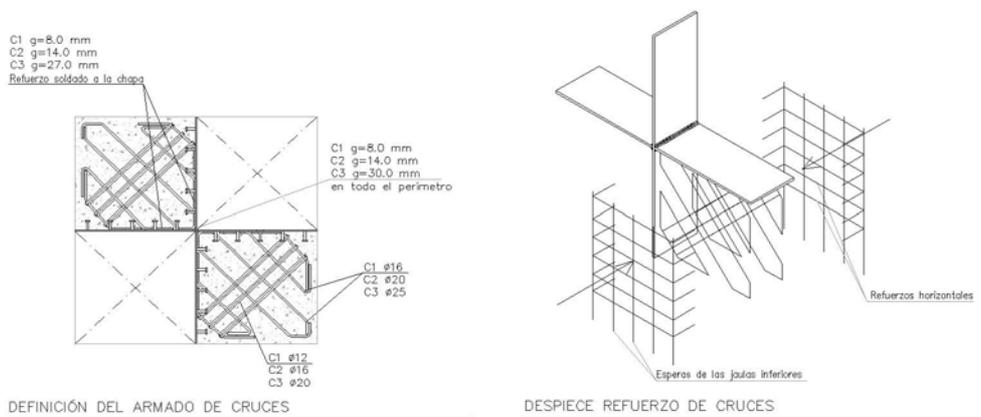


Uno de los elementos estructurales más singulares del muro que nos ocupa se halla en el encuentro en arista que se produce en bastantes casos entre dos módulos de ventana. Al efecto, se ha proyectado un elemento resistente a modo de cruz de acero, que recibe la carga de la parte superior de hormigón armado a través de un conjunto de conectores tipo “Nelson” que, concentrándola en una pequeña arista de acero, diseñada siempre en régimen elástico, pasa después a disiparla en la parte inferior, devolviéndole por tanto la carga al hormigón armado, de nuevo a través de un conjunto de conectores del mismo tipo. Como elemento fundamental de ayuda a la captación y disipación de la carga se proyectan en unos casos unas armaduras a 45° soldadas al elemento de cruz, tanto en la parte superior como en la inferior, y en otros casos se consignan dos perfiles laminados del tipo HEB, igualmente oblicuos, y soldados convenientemente a la mencionada cruz.



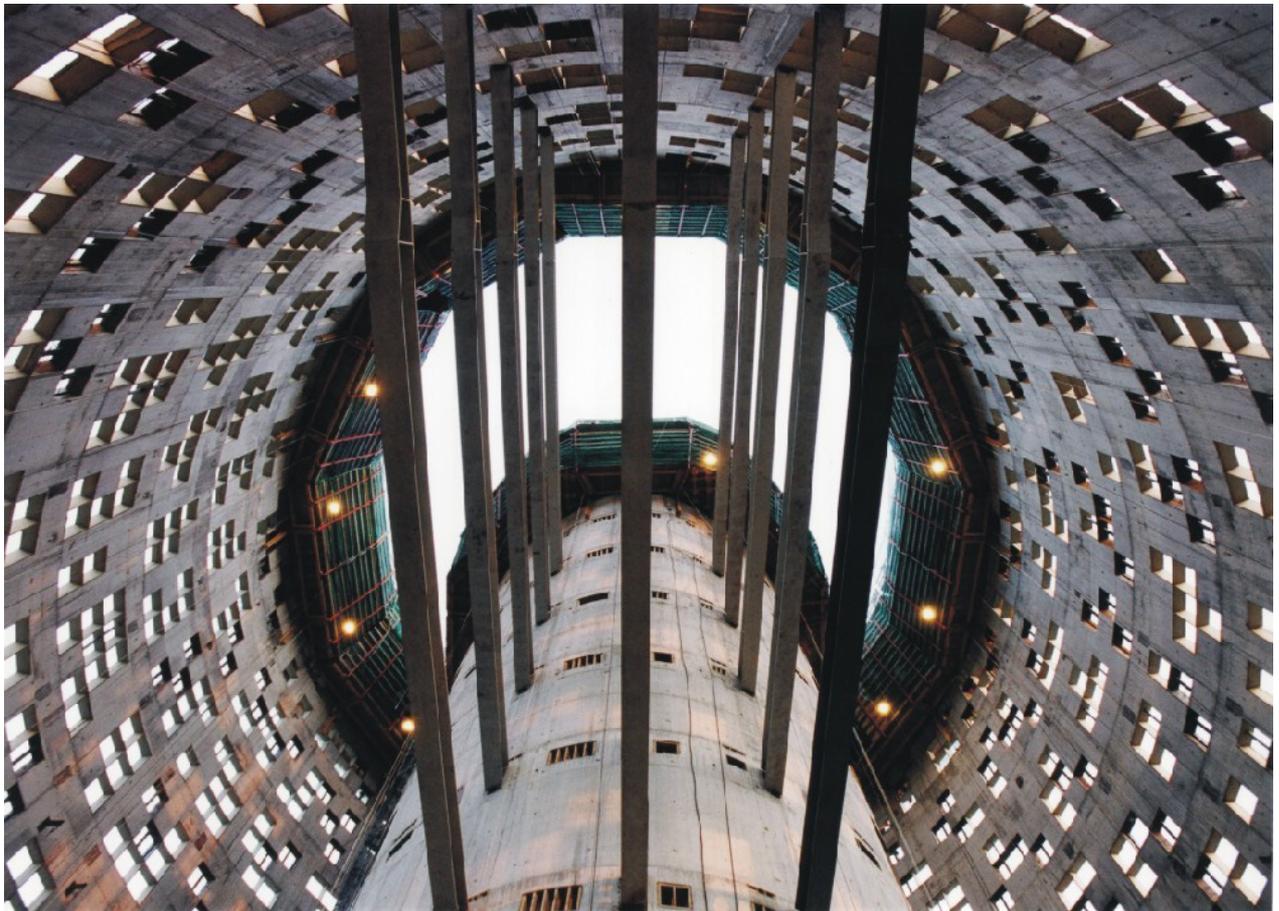
*Detalles de proyecto de una cruz tipo con armadura oblicua.*



*Cruces preparadas en la obra con perfiles oblicuos.*

**BOMA**

Unas de las solicitaciones debidas a los medios auxiliares de la construcción que han afectado en mayor medida al proceso de ejecución de la estructura son las generadas por las acciones de las grúas de altura que se arriostan contra la torre para la consecución de su estabilidad; al respecto, cabe significar que la construcción de los muros de hormigón, tanto el exterior como el interior, avanza inicialmente con mayor celeridad que la construcción de los forjados, de manera que los mencionados muros quedan, en cierta medida, en falso ante los empujes de la grúa que, si bien no suponen un problema relevante respecto al comportamiento global, si que lo suponían a nivel local. Para equilibrar esta desfavorable situación se han debido colocar en algunos casos un cierto número de vigas de forjado antes de lo estrictamente necesario para la construcción de los propios forjados.



