las transmite hasta los núcleos principales de apoyo. Está sometido por lo tanto a esfuerzos muy elevados que deben ser controlados, al igual que su nivel de deformación. Asimismo debe conectarse al muro existente de ladrillo

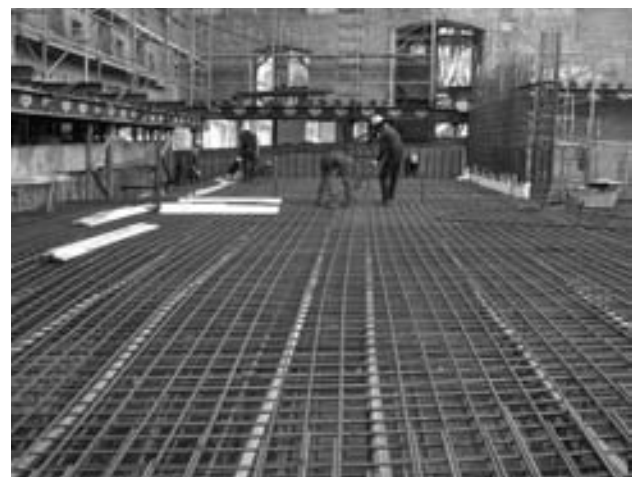


Figura 21. Losa postesada sobre auditorio. Disposición de las vainas y armado.

y compatibilizar su comportamiento con el de éste, de manera que se evite la aparición de fisuras en la fábrica. Así, una posible solución consistente en grandes celosías metálicas fue rápidamente descartada pues, si bien podría resolver la transmisión de esfuerzos a los núcleos con un orden tensional y deformacional adecuado, la conexión al muro existente de ladrillo no resulta en modo alguno sencilla y produciría sin duda la concentración de cargas en los puntos de conexión (correspon-

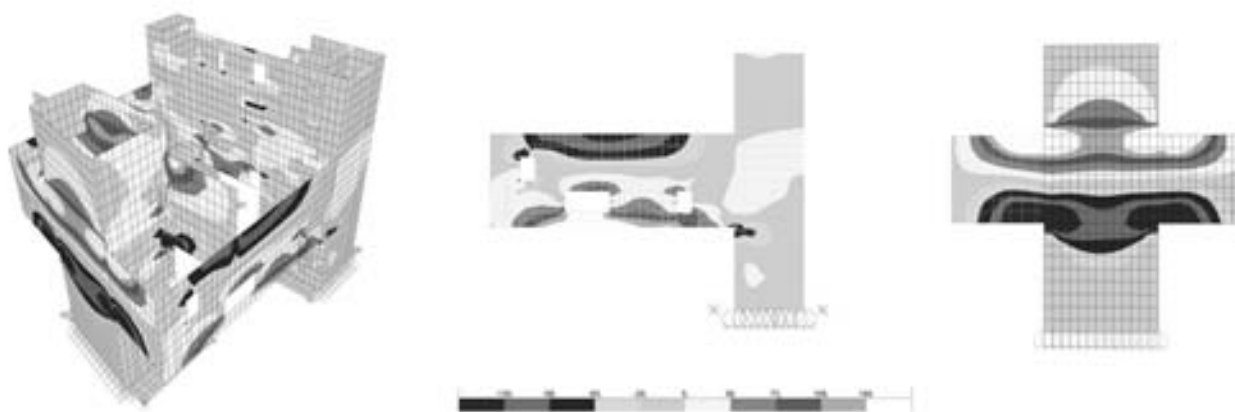


Figura 22. Macrosistema estructural. Resultados de esfuerzos axiales del modelo de cálculo, bajo cargas verticales. Vista 3D, alzados calle Cenicero y calle Almadén.

dientes con los elementos metálicos de la celosía), y la transferencia de esfuerzos entre la estructura metálica y el muro de ladrillo de forma poco uniforme y controlable; efectos ambos que podrían producir la aparición de fisuras en la fábrica de ladrillo. Se opta por lo tanto por una solución en hormigón, que permite un contacto continuo y uniforme entre el nuevo muro y el existente de ladrillo. El muro de hormigón, de una altura aproximada de 11 metros, tiene además una inercia muy importante, que hace que la deformada instantánea se mantenga en todos los casos en valores admisibles, si bien debe tenerse en cuenta sin embargo la deformada diferida del hormigón y la derivada de la fisuración de la sección. Este hecho, unido a la importante concentración de tensiones que se producen en determinadas zonas, como los puntos de apoyo -empotramiento- del muro en los núcleos, hacen necesario considerar la posibilidad de postesar el muro, como quedó patente en los análisis y modelos realizados (Figura 22).

Como solución postesada se consideró inicialmente un trazado de los cables ajustado al antifunicular de cargas (Figura 23). Esta solución resulta muy adecuada desde un punto de vista de seguimiento y control de los esfuerzos en el muro perimetral, pero plantea importantes dificultades constructivas y de control de la ejecución, que obligarían incluso a disponer la totalidad del sistema de

cableado con su armado correspondiente antes de poder comenzar el hormigonado del muro.

Se optó entonces por un trazado recto de los cables que, si bien no se beneficia de los efectos derivados de la introducción de fuerzas de desvío, sí permite reducir el nivel de tensiones en las zonas más solicitadas, controlando además así la fisuración y los efectos diferidos del hormigón. Esta solución favorece enormemente el proceso de ejecución y control del sistema, permitiendo el hormigonado del muro por tongadas, con la disposición de cables y armado estrictamente necesaria para cada fase de hormigonado.

El sistema adoptado consiste así en una distribución prácticamente uniforme de cables rectos de trazado horizontal, formados por cables de 12 cordones de 0,6", que generan una compresión uniforme en toda la altura del muro, de 50 cm de espesor, del orden de unos 35 – 40 kp/cm². En la práctica la disposición de los cables debe ajustarse en cada alzado a la existencia de huecos en la fachada, si bien en líneas generales el trazado propuesto permite obtener una compresión prácticamente uniforme en toda la altura del muro (Figura 24). Esta compresión reduce los esfuerzos de tracción, pero incrementa la tensión de las zonas comprimidas, que deben por lo tanto controlarse cuidadosamente.



Figura 23. Muro perimetral. Solución con trazado antifunicular de los cables.

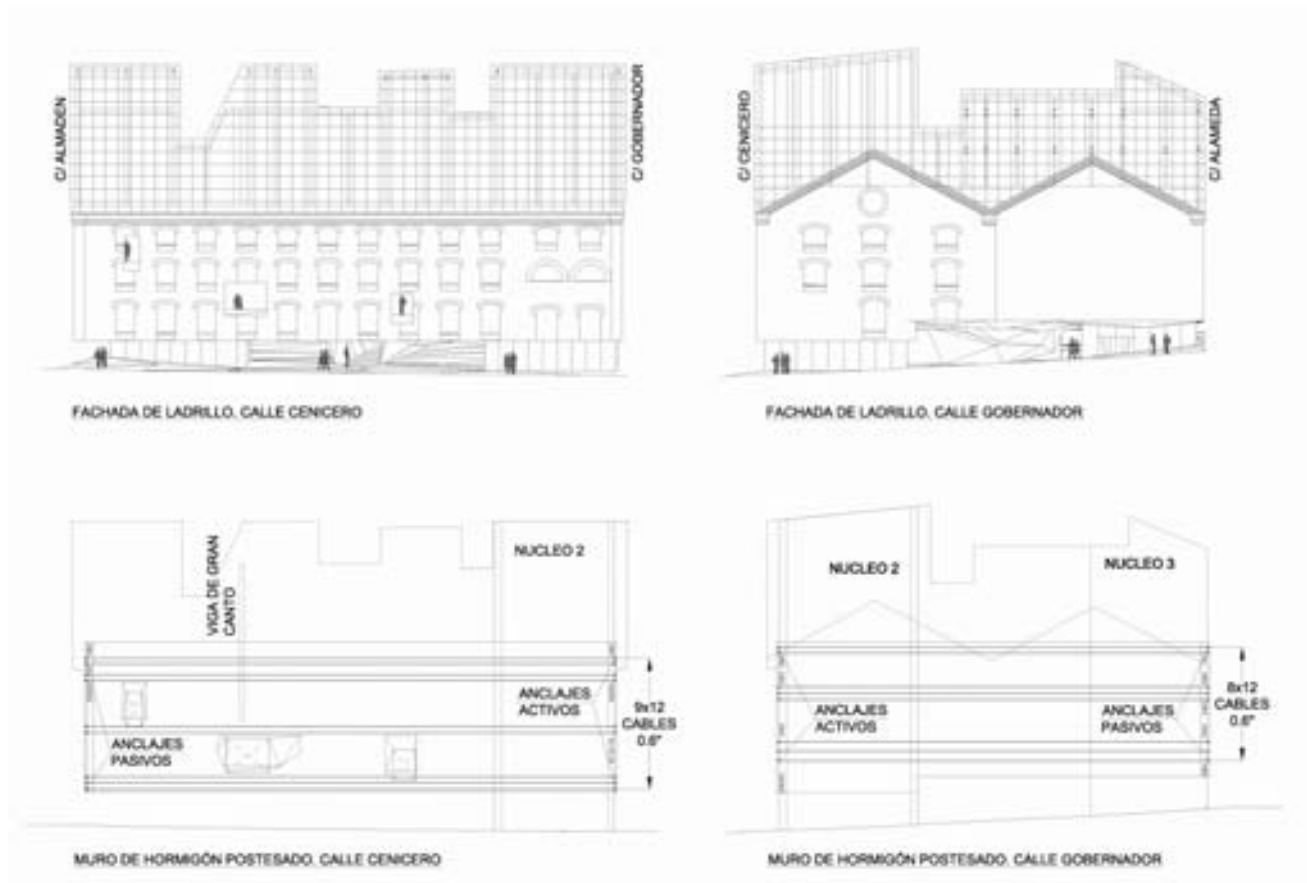


Figura 24. Muro perimetral. Solución con trazado recto horizontal de los cables.

