

Estructura colgada del edificio "Parc de Recerca Biomèdica" en Barcelona

Hanged structure of the building *"Parc de Recerca Biomèdica" in Barcelona*

♦
Miguel Ortega Cornejo

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A. Madrid

♦
Enrique Bordó Bujalance

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A. Madrid

♦
Javier Pascual Santos

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A. Madrid

♦
Francisco Millanes Mato

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A. Madrid

RESUMEN

En el presente artículo se describen las singularidades de la estructura colgada del edificio "Parc de Recerca Biomèdica" de Barcelona.

El edificio sobre rasante se compone de 9 plantas con forma elíptica concéntrica, que van reduciéndose con la altura creando así un tronco de cono con sección elíptica, que se ve cortado por la cubierta inclinada en dirección al mar.

El edificio está colgado exteriormente de 69 tirantes metálicos que se articulan planta a planta y de una serie de alineaciones verticales de tirantes interiores. El cuelgue exterior inclinado del edificio obligó a plantear un proceso constructivo con forjados apeados durante las fases de ejecución, hasta completar la estructura superior resistente y poder proceder a realizar el desapeo y cuelgue de los forjados.

Para el enganche de los tirantes exteriores a los forjados se han empleado unos "tetones de cuelgue" metálicos, adosados inferiormente a la losa y pretensados mediante Tornillos de Alta Resistencia. El control del par torsor aplicado a los tornillos se ha garantizado mediante el empleo de Arandelas Indicadoras de Tensión.

SUMMARY

This article describes the singularities of the hanged structure of the building "Parc de Recerca Biomèdica" in Barcelona.

Over the ground level, the building is made up of 9 elliptic concentric slabs, which are reduced with the height, creating a truncated cone cut by the inclined roof in the sea direction.

The outside of the building is hanged by 69 steel ties, hinged in each slab, while the inside is supported by some lines of vertical ties. The inclined outside hanging of the building forced to propose a constructive process with temporary supported slabs during the execution period, until the superior resistant structure was finished, so as to proceed with the hang of the slabs.

For the joint of the outside ties with the slabs it has been used a metallic "hanging cantilevers", placed below the slabs, which are prestressed with High Strength Bolts. The Torque Control Method applied to the bolts has been guaranteed with the Direct Tension Indicator Method.

1. INTRODUCCIÓN

El edificio "Parc de Recerca Biomèdica" se encuentra situado en la ciudad de Barcelona, frente al paseo marítimo, junto al Hospital del Mar, cercano a las torres de Mapfre y del Hotel Arts, entre el barrio de la Barceloneta y el nuevo barrio de la Villa Olímpica (Fig. 1).

Se trata de un edificio singular con forma elíptica abierto al mar, diseñado por los arquitectos Manel Brullet, y Albert



Figura 1. Situación del "Parc de Recerca Biomèdica", en el paseo marítimo de Barcelona.

Pineda, para alojar uno de los mayores complejos de investigación científica de España.

El proyecto ha sido financiado por el Ayuntamiento de Barcelona, el Consorci de la Zona Franca de Barcelona, la Universidad Pompeu Fabra, y la Generalitat de Catalunya.

La construcción del edificio fue adjudicada a la UTE Parc Biomèdica, formada por las empresas DRAGADOS y COMSA, el proyecto básico de la estructura fue calculado por el arquitecto Manuel Arguijo, y el proyecto constructivo de la estructura colgada del edificio sobre la planta baja ha sido realizado por IDEAM tras el encargo de la UTE para modificar el proyecto original.

Durante la fase de ejecución de las obras, IDEAM colaboró con Antonio Tabera de la Dirección Técnica de Edificación de Dragados, para la asistencia técnica a la UTE durante las fases más singulares del proceso constructivo del edificio.

2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

2.1. Definición geométrica

El edificio tiene una superficie aproximada de 52.000 m², de los cuales 38.500 son de estructura colgada sobre rasante.

Los tres niveles de sótanos bajo rasante, con una superficie construida de 13.500 m², están destinados a aparcamientos, así como a albergar bajo el Sector III un polideportivo de 1.750 m². Los forjados de los tres sótanos son losas macizas de hormigón armado de 30 cm de espesor y se encuentran cerrados por un perímetro de pantallas arriostradas por los propios forjados.

La parte del edificio sobre rasante es la que presenta una geometría y tipología estructural singular.

Las 9 plantas sobre el nivel de calle son plantas elípticas concéntricas, que partiendo de unas dimensiones del eje mayor de 115,10 m y del eje menor de 71,42 m (Fig. 2), se van reduciendo planta a planta, 1,10 m en el eje mayor, y 0,68 m en el eje menor (Fig. 3). Las generatrices que unen los extremos de los ejes mayores y menores, definen un cono con sección elíptica.

El edificio sobre rasante es simétrico respecto del eje mayor de las elipses, eje que apunta en dirección al mar, mientras que en la otra dirección principal es asimétrico por el corte inclinado de la cubierta, con una pendiente hacia el mar del 18,51%. Esta pendiente hace que las elipses de las plantas 1 a 4 sean completas, de tal forma que a partir de la planta 5 van disminuyendo por el corte con el plano de cubierta (Fig. 4) hasta dejar la planta 9 reducida a una pequeña zona del Sector I (sector más alejado del mar).

Todos los forjados sobre la planta baja presentan un gran hueco rectangular central, con el lado largo paralelo al eje mayor de las elipses. Este hueco divide los Sectores II, y III, en dos lados iguales (Norte y Sur) y materializa en el Sector I una gran fachada interior a modo de balcón frente al mar.

2.2. Forjados

Los 9 forjados colgados son losas macizas de 28 cm de espesor en hormigón armado HA-30, con una altura entre plantas de 4 m. Cada planta se divide en tres sectores separados por dos juntas de dilatación paralelas al eje menor de las elipses. Para evitar la colocación de doble línea de pilares y

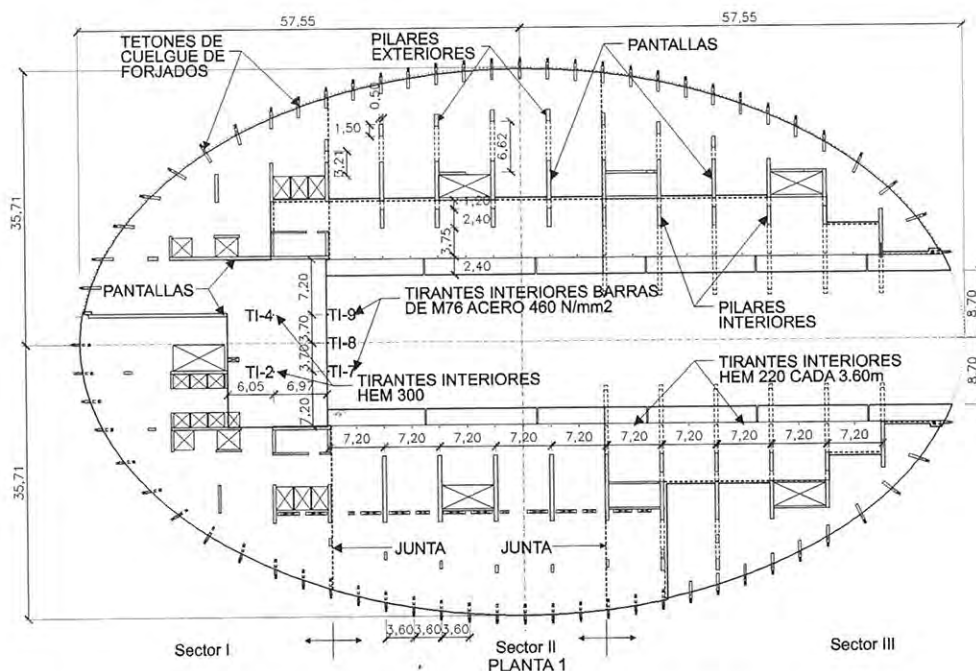


Figura 2. Planta 1. Forjado elíptico de semieje mayor 57,55 m y 35,71 m de semieje menor.