*Vigas de forjado colocadas previamente como arriostamiento.*

## BOMA



*Desarrollo del muro exterior sin el acompañamiento de los forjados*

**BOMA**

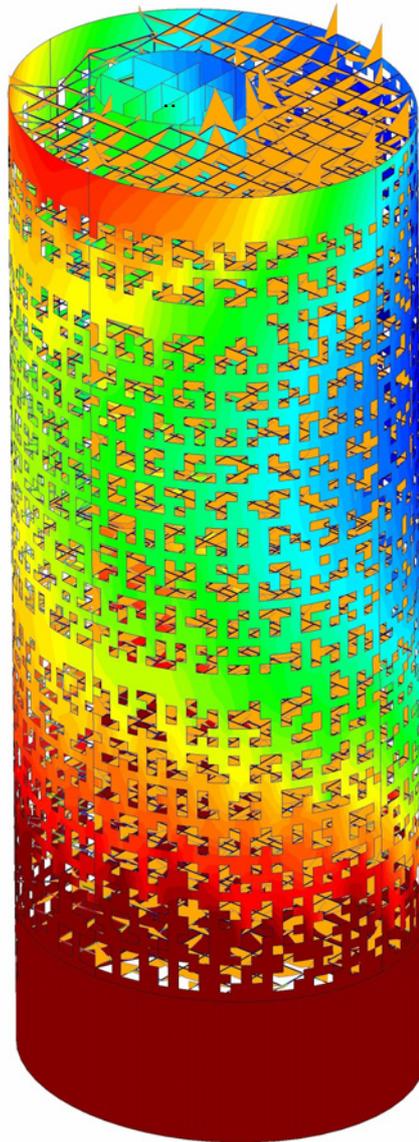


*Grúa arriostrada contra la torre en segundo término.*

Por lo que refiere al análisis estructural del elemento que nos ocupa, cabe manifestar que previo al estricto cálculo, se procedió a un trabajo exhaustivo de ubicación de los huecos de ventanas, conjuntamente con el equipo de arquitectura, una a una, y planta a planta, fijando criterios de distorsión del descenso de cargas, luz máxima de los dinteles, etc. Posteriormente se procedió a la

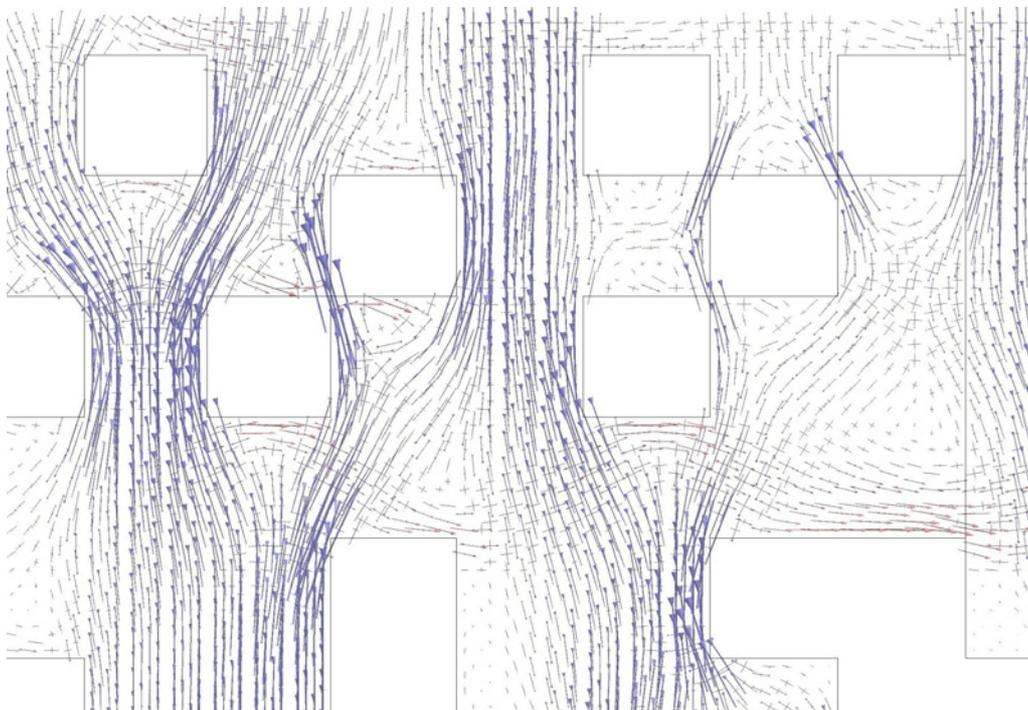
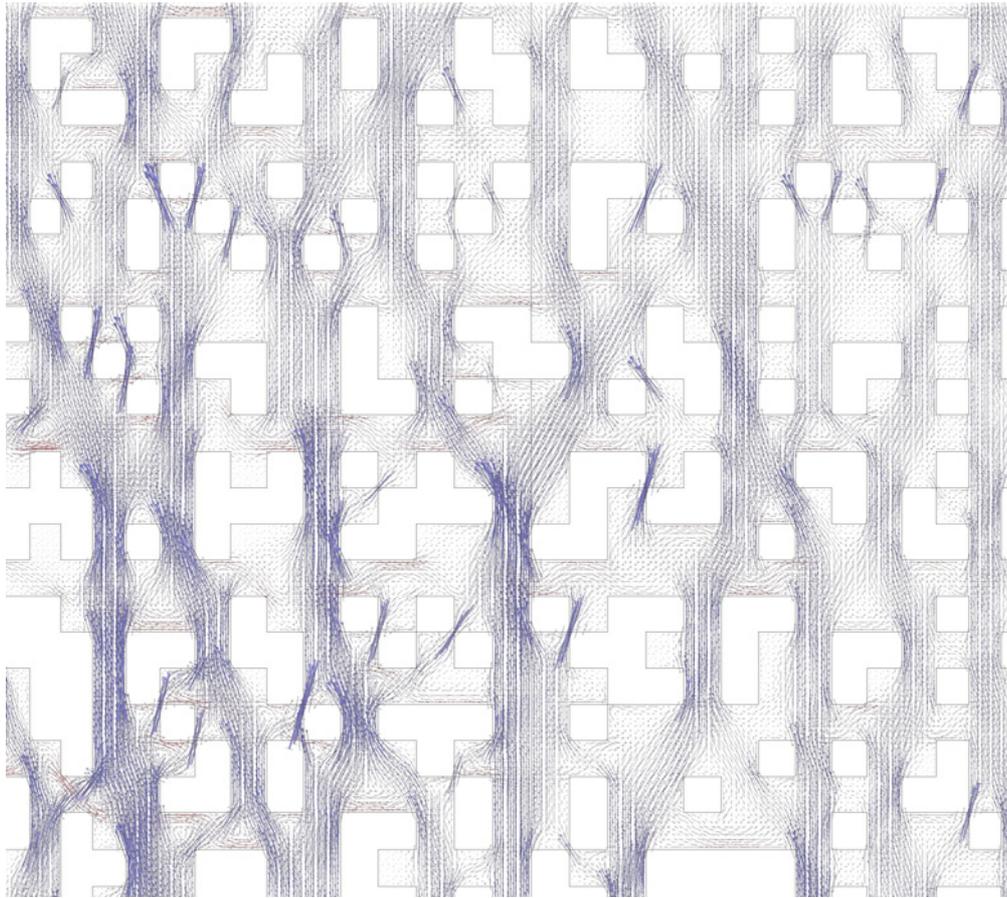
## **BOMA**