Únicamente en los alzados correspondientes a la calle Almadén y a una de las vigas interiores de gran canto, en los que el comportamiento estructural de los muros es equivalente al de dos vigas en ménsula empotradas en uno de los núcleos, se planteó una distribución de los cables que aplica tensiones diferenciadas a la sección. En este caso se mantiene el trazado horizontal de los cables, pero se concentran en la zona superior de la sección, generando así esfuerzos de flexión que se oponen a los momentos de empotramiento de la ménsula y disminuyen la deformada en los extremos.

A nivel de control de las deformaciones, el trazado horizontal uniforme de los cables no introduce fuerzas de desvío que se opongan a la flexión propia de los muros, por lo que los esfuerzos de postesado no tienen apenas influencia directa en la deformación del conjunto (salvo en los alzados indicados de la calle Almadén y la viga de gran canto). Sin embargo, sí permiten controlar la fisuración, al disminuir significativamente el nivel de tracciones, y reducir los efectos diferidos del hormigón [9], controlándose indirectamente la deformada que, en líneas generales se mantuvo en todos los casos en el orden de los 5 a 10 mm de flecha instantánea previstos según las zonas.

Por otra parte, la singular disposición del muro perimetral postesado, adosado y conectado al antiguo muro de ladrillo, planteaba dos cuestiones fundamentales: cómo

realizar la conexión entre el nuevo muro de hormigón y la fábrica de ladrillo existente, de casi 1,0 m de espesor, y cómo controlar la transferencia de esfuerzos entre ambos, debida al tesado del muro de hormigón y a los efectos reológicos.

Para resolver estas cuestiones se consideró la posibilidad de ejecutar el muro de hormigón independiente de la fachada existente, materializando la conexión entre ambos una vez realizado el postesado del muro. Sin embargo, la enorme dificultad constructiva que suponía realizar esta conexión a posteriori, y el hecho de que una vez conectados el muro de hormigón y la fachada de ladrillo se producirían, en cualquier caso, transferencias de esfuerzos entre ambos, aconsejaron realizar la conexión durante el proceso de hormigonado del nuevo muro, antes de realizar el tesado, contemplando la relación e interacción entre ambos desde el primer momento.

Para materializar esta conexión se practicaron una serie de cajeados en la cara interior de la fachada de ladrillo que permitían que el hormigón del muro entrara en la fachada, a modo de ménsulas de anclaje capaces de recoger la totalidad de las cargas de peso propio de la fachada, y que garantizan además su estabilidad horizontal. Adicionalmente a este sistema de ménsulas se distribuyeron uniformemente un conjunto de redondos anclados a la fachada de ladrillo que, junto con la activación del rozamiento entre las superficies de ladrillo y hormigón,



Figura 25. Muro perimetral postesado una vez desapareado.

contribuyen a dispersar la transferencia de cargas de manera que se produzca de manera suave y uniforme. Se evita así la acumulación de esfuerzos en torno a las ménsulas de conexión, que hubiera supuesto la aparición de fisuras locales en la fábrica de ladrillo.

Estando conectados la fachada de ladrillo y el muro de hormigón, era necesario considerar y controlar la posible transferencia de esfuerzos al ladrillo como consecuencia del tesado del muro de hormigón. En este sentido se decidió considerar la sección formada por el muro de hormigón y la fachada de ladrillo como una sección mixta, situando los cables de pretensado en el centro de gravedad de la sección compuesta hormigón-ladrillo, de manera que los esfuerzos de pretensado generaran una compresión uniforme entre ambos. Así, la relación entre el módulo de elasticidad de la fábrica de ladrillo y el del hormigón, de un factor 10, hace que los 100 cm del muro de ladrillo equivalgan a un aumento de 10 cm del muro de hormigón, lo que suponía un desplazamiento de 5 cm en la posición de los cables de pretensado. Se evita así la aparición de tracciones en la cara exterior de la fábrica de ladrillo debidas a la excentricidad de los esfuerzos de postesado, comprimiendo uniformemente la sección compuesta, de manera que en todo caso se produzca una "precompresión" del ladrillo. Este planteamiento consideraba un módulo de elasticidad de la fábrica de ladrillo uniforme en todo el perímetro y no tenía en cuenta las irregularidades y discontinuidades de la misma. Sin embargo, el estudio realizado permitió concluir que el orden de magnitud de los esfuerzos producidos en la fábrica de ladrillo era

considerablemente bajo y el efecto de las posibles irregularidades poco significativo, pudiéndose aceptar el planteamiento y las hipótesis consideradas como válidas, tal y como puso de manifiesto su excelente comportamiento una vez ejecutado (Figura 25).

Finalmente, desde un punto de vista constructivo, era necesario tener en cuenta el empuje hidrostático del hormigón fresco en la fábrica de ladrillo, que obliga a plantear unas fases de hormigonado del muro por tongadas de una altura máxima que garantice la estabilidad del muro existente frente a los empujes horizontales, disponiendo en caso necesario un sistema de arriostramiento provisional. Este sistema resulta necesario en los niveles superiores del muro, donde el pequeño peso de la fábrica de ladrillo la hace más inestable frente a los empujes horizontales.

Por otra parte, la situación de dos de los núcleos principales de apoyo en los extremos del alzado de la calle Gobernador suponía un condicionante determinante en el planteamiento del proceso constructivo y de tesado de los muros. En efecto, si se realizara el tesado del muro de Gobernador conectado a los dos núcleos, la enorme rigidez de éstos hubiera absorbido gran parte de los esfuerzos de tesado, impidiendo su transferencia a la zona central del muro y disminuyendo drásticamente su efecto. Era necesario por lo tanto liberar temporalmente el muro en uno de sus extremos, de manera que pudiera recoger libremente la acción del postesado, y conectarlo posteriormente al núcleo.

De acuerdo con estas consideraciones, el proceso constructivo considerado fue el siguiente (Figura 26):

- Limpieza de la cara interior de la fábrica de ladrillo existente. Ejecución de los cajeados de las ménsulas de conexión de la fachada con el muro de hormigón y colocación de las barras de anclaje.
- Armado y colocación de los cables del muro de hormigón, por fases de hormigonado (Figura 27). Disposición de los apeos y encofrados del muro interior de hormigón, y del sistema de arriostramiento de la fachada de ladrillo existente, en caso necesario. Humedecido de la fábrica de ladrillo en la zona a hormigonar, y hormigonado de la tongada correspondiente.

Esta fase se repite en todo el perímetro, según las tongadas previstas, hasta alcanzar la altura total de los muros. Se disponen además progresivamente dos niveles de arriostramiento horizontal provisional de los muros, que garantizan temporalmente su estabilidad hasta la ejecución de los forjados superiores.