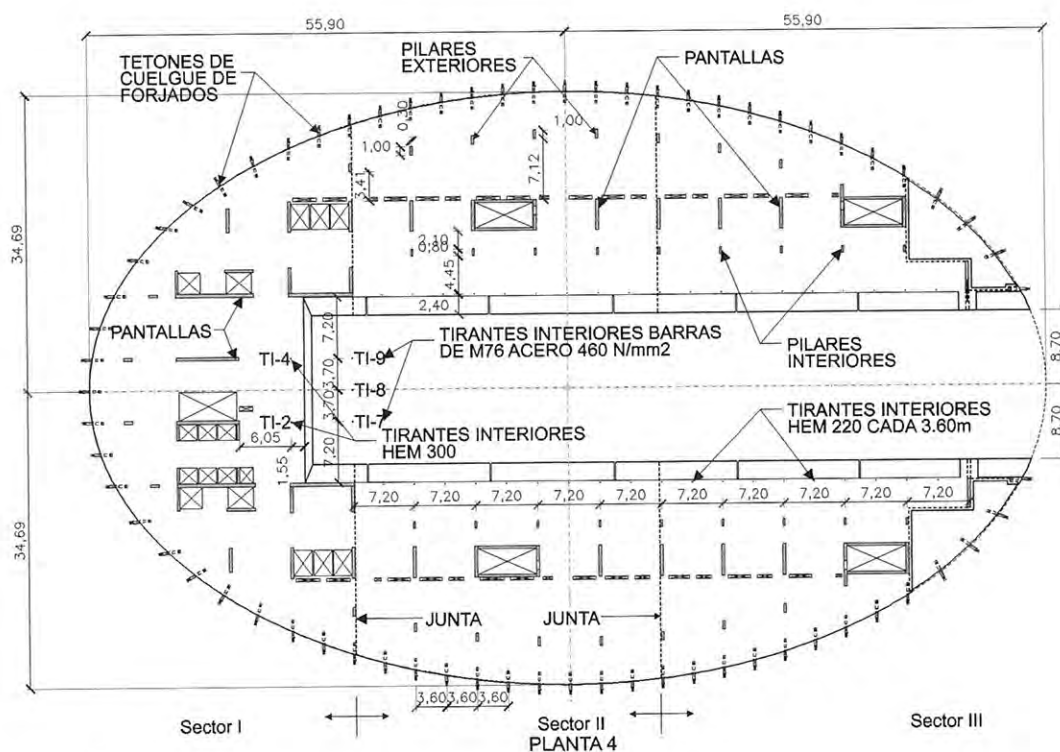


Figura 3. Planta 4. Forjado elíptico de semieje mayor 55,90 m y 34,69 m de semieje menor.

pantallas, los vanos extremos de los forjados del Sector II (central), se apoyan en los Sectores I y III mediante el empleo de pasadores conectadores.

2.3. Elementos de soporte. Pantallas, pilares y tirantes

Los forjados de los Sectores II y III tienen una forma de trabajo claramente definida por las alineaciones de pórticos paralelas al eje menor de las elipses. Las plantas se sustentan

por unas pantallas centrales de 3,60 m de longitud y 0,40 m de espesor, por una línea de pilares interiores y por una alineación de pilares exteriores que siguen la forma elíptica del borde de los forjados. (Fig. 5 y 6).

Los pilares interiores son de sección variable reduciéndose en altura desde 1,00 x 0,25 m a 0,80 x 0,25 m, mientras que los exteriores se reducen con la altura desde 1,00 x 0,35 m hasta 0,80 x 0,25 m. El hormigón empleado en las pantallas y pilares es HA-40.

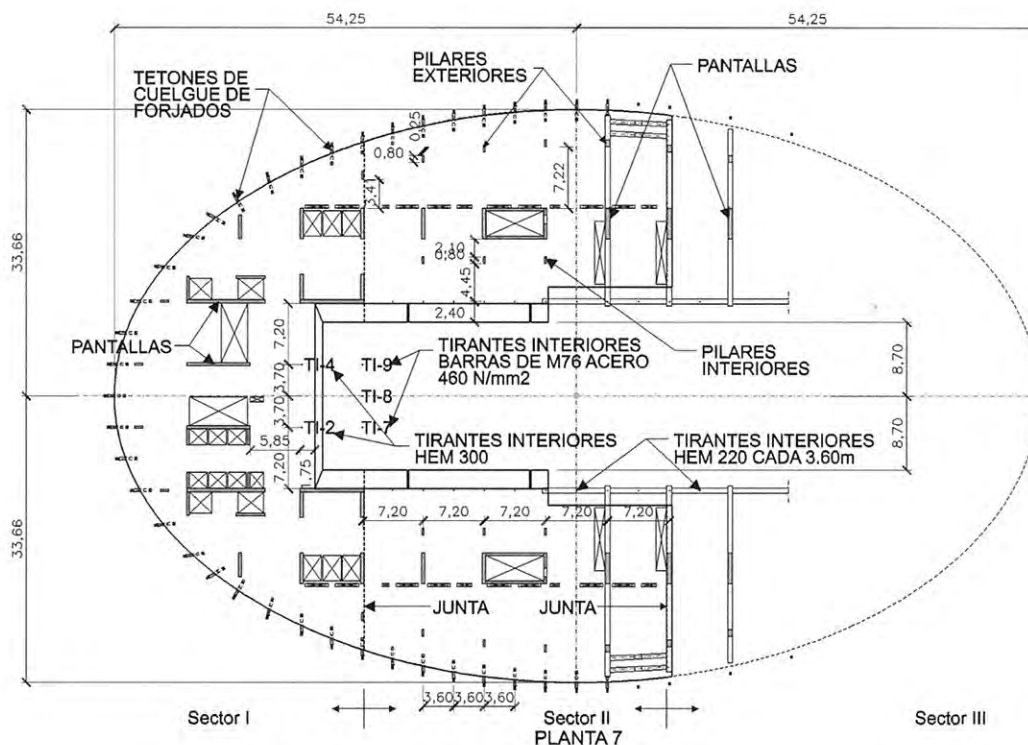


Figura 4. Planta 7. Forjado elíptico de semieje mayor 54,25 m y 33,66 m de semieje menor.

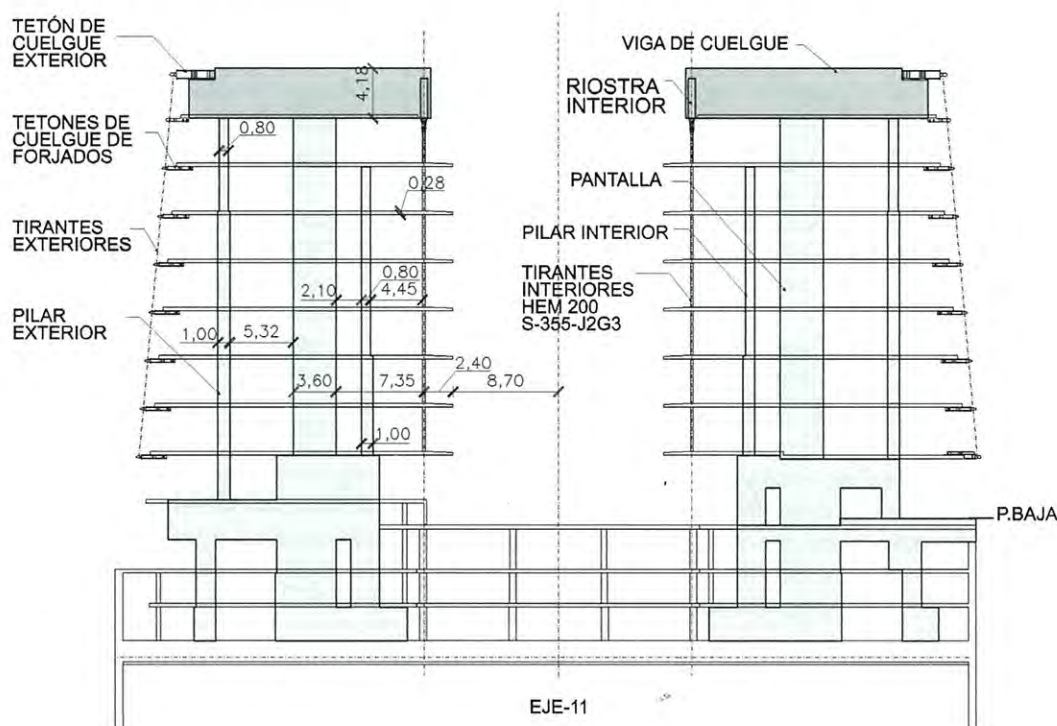


Figura 5. Pórtico Tipo del Sector II.