modelización completa del muro, incluidos forjados y núcleo, mediante una malla de elementos finitos laminares, procediendo en primera instancia a su cálculo en régimen elástico. Una vez realizado este cálculo se detectaron las zonas de mayor sollicitación y gradiente tensional, las cuales se han estudiado bajo la condición de no linealidad mecánica con mallas de elementos finitos más refinadas; igualmente para la obtención de la armadura de los elementos de muro más esbeltos, semejantes a pilares, se han tenido en cuenta los procesos habituales de no linealidad geométrica (pandeo).



*Detalle de la modelización del muro exterior.*

## BOMA



*Detalles de la modelización del muro exterior.*

**BOMA**

### 1.2.3 Núcleo

Naciendo en los cimientos, este elemento estructural llega a alcanzar los 132m de altura sobre la rasante de la calle, cerrándose sobre sí mismo en las últimas plantas, para formar una pequeña cúpula de hormigón armado ligeramente apuntada.

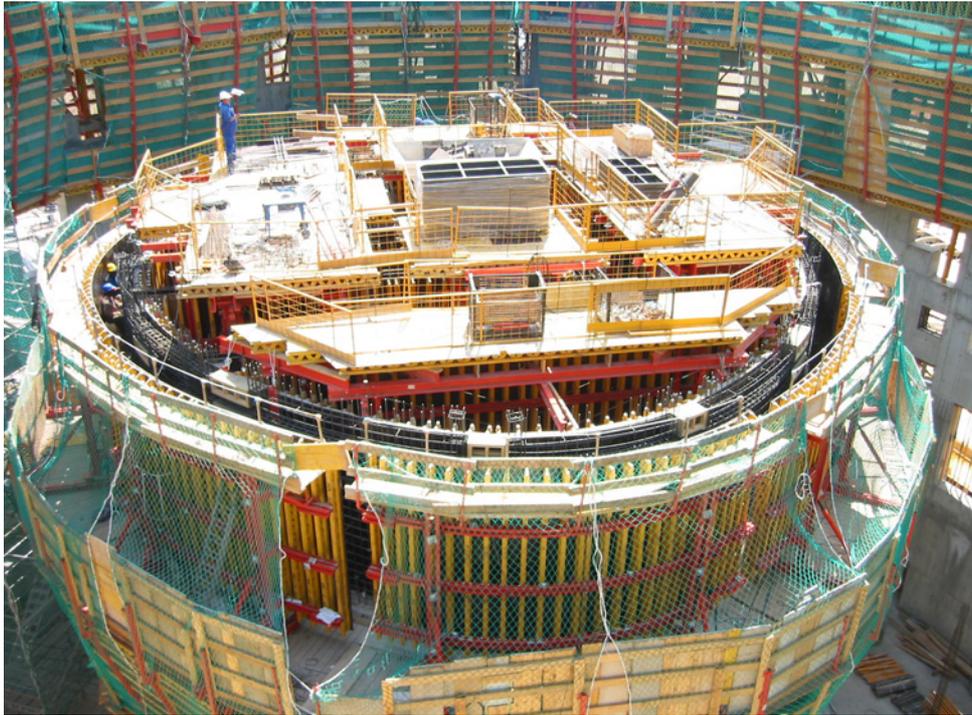
En planta, el núcleo toma una forma parecida a un ovoide de dimensiones principales 16.30m por 15.90m en las plantas tipo, como se puede observar en *EP-08*. Los ejes se orientan de manera que la dimensión mayor del ovoide es coincidente en dirección y posición con la dimensión mayor de la elipse que da forma al muro exterior; ahora bien, el centro del ovoide está desplazado hacia el núcleo de ascensores de la torre, de manera que evidentemente no se produce la coincidencia de centros.