Se deja únicamente sin hormigonar la esquina de las calles Gobernador y Alameda, a fin de liberar el muro de Gobernador de la coacción del núcleo de esta es-

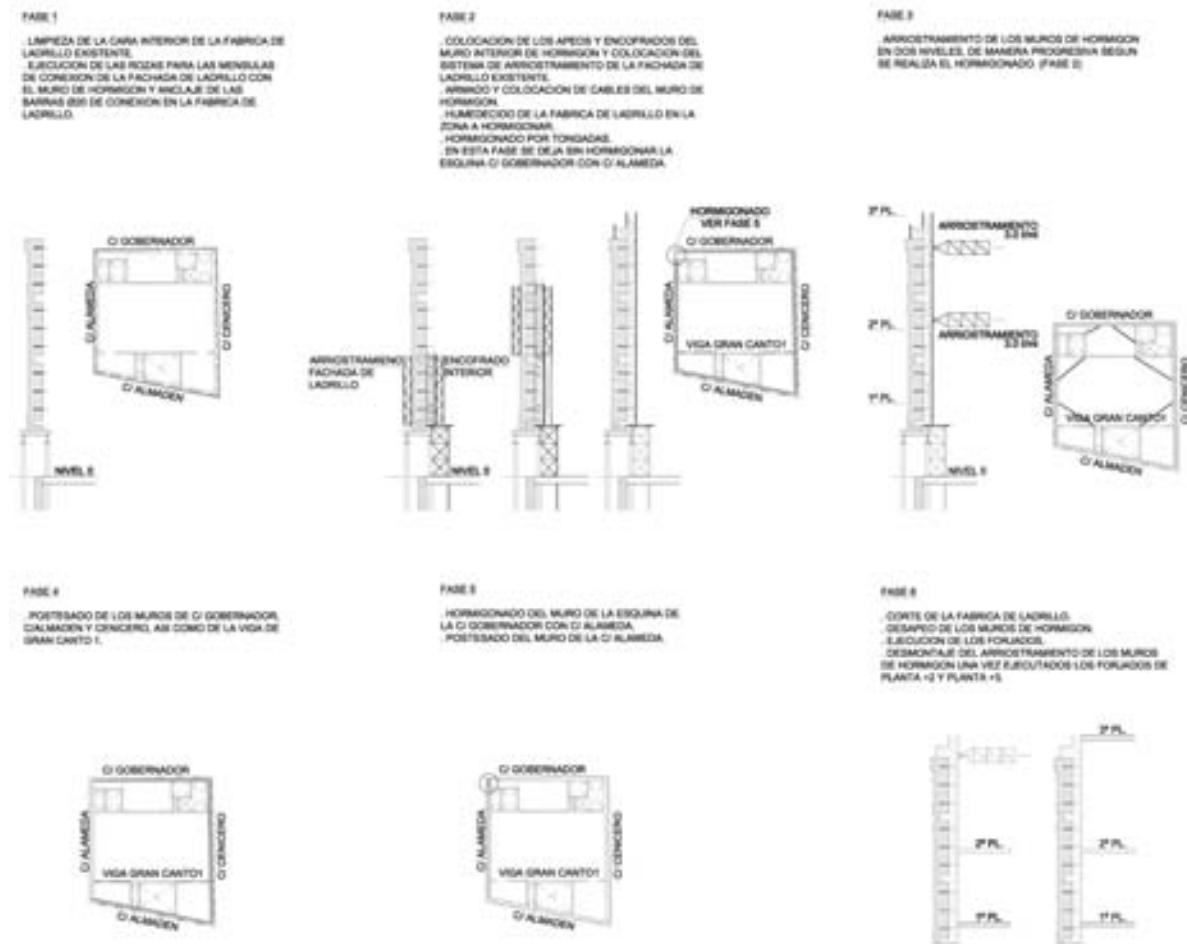


Figura 26. Proceso constructivo del muro perimetral postesado.



Figura 27. Colocación de las vainas de postesado en el muro perimetral.

quina y permitirle recoger y transferir libremente la acción del postesado. Al dejar sin hormigonar esta esquina, el muro de la calle Alameda se debe postesar en una fase posterior.

- Postesado de los muros de los alzados de Gobernador, Almadén y Ceniceró, así como de la viga de gran canto interior (Figura 28). El postesado se realiza de manera uniforme en toda la altura del muro, alternando los cables a tesar.
- Hormigonado del muro de la esquina de las calles Gobernador y Alameda, con los mismos criterios indicados para el resto de los muros. Postesado del muro de la calle Alameda.



Figura 28. Ejecución del tesado del muro perimetral.

- Ejecución de los forjados superiores y progresiva eliminación de los dos niveles de arriostramiento horizontal provisional de los muros.

5. CONCLUSIONES

Tratar de establecer pautas o criterios de diseño en el campo de la edificación singular resulta en cierto sentido contradictorio con la propia naturaleza de sus estructuras, singulares, particulares y en gran medida únicas o intransferibles. Sin embargo, de la experiencia del desarrollo y ejecución de los sistemas estructurales postesados aquí expuestos consideramos que se pueden extraer, si no conclusiones categóricas, sí algunos aspectos diferenciadores y puntos de reflexión que resulta interesante tener en cuenta en el planteamiento de este tipo de soluciones.

En primer lugar, los sistemas postesados ofrecen grandes posibilidades a las estructuras de edificación singular, permitiendo resolver eficazmente problemáticas asociadas a este tipo de proyectos, como los derivados de las grandes luces y voladizos, y permitiendo además conjugar y compatibilizar adecuadamente tanto los requisitos derivados de la magnitud y complejidad estructural, como de su condición intrínseca de edificación. No olvidemos que la adopción de tipologías estructurales exigentes conlleva dimensiones significativas de esos elementos estructurales y que con tecnologías menos apropiadas plantearían problemas de escala con la arquitectura de muy difícil conciliación y solución.

En este sentido, uno de los requisitos más significativos y delicados de las estructuras de edificación son sus importantes condicionantes de flecha, que resultan de difícil resolución en el caso de grandes luces, y que el postesado permite regular y controlar adecuadamente.

Por otra parte, las estructuras de edificación están asociadas a la definición, en líneas generales, de esquemas estáticos complejos, de gran hiperestaticidad espacial, que deben ser tenidos en cuenta en el planteamiento y definición del sistema estructural. En el caso de los sistemas postesados, esta problemática puede ser a menudo fácilmente resuelta planteando un proceso constructivo y unas fases y órdenes de tesado acordes con el sistema previsto. Así, una solución en estos casos consiste en aislar temporalmente los sistemas estructurales, de manera que el postesado se aplique sobre una estructura más sencilla y controlable, evitando que la gran hiperestaticidad del sistema completo pueda oponerse a la acción del postesado, reduciendo o incluso desvirtuando su efecto. En este sentido se considera el tesado de las losas de Caixaforum o del Auditorio de Torre Vieja, independizándolas temporalmente de determinados elementos de apoyo de gran rigidez, o el proceso constructivo y de tesado del muro perimetral de Caixaforum, que debe evitar la coacción horizontal de los núcleos principales.

Sin embargo, la necesidad de plantear procesos constructivos por fases, unido a la importante magnitud de los elementos a postesar y a su complejidad inherente, aconsejan a menudo simplificar al máximo el trazado y la disposición de los cables de postesado. Así, si de una manera simplificada consideramos el efecto del postesado en una estructura como el resultado de dos acciones combinadas: compresión uniforme de la sección y fuerzas de desvío procedentes del trazado curvo de los cables, en algunos de los proyectos analizados, como los muros de Caixaforum y del Auditorio de Torre Vieja, se renuncia a los efectos derivados del trazado curvo de los cables. En estos casos, el planteamiento de un trazado de los cables correspondiente con el antifunicular de las cargas hubiera supuesto grandes complejidades constructivas y de control, que hubieran puesto en cuestión el interés o incluso la viabilidad de la solución. Sin embargo, la gran dimensión e inercia de los elementos a postesar (muros de hormigón de más de diez metros de altura), permite obtener esfuerzos de flexión opuestos a los debidos a las cargas gravitatorias mediante la concentración de los cables en una zona determinada de la sección, lo que supone una aplicación excéntrica de las fuerzas de postesado. Es el caso del muro lateral del Auditorio de Torre Vieja y de uno de los alzados del muro perimetral y del muro interior postesado de Caixaforum. En este último proyecto se considera incluso en el resto de los alzados la disposición de un trazado recto horizontal uniforme de los cables, que genera una compresión uniforme del muro en toda su sección y no supone esfuerzo alguno de flexión.

Dentro de las consideraciones relativas al proceso constructivo es interesante también señalar la importancia de valorar detenidamente la disposición de los anclajes activos y pasivos, en función de las características geométricas, a menudo de cierta irregularidad y complejidad, los intereses arquitectónicos (como el dejar determinados elementos o cantos del forjado en hormigón visto, sin las cajas de anclaje visibles), y los requisitos derivados del propio proceso de montaje y tesado. La compatibilidad de estos criterios obliga en ocasiones a alternar la disposición de anclajes activos y pasivos o a la colocación de los anclajes en cara superior de forjado, como ocurre en el proyecto de Juzgados en Ciudad Real.

Por último, destacar que como sistema de postesado se ha considerado en todos los casos analizados postesado adherente, según se ha ido indicando, cuyas características y productos consideramos se adaptan mejor, en líneas generales, a las necesidades estructurales y constructivas de estos proyectos.

Se incluye a continuación una tabla resumen de los sistemas postesados planteados en los proyectos analizados, indicando sus principales características y cuantías, reseñadas a lo largo del artículo, a modo de resumen comparativo y referencia (Figura 29).