Cada sector lleva un núcleo de pantallas cerrado de forma rectangular de 7,20 x 3,60 m con espesores de 0,40 m que lo estabiliza frente a las acciones transversales de viento, y sirven como núcleo de escaleras.

Los pórticos formados por las pantallas, y pilares definen una luz transversal para los forjados de 7,20 m. Entre las pantallas centrales y el pilar interior hay un espacio libre de 2,10 m, y

entre pantallas y pilares exteriores la luz es variable hasta un máximo de 7,60 m por la forma elíptica de los forjados.

El resto del forjado interior de cada planta, desde el pilar interior hasta el voladizo 4,75 m +2,10 m, se sustenta mediante el cuelgue interior. Los tirantes interiores son perfiles metálicos HEM 200 dispuestos cada 3,60 m partiendo en dos la luz transversal entre los pórticos de pilares y pantallas.

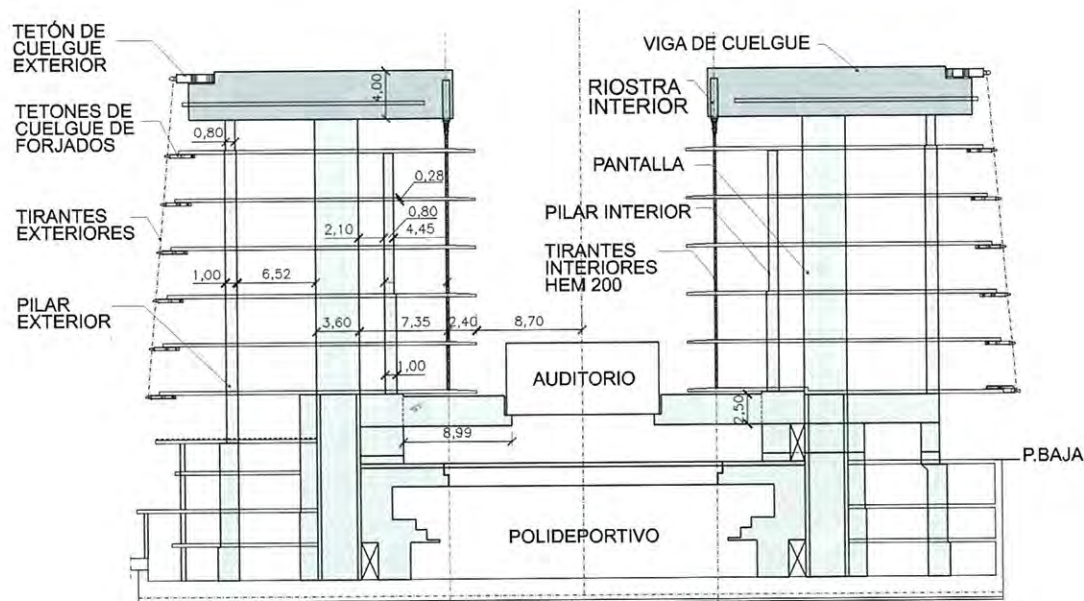


Figura 6. Pórtico Tipo del Sector III.

Del mismo modo, los forjados desde los pilares exteriores hacia el voladizo exterior, se sustentan mediante el cuelgue exterior del edificio. Este último, se resuelve mediante el empleo de tirantes inclinados metálicos de acero de 460 N/mm² de límite elástico con sección variable por plantas entre 56 mm y 76 mm.

Estos tirantes exteriores se disponen cada 3,60 m, al igual que los tirantes interiores, enfrentando un tirante a cada pórtico de pantallas y pilares y situando otro entre ellos. Los tirantes exteriores se articulan planta a planta uniéndose a los forjados mediante el empleo de unos "tetones de cuelgue exterior de forjados".

Los tirantes interiores y exteriores de cuelgue de forjados se enganchan en la estructura superior resistente. Dicha estructura se compone de las vigas principales de cuelgue, las riostras interiores, y una doble riostra exterior.

Las vigas principales son de hormigón pretensado HP-40, de 4,00 m de canto y 0,60 m de ancho. Se empotran en las pantallas centrales y en los pilares exteriores cada 7,20 m, y recogen directamente la mitad de los tirantes interiores y exteriores.

Los tirantes interiores situados entre ejes de pantallas y vigas (cada 3,60 m), se enganchan a la estructura superior mediante la unión a la riostra interior. Esta gran viga es de hormigón armado HA-30 de canto variable, y une todas las vigas de cuelgue de los Sectores II, y III.

Del mismo modo, los tirantes exteriores dispuestos entre ejes de pantallas y vigas de cuelgue, se enganchan mediante los "tetones superiores de cuelgue" metálicos a la doble riostra exterior. Estas riostras son también de hormigón armado HA-30 y recorren todo el perímetro del edificio, uniendo las vigas del mismo modo que la riostra interior.

Los forjados del Sector I se sustentan en una serie de alineaciones de pantallas en las dos direcciones principales del edificio, en la alineación de pilares exteriores, y en los cuelgues exterior e interior. (Figs. 2, 3 y 4)

El interior de los forjados del Sector I tiene una longitud en la dirección del eje mayor de la elipse de 13,25 m en las plantas 1, 3, 5, y 8, y de 8,25 m en las plantas 2, 4, 6, y 7. En la dirección del eje menor todas ellas tienen una luz de 21,40 m.

Estas grandes zonas con forjados de hormigón de 28 cm de espesor se sustentan mediante dos grandes tirantes centrales HEM 300 en acero S-355, que parten los 21,40 m de luz transversal en tres vanos de 7,20 m y distan 6,05 m de las pantallas centrales (Figs. 2, 3, 4, 7 y 8). Las plantas 1, 3, 5, y 8 con voladizos mayores, se sustentan también en el extremo mediante 3 alineaciones de tirantes verticales metálicos de acero de 460 N/mm² de límite elástico, y 76 mm de diámetro (Figs. 7 y 8).

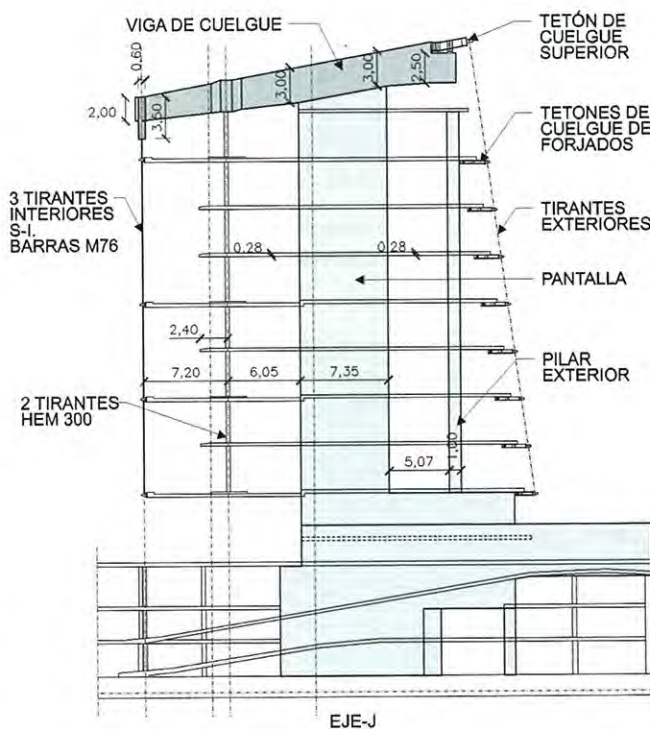


Figura 7. Pórtico Tipo del Sector I paralelo al eje mayor de las elipses.

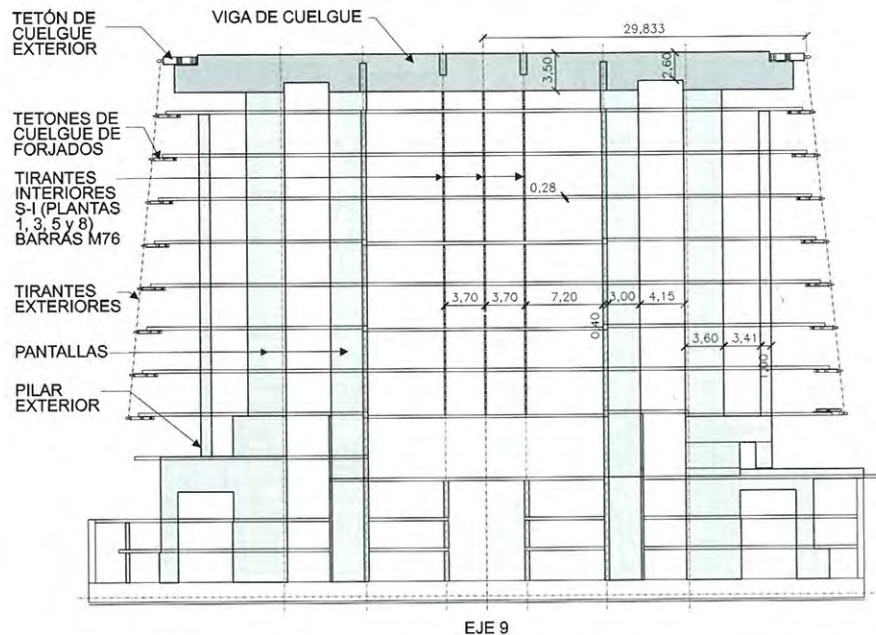


Figura 8. Pórtico Central del Sector I paralelo al eje menor de las elipses.