El núcleo está formado por un entramado de paredes de hormigón armado "in situ", en el que la pared perimetral liga todas las demás, confiriendo al conjunto la mencionada forma de ovoide. Dicho entramado de paredes, por el hecho de no adquirir responsabilidad en la estabilización horizontal del edificio, por el número y proximidad entre ellas, se proyecta con un grosor mínimo que oscila entre los 25 y 40cm. El cerramiento de la batería principal de ascensores, fuera ya de este núcleo pero próximo a él, también se proyecta como elemento de carga en hormigón armado (ver *EP-08*).



*Primeros trabajos en el núcleo.*

## BOMA



*Encofrado autotrepante en el sector del núcleo*



*Evolución del núcleo en una fase más avanzada.*

## **BOMA**

### 1.2.4 Forjados

Para la concreción de la estructura horizontal de los forjados de la torre se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

- La consecución del mínimo peso posible.
- La facilidad de adaptación al conjunto de las diversas redes de instalaciones.
- La consecución de una planta sin pilares.
- La utilización de procedimientos constructivos lo más sencillos posible.
- La prefabricación en taller, o a pie de obra, del máximo número de elementos.

La parte de forjado contenida en el núcleo interior la forma una losa de hormigón armado de 20cm de canto, que se apoya en el denso entramado de muros resistentes que da forma a dicho núcleo.

La parte de piso que va del núcleo al muro exterior se cubre con un forjado mixto a base de vigas de acero entrevigadas mediante chapa grecada colaborante de 6cm de altura, complementada con hormigón "in situ" hasta que el conjunto chapa-hormigón alcanza una altura de 11cm. Las vigas de acero se van colocando y orientando de manera que su luz sea la menor posible; ahora bien, siempre guardan una distancia entre sus ejes de 3m y, por otra parte, solo se admiten dos direcciones en la orientación de las vigas, las paralelas a los ejes principales de la elipse que forma el muro exterior, de manera que en determinadas zonas unas vigas han de descansar sobre otras, produciéndose un número de brochales no desdeñable (Ver EP-08).

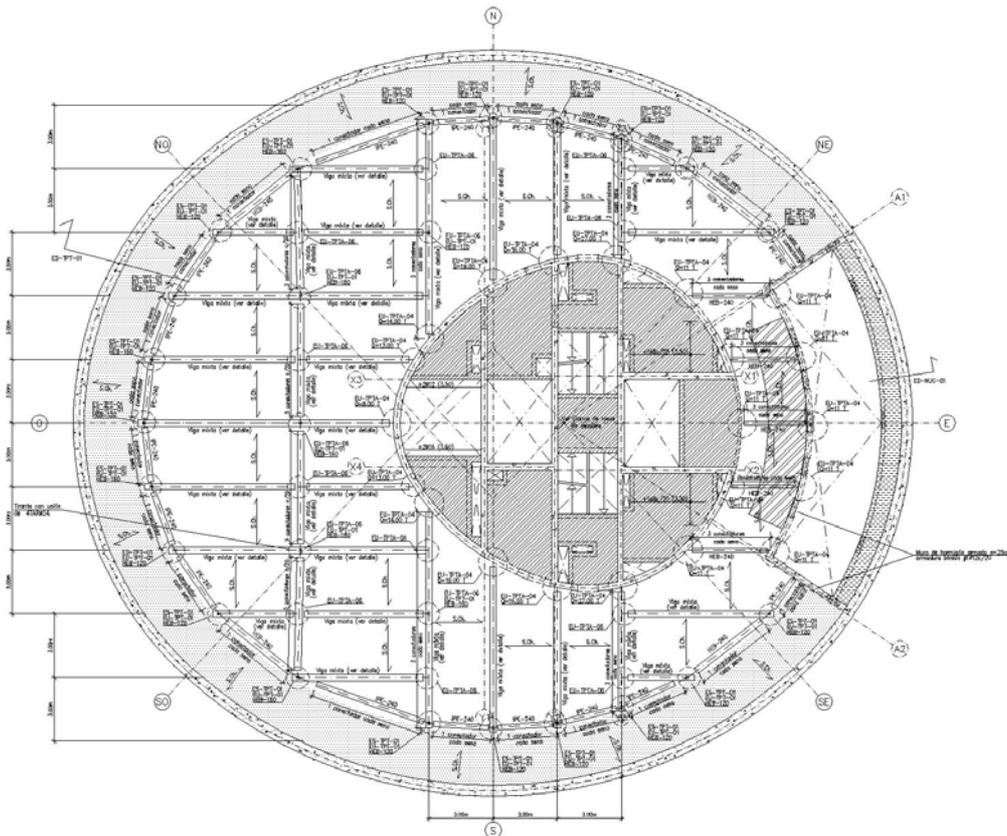
La no coincidencia de los centros de los cilindros resistentes provoca una sollicitación heterogénea de los nervios de acero, de manera que esta situación estructural conduce por sí sola a la aparición de una jerarquía de vigas, acción que se ve acentuada en algunos casos por el hecho de que unas vigas descansen sobre otras.

Se han identificado grupos de vigas, que se concretan en función de las exigencias mecánicas, la servidumbre de paso de instalaciones y la altura máxima posible para ese elemento, en función de los requerimientos arquitectónicos. Básicamente, resultan dos tipos de nervios: vigas armadas, alveoladas para el paso de instalaciones, y perfiles laminados de canto suficientemente reducido para permitir el paso de instalaciones por debajo de ellos. Ambos tipos de vigas presentan en algunos casos conexión a la chapa de hormigón para formar vigas mixtas allá donde es necesario.

## BOMA

Al hallarse las vigas metálicas por debajo de la losa del forjado resulta posible una reducción del canto de éstas en el anillo periférico de 2m de anchura adyacente a la fachada, en sintonía con el proyecto arquitectónico.