PROYECTO	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS POSTESADO Y CUANTÍAS
Teatro y Auditorio Municipal de Torre vieja	Losa aligerada de platea	Luz: 22,80 m Canto: 70 cm Aligeramientos entre nervios	Disposición de dos cables por nervio Trazado parabólico Tendones adherentes de 15 x 0,6" Cordones Y1860 S7 Hormigón HP-40 Anclajes activo / pasivo accesible Cuantía: 18,0 kg/m ²
	Muro de cuelgue	9 tirantes verticales Longitud tirantes: 14 m	Disposición de dos cables por tirante Trazado recto vertical Tendones adherentes de 4 x 0,6" Cordones Y1860 S7 Hormigón HP-40 Anclajes activo / pasivo accesible Cuantía: 4,0 kg/m ²
	Muro lateral en voladizo	Voladizo: 18,0 m Altura muro: 21,50 m Canto: 35 cm	Concentración de cables en tramo superior Tendones adherentes de 15 x 0,6" Cordones Y1860 S7 Hormigón HP-40 Anclajes activo / pasivo accesible Cuantía: 5,0 kg/m ²
Nuevo edificio Juzgados de Ciudad Real	Pasarelas	Luz: 14,0 m Canto: 35 cm Vano isostático	Disposición de cables cada 25 cm Trazado parabólico Tendones adherentes de 3 x 0,6" Cordones Y1860 S7 Hormigón HP-35 Anclajes activo / pasivo no accesible Cuantía: 14,5 kg/m ²
	Losa de cubierta en voladizo	Vuelo variable: 3,75 – 21,50 m Canto variable: 0,50 – 1,00 m	Trazado parabólico Tendones adherentes de 4 x 0,6" y 9 x 0,6" Cordones Y1860 S7 Hormigón HP-35 Anclajes activo / pasivo no accesible Cuantía: 28,5 kg/m ²
Caixaforum Madrid	Losa sobre auditorio	Luz máxima: 15,0 m Canto: 50 cm Vanos isostáticos / continuos	Distribución uniforme unidireccional Trazado parabólico Tendones adherentes de 12 x 0,6" Cordones Y1860 S7 Hormigón HP-40 Anclajes activo / pasivo accesible Cuantía: 18,5 kg/m ²
	Muro perimetral	Luz máxima: 15,0 m Vuelo máximo: 11,5 m Altura muro: 11,0 m Espesor: 50 cm	Distribución uniforme unidireccional Trazado horizontal Tendones adherentes de 12 x 0,6" Cordones Y1860 S7 Hormigón HP-40 Anclajes activo / pasivo accesible Cuantía: 9,0 kg/m ²

Figura 29. Tabla resumen de los sistemas postesados analizados.

RELACIÓN DE PARTICIPANTES

✓ Teatro y Auditorio Municipal de Torreveja

Arquitectos: FOA Architects, Arquem Arquitectos

Estructuras: NB35 Ingeniería

Contratista general: Necso

Contratista postesado: Freyssinet

✓ Juzgados de Ciudad Real

Arquitectos: Guillermo Vázquez Consuegra

Estructuras: NB35 Ingeniería

Contratista general: Alcuba

Contratista postesado: Dywidag sistemas constructivos

✓ Caixaforum Madrid

Arquitectos: Herzog & de Meuron, Mateu i Bausells.

Estructuras: NB35 Ingeniería, WGG Schnetzer-Puskas

Contratista general: Ferrovial - Agromán

Contratista postesado: Tecpresa

✓ NB35 Ingeniería (Equipo de los proyectos analizados)

Jesús Jiménez, Antonio Gimeno, Eduardo Gimeno, Alejandro Bernabeu, Roberto Duque, Marian Sánchez, José Ignacio García, José Antonio Bermejo, Lola Tena, Javier Garrayo, Germán Gil.

✓ Fotos y documentación gráfica

NB35 Ingeniería, Fundación La Caixa, archivo Herzog & de Meuron y Vázquez Consuegra Arquitectos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Rui-Wamba, Javier. "El uso del postensado en estructuras de edificación". *Hormigón y Acero*. 1989, nº 170, p. 23-32.

[2] Llombart, José Antonio. "El postesado en edificación". *Hormigón y Acero*. 2000, nº 215, p. 127-139.

[3] Lima, Juan y Ossó, Pedro. "Forjados postesados: Tipologías -Rangos de utilización- Predimensionamiento". *Quaderns d'Estructures*. Febrero 2006, nº 22, p. 42-52.

[4] Rui-Wamba, Javier. "El pretensado como instrumento de diálogo entre la ingeniería y la arquitectura". *Hormigón y Acero*. 2000, nº 215, p. 35-43.

[5] Aguiló, Miguel. *Estructuras para edificios singulares españoles*. Madrid: Edición Grupo ACS, 2008.

[6] Duque Corroto, Roberto y Jiménez Cañas, Jesús. "Teatro y auditorio municipal de Torreveja (FOA Architects-Arquem Arquitectos y NB35 Ingeniería)". En: *IV Congreso Internacional de Estructuras de la Asociación Científica del Hormigón Estructural (ACHE)*, (Valencia 24-27 de noviembre de 2008).

[7] El Croquis (ed.). "Herzog & de Meuron. 2002-2006". *El Croquis*, nº 129 / 130. Madrid, 2006.

[8] Jiménez Cañas, Jesús y Bernabeu Larena, Alejandro. "Caixaforum Madrid". *Revista de Obras Públicas*, 155 (3487), 2008, p. 8-30.

[9] "Instrucción de hormigón estructural" EHE 08. Ministerio de Fomento, 2008.

CAIXAFORUM MADRID (Herzog & de Meuron y NB35 Ingeniería)

Alejandro BERNABEU LARENA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

NB35 Ingeniería

Director

abernabeu@nb35.es

Jesús JIMENEZ CAÑAS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

NB35 Ingeniería

Presidente

jjimenez@nb35.es

Resumen

La ponencia ofrece un análisis detallado de la estructura de Caixaforum Madrid, rehabilitación y ampliación de la antigua central eléctrica del Mediodía, en el que un potente gesto arquitectónico elimina la base inferior del muro existente de ladrillo, dejando el volumen del nuevo edificio "suspendido" en el aire. Se consideran en primer lugar los objetivos arquitectónicos y el concepto estructural planteado, realizando a continuación un análisis detallado de los principales elementos estructurales del proyecto. Especial atención merece en este análisis el macrosistema estructural, formado por tres potentes núcleos de hormigón, únicos elementos portantes verticales del edificio, y un muro perimetral continuo de hormigón postesado, adosado y conectado al muro existente de ladrillo.

Palabras Clave: Caixaforum, edificación singular, muro postesado, losa postesada, estructura mixta.

1. Introducción. Planteamiento arquitectónico y concepto estructural.

El nuevo edificio de Caixaforum Madrid, de los arquitectos suizos Herzog & de Meuron, alberga el nuevo centro social y cultural de la Fundación la Caixa en Madrid. Situado estratégicamente en el Paseo del Prado, frente al Jardín Botánico y junto al Museo del Prado, el Museo Thyssen-Bornemisza y el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, Caixaforum Madrid se enmarca dentro del Proyecto de reordenación del eje Recoletos-Prado y se suma a la impresionante oferta cultural que se concentra en esa zona de la ciudad (Fig. 1).



Fig. 1. Vista del edificio terminado. (Fundación la Caixa).

El nuevo edificio consiste en la rehabilitación y ampliación de la antigua Central Eléctrica del Mediodía, construida en 1899 por el arquitecto Jesús Carrasco y Encina, y que constituye uno de los escasos ejemplos de arquitectura industrial que aún se mantienen en el casco antiguo de Madrid.

El planteamiento arquitectónico del proyecto se basa en dos objetivos fundamentales: conectar directamente el nuevo edificio de Caixaforum con el Paseo del Prado, mejorando su visibilidad y revalorizando la zona, y configurar un gran espacio público, una plaza, en una zona de Madrid especialmente congestionada y abigarrada.

La conexión del nuevo edificio con el Paseo del Prado se consigue al disponer del solar contiguo, ocupado anteriormente por una gasolinera y que se mantiene ahora como un espacio libre, completamente diáfano, permitiendo el acceso directo al edificio y aumentando enormemente su visibilidad (Fig. 2).

Por otra parte, la generación de la plaza pública se logra gracias a un único y potente gesto arquitectónico, que consiste en eliminar el zócalo inferior del muro perimetral existente, de manera que el volumen superior del edificio queda "suspendido" en el aire, creándose un amplio espacio público resguardado que ocupa la totalidad de la superficie del solar disponible (Fig. 2).

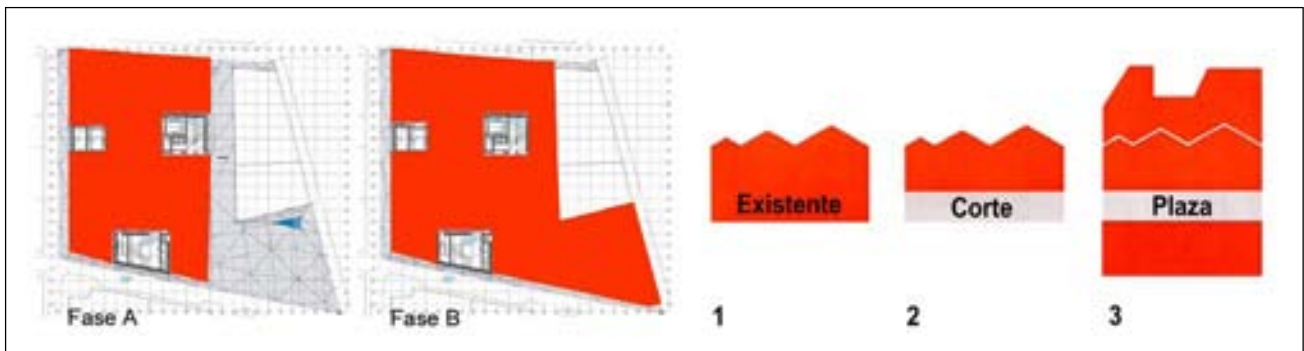


Fig. 2. Planteamiento arquitectónico. (Herzog & de Meuron).

El corte del zócalo inferior transforma irremediamente la función de los pesados muros de ladrillo del antiguo edificio existente, que dejan de ser unos elementos portantes y se convierten, en la nueva situación estática, en un mero "revestimiento", una piel, modificando radicalmente la percepción del nuevo volumen, que parece levitar ahora sobre el suelo en un aparente desafío a la ley de la gravedad.

La configuración arquitectónica y programática del edificio se completa con la ocupación del espacio bajo rasante en dos niveles de sótano, que se extienden también bajo el solar de la antigua gasolinera, y con la incorporación de un volumen superior, cuya geometría quebrada deriva del perfil tridimensional de los edificios contiguos, ampliando la superficie útil total de los 2.000 m² de la antigua Central Eléctrica a unos 10.000 m².

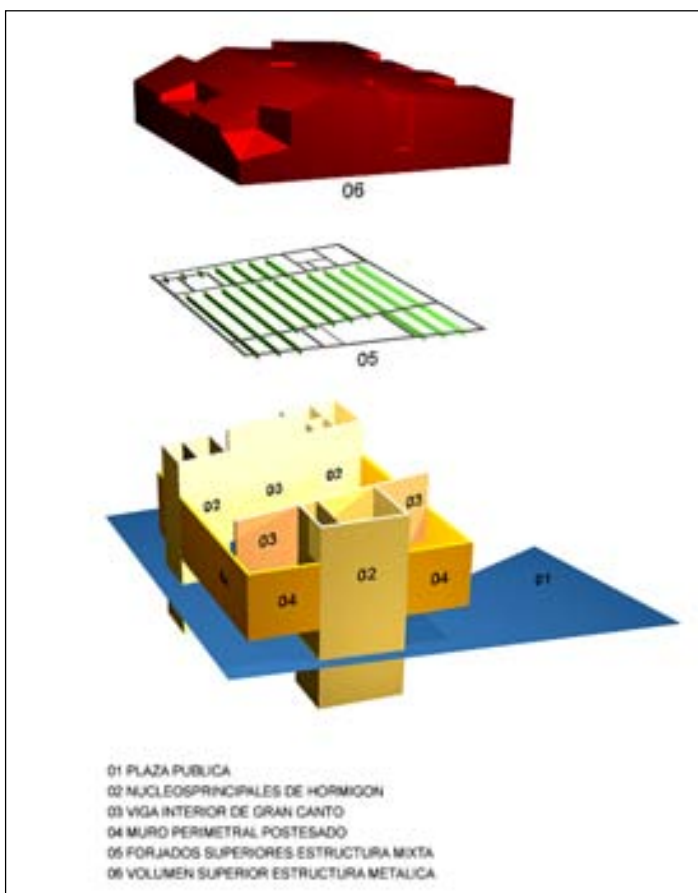


Fig. 3. Planteamiento conceptual de la estructura.

A partir de este planteamiento arquitectónico, la problemática estructural principal reside en plantear un sistema que sea capaz de recoger la totalidad de las cargas verticales del volumen sobre rasante (muro perimetral de ladrillo, forjados y cubierta) y transmitir las a cimentación, sin interferir con el espacio público de la plaza. Para resolver esta cuestión se planteó un macrosistema estructural formado por tres potentes núcleos de hormigón situados en puntos estratégicos del perímetro (únicos elementos portantes verticales), un muro perimetral continuo, adosado y conectado interiormente al muro de ladrillo, y dos paredes estructurales interiores de gran canto que conectan los núcleos con el muro perimetral. Según este sistema los forjados superiores y la cubierta apoyan directamente en el nuevo muro perimetral, que recoge además el peso propio del muro de ladrillo, y en las vigas interiores de gran canto, apoyándose todo el sistema en los tres núcleos, que transmiten la totalidad de las cargas a cimentación (Fig. 3). El volumen del nuevo edificio queda así soportado exclusivamente en tres puntos, los núcleos perimetrales de hormigón, que actúan además como núcleos de comunicación vertical del edificio (escaleras, ascensores e instalaciones) y le confieren la imprescindible rigidez y estabilidad horizontal.

A partir de este macrosistema estructural se define la ordenación de las plantas superiores, que deja libre de soportes el espacio central, de unas dimensiones aproximadas de 20,0 x 36,0 metros, y genera tres espacios laterales de menor dimensión anexos a los núcleos. La estructura de estos forjados se resuelve con una estructura mixta que apoya en el muro perimetral y en las vigas interiores de gran canto, mientras que el volumen superior, ampliación del antiguo edificio, se plantea con una serie de pilares metálicos que nacen sobre el nuevo muro perimetral y recogen la estructura de la cubierta, también metálica.

2. Estabilización y apeo provisional de la fachada existente.

Del antiguo edificio de la Central Eléctrica del Mediodía se mantienen exclusivamente los muros perimetrales de ladrillo, demoliéndose y desmontándose tanto la estructura de la cubierta como todos los forjados y muros interiores, así como la totalidad de las instalaciones bajo rasante.

El proceso de desmontaje de la cubierta y demolición de los forjados interiores, y el apeo provisional de la fachada original hicieron necesario el planteamiento de un doble sistema de arriostramiento y apeo, que garantizara la estabilidad de los muros de fábrica frente a las acciones horizontales de viento y la transmisión provisional de las cargas verticales de peso propio a cimentación hasta la completa ejecución del nuevo macrosistema estructural.



Fig. 4. Sistema provisional de estabilización y apeo de la fachada existente.

El arriostramiento horizontal se resolvió mediante un sistema tradicional de castilletes metálicos, situados en el exterior de la fachada. Este sistema presentaba sin embargo una singularidad, al sustituir la habitual viga metálica interior que conecta la fachada con los castilletes exteriores por una pletina metálica. Al tener que ejecutar posteriormente un nuevo muro de hormigón, adyacente y conectado a la fachada de fábrica, la presencia de una viga metálica interior hubiera dificultado enormemente el proceso de armado y hormigonado del nuevo muro, por lo que se optó por sustituir esta viga por una pletina metálica adosada al intradós del muro existente, que no interfiere así con el futuro muro de hormigón.

El apeo vertical de las fachadas se resolvió mediante un sistema formado por una serie de vigas transversales que recogían la carga vertical de la fachada de ladrillo y la transmitían, a través de dos vigas longitudinales que recorrían el perímetro interior y exterior del edificio, a unos castilletes de micropilotes (Fig. 4). Para controlar la deformada de los muros de fábrica y evitar la aparición de fisuras, debida principalmente a la flexión de las vigas de apeo en el momento de puesta en carga, se dispuso de un sistema de tornillos calibrados que permitieron precargar y predeformar las vigas perimetrales antes de realizar el corte del zócalo inferior de los muros. De esta manera la fachada no sufre deformaciones significativas al pasar a apoyarse en el sistema provisional de apeo, evitándose la indeseable aparición de fisuras.

3. Estructura bajo rasante y losa postesada sobre auditorio.

La estructura bajo rasante se resolvió en líneas generales con un sistema convencional de apoyos verticales (muros y pilares) y losas macizas de hormigón armado, ajustado a la geometría y los requisitos de cada zona.

Únicamente en la zona correspondiente a los espacios bajo rasante del auditorio y del hall principal, con luces de aproximadamente 15,0 metros y cargas importantes (plaza pública con posibilidad de acceso de bomberos), se planteó una solución de losa postesada, liberando estos espacios de la presencia de cualquier elemento estructural y ofreciendo un canto del forjado ajustado que posibilita alcanzar importantes alturas libres.

Esta losa tiene un canto constante de 50 cm y está postesada con tendones adherentes formados por 12 cables de 0,6", uniformemente distribuidos en la dirección de menor luz, y que ajustan su trazado en función de los requisitos de cada zona. Así, las zonas laterales de la losa se comportan como un vano isostático, mientras que la existencia de dos muros intermedios de apoyo muy próximos entre sí en la zona central hacen que el sistema se asemeje al comportamiento de una viga continua de dos vanos, debiéndose en consecuencia adaptar el trazado de los cables de esa zona.

El apoyo de la losa postesada en los muros perimetrales de contención se resolvió mediante apoyos provisionales de neopreno que permitían un pequeño desplazamiento de la losa durante el proceso de tesado y evitaban posibles coacciones horizontales que hubieran reducido el efecto del postesado. Sin embargo, una vez completado el tesado se rigidizó la conexión, impidiéndose el desplazamiento horizontal de la losa de manera que ésta actúe como arriostamiento horizontal de los muros frente a los empujes horizontales del terreno.



Fig. 5. Losa postesada sobre auditorio. Puesta en obra y vista del espacio interior terminado.

4. Macrosistema estructural: núcleos principales y muro perimetral postesado.

El macrosistema estructural está formado por un muro perimetral, adosado y conectado a la fachada de ladrillo, dos vigas pared interiores de gran canto y tres potentes núcleos verticales que, dispuestos en puntos estratégicos del perímetro, sirven de apoyo al muro perimetral y a las vigas pared, recogiendo la totalidad de las cargas verticales y transmitiéndola hasta cimentación.

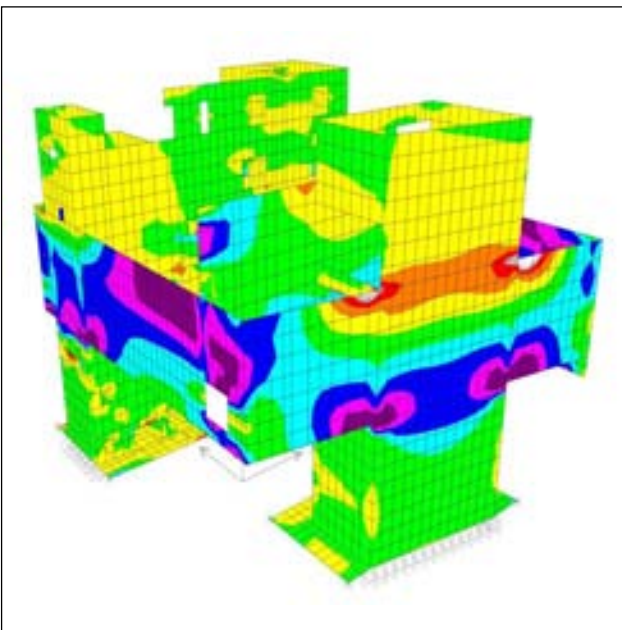


Fig. 6. Macrosistema estructural. Modelo de cálculo.

Los núcleos principales, de una dimensión en planta aproximada de 10 x 10 metros, están constituidos por potentes muros de hormigón armado de hasta 50 cm de espesor y resuelven, además de la transmisión de cargas verticales, la estabilidad horizontal del conjunto.

El muro perimetral tiene una altura total de 11 metros, entre los niveles de planta primera y planta tercera, mientras que las vigas interiores de gran canto se disponen respectivamente como prolongación de la cara interior del núcleo de la calle Almadén, con una altura de 12 metros entre planta segunda y planta cuarta, y como conexión de los dos núcleos correspondientes a la calle Gobernador, con una altura total de 17 metros entre planta primera y cuarta. Sin embargo, a pesar del importante canto de estos elementos, la gran longitud de las luces y voladizos que deben salvar y la magnitud de las cargas que recogen hacen que se produzcan esfuerzos muy elevados, que aconsejaron plantear un sistema de postesado de los muros que permitiera asumir los esfuerzos de tracción y controlar la fisuración (Fig. 6).

Desde un punto de vista de seguimiento y adecuación de los esfuerzos en el muro perimetral la consideración de un trazado parabólico de los cables de postesado hubiera resultado sin duda muy adecuado. Sin embargo, la difícil ejecución y control de un sistema de postesado de estas características y las particulares circunstancias de la obra, que hubieran obligado a tener dispuesto la totalidad del sistema de cableado con su armado correspondiente antes de proceder al hormigonado, hizo que se decidiera optar por una solución alternativa de trazado recto de los cables. Se favorece así enormemente el proceso de ejecución y control del sistema, a pesar de no beneficiarse de los efectos debidos a la introducción de fuerzas de desviación de un trazado curvo de los cables.

El sistema de postesado adoptado consiste por tanto en una disposición uniformemente distribuida de cables horizontales, formados por tendones de 12 cables de 0,6", que generan una compresión uniforme en toda la altura del muro, de 50 cm de espesor, del orden de 35 - 40 kg/cm². En la práctica, la disposición de los cables debe ajustarse en cada alzado a la existencia de huecos en la fachada, si bien en líneas generales el trazado propuesto permitió obtener una compresión prácticamente uniforme en toda la altura del muro, reduciendo los esfuerzos de tracción pero aumentando el nivel tensional de las zonas comprimidas, que deben por lo tanto controlarse cuidadosamente (Fig. 7).

La importante inercia de los muros, de 11 metros de altura, y el trazado horizontal de los cables, que no introduce fuerzas de desvío que se opongan a la flexión propia de los muros, hace que los esfuerzos derivados del postesado no tengan apenas influencia directa en la deformación del sistema. Sin embargo sí permiten controlar la fisuración, al disminuir significativamente el nivel de tracciones, y reducir los efectos diferidos del hormigón, controlándose indirectamente la deformada, que en líneas generales se mantuvo en el orden de los 5 a 10 mm de flecha instantánea previstos según las zonas.

En los alzados correspondientes a la calle Almadén y a una de las vigas de gran canto, paralela a dicha calle, se planteó sin embargo un esquema de los cables distinto, que sí aplica tensiones diferenciadas a la sección. En este caso el comportamiento estructural es equivalente al de dos vigas en ménsula empotradas en la pared sur del núcleo portador del sistema. Esto permitió concentrar el postesado horizontal en la zona superior de la sección, reduciendo los esfuerzos de flexión en el empotramiento de la ménsula y disminuyendo la deformada en su extremos (Fig. 7).