Ambas familias de tirantes se enganchan a las vigas de cuelgue soportando una superficie interior total en los forjados mayores de 284 m² y de 180 m² en los menores, con la ausencia de pilares en los 284 m² de la planta baja.

3. PROCESO CONSTRUCTIVO

El proceso constructivo de los sótanos bajo rasante se realiza de una forma convencional. En primer lugar se ejecutan las pantallas perimetrales, y a medida que se van excavando los sótanos, se realizan los anclajes provisionales al terreno en niveles intermedios.

Una vez que se han excavado los sótanos, se ejecuta la cimentación del edificio. Bajo las principales pantallas del edificio se ejecutan unas pantallas de cimentación, de 6 ó 9 m de profundidad, a modo de pilotes, para posteriormente realizar una losa de cimentación de 1,80 m de canto.

Concluida la losa de cimentación, los 3 sótanos se ejecutan de forma convencional cimbrando una planta sobre otra hasta llegar a la planta baja.

Los forjados sobre la planta baja se apoyan en las pantallas centrales, los pilares interiores y exteriores, y se sustentan en los tirantes interiores y exteriores. Para poder realizar una construcción planta a planta segura y eficaz en cuanto a plazos, se decidió aprovechar la alineación vertical de los tirantes interiores, haciéndolos trabajar a compresión durante las fases constructivas apeándolos bajo la planta 1. Los perfiles empleados como apeos son HEB 300 (Fig. 9).

Con una geometría exterior del edificio elíptica reduciéndose los voladizos planta a planta, no es posible emplear los tirantes definitivos inclinados como elementos trabajando a compresión, por lo que se hace necesario realizar el apeo exterior de los forjados mediante 69 apeos por planta, enfrentados a los futuros tirantes exteriores (Fig. 10).



Figura 9. Apeos HEB 300 cada 3,60 m bajo los tirantes interiores.



Figura 10. Forjados apeados exteriormente cada 3,60 m durante las fases constructivas.

Al disponer los apeos exteriores en alineaciones verticales, los voladizos exteriores de los forjados durante las fases constructivas son variables en cada planta, debido a la geometría

de forjados elípticos concéntricos reduciéndose en altura. El máximo voladizo resultante es de 3,50 m en la planta 1.

Los apeos exteriores empleados son perfiles HEB 200 desde la Planta 1 hacia arriba, y HEB 300 hacia abajo. La carga máxima que debe resistir cada apeo exterior durante las fases de montaje es de 1400 kN en Estado Límite Último (E.L.U.).

El dimensionamiento de estos apeos está muy condicionado por cuestiones de rigidez axil, ya que frente a alineaciones de

pantallas muy rígidas, y de pilares también rígidos, los apeos exteriores no pueden ser excesivamente flexibles. De esta manera se minimizan las deformaciones diferenciales entre unos apoyos y otros dentro del mismo forjado.

Al ir apoyando cada planta sobre los elementos de hormigón definitivos, pantallas y pilares, sobre los tirantes interiores, apeados hasta la cimentación, y sobre los apeos exteriores, se puede cimbrar una planta sobre la anterior, y progresar en la ejecución de los forjados siguiendo los procedimientos constructivos convencionales de edificios (Fig.11).



Ejecución de forjados apeados (Septiembre 2003).



Ejecución de estructura superior de cuelgue (Enero 2004).



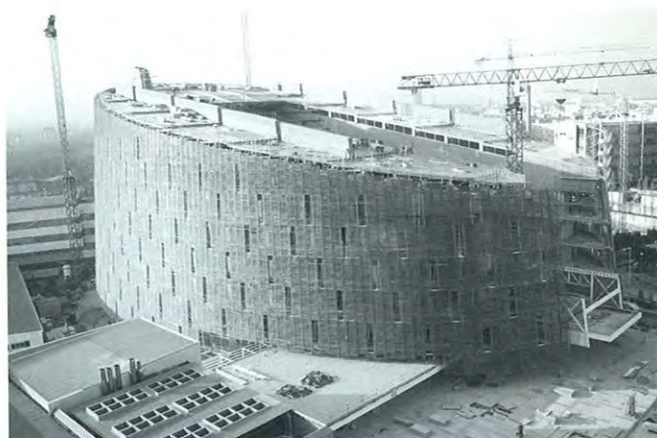
Colocación tetones superiores de cuelgue y enganche de tirantes a estructura de cuelgue (Abril 2004).



Desapeo y cuelgue del edificio (Septiembre 2004)



Ejecución de fachada exterior (Diciembre 2004).



Fachada exterior concluida (Marzo 2005).

Figura 11. Secuencia del proceso constructivo.

Siguiendo el proceso, una vez concluidos todos los forjados se ejecuta la estructura superior de cuelgue, cimbrando las vigas de cuelgue y las riostras interiores y exteriores sobre el último forjado. Debido al elevado peso de estas vigas es necesario reapuntar el nivel inferior para repartir el peso entre dos plantas.

Concluida la estructura superior de cuelgue, se procede a realizar el enganche de los tirantes interiores a las vigas de cuelgue y a las riostras interiores. Concluida esta operación se realiza el desapeo de los tirantes interiores, cortando los apeos bajo planta 1. Al realizar este proceso, los tirantes interiores entran en tracción elevando la carga hasta la estructura superior de cuelgue, invirtiendo el signo de los esfuerzos, hasta ese momento de compresión.

El cuelgue y desapeo exterior del edificio se realiza planta a planta, enganchando los tirantes exteriores desde la estructura superior de cuelgue hasta el forjado superior. Una vez colocados todos los tirantes, se procede a realizar la retirada de los apeos exteriores que soportaban dicha planta, dejando colgado el forjado de los tirantes exteriores.

Colgada una planta se colocan los tirantes hasta la planta inferior, para posteriormente realizar el desapeo de ese nivel. Este proceso repetitivo de colocación de tirante, y desapeo del forjado se repite hasta llegar así a la planta 1. Mediante esta operación se concluye con todos los forjados colgados de la estructura superior resistente.

4. CUELGO EXTERIOR DEL EDIFICIO

Tal y como se ha descrito, los voladizos exteriores del edificio se sustentan mediante el cuelgue de 69 tirantes inclinados. Estos tirantes con una inclinación variable entre 4,8° y 8°, son metálicos con sección circular maciza de 56 mm de diá-

metro desde la P-1 a la P-3, 64 mm desde la P-3 a la P-5, y 76 mm desde la P-5 hacia arriba. El acero tiene 460 N/mm² de límite elástico, y los 69 tirantes se disponen cada 3,6 m.

4.1. Tetones de cuelgue exterior de forjados

El enganche de los tirantes exteriores a los forjados se realiza mediante el empleo de los "tetones de cuelgue exterior de forjados" (Fig. 12). Estos elementos son unas ménsulas HEB-280 en acero S-275-JR, que se sujetan a los forjados mediante un doble apoyo. El enganche de los tirantes dista 0,90 m del borde del forjado por criterios arquitectónicos, para separar la fachada exterior de lamas de madera del cerramiento de vidrio en el borde del forjado, y para poder alojar en esos 90 cm una pasarela para el mantenimiento de la fachada.

La unión de los tirantes exteriores a los tetones exteriores de cuelgue de forjados se realiza articulando cada tirante planta a planta, mediante el empleo de un terminal en "horquilla" superior, y uno en "orejeta" inferior. Ambos terminales se bulonan a dos chapas exteriores a modo de orejetas de enganche que se sueldan al propio tetón. Con esta articulación planta a planta las uniones permiten ligeros giros diferenciales entre un tirante y otro, para poder absorber las tolerancias de ejecución.