Una variación de esta solución tipo tiene lugar en la planta primera y en las tres plantas técnicas que contiene el edificio. La particularidad viene dada por el hecho de que, en estos casos, un forjado pende del otro; ello implica la lógica aparición de unos tirantes entre pisos, un aumento de sollicitación en la planta superior y la consiguiente disminución en la inferior. Los tirantes se disponen en función de los requerimientos arquitectónicos, intentando mantener la luz del forjado suspendido en torno a los 6m. Por lo que se refiere a las consecuencias de la variación de esfuerzo de los nervios, en la planta superior se opta por armar unas vigas diseñadas convenientemente para formar una red de jácenas suficientemente capaces, mientras que en la inferior se disminuye la dimensión de los elementos resistentes al mínimo posible, ante sus nuevas condiciones de trabajo. El trazado de los nervios resistentes en la planta sustentadora, techo de la planta técnica, es idéntico al de las plantas tipo (no, evidentemente, sus secciones ni prestaciones mecánicas), mientras que el trazado de la planta sustentada, suelo de la planta técnica, se adapta a la disposición de tirantes resultando, por tanto, un entramado desigual.



*Suelo de una de las Plantas Técnicas.*

## BOMA

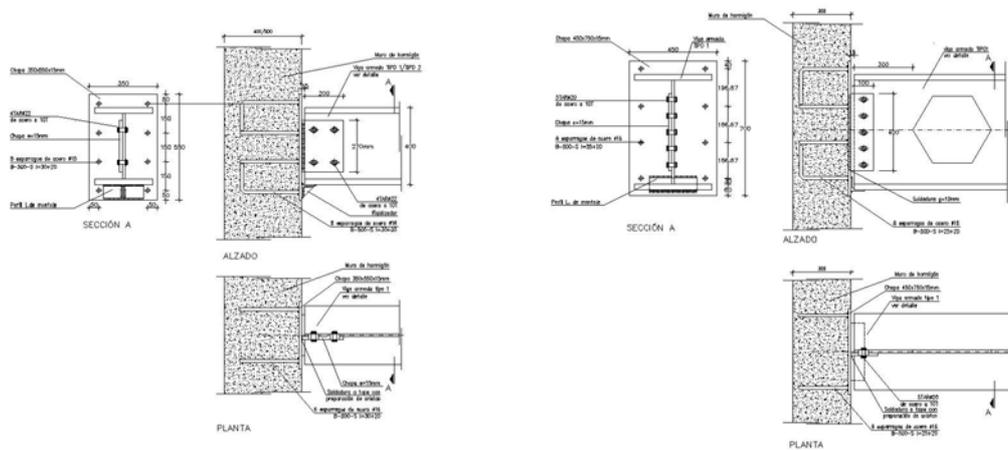
Cabe reseñar que, en las fases previas de proyecto, se tantearon otras soluciones como la de nervios en disposición radial, descartada por la irregularidad del entrevigado, o la de un forjado bidireccional de vigas de acero, descartado porque de su cálculo se deducía la inoperatividad de la mayor parte de los nervios que lo conformaban y por la cantidad de uniones necesarias para su construcción.



*Sectores de forjado de una Planta Tipo y del techo de una Planta Técnica listos para hormigonar.*

## BOMA

La unión de las diferentes vigas con los muros se ha concebido siempre como articulada y resuelta mediante tornillería. Finalmente, las uniones se han ejecutado mediante soldadura, con la voluntad de facilitar el replanteo, aunque manteniendo siempre el carácter de articulación. Para la ejecución de las mencionadas uniones se han debido embeber previamente en los diferentes muros las chapas de acero de fondo necesarias para la posterior recepción de la unión del perfil. Las uniones entre vigas se diseñaron resueltas con tortillería y así han sido finalmente ejecutadas.



Uniones vigas-muro de proyecto.



Chapa precolocada en uno de los muros.



Unión viga-muro ya ejecutada.

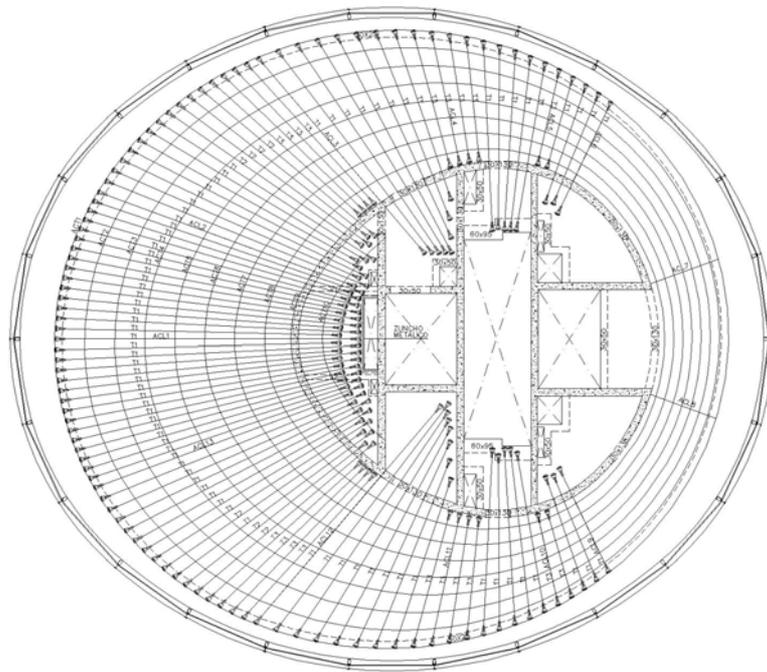
### 1.2.5 Plantas de Dirección

**BOMA**

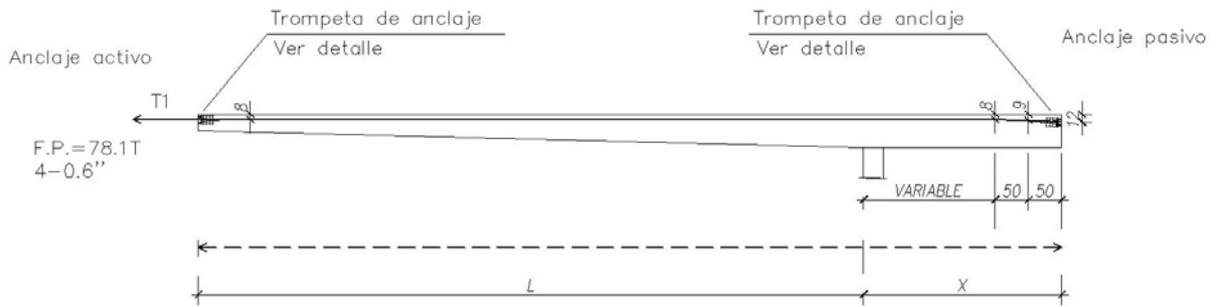
Las plantas de dirección ocupan los seis últimos niveles útiles de la torre, pero son los últimos cinco los que detentan una tipología estructural ajena a las del resto. Dichas plantas presentan la originalidad de que no alcanzan nunca el perímetro de la construcción, como ya se ha comentado anteriormente, siendo así que únicamente pueden sustentarse en el núcleo interior de la torre; por tanto, pasan a formar unos voladizos de longitud idéntica a lo que se aleja el borde del piso del citado núcleo interior. Esta concepción implica en algunos casos vuelos del orden de 10m; por otro lado, el canto máximo para la resolución de estos forjados es de 50cm por necesidades arquitectónicas y del proyecto de instalaciones, por lo que se ha optado por una losa de canto variable (25cm-50cm) postesada, con el objetivo de introducir en la estructura una deformación y un estado tensional contrarios a los que se producirán cuando ésta entre en servicio, haciendo admisibles los corrimientos y tensiones resultantes.

Resulta evidente que el muro perimetral del núcleo interior, con una anchura en torno a los 30cm, es incapaz de movilizar el momento de respuesta suficiente para equilibrar semejantes vuelos; por ello, en estos casos se opta por un canto del forjado interior del núcleo de 50cm, con el fin de hacer partícipes del problema a los muros interiores de dicho núcleo. La separación entre tal muro perimetral y los interiores facilita la aparición de un par de fuerzas, que solicita a los referidos muros axialmente, capaz de equilibrar al momento provocado por el vuelo.

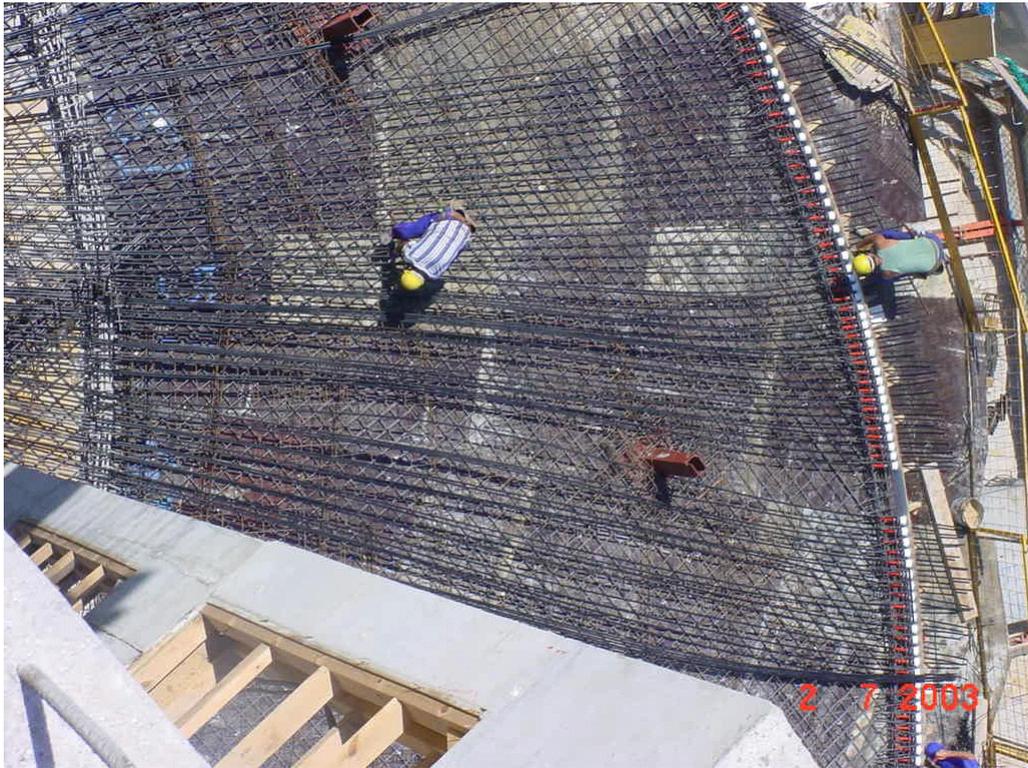
La disposición de la armadura activa es, en éste, radial, en concordancia con el comportamiento real del elemento resistente, obteniendo de tal modo la máxima eficiencia de la operación de tesado. Las cabezas activas se sitúan siempre en el extremo de los forjados, mientras que las pasivas se ubican, en la medida de lo posible, ya en el interior del núcleo.



Distribución de la armadura activa en el Techo de la Planta 26.



Trazado tipo de la armadura activa en las plantas de Dirección



*Colocación de la armadura activa y pasiva en las plantas de Dirección*

**BOMA**

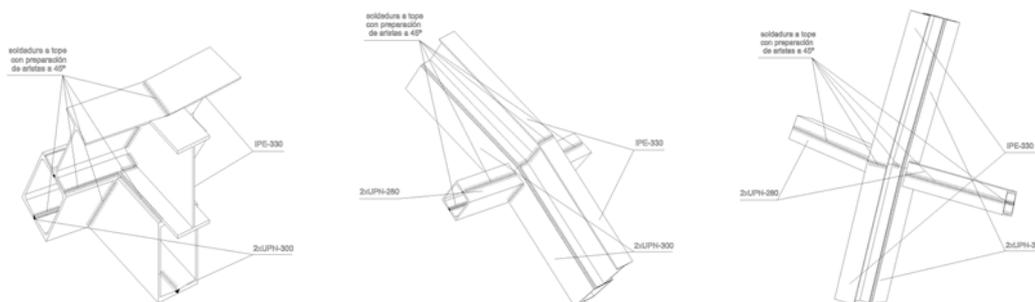
### 1.2.6 Cúpula

Se trata de una estructura metálica formada a base de un conjunto de 26 meridianos y 19 paralelos; éstos constituyen una retícula que sustenta directamente los marcos de la carpintería que recogen el doble acristalamiento que cierra los huecos.

El hecho comentado de la relación directa entre estructura y carpintería es determinante en la conformación inicial del proyecto de este entramado por la baja deformabilidad que se le exige a una estructura en esta situación; por otra parte se daba un requerimiento formal de no disposición de tirantes de triangulación en ninguno de los recuadros definidos por meridianos y paralelos. La perfilaría escogida primeramente tenía, por tanto, que ser capaz de albergar la mencionada carpintería; es por ello que se optó por dos tipos de nervio, en función de que se tratase de un meridiano o de un paralelo. El nervio de los meridianos estaba constituido por un cajón formado con dos UPN-300 y un IPE-330; este último perfil iba soldado por un ala a uno de los dos lados menores del cajón; la orientación del conjunto se producía de tal modo que el cajón quedaba en el interior de la cúpula y el IPE-330 en el exterior. El nervio de los paralelos estaba constituido por un cajón formado con dos perfiles laminados tipo UPN-280 orientados perpendicularmente al vidrio que forma el cerramiento de la cúpula.

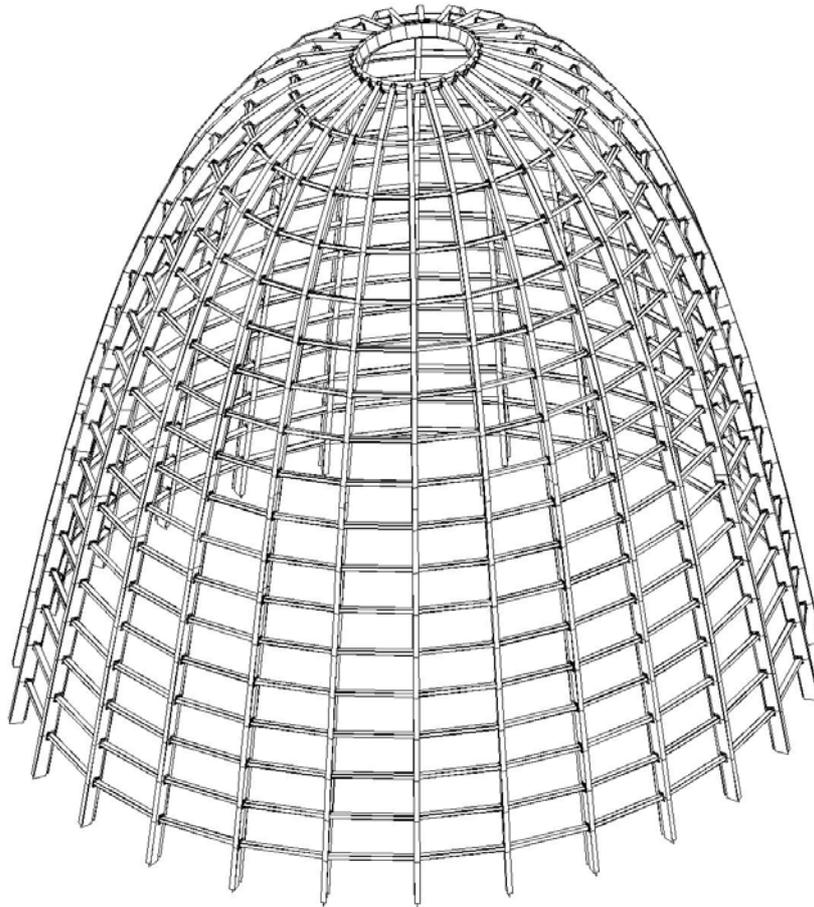
Cabe destacar que, sobre los dos paralelos más altos, se proyectó una estructura secundaria con el fin de proporcionar una base horizontal al conjunto de antenas que se ubica en la parte superior de la cúpula.

El proyecto de la cúpula ha sido revisado en múltiples ocasiones con la intención de atender a todos los condicionantes a que ésta deber dar respuesta, afectando a la perfilaría escogida otras tantas veces. Finalmente, atendiendo fundamentalmente a criterios de facilidad y velocidad constructiva, la perfilaría final ha resultado ser unas vigas armadas de sección tipo "I", de 640x220mm, para los meridianos, y unos perfiles huecos rectangulares, de 180x260x8mm, para los paralelos.



*Detalles de una de las versiones iniciales de la estructura de la cúpula.*

## BOMA



*Perspectiva de la versión definitiva de la cúpula.*

Uno de los retos más importantes en la concepción de la cúpula vino dado por su propia construcción o, por lo que es lo mismo, por su proceso de montaje. Resulta clara la necesidad de minimizar, en la medida de lo posible, las operaciones de atado o de resolución de nudos en altura, máxime, si se toma en cuenta la circunstancia de que las plantas de dirección no alcanzan el perímetro definido por la propia cúpula, lo que impide el acceso directo a pie plano a los nervios de la cáscara. Con tal objetivo, en base a la capacidad de izado de las grúas presentes en la obra, se realizó un estudio de las partes de cúpula premontadas que podían ser trasladadas a la altura correspondiente.

Así, finalmente, se decidió que el montaje de los dos tercios inferiores de la cúpula, la altura correspondiente a los doce primeros paralelos, se montarían mediante piezas que abarcarían dos meridianos, con la altura comentada; en una forma similar a una gran escalera de mano. Este planteamiento implica la resolución “in situ” de las uniones de los doce paralelos ubicados entre cada “escalera”.

## **BOMA**



*Diferentes momentos del montaje de la parte inferior de la cúpula.*

El tercio superior, se montó previamente en el suelo, sobre unas bases que cuyas coordenadas relativas fueron extraídas del remate provisional de los dos tercios inferiores de cúpula ya montados en la

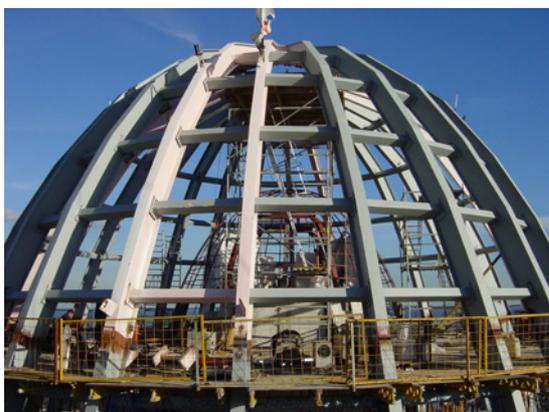
## BOMA

propia torre. De esta manera, se asegura el encaje de las piezas principales del puzzle antes de las maniobras finales.



*Diferentes momentos del premontaje de la parte superior de la cúpula.*

Una vez asegurada completamente la geometría, se hizo parte del remate de la cúpula según se muestra en las imágenes adjuntas, montándose posteriormente el resto de piezas que componen el conjunto.



*Diferentes momentos del montaje de la parte superior de la cúpula.*

**BOMA**



*Estructura principal de la torre ya finalizada*

### 1.3 MARQUESINAS DE LOS ACCESOS PRINCIPALES

Como elemento singular, y en términos estructurales en cierto modo independiente, el proyecto arquitectónico contempla la realización de dos marquesinas; una que conduce a la entrada peatonal de la torre, y la otra que conduce a la entrada del aparcamiento. Ambas marquesinas se conforman a partir de una columna vertebral que arranca del techo del semisótano (Planta baja); dicha columna va doblando su directriz en el espacio para marcar el recorrido del acceso. El eje sustenta la cubrición que forma la marquesina, concebida a base de unas lamas de vidrio que descansan sobre una estructura secundaria que arranca en voladizo de la columna vertebral.

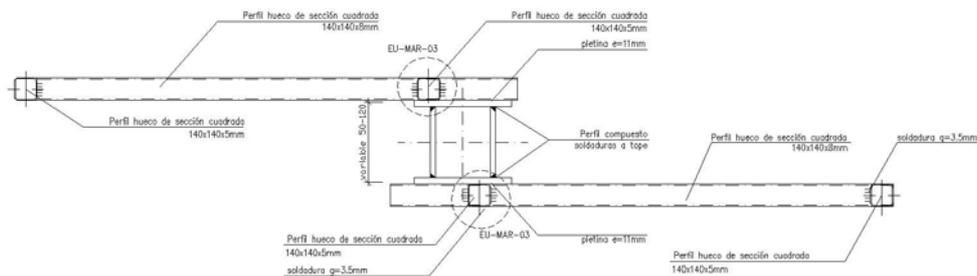
Todo el entramado se plantea con perfiles de acero. Para el eje se arma una viga cajón, por el hecho de que su curvatura hace que se vea solicitado por unas torsiones elevadas; la geometría del cajón se proyecta a modo de dos "I" adosadas lateralmente, de manera que presenta cuatro pequeños vuelos de 10cm en cada una de las esquinas de la sección. La estructura secundaria se plantea a partir de perfiles huecos de sección cuadrada.

Las columnas de ambas marquesinas son de sección variable, presentando el mayor canto en el empotramiento, mientras que en el extremo de su desarrollo reducen su sección. El ancho del eje se mantiene constante en 60cm de principio a fin para ambas estructuras. Mientras que el palio que da

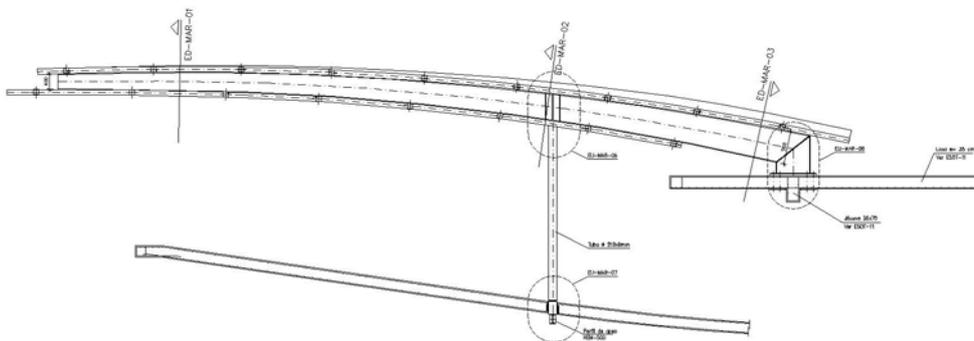
## BOMA

acceso a la torre se sustenta en su extremo al muro exterior de la edificación, la marquesina que da acceso al aparcamiento consigue su equilibrio apoyándose en un pilar ubicado en la parte central de la rampa de acceso, que permite reducir su vuelo.

Cabe comentar que para el dimensionamiento de estos elementos estructurales no se han observado los criterios convencionales de deformabilidad de otras estructuras de acero, sino que se ha trabajado como un elemento escultórico, con cierta flexibilidad, que para las hipótesis de viento y nieve presenta un cierto movimiento controlado.



Sección transversal de la columna vertebral de una de las marquesinas.



Sección longitudinal de la columna vertebral de una de las marquesinas.

## 2 CONCLUSIONES Y DATOS GENERALES

**BOMA**

Como colofón, muy sintéticamente, cabe destacar que el proyecto y construcción de la estructura de la Torre AGBAR constituyen una prueba más de que una revisión exhaustiva de las herramientas de la construcción y del diseño permite alcanzar planteamientos arriesgados y/o novedosos sin el empleo de recursos especialmente singulares.



*EF-01. Detalle de la fachada acabada.*

Los datos generales de la operación inmobiliaria son los siguientes:

**FICHA TÉCNICA:**

- Promotora: Layetana Inmuebles, S.L.
- Constructora: Rodio (Cimentación) - Dragados
- Management: ARGOS Management
- Arquitectos: Atelier Jean Nouvel (París) – b720 Arquitectos (Barcelona)
- Aparejador: Josep Gilabert
- Estructura: BOMA
- Instalaciones: GEPRO, S.L.

- Proyecto: 2000 – 2001
- Construcción: 2001 – 2005
- Coste final: 60.000.000,00.-€ (Excluidos costes financieros)

Fotografías: AGBAR/b720 Arquitectos/BOMA/Dragados/Layetana Inmuebles

**BOMA**