



**PROYECTO Y EJECUCIÓN DE LA ESTRUCTURA
DE LA TORRE AGBAR**

José Ramón Solé Marzo
Arquitecto y Socio Director de
BOMA Zona Levante
Profesor de estructuras de la
Universidad Politécnica de Catalunya
Septiembre de 2007

El diseño y construcción de la torre AGBAR, sede del grupo empresarial Aguas de Barcelona y nuevo icono arquitectónico de la ciudad, ha sido posible, especialmente en sus aspectos más singulares, gracias a una revisión innovadora y atrevida de las herramientas que brinda, de una manera más o menos habitual, la tecnología de la construcción de nuestro entorno; uno de estos aspectos más destacables es, sin duda, el de su entramado resistente, cuyo proyecto y dirección de obra han corrido a cargo de la consultoría de estructuras BOMA.

El trabajo que aquí se extiende atiende, precisamente, a toda la problemática asociada al desarrollo del entramado resistente de la construcción de referencia, haciendo especial hincapié en todos aquellos particulares de mayor interés, por su carácter más novedoso o singular. Se pretende desarrollar una explicación detallada de estos particulares atendiendo a tres aspectos o etapas fundamentales: concepción, análisis y ejecución.



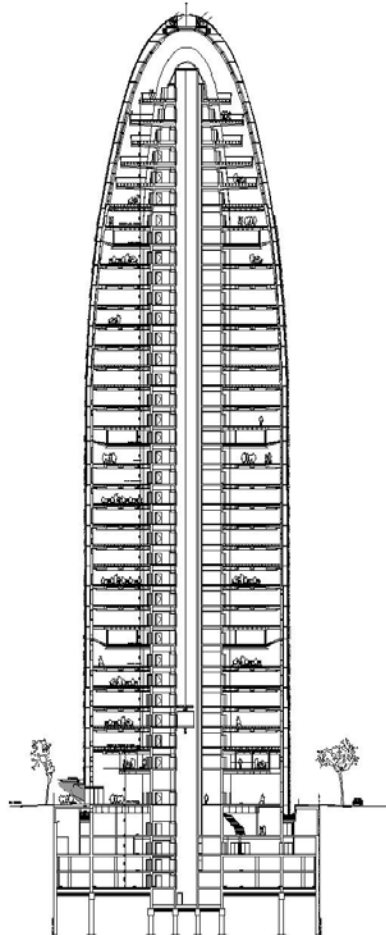
Imagen general de la torre con el sector de Diagonal-mar al fondo

BOMA

1 PLANTEAMIENTO GENERAL

El planteamiento volumétrico del proyecto de la torre AGBAR consiste en una edificación en altura de 141.5m sobre la cota de rasante, cuya planta, de geometría más o menos elíptica, posee unos ejes principales de 39.40 m y 35.42 m. Se trata, pues, de un cuerpo cilíndrico que en la parte final se cierra sobre sí mismo. En el proyecto arquitectónico se contempla la formación de cuatro sótanos, los cuales ocupan la totalidad de la parcela donde se ubica el proyecto.

La obra presenta en primera instancia dos situaciones estructurales en que las problemáticas son bien distintas; por un lado la formación de los sótanos, resuelta en términos generales a base de losas y pilares de hormigón armado, y por otro, la erección de la torre propiamente dicha, cuya solución estructural no se puede adscribir a ninguna tipología convencional.



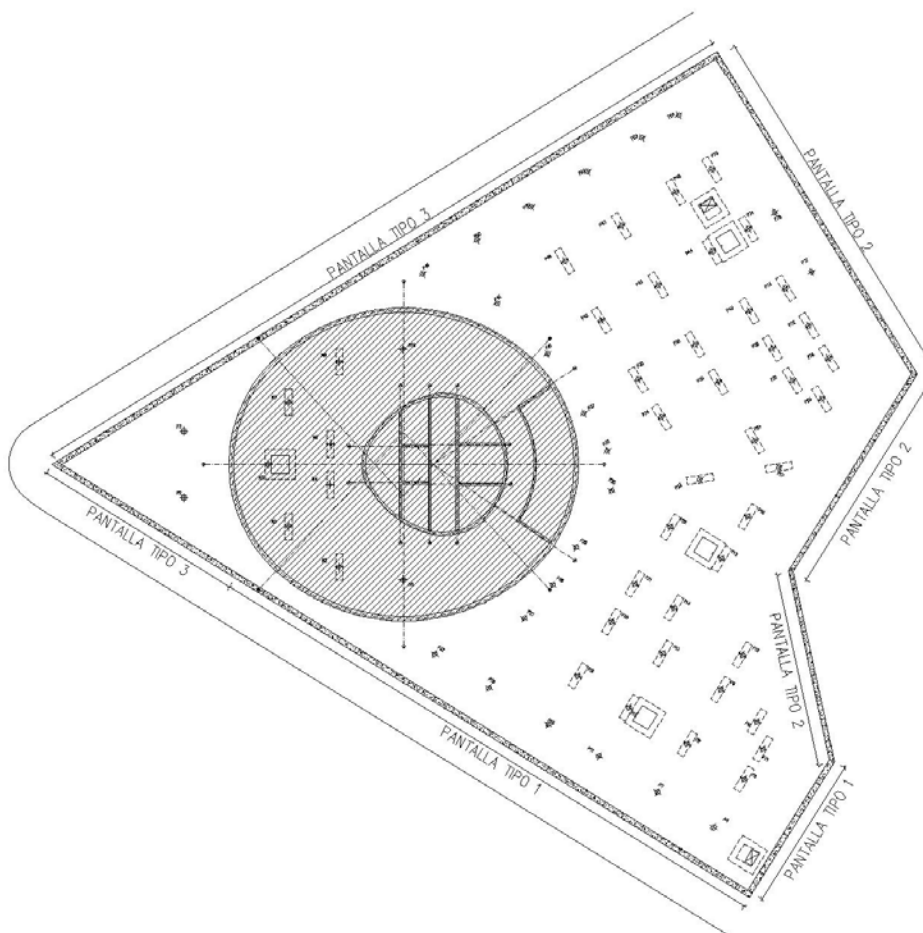
Sección general.

BOMA

1.1 LA ESTRUCTURA DE LOS SÓTANOS

1.1.1 Excavación y estructuras de contención

Como se ha indicado anteriormente, el proyecto plantea la formación de cuatro niveles de sótanos de diferentes alturas cada uno de ellos, que provocan un rebaje total desde de la cota inicial del terreno en torno a los 17m de altura. Anteriormente se ha comentado asimismo que los sótanos ocupan la totalidad de la parcela, planteamiento que conlleva acometer el rebaje consignado en la globalidad del solar. El primer nivel de sótano es referido a nivel de proyecto como semisótano, de tal modo que el más bajo de los sótanos es referido como el sótano 3.



Planta general.

La caracterización geológica del subsuelo viene definida de un modo general por tres tipos de estratos; el primero corresponde a un nivel de rellenos antrópicos bastante consolidado que oscila entre los 2 y 5m de espesor, el segundo consiste en un terreno arcilloso de un espesor en torno a los 13m, y el tercero, situado a unos 20m por debajo de la cota de rasante, está constituido por un

BOMA

estrato formado por gravas y arenas; este último nivel contiene de un modo aleatorio "lentejones" de arcilla de pequeño espesor y de longitudes variables.

En cuanto a la naturaleza del terreno conviene destacar como característica fundamental la presencia del nivel freático a unos 10m por debajo de la rasante del solar, de modo que el fondo de la excavación se sitúa 7m por debajo del mencionado nivel. Esta situación conlleva, por un lado, la previsión de un considerable mecanismo de bombeo para el abatimiento del nivel freático durante la ejecución de la obra y, por otro, el acondicionamiento de la cimentación para equilibrar la subpresión correspondiente.

La circunstancia descrita en el párrafo superior condiciona decisivamente el diseño de las estructuras de contención del terreno que se proyectan no únicamente con criterios de estabilidad y resistencia, sino atendiendo también a la intención de formar un vaso más o menos estanco a la entrada de agua del subsuelo.

La excavación se plantea de tal modo que se prevé un primer rebaje de unos 4.5m de media sin medidas de sujeción del suelo, de manera que se permite la formación de cuñas o taludes de trazado prácticamente vertical de 4.5m de altura; este rebaje viene a corresponder con el nivel del suelo del semisótano. A partir de este límite se encuentran las estructuras de contención propiamente dichas.

En primera instancia se puede afirmar que hay dos situaciones generales de contención. Ello es debido a que la finca vecina pertenece a la misma propiedad, y en dicha finca se proyecta una edificación que dispone de tres niveles de sótanos de tal modo que la cantidad de tierras a contener en el linde entre las dos fincas resulta necesariamente menor; por otro lado, la estructura afectada por esta condición ha de estar capacitada para dominar la carga que sobre ella induzca el edificio vecino. Esto sucede en el lado más alejado de la plaza de las Glorias. Por tanto, tenemos que contener de una parte en dos de los lados del solar, las tierras correspondientes a cuatro niveles de sótanos y, de otra, en el lado restante, una altura de tierras correspondiente al último sótano.

La altura de la contención proyectada, la presencia y cota del nivel freático, la evidente imposibilidad de realizar todo el rebaje contemplando taludes, junto a la estratigrafía del terreno, es lo que provoca que la solución más adecuada para la formación de los sótanos que nos ocupan, en cualquiera de las dos situaciones de contención del proyecto, sea la de muros pantalla amarrados provisionalmente al terreno mediante anclajes en los casos necesarios, hasta la ejecución de los diferentes forjados que forman dichas plantas.

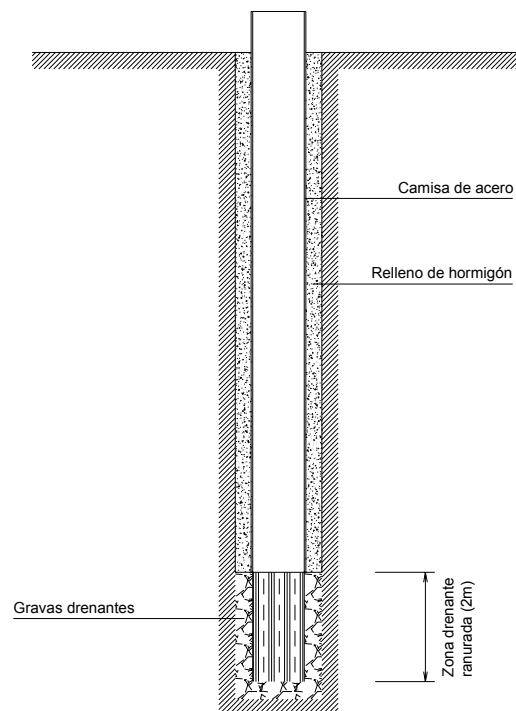
Las pantallas se plantean de tal modo que en cualquier caso siempre se adentran un mínimo de 7m en el terreno por debajo del fondo de la excavación. Esto no obedece únicamente a criterios resistentes,

BOMA

como se ha dicho anteriormente, sino también a la voluntad de evitar el sifonamiento del fondo de la trinchera de una parte, y de otra, a la intención de reducir la entrada de agua al solar que nos ocupa durante la ejecución de la obra.

Respecto al particular anterior resulta necesario comentar que los 7m de clava consignados se preveían empotrados unos 3.5m en un hipotético estrato margoso perteneciente al terciario en concordancia con los datos reflejados en un primer estudio geotécnico. Por desgracia, durante la ejecución de la obra se ha podido constatar la inexistencia del mencionado estrato, al menos a la cota prevista en el referido estudio; este hecho influyó de un modo decisivo en el desarrollo de la obra, ya que el hipotético estrato detentaba una permeabilidad muy baja que aseguraba una reducción del acceso de agua al recinto de la obra de importancia fundamental. En cualquier caso, a pesar de la constatación de esta circunstancia se debieron ejecutar las pantallas tal y como estaban proyectadas, una vez asegurada su estabilidad, por el grave perjuicio económico que suponía una parada de la obra sin reanudación hasta el conocimiento de las verdaderas condiciones de la permeabilidad del terreno.

Para el abatimiento del nivel freático el proyecto contemplaba seis pozos, pero debido a la situación sobrevenida descrita en el párrafo anterior, la obra ha requerido 29 pozos de abatimiento, a través de los cuales se llegó a bombear ocasionalmente un caudal de agua del orden de 300l/s.



Detalle de un pozo de obra.

BOMA

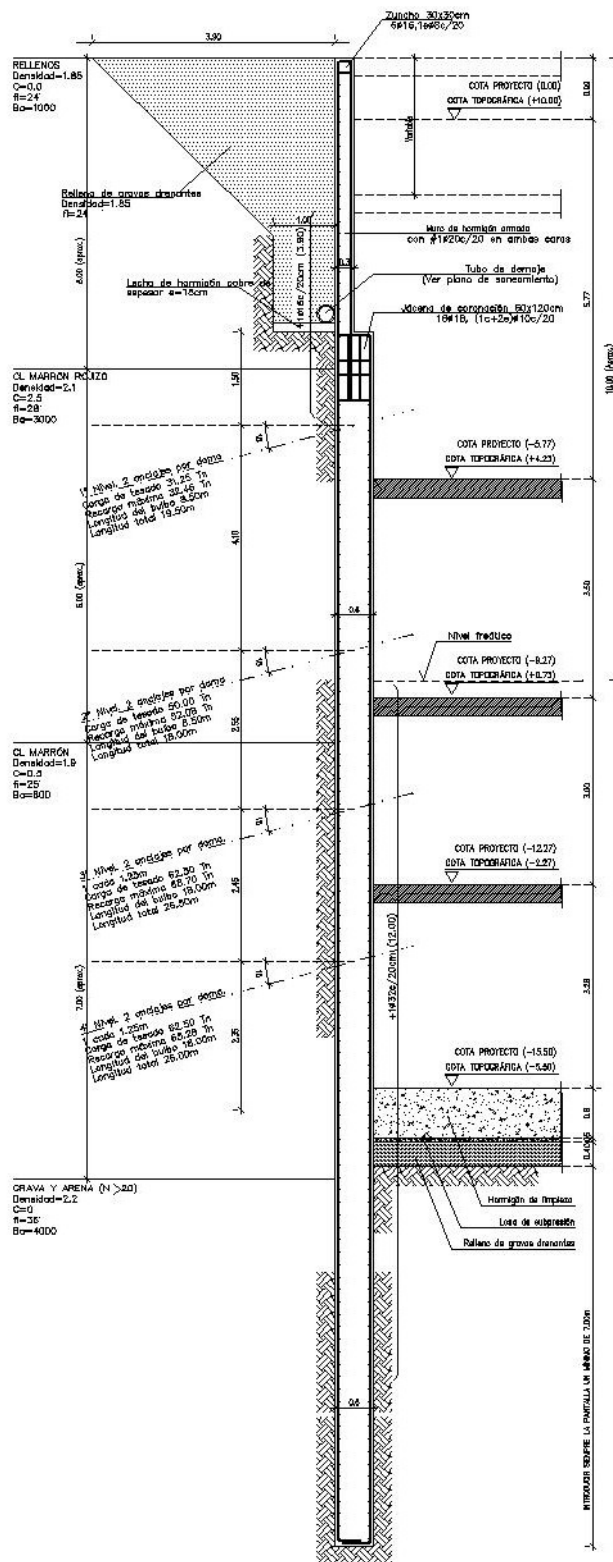


Pozos de obra ya fuera de servicio.

Dentro de la primera situación de contención, la de tres niveles de sótano, se distinguen dos grupos de pantallas, cuya diferencia radica en que un tipo tiene su coronación junto al techo del sótano -1 , mientras que el otro presenta su coronación 2.30m por encima de dicho forjado. El primer grupo presenta tres niveles de anclajes al terreno, uno por cada planta, mientras que el segundo comprende un total de cuatro niveles de anclaje, uno por planta, más uno por encima del techo del sótano -1 ; en ambos casos los dos niveles de anclaje inferiores se sitúan bajo el nivel freático. El espesor previsto para este tipo de pantallas es de 60cm. La contención se completa con un muro de hormigón armado encofrado a dos caras de 30cm de grueso, hasta alcanzar la rasante de la calle.

Por lo que se refiere a la segunda situación de contención, se ha proyectado una pantalla que sostiene las tierras correspondientes a un nivel de sótano, el más bajo, ya que la excavación del solar vecino, perteneciente a la misma Propiedad como ya se ha comentado, se ha situado en este nivel. El grueso de este tipo de pantallas es de 50cm que, dadas las condiciones de contención se han previsto sin anclajes provisionales; sobre la mencionada pantalla descansa un muro de hormigón armado de 30cm de espesor encofrado a dos caras que ocupará la altura correspondiente a los sótanos -1 y -2 .

BOMA



Detalle de uno de los muros pantalla.

1.1.2 Cimentación.

BOMA

El diseño de la cimentación de la parte de proyecto que nos ocupa atiende a los siguientes condicionantes;

- Inexistencia de planta alguna sobre rasante.
- La profundidad relativa del fondo de los sótanos respecto al nivel freático.
- La estratigrafía y condiciones mecánicas del terreno.
- La carga permanente de los forjados que forman los sótanos.
- La luz representativa de esta parte del proyecto (7.5m).

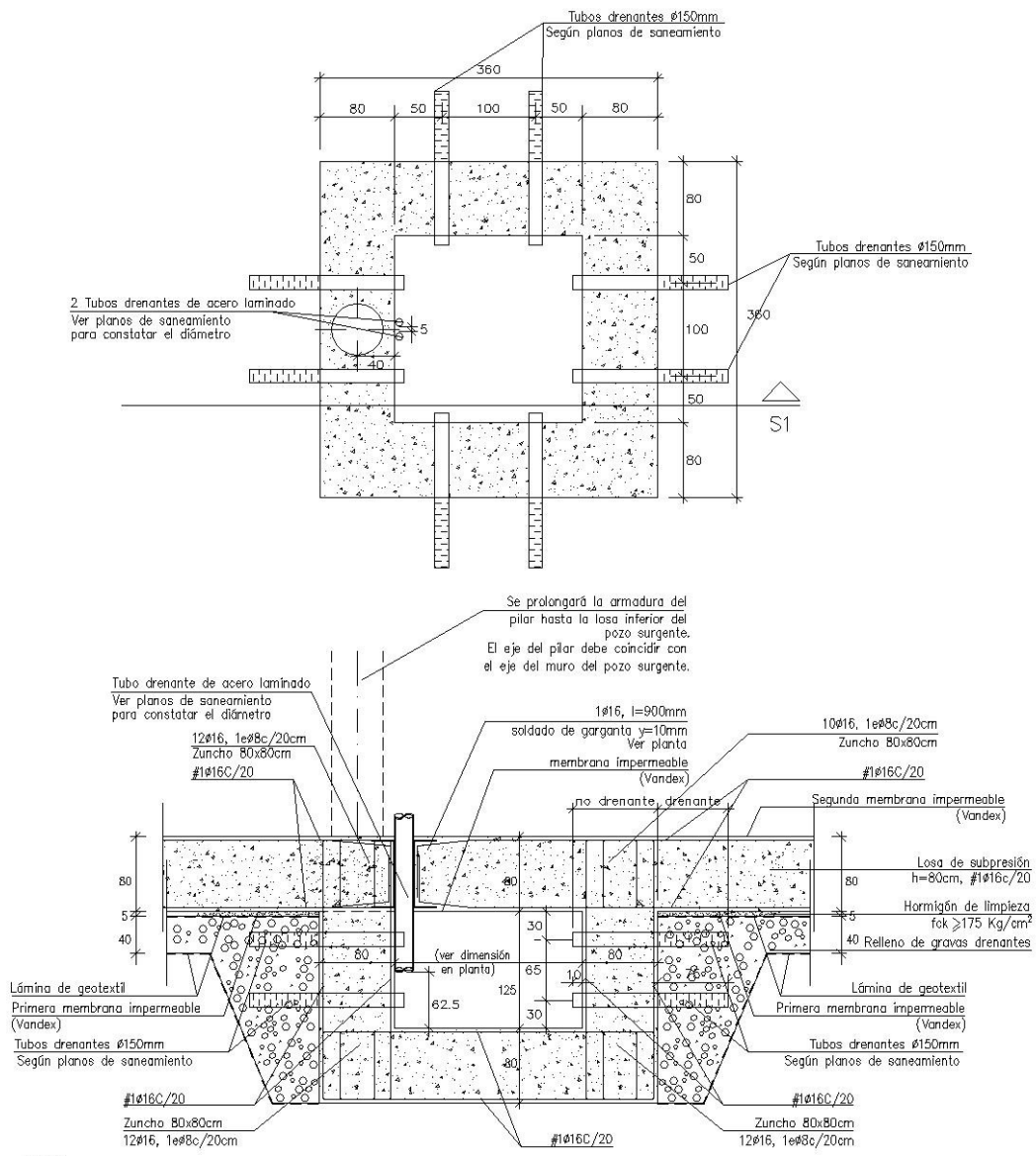
Atendiendo a estos condicionantes, y dado que el peso muerto de la construcción resulta mucho menor que la presión ascendente que lo solicita, se ha concebido una losa de subpresión anclada al terreno mediante módulos de pantalla que, trabajando a fricción negativa y situados debajo de cada pilar, resultan capaces para equilibrar dicha subpresión. Esta opción permite construir una losa de un canto moderado para las cargas y luces con las que se trabaja; concretamente, se proyecta una losa de 80cm de espesor. Este moderado espesor alivia en cierto modo el comportamiento de las estructuras de contención, ya que al producirse una depresión mínima del terreno, las pantallas pueden ser más cortas, puesto que éstas alcanzan con mayor facilidad la estabilidad.



Ejecución de la losa de subpresión.

La losa descansa sobre un enchado de gravas drenantes de 40cm de espesor que facilita el discurrir del agua hasta cuatro pozos surgentes. El motivo de la concepción de pozos surgentes es el de evitar que, ante una subida inesperada del nivel freático, la subpresión aumente por encima de los valores que la cimentación proyectada es capaz de soportar, al actuar éstos como aliviadero. Concretamente, la losa ha sido diseñada para un valor de 8t/m^2 de presión ascendente, contemplando por tanto una subida excepcional del nivel freático de 1m; a partir de este nivel comenzaría a actuar el mecanismo de surgencia.

BOMA



Detalle de uno de los Pozos surgentes.

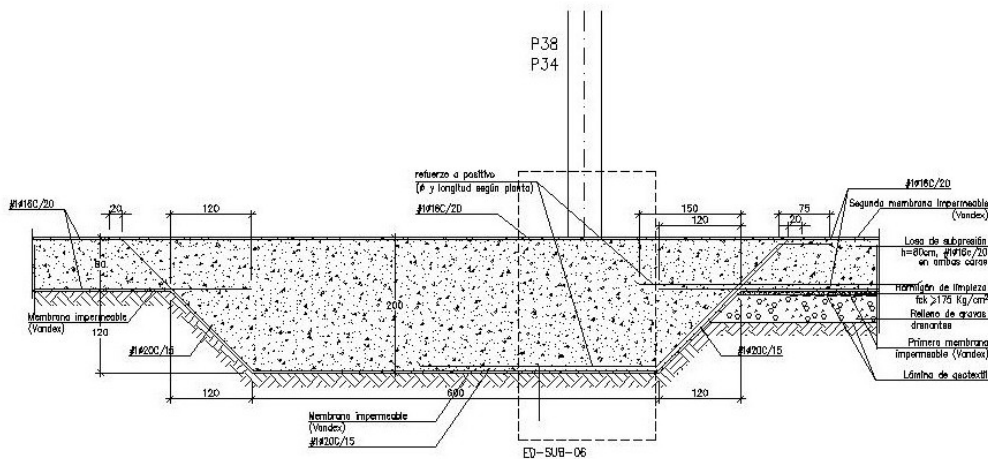
La losa se encuentra, evidentemente, en contacto permanente con el agua del subsuelo que, en la obra que nos ocupa resulta débilmente agresiva por el contenido en sulfatos, según los límites establecidos por la *Instrucción del Hormigón Estructural*. Al respecto, resulta necesario reseñar que la resistencia característica del hormigón de los elementos estructurales de los sótanos es típicamente de 35N/mm².

BOMA



Detalles de la coronación de los bataches en preparación para recibir la losa de subpresión.

Finalmente, como singularidad relevante de la losa de cimentación se encuentra la adaptación local que la mencionada losa experimenta para dar solución a la fundación de las dos grúas de altura que, al encontrarse dentro del recinto de la obra, necesariamente se sustentan sobre ella. Al respecto se ha previsto un recrecido local de la losa, a modo de gran zapata embebida, de aproximadamente 5x5m de base con 2.00m de canto.



Detalle de cimentación de una de las grúas de altura.

1.1.3 Forjados y pilares.

La estructura de los sótanos se adscribe a la más convencional de las tipologías previstas. La forma un entramado de pilares que intenta respetar una distancia entre ellos no mayor de 8m, luz acorde con el uso de aparcamiento en dos de estas plantas; éstos, a su vez, sustentan en los casos típicos una losa de hormigón armado de 30cm de canto; constituye una excepción el techo del semisótano

que, debido a la mucho mayor carga que ha de soportar (tránsito de vehículos de bomberos, jardinería, etc.), se proyecta con cantos que van desde los 35cm hasta los 40cm.

Cabe significar que existen otras singularidades, que dan lugar en algún caso a apeos, jácenas de canto, o incluso alguna viga-pared. También se prevé algún aumento local de canto allá donde la carga sobrepase notablemente las cifras más representativas.



Diferentes momentos del desarrollo de las tareas correspondientes a la ejecución de las losas.

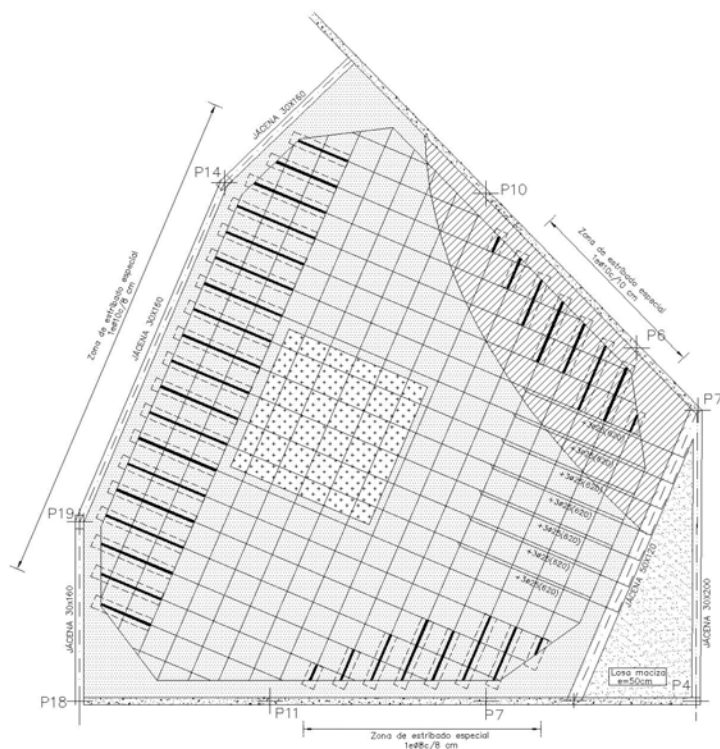
1.1.4 Auditorio

En el interior del entramado general de los sótanos encontramos una singularidad muy notable; es la ubicación del auditorio. Resulta evidente que el mencionado auditorio presenta una estructura especial para su cubrición, debido a la pertinente necesidad de no disponer pilares en el espacio de audiencia y escenario.

BOMA

A la hora de dirimir la estructura adecuada para la formación del susodicho auditorio se han tenido en cuenta primordialmente las siguientes premisas: de una parte, la coincidencia de la posición del auditorio con la previsión de un montículo a nivel de planta baja, por necesidades de paisajismo y jardinería; de otra, la exigua reserva dimensional que contempla el diseño para el entramado resistente. En base a estos datos se ha optado por una lámina de doble curvatura en hormigón armado “in situ” aligerada mediante casetones de poliestireno expandido, que con su geometría, ayuda a resolver el problema resistente y conforma en gran medida el montículo requerido por el proyecto arquitectónico.

La lámina, compuesta de dos chapas de hormigón armado de 10cm y aligeramiento intermedio de 60cm, descansa en todo su perímetro sobre vigas o muros suficientemente capaces, que a su vez descansan sobre pilares que conducen la carga hasta la cimentación.



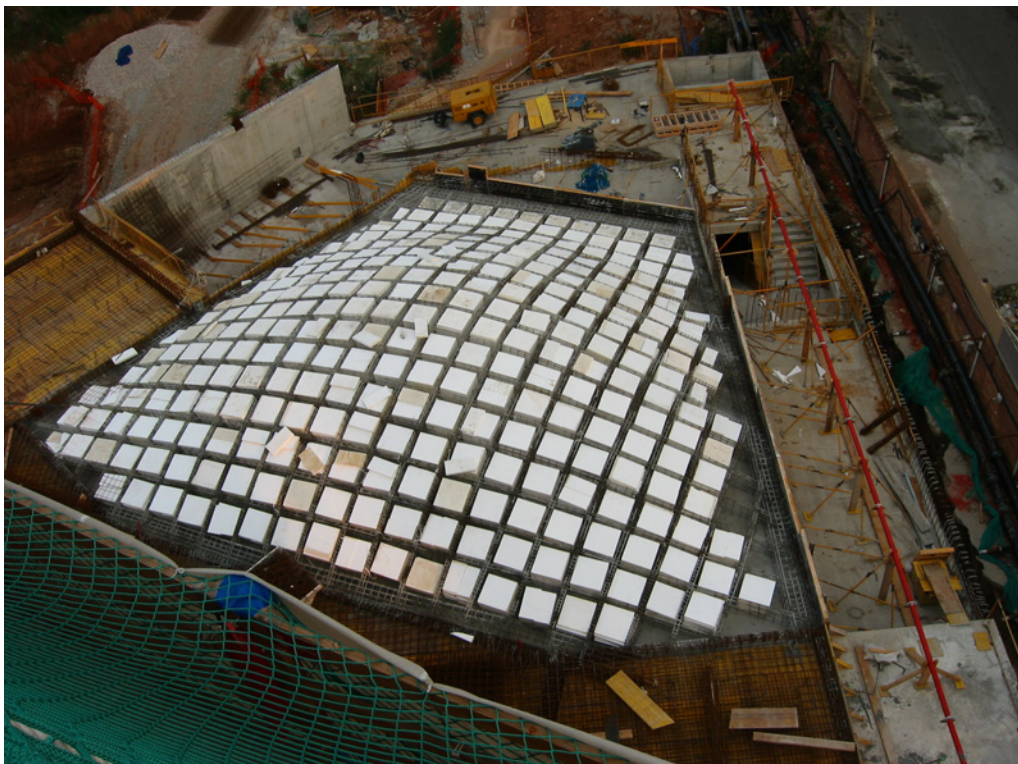
Planta de la cúpula del auditorio.

BOMA



Diferentes momentos de la construcción de la cúpula del Auditorio.

BOMA

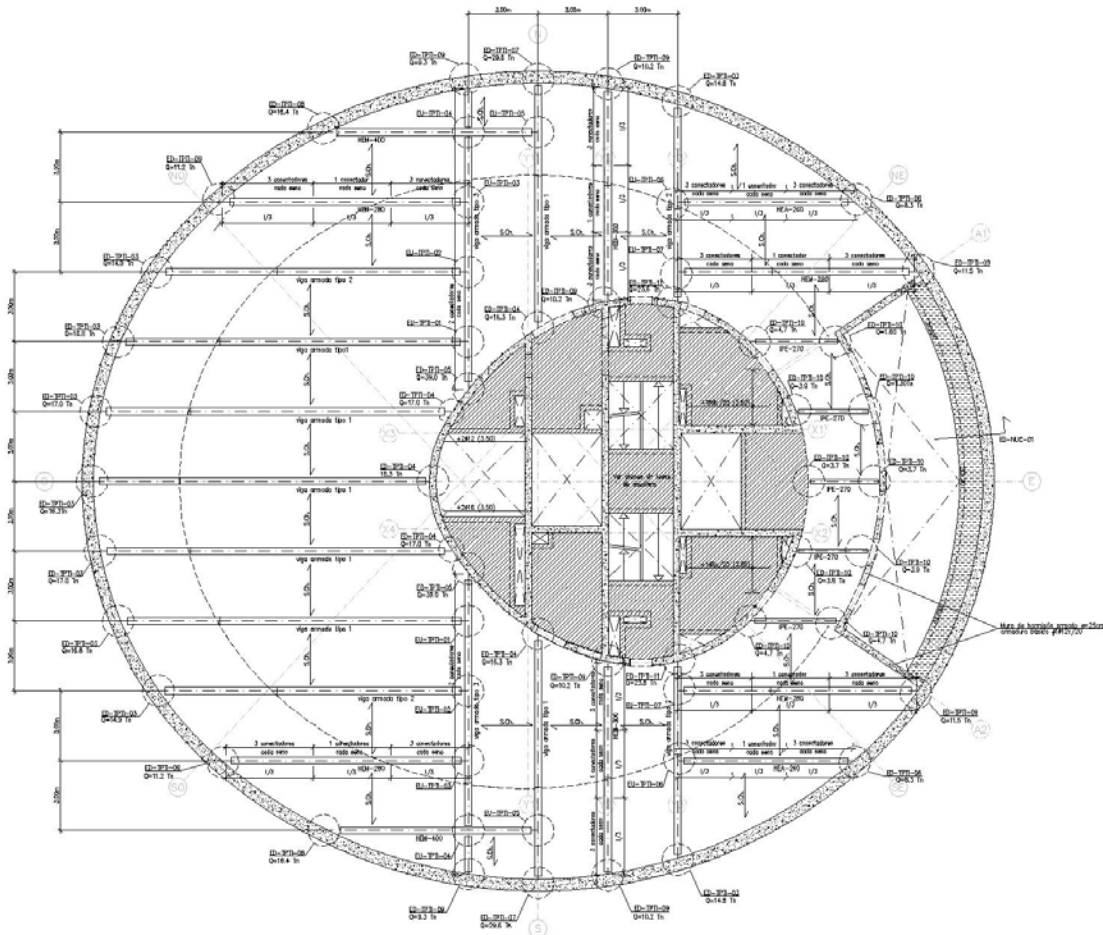


Diferentes momentos de la construcción de la cúpula del Auditorio.

1.2 ESTRUCTURA DE LA TORRE

BOMA

Como ya se ha manifestado anteriormente, el planteamiento de la torre consiste en una edificación en altura de 141.5m sobre la cota de rasante que presenta una planta de geometría más o menos elíptica de ejes 39.40m y 35.42m. La estructura vertical de carga se resuelve hasta los 110 primeros metros sobre rasante mediante un cilindro exterior, proyectado como un muro de hormigón armado, y otro cilindro interior, no concéntrico con el anterior, proyectado igualmente en hormigón armado. Sobre estos dos cilindros de carga se van apoyando los diferentes forjados. La resistencia característica del hormigón vuelve a ser típicamente de 35N/mm². A partir de la cota 110m los forjados se sustentan en voladizo desde el núcleo interior, sin contacto con el perímetro exterior, que asciende hasta la cota 132m; estos forjados se corresponden con las cinco últimas plantas, las de dirección. Cerrando todo el conjunto nace, desde la cota 110m del muro exterior, una cúpula resuelta en acero y vidrio.



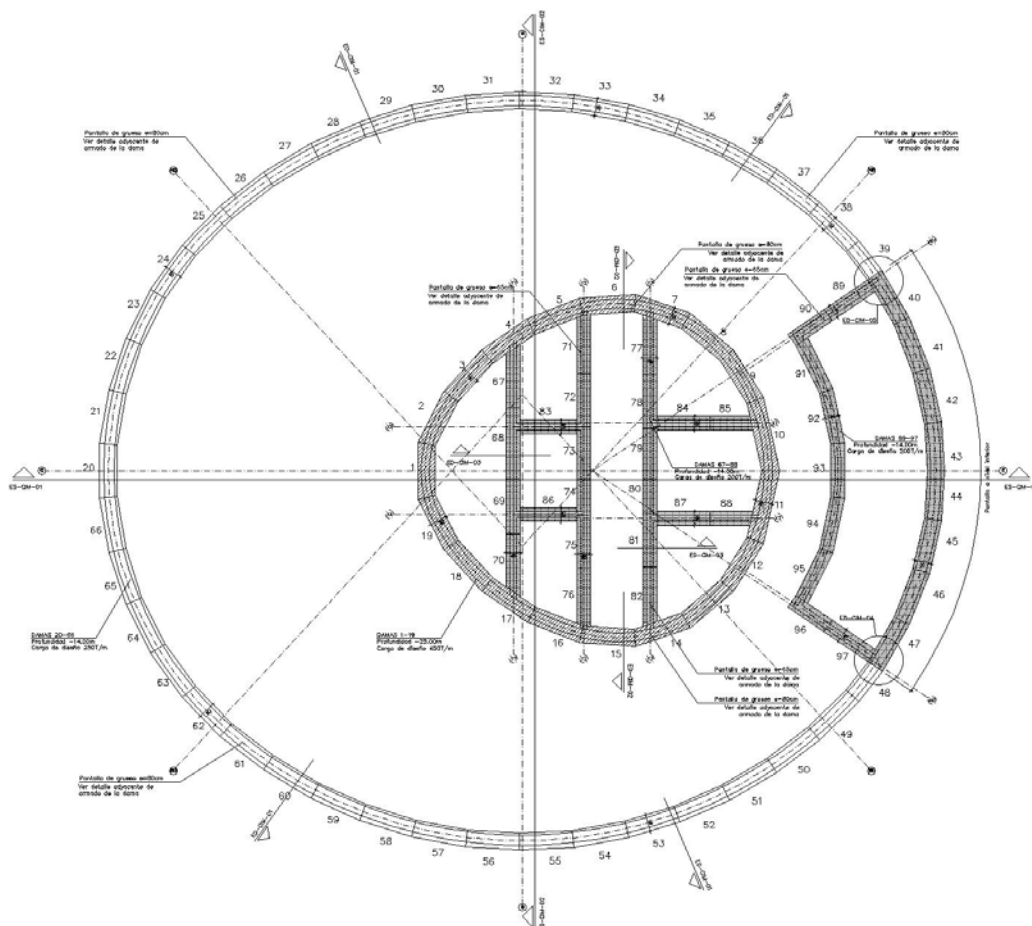
Planta Tipo de la torre.

1.2.1 Cimentación

BOMA

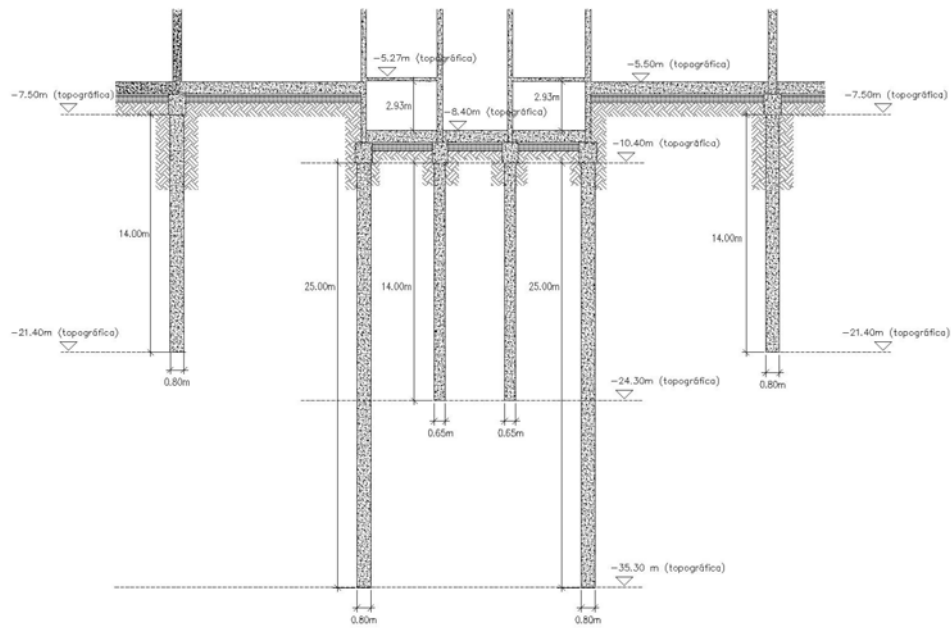
Dos han sido los elementos fundamentales en la elección del tipo cimentación; por un lado, las cargas máximas y características de trabajo de la estructura vertical de la torre y, por otro, la capacidad portante del terreno ante una cimentación profunda, tanto por rozamiento del fuste, como por la transmisión por punta.

Se ha proyectado como cimiento una secuencia continua de bataches de hormigón armado que siguen fielmente el recorrido de todos los elementos resistentes verticales de la torre; dichos bataches, empotrados suficientemente en el terreno, transmiten el peso de la construcción al mismo que, en alguna zona, para la hipótesis pésima, alcanza las 450t/ml. Los gruesos de estos elementos oscilan entre los 65 y 80cm, y profundidades entre 14 y 25m, dependiendo todas estas variables dimensionales de la magnitud del lastre que deben soportar. Cabe reseñar que la porción comprendida por el núcleo y la batería de ascensores presenta un quinto nivel de sótano desde donde arranca, en consecuencia, en este caso, la cimentación proyectada.



Planta de la Cimentación.

BOMA



Secciones de la cimentación.