Ante la complicación de realizar la sujeción a la losa de unos tirantes metálicos situados a 90 cm del borde del forjado, se barajaron diferentes alternativas para los elementos de enganche.

La posibilidad de realizar un empalme del perfil de forma frontal al forjado, mediante el empleo de una basa atornillada con barras previamente embebidas en la losa, se desechó de partida al no ser nunca los tetones perpendiculares al borde del forjado.

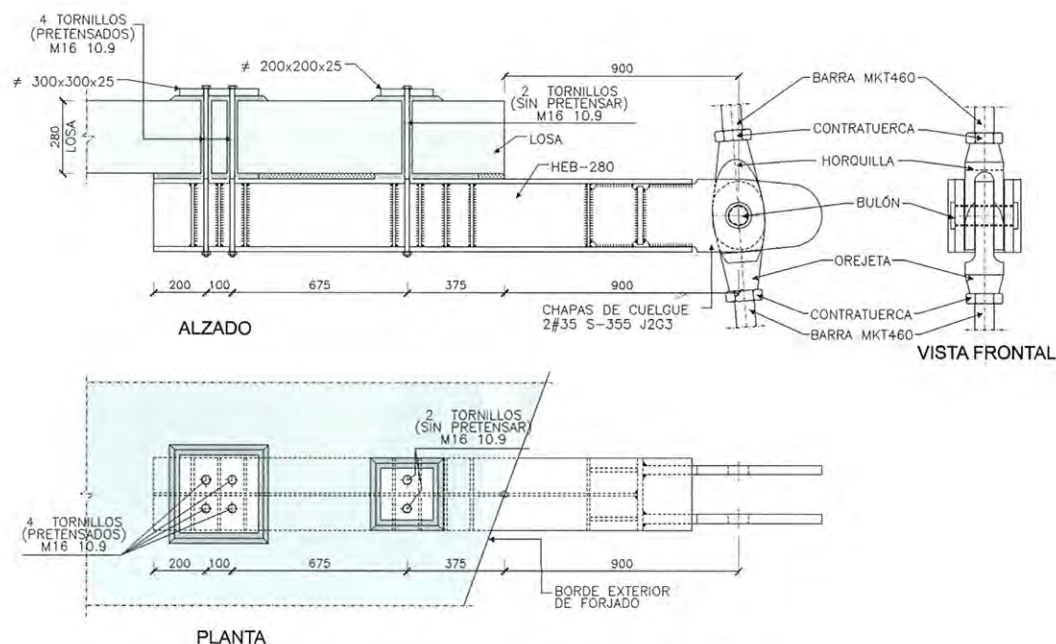


Figura 12. Tetones de cuelgue exterior de forjados HEB 280.

Con la geometría elíptica de los forjados, los ángulos del eje del tetón con el borde del forjado eran diferentes en todos y cada uno de los tetones del edificio, y para poder lograr una superficie plana perpendicular al tetón hubiera sido necesario realizar unos rehundidos o recrecidos complicados en la losa.

La alternativa de embeber el tetón en el propio forjado y materializar una unión mediante el empalme de perfiles transversales a modo de crucetas, complicaba enormemente el armado de los bordes del forjado, y requería dejar todos los perfiles colocados a la hora del hormigonado de cada planta.

Para independizar los trabajos de ejecución de los forjados, ejecución de la estructura metálica, y colocación de tetones, se optó por la solución definitiva de "tetones de cuelgue" adosados inferiormente a la losa, aprovechando las zonas de falso techo en el exterior de los forjados.

Esta solución permite realizar todos los tetones del edificio iguales, e independizar la colocación de los mismos de la ejecución de los forjados, dejando una serie de vainas de 40 mm de diámetro en la losa para posteriormente alojar los Tornillos de Alta Resistencia (T.A.R.) que unirán el tetón al forjado (Fig. 13).

La tracción de cada tirante en cada planta, 225 kN en E.L.U., provoca un momento que se descompone en un par de fuerzas, comprimiendo el apoyo delantero del tetón, y traccionando el trasero. El apoyo delantero se sitúa a 1,275 m del extremo del tirante, y se sujeta por dos Tornillos de Alta Resistencia M16 sin pretensar.

La unión trasera que se separa de la delantera 0,725 m, se tracciona, por lo que hay que realizar una unión capaz de soportar un tiro de 1,75 veces la tracción del tirante. Por este motivo esta unión se pretensa mediante el empleo de 4 T.A.R. de métrica 16, dejando la unión siempre comprimida, para resistir la tracción que produce el cuelgue exterior (Fig. 12).

Para fijar el HEB inferior a la losa se plantean las dos uniones descritas mediante Tornillos de Alta Resistencia, y el empleo de unas basas superiores de 25 mm de espesor de acero.

En los 7 cm dejados sobre las losas de los forjados para el pavimento debe haber espacio suficiente para alojar las chapas de 25 mm mencionadas, además de la cama de mortero para la regularización de las mismas, y las cabezas de los T.A.R. Este requisito invalidaba la alternativa del empleo de barras convencionales de pretensado, al tratarse de elementos con tuercas y cabezas de dimensiones elevadas, que sobresaldrían del reducido espacio útil para alojar estos terminales.

Por este motivo se hizo necesario recurrir al empleo de los Tornillos de Alta Resistencia para fijar los tetones a los forjados.

La unión de un perfil de 28 cm, con una losa de hormigón de 28 cm con Tornillos de Alta Resistencia Pretensados con una longitud de casi 60 cm no es habitual, y menos lo es todavía que la unión no sea entre dos chapas metálicas, sino que sea entre un perfil y una losa de hormigón.

Por estos motivos, para tener una garantía plena de la correcta ejecución del par de apriete de los T.A.R. de la unión trasera, se planteó el empleo de Arandelas Indicadoras de Tensión (Fig. 14) empleando el Método de Indicador Directo de Tensión (Direct Tension Indicators DTIs).

Las ventajas del empleo del Método de Indicador Directo de Tensión para dar el par de apriete a los T.A.R. con el empleo de Arandelas Indicadoras de Tensión, son claras respecto del resto de métodos, definidos en las normativas [1], [2] y [3].

En el Método de Control del Par Torsor, para realizar el apriete de uniones con T.A.R. se introduce un par torsor a los



Figura 13. Detalle de tirantes exteriores, tetones exteriores de cuelgue de forjados, y tetones superiores de cuelgue exterior.

tornillos que induce un esfuerzo en la espiga del tornillo, el cual depende del diámetro del tornillo, y de un coeficiente que evalúa el rozamiento entre los componentes de la parte que gira. Este coeficiente varía mucho según las condiciones de suministro de tornillo, y tuercas. Así para tornillos y tuercas ligeramente engrasados ese coeficiente es 0,18, mientras que si los tornillos están sucios u oxidados puede llegar a valer 0,40, y en cambio si están muy engrasados podría llegar a 0,09.



Figura 14. Detalle de una Arandela Indicadora de Tensión. (DTIs).

Como puede observarse, la variación del coeficiente de rozamiento es muy importante según sean las condiciones de engrasado de tornillos y tuercas. Si se procede a realizar el pretensado utilizando el valor del par torsor indicado por las normativas (Eurocódigo [2] o NBE-EA-95 [3]), pensando en unas condiciones de engrasado con $K=0,18$, puede suceder que si el coeficiente realmente vale 0,09, se obtenga un pretensado doble del estimado, llegando a romper el tornillo; mientras que si $K=0,36$, se obtendrá un pretensado mitad, reduciendo drásticamente la capacidad de la unión, cuestión inadmisibles en un elemento del que cuelgan los forjados.

El Método de Control del Par Torsor, requeriría una medición experimental del coeficiente K en cada lote de tornillos, y aunque se calibrara, hubiera dependido mucho de las condiciones de engrase de los tornillos y tuercas, por lo que este método del par de apriete, aún calibrado, no ofrecía las garantías necesarias para las sujeciones de los tetones exteriores de cuelgue de forjados.

El Método de Girar la Tuerca está calibrado para uniones de chapas metálicas de espesores pequeños, y no cubre la unión de un perfil a una losa de hormigón, con una unión de casi 60 cm.

Al descartar estos métodos, queda directamente descartado el Método Combinado, que consiste en una mezcla de ambos.

El Método de Indicador Directo de Tensión mediante el empleo de las Arandelas Indicadoras de Tensión resultaba el método más fiable para asegurar el apriete correcto de los T.A.R.

Las Arandelas Indicadoras de Tensión tienen unos resaltes (Fig. 14), que al alcanzar la fuerza de tesado del T.A.R. se reducen hasta un límite, que indica el correcto apretado del tornillo. Mediante este método hay un doble control, el propio

de las Arandelas Indicadoras de Tensión, comprobando el espacio entre resaltes, y mediante el control del par de apriete, controlado con los ensayos de calibración del sistema.

Al tratarse de una unión con tornillos de dimensiones no convencionales, para realizar las comprobaciones de la condición de apriete, se plantearon los ensayos de tesado de tres tetones (12 tornillos). En el ensayo se empleó el mismo procedimiento de apriete y control a utilizar en toda la obra, instrumentando previamente los tornillos de manera que se obtuviera la deformación y tensión en la caña del tornillo en cada instante, y en particular en el momento en que se alcanzaba la tensión de referencia con el aplastamiento de los resaltes de las DTI.

Mediante estos ensayos de calibración (Fig. 15), queda definido el par torsor a emplear en las uniones del edificio, momento en el cual las DTI aseguran el correcto funcionamiento de la unión.



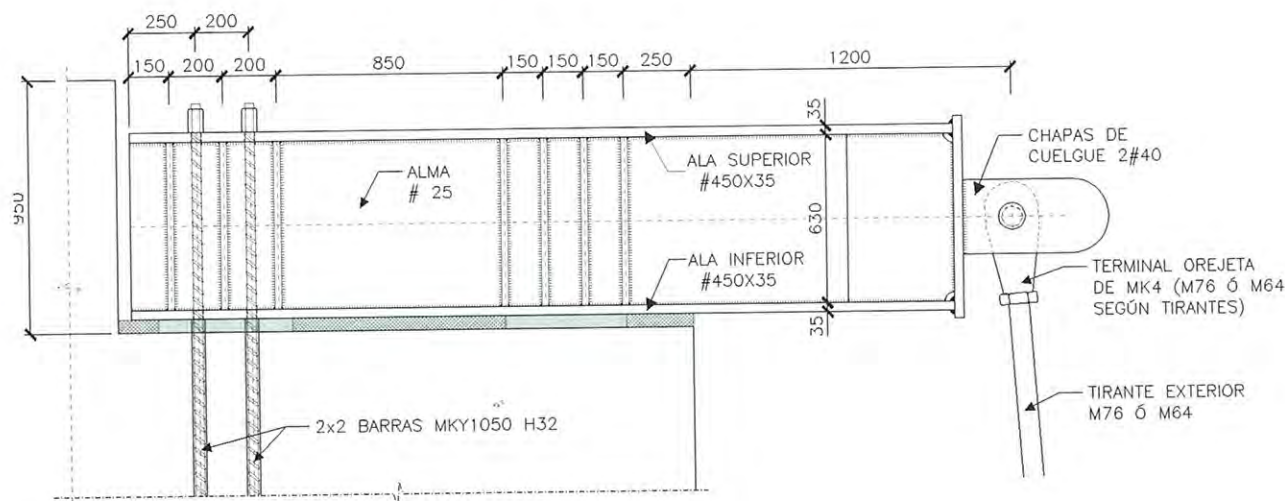
Figura 15. Ensayo de calibración de las uniones pretensadas, instrumentalizando los T.A.R.

En el caso de que al aplicar el par torsor calibrado, los resaltes de las DTI no estuvieran suficientemente aplastados, se estaría produciendo más rozamiento de lo normal, infratesando los tornillos, por lo que sería necesario volver a calibrar el método. De cualquier manera, durante la ejecución de las obras este hecho no fue necesario, al finalizar todas las uniones con las arandelas aplastadas para el par torsor calibrado.

4.2. Tetones superiores de cuelgue exterior

El enganche de los tirantes exteriores a la estructura superior de cuelgue se realiza mediante el empleo de los "Tetones Superiores de Cuelgue", que son unas vigas armadas doble T metálicas de 70 cm de canto, en acero S-355, donde las alas son chapas de 450x35 mm, y el alma es de 25 mm. El terminal en orejeta del tirante superior, se articula a dos chapas que salen del extremo del tetón (Fig. 13 y 16).

Estos Tetones Superiores Exteriores se disponen en el plano vertical de los Tetones Exteriores de Cuelgue de forjados, y recogen los tirantes exteriores cada 3,60 m. El tiro máximo de un tirante es de 1650 kN en ELU, y el mecanismo de transmisión del tiro a las vigas superiores de cuelgue es similar al de los tetones de cuelgue de forjados, ya que el momento induci-



TETÓN SUPERIOR EXTERIOR DE CUELQUE

Figura 16. Tetón Superior de Cuelgue Exterior.

do por la tracción del extremo se descompone en un par de fuerzas. De esta manera se comprime la unión delantera del tetón, situada a 1,675 m del extremo del tirante, unión simplemente apoyada, y se tracciona la unión trasera.

La unión trasera dista de la delantera 1,275 m, y debe ser capaz de resistir un tiro de 1,31 veces el tiro del tirante. Por este motivo, esta unión se pretensa a las vigas de cuelgue, o a las riostras exteriores, mediante el empleo de 4 barras pretensadas tipo MKY 1050, de métrica H32. La unión trasera queda así siempre comprimida, para resistir la tracción que produce el cuelgue total de los forjados exteriores, en un mecanismo análogo al empleado para el tetón tipo.

El proceso seguido para realizar el cuelgue exterior asegura la absorción de las tolerancias normales en la ejecución de colocación de tirantes exteriores y enganche a los tetones de cuelgue de forjados, de la forma siguiente.

En primer lugar se colocan los tetones superiores, enganchados a la estructura superior de cuelgue. De forma simultánea se coloca el tetón del forjado inmediatamente inferior, el cual tiene cierta holgura de colocación al dejar vainas de 40 mm en el forjado, para posteriormente alojar tornillos de M16. Con estas holguras se puede jugar entre la unión trasera y la delantera para hacer que el extremo del tirante se mantenga en el mismo plano vertical que el extremo del tetón superior.

Este proceso de colocación de tetones exteriores de forjados es repetitivo, y en el caso de que se produjese un error grave de replanteo de las vainas que deben alojar los tornillos para enganchar el tetón, simplemente habría que realizar unas nuevas perforaciones en el forjado con el replanteo correcto para asegurar la alineación de los tirantes en el plano vertical.

Garantizado el plano vertical por el que deben pasar los tirantes, se diseñó una unión de tirantes a tetones de forjados bulonada, para asumir los pequeños quiebros en la alineación inclinada del tirante en cada planta.

La colocación de tirantes exteriores planta a planta, supuso el replanteo "in situ" y el corte de tirantes con las longitudes

reales en cada caso. Para absorber las pequeñas tolerancias de longitud, las propias tuercas superior e inferior de los terminales en horquilla y orejeta permitían una holgura de ± 5 cm.

5. CUELQUE INTERIOR DEL EDIFICIO

5.1. Cuelgue interior de los Sectores II y III

Como ya se ha descrito, los voladizos interiores de los forjados de los Sectores II, y III (Fig. 2, 3, y 4), desde el pilar interior hasta el voladizo $4,75 \text{ m} + 2,10 \text{ m}$ (Fig. 5 y 6), se cuelgan mediante 19 tirantes interiores en cada lado, equidistantes a 3,60 m.

Estos tirantes son perfiles metálicos HEM 200, y se conectan a los forjados de hormigón mediante el empleo de unas "crucetas metálicas" (Fig. 17), perfiles HEM 120, que transfieren la reacción del forjado al tirante haciéndolas trabajar a flexión, y cortante. Los pequeños momentos flectores locales que los tirantes filtran del forjado son transmitidos mediante el mecanismo de un par de fuerzas entre los brazos de las crucetas.



Figura 17. Tirantes interiores de Sectores II, y III. Unión mediante crucetas a forjados.

El empalme entre tirantes se realiza mediante uniones con cubrejuntas de alas y de alma, realizando en obra uniones soldadas en ángulo trabajando a rasante, menos comprometidas y más fácilmente controlables que las soldaduras a tope en elementos traccionados (Fig. 18).



Figura 18. Uniones de Tirantes Interiores de Sectores II, y III con cubrejuntas.

La decisión de realizar el empalme mediante cubrejuntas a media planta está justificada ya que los momentos flectores que aparecen en los tirantes cambian de signo entre un forjado y el siguiente, con el punto de momento nulo en el centro, dejando la unión sometida sólo a esfuerzos axiales.

La necesidad de emplear perfiles HEM en los tirantes interiores, se debe a que estos son los perfiles que proporcionan mayor área para unas dimensiones exteriores más reducidas, exigencia obligada en nuestro caso por cuestiones arquitectónicas.

El empleo del mismo perfil en toda la altura del edificio podría hacer pensar en un dimensionamiento poco optimizado, sin embargo no es así. Aunque en la fase de edificio colgado, el tirante lleva menos carga de tracción en las plantas bajas y más en las altas, durante las fases constructivas con el edificio apeado sucede lo contrario, con las plantas bajas trabajando a mayores esfuerzos de compresión que las altas.

Así, en las fases constructivas la máxima compresión que lleva cada tirante es de 1500 kN en E.L.U., producida por el peso propio de los forjados, más una cierta sobrecarga de trabajo. Mientras que la máxima tracción de un tirante con el edificio concluido es de 2100 kN también en E.L.U., producida por los pesos propios de forjados, cargas muertas, y sobrecargas de uso.

El argumento definitivo para no reducir la sección del tirante por planta, fue la necesidad de dar rigidez al tirante frente a la elongabilidad axial. Al tratarse de un edificio colgado interiormente con tirantes de acero estructural más flexibles que los pilares y pantallas de hormigón, hay que evitar la acumulación de deformaciones diferenciales excesivas entre los tirantes y los pilares adyacentes, que puedan producir problemas de fisuraciones en las tabiquerías y cerramientos del edificio.

El enganche superior de los tirantes a la estructura superior de cuelgue se realiza mediante una articulación bulonada del extremo del tirante a una pieza metálica, que se fija mediante una basa pretensada a las vigas superiores de cuelgue, y a las riostras interiores (Fig. 19).

El bulón que articula las dos chapas de 50 mm de espesor es de 109 mm de diámetro en acero de 460 N/mm² de límite elástico, y la basa superior se fija a las vigas y riostras interiores mediante 4 barras pretensadas tipo MKY 1050, de métrica H36, dejando la unión permanentemente comprimida.

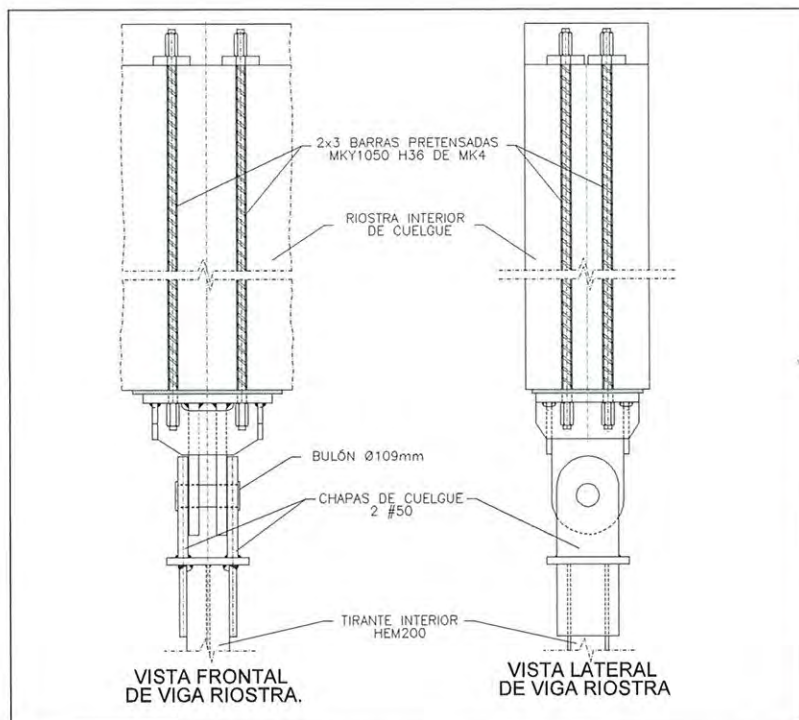


Figura 19. Enganche de tirantes interiores de Sectores II y III, a Vigas de Cuelgue y a Riostras Interiores.

5.2. Cuelgue interior del Sector I

El interior de las amplias zonas de forjados del Sector I se cuelga mediante dos familias de tirantes (Fig. 20), como ya se describió en el apartado de "Descripción del edificio", así los dos grandes tirantes centrales HEM 300 en acero S-355, parten los 21,40 m de luz transversal en tres vanos de 7,20 m y distan 6,05 m de las pantallas centrales (Fig. 2, 3, 4, 7 y 8).

Los voladizos interiores de las plantas 1, 3, 5, y 8, se sustentan mediante 3 tirantes verticales metálicos de acero de 460 N/mm² de límite elástico, y 76 mm de diámetro, articulándose planta a planta, mediante el empalme con unos tetones metálicos que se enganchan por medio de una basa frontal al forjado, a la que se atornillan una serie de barras dejadas previamente embebidas en la losa.

Para realizar la unión de los tirantes HEM 300 del Sector I a los forjados, se emplea la misma solución que con los tirantes HEM 200 de los Sectores II y III mediante crucetas metálicas, y el empalme entre diferentes tramos de tirante se realiza con cubrejuntas de alas y de alma de la misma manera.

Durante el proceso constructivo los dos tirantes centrales trabajan a compresión al estar apeados hasta la cimentación, con una compresión máxima en E.L.U. de 3000 kN por tirante, mientras que con el edificio colgado la máxima reacción que debe resistir cada tirante es de 7500 kN también en E.L.U.

Como ocurría con los tirantes de los Sectores II y III, estos tirantes tienen sección constante en toda la altura al trabajar a compresión durante el proceso constructivo, con esfuerzos superiores en las plantas inferiores, y al estar sometidos a elevadas tracciones con el edificio en servicio, crecientes con la altura.

6. ESTRUCTURA SUPERIOR DE CUELQUE

Como se ha descrito, el edificio está colgado exteriormente mediante 69 tirantes inclinados articulados planta a planta, que se enganchan a la estructura superior de cuelgue mediante la articulación a los tetones superiores de cuelgue.

El cuelgue interior se resuelve mediante la alineación de tirantes interiores HEM 200 en los Sectores II y III, y median-



Figura 20. Interior del Sector I colgado con 2 HEM 300, y 3 tirantes de 76 mm de diámetro.

te las dos familias de tirantes del Sector I, los 2 grandes HEM 300, y los 3 tirantes de 76 mm de diámetro.

Tanto los tirantes exteriores como los interiores de los sectores II y III, se disponen cada 3,60 m, enfrentándose a los pórticos de pantallas y pilares, dispuestos cada 7,20 m y partiendo la luz en dos.

Los tirantes alineados con los pórticos se enganchan directamente a las vigas principales de cuelgue, mientras que los intermedios, lo hacen a la riostra interior, y a la doble riostra exterior. (Fig. 21 y 22)

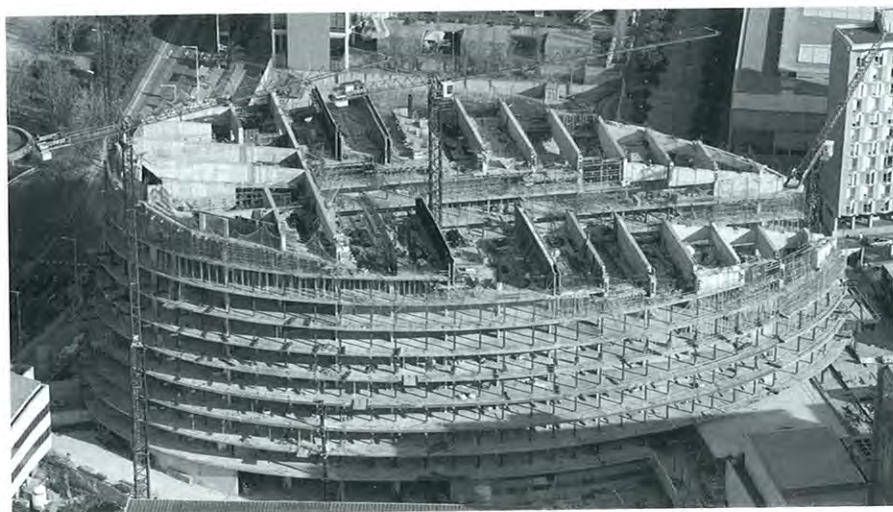


Figura 21. Vista superior durante la ejecución de las vigas principales de cuelgue.



Figura 22. Vista de la estructura superior de cuelgue: Vigas principales, riostra interior y doble riostra exterior.

6.1. Vigas principales de cuelgue

Cada 7,20 m se dispone una viga de cuelgue de hormigón pretensado HP-40, de 4,00 m de canto por 0,60 m de ancho, de la que cuelgan los tirantes exteriores sujetos mediante los tetones superiores de cuelgue, y los tirantes interiores mediante el empalme con barras pretensadas.

Estas vigas se empotran en las pantallas centrales y en los pilares exteriores, con un vuelo interior de 7,35 m y un vuelo variable para los exteriores (Fig. 23).

Las vigas se pretensan mediante el empleo de 4 unidades de pretensado de 24 torones de 0,6".

6.2. Riostras interiores y doble riostra exterior

Para arriostrar el interior de las vigas principales de cuelgue de los sectores II y III, y para recoger los tirantes interiores intermedios situados entre los pórticos principales se disponen las riostras interiores, que son unas vigas de hormigón armado HA-30 de canto variable entre 2,00 m y 4,66 m, y 0,60 m de ancho, que siguen la pendiente de la cubierta. Estas

vigas trabajan a flexión positiva llevando la carga de los tirantes intermedios a las vigas de cuelgue (Fig. 24).

De forma similar a lo que ocurre con los tirantes interiores, para poder recoger los tirantes exteriores dispuestos entre las vigas de cuelgue, se dispone una doble viga riostra de hormigón que permita transmitir estos esfuerzos a las vigas principales, y sirva de corona exterior de arriostramiento de todas las vigas de cuelgue.

La riostra exterior es una doble viga de hormigón armado de canto variable que sigue perimetralmente la pendiente de la cubierta, en HA-30, con 0,50 m de espesor cada una de ellas.

Se proyectan dos vigas para poder mantener el mismo detalle de tetón superior, que frente al tiro genera un par que comprime el apoyo delantero y tracciona el trasero, al mismo tiempo que se evitan las torsiones en secciones rectangulares de poco ancho. Con esta tipología, la viga riostra más exterior trabajará con cargas verticales descendentes y flectores positivos en el centro de cada vano, mientras que la más interna lo hará con cargas verticales ascendentes y con flectores negativos en el centro del vano (Fig. 25).

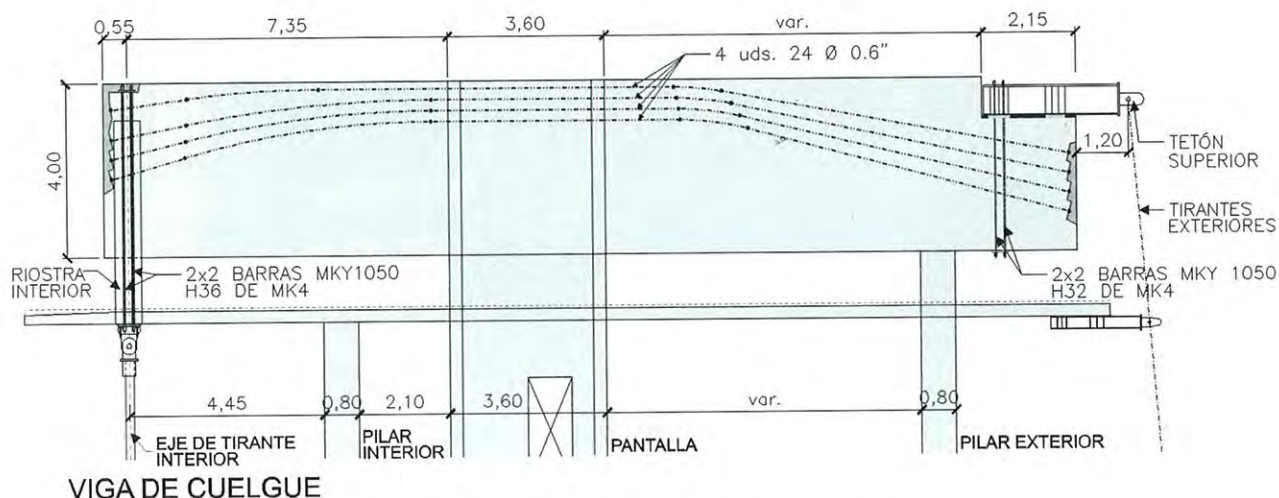


Figura 23. Detalle de una viga principal de cuelgue postesada.

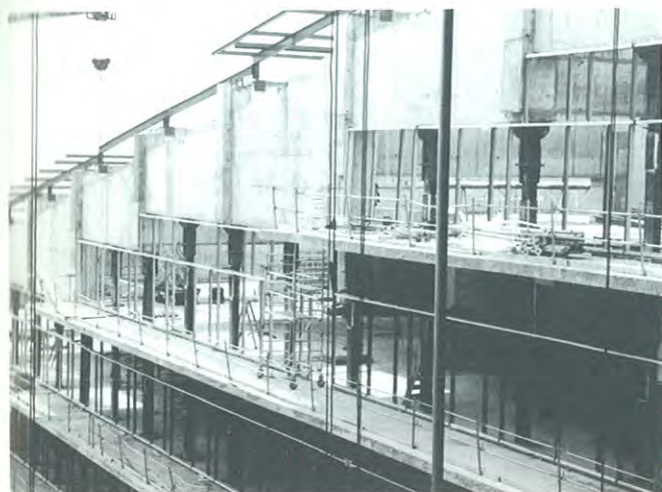


Figura 24. Riostra interior.

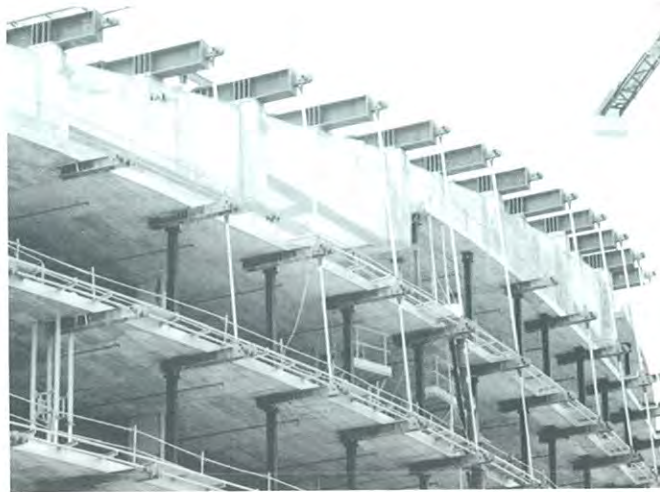


Figura 25. Doble riostra exterior.

7. CERRAMIENTO EXTERIOR

El "Parc de Recerca Biomèdica" no sólo presenta una geometría muy singular con las plantas elípticas concéntricas, el hueco central, y la cubierta inclinada, sino que, además, el esquema resistente del edificio se aleja de cualquier forma usual de resistir las cargas gravitatorias, con el cuelgue exterior inclinado y el cuelgue interior del edificio.

Para lograr una fachada exterior poco convencional, los arquitectos han diseñado un cerramiento interior de vidrio, uno exterior con lamas de madera a modo de enrejado visto, que se apoya en un tubo perimetral. Dicho tubo recorre el perímetro de todos los forjados y se sujeta en los tetones de cuelgue exterior de cada forjado mediante una articulación vertical en ambos extremos. (Fig. 26)

La doble fachada de vidrio y maderas, se ejecutó una vez que todo el edificio estaba colgado, para evitar así problemas

con las deformaciones instantáneas de los voladizos debidas al cuelgue exterior. De cualquier manera el sistema de fachadas se dimensionó de forma que pudiera admitir las ligeras deformaciones activas diferenciales entre un forjado y otro, durante la vida útil del edificio.

REFERENCIAS

- [1] UNE-ENV 1090-1:1996: Ejecución de estructuras de acero. Parte 1: Reglas generales y reglas para edificación.
- [2] prEN1993-1-8:2003 "Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1.8. Design of Joints"
- [3] NBE-EA 95: Normativa Básica de Edificación. Estructuras de acero en Edificación



Figura 26. Detalle de tubo perimetral y montantes para sujeción de cerramiento exterior con lamas de madera, y detalle de fachada exterior.