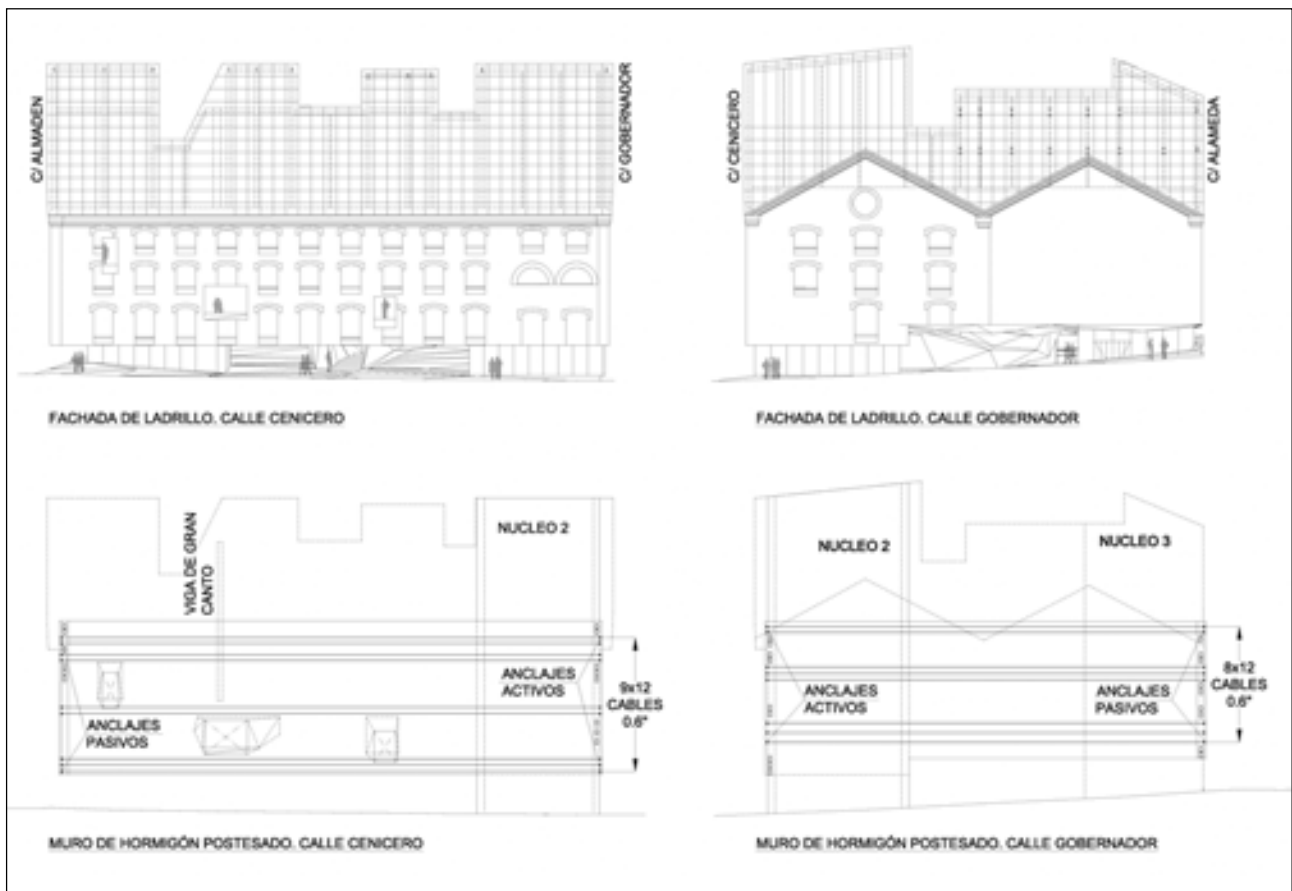


Fig. 7. Muro perimetral postesado. Alzados calle Cenicero y calle Gobernador.

La disposición de los muros perimetrales postesados adosados al antiguo muro de ladrillo plantea dos problemas fundamentales: cómo realizar la conexión de la fachada, de casi 1,0 m de espesor, al nuevo muro de hormigón y cómo controlar los esfuerzos debidos al tesado del muro de hormigón y a los efectos reológicos del mismo en la fachada de ladrillo.

Para resolver estas cuestiones se consideró inicialmente la posibilidad de ejecutar el muro de hormigón independiente de la fachada existente, materializando la conexión entre ambos una vez realizado el postesado del muro. Sin embargo, la enorme dificultad constructiva que suponía realizar esta conexión a posteriori, y el hecho de que una vez conectados el muro de hormigón y la fachada de ladrillo se producirían, en cualquier caso, transferencias de esfuerzos entre ambos, aconsejaron realizar la conexión durante el proceso de hormigonado del nuevo muro, antes de realizar el tesado, contemplando la relación e interacción entre ambos desde el primer momento.

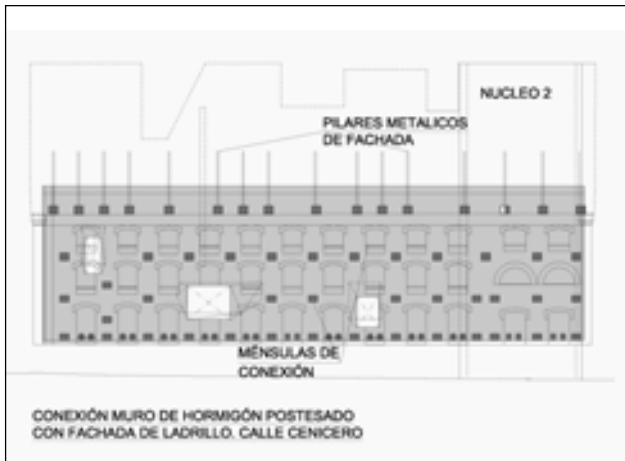


Fig. 8. Conexión del muro postesado a la fachada existente.

Para materializar la conexión se practicaron una serie de cajeados en la cara interior de la fachada de ladrillo que permitían que el hormigón del muro entrara en la fachada, a modo de ménsulas de anclaje capaces de recoger la totalidad de las cargas de peso propio de la fachada, y que garantizan además su estabilidad horizontal (Fig. 8). Adicionalmente a este sistema de ménsulas se distribuyeron uniformemente un conjunto de redondos anclados a la fachada de ladrillo que, junto con la activación del rozamiento entre las superficies de ladrillo y hormigón, contribuyen a dispersar la transferencia de cargas de manera que se produzca de manera suave y uniforme. Se evita así la acumulación de esfuerzos en torno a las ménsulas de conexión, que hubiera supuesto la aparición de fisuras locales en la fábrica de ladrillo.

Estando conectados la fachada de ladrillo y el muro de hormigón, era necesario considerar y controlar la posible transferencia de esfuerzos al ladrillo como consecuencia del tesado del muro de hormigón. En este sentido se decidió considerar la sección formada por el muro de hormigón y la fachada de ladrillo como una sección mixta, situando los cables de pretensado en el centro de gravedad de la sección compuesta hormigón-ladrillo, de manera que los esfuerzos de pretensado generaran una compresión uniforme entre ambos.



Fig. 9. Muro perimetral postesado, una vez desapeado.

Así, la relación entre el módulo de elasticidad de la fábrica de ladrillo y el del hormigón, de un factor 10, hace que los 100 cm del muro de ladrillo equivalgan a un aumento de 10 cm del muro de hormigón, lo que suponía un desplazamiento de 5 cm en la posición de los cables de pretensado. Se evita así la aparición de tracciones en la cara exterior de la fábrica de ladrillo debidas a la excentricidad de los esfuerzos de postesado, comprimiendo uniformemente la sección compuesta, de manera que en todo caso se produzca una "precompresión" del ladrillo. Este planteamiento consideraba un módulo de elasticidad de la fábrica de ladrillo uniforme en todo el perímetro y no tenía en cuenta las irregularidades y discontinuidades de la misma. Sin embargo, el estudio realizado permitió concluir que el orden de magnitud de los esfuerzos producidos en la fábrica de ladrillo eran considerablemente bajos y el efecto de las posibles irregularidades poco significativo, pudiéndose aceptar el planteamiento y las hipótesis consideradas como válidas, tal y como puso de manifiesto su excelente comportamiento una vez ejecutado (Fig. 9).

Con respecto al control de los efectos diferidos del hormigón y su posible influencia en la fábrica de ladrillo, se comprobó que la magnitud de las deformaciones producidas por estos fenómenos una vez realizado el postesado del muro era de poca magnitud. En cualquier caso se dispuso un armado horizontal uniforme de control de la retracción, que contribuye a garantizar una mínima transferencia de esfuerzos a la fábrica de ladrillo.

Finalmente, desde un punto de vista constructivo, el tesado del muro perimetral se realizó en dos fases (Fig. 10). En primer lugar se tesaron los muros de las calles Gobernador, Almadén y Cenicero, y la viga de gran canto 1, manteniendo sin hormigonar la esquina de las calles Gobernador y Alameda, que debido a su proximidad con uno de los núcleos presentaban una rigidez muy importante que hubiera reducido los efectos del tesado del muro de la calle Gobernador, disminuyendo fuertemente su influencia. Una vez completada la primera fase de tesado se realizó el hormigonado de esta esquina y se postesó el muro de la calle Alameda. Durante todo el proceso de tesado se dispuso un sistema de arriostramiento horizontal de los muros de hormigón, que garantizara su estabilidad en el plano perpendicular a la fachada hasta la ejecución de los forjados superiores.



Fig. 10. Ejecución de tesado del muro perimetral.

5. Estructura mixta forjados sobre rasante.

La planta de los niveles superiores está geoméricamente definida por los tres núcleos de comunicación, el muro perimetral y las dos vigas pared interiores. Estos elementos definen un espacio central, correspondiente a la sala principal de exposiciones, de aproximadamente 20,0 x 36,0 metros, y tres espacios laterales de menor luz, anexos a los núcleos. La estructura de estos forjados se resolvió mediante un sistema mixto, formado por vigas metálicas alveoladas (a fin de permitir el paso de conductos de instalaciones) situadas cada 3,0 metros, y un forjado nervado de hormigón, de chapa grecada, que actúa como cabeza de compresión (Fig. 12). Estas vigas mixtas salvan una luz máxima de 20 metros entre las dos vigas de gran canto y tienen un canto total (viga metálica y capa de compresión) de 110 cm.

En el caso de la estructura del nivel 2 algunas de las vigas soportan, además de las cargas propias de este forjado, cargas puntuales correspondientes al cuelgue del forjado de planta primera, formado por una compleja estructura mixta tridimensional. En este caso, al soportar cargas mayores, el canto total de la sección mixta es de 120 cm, requiriendo las vigas metálicas espesores de alas importantes, de hasta 80 mm en las de mayor sollicitación.

La solución de forjados mixtos propuesta es muy ligera, lo que supone una enorme ventaja de cara al planteamiento y dimensionado del macrosistema estructural de muros perimetrales y vigas pared, que recoge la carga de los forjados y la transmite a los núcleos principales, y constituye además un sistema de gran rapidez y facilidad constructiva. Así mismo, la solución adoptada contribuye positivamente a definir la configuración espacial de las salas de exposiciones, cuyo falso techo adopta una geometría acorde con la modulación de la estructura, con un ritmo que viene definido por la posición de las vigas estructurales, dispuestas cada 3,0 metros, y unas "falsas vigas" intermedias que permiten el paso de los conductos de instalaciones y de iluminación (Fig. 11).

El forjado correspondiente a la planta primera (techo de la plaza pública) presenta una gran complejidad geométrica, estructural y constructiva, al tener que compatibilizar la geometría triangular quebrada de fuertes pendientes que define el techo de la plaza con la superficie horizontal del nivel de planta primera. Se genera así una volumetría espacial de cantos muy diversos, de 22 cm a 183 cm según las zonas, a la que debe acomodarse y dar respuesta la estructura.



Fig. 11. Estructura mixta niveles superiores. Ejecución y galería de exposiciones terminada.

En conformidad con este planteamiento geométrico la estructura se planteó como un sistema mixto formado por una estructura metálica tridimensional, que se ajusta a la volumetría del techo de la plaza pública, y una capa de compresión de hormigón, de 15 cm de espesor, que constituye el forjado horizontal de la planta primera. Esta estructura se apoya en el macrosistema formado por el muro perimetral, las vigas de gran canto y los tres núcleos de comunicación, y en una serie de puntos interiores, en los que cuelga del nivel superior.

La estructura metálica tridimensional está formada en su cara inferior por una serie de planos metálicos triangulares que definen la topografía quebrada del techo de la plaza y constituyen el ala inferior de la estructura mixta. Un conjunto de rigidizadores metálicos principales actúan como alma de la viga, uniendo el ala inferior con una placa metálica superior sobre la que se conecta el forjado horizontal de hormigón, que actúa así como cabeza de compresión del sistema mixto. Los rigidizadores principales se disponen en las aristas de intersección entre los distintos triángulos metálicos, adoptando por lo tanto un canto variable que se acomoda a la definición geométrica de cada zona, compatibilizando la geometría quebrada de los triángulos inferiores con el plano horizontal del forjado superior (Fig. 12).

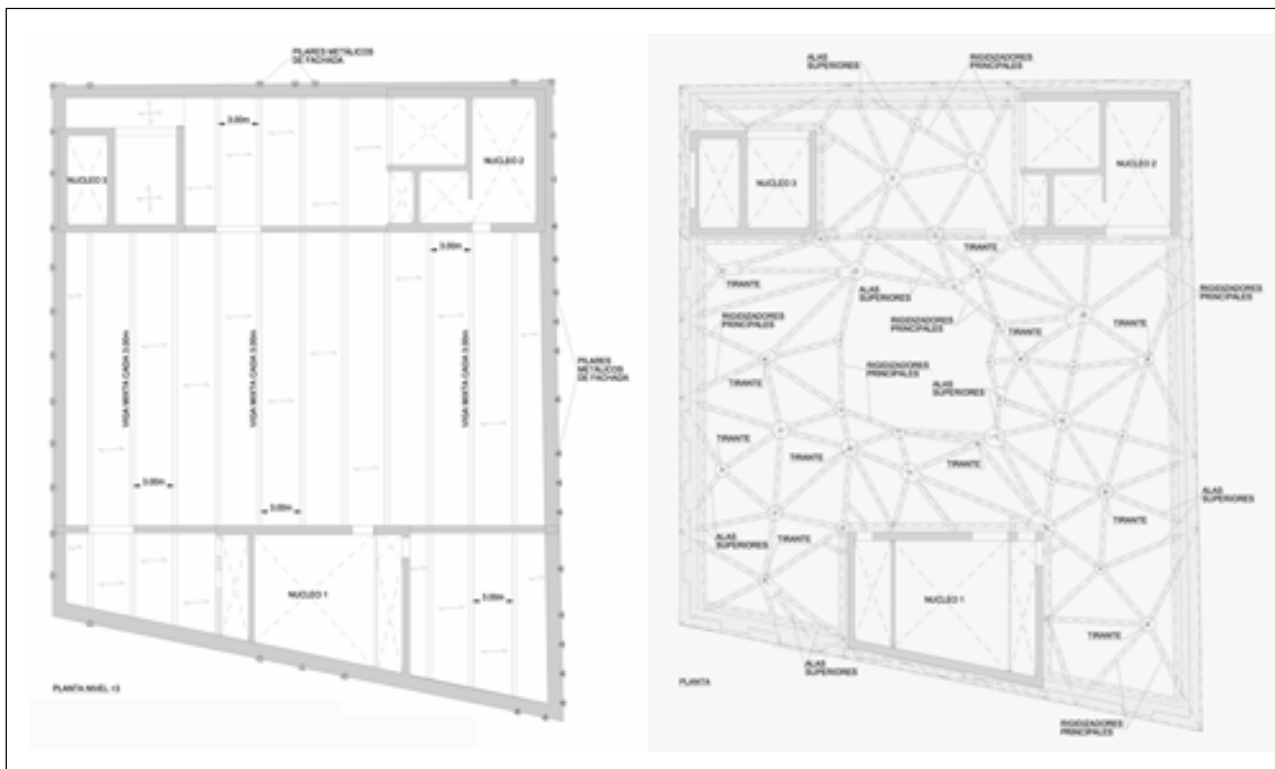


Fig. 12. Planta tipo forjados mixtos superiores y planta forjado nivel 1.

La estructura mixta está así constituida por un conjunto de módulos poliédricos que se conectan entre sí hasta ocupar la totalidad de la superficie. Cada uno de estos módulos está formado por los siguientes elementos (Fig. 13):

- Placas metálicas inferiores, de 12 mm de espesor y forma triangular. Estas placas se refuerzan con una serie de rigidizadores secundarios que evitan la abolladura de las chapas.
- Rigidizadores verticales principales, de 12 mm de espesor y canto variable. La disposición de los rigidizadores en las aristas de las placas inferiores triangulares hace que en un mismo punto se produzca la intersección de hasta ocho rigidizadores principales, con ángulos en ocasiones muy cerrados. Esta intersección se resolvió mediante cilindros metálicos, de diverso diámetro en función de los requisitos de cada punto, que permiten conectar los distintos rigidizadores que coinciden en un mismo nudo. Estos cilindros alojan además el anclaje de los tirantes metálicos en aquellos nudos en los que la estructura cuelga del nivel superior.
- Alas metálicas superiores, de 12 mm de espesor y 30 cm de ancho, sobre las que se disponen los pernos conectadores de unión de la estructura metálica con la capa de compresión de hormigón. La continuidad de las alas metálicas superiores en los nudos de conexión se resolvió mediante placas metálicas circulares.

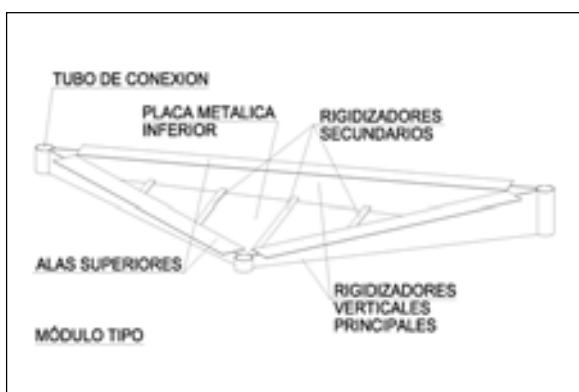


Fig. 13. Estructura mixta nivel 1. Módulo tipo: elementos principales y ejecución en taller.

6. Conclusión.

La complejidad y particularidad del proyecto sugiere el planteamiento combinado de tipologías y sistemas estructurales muy diversos, algunos de ellos de gran singularidad estructural y constructiva, como la realización de un muro de hormigón postesado, adosado y conectado a la fachada de ladrillo del edificio existente.

Se busca así ofrecer una respuesta específica adecuada a los diversos requisitos arquitectónicos, estructurales y funcionales de cada zona, como alternativa a las soluciones que buscan la uniformidad estructural del proyecto; soluciones en general poco adecuadas para este tipo de intervenciones, al tratar de ofrecer una solución única a situaciones y problemáticas diversas, en pos de una forzada uniformidad.

Este eclecticismo de soluciones estructurales, indeseable para la mayoría de las situaciones, encuentra en esta ocasión sin embargo una aplicación satisfactoria y adecuada al ponderarse tanto las peculiaridades arquitectónicas, de preexistencias, constructivas y programáticas presentes en este edificio.

El proyecto ofrece así un ejemplo interesante de relación y diálogo entre la definición arquitectónica y su soporte resistente, de manera que los distintos sistemas estructurales utilizados ponen de manifiesto y se adecuan a los diversos intereses arquitectónicos, definiendo un conjunto coherente que contribuye eficazmente al desarrollo formal del proyecto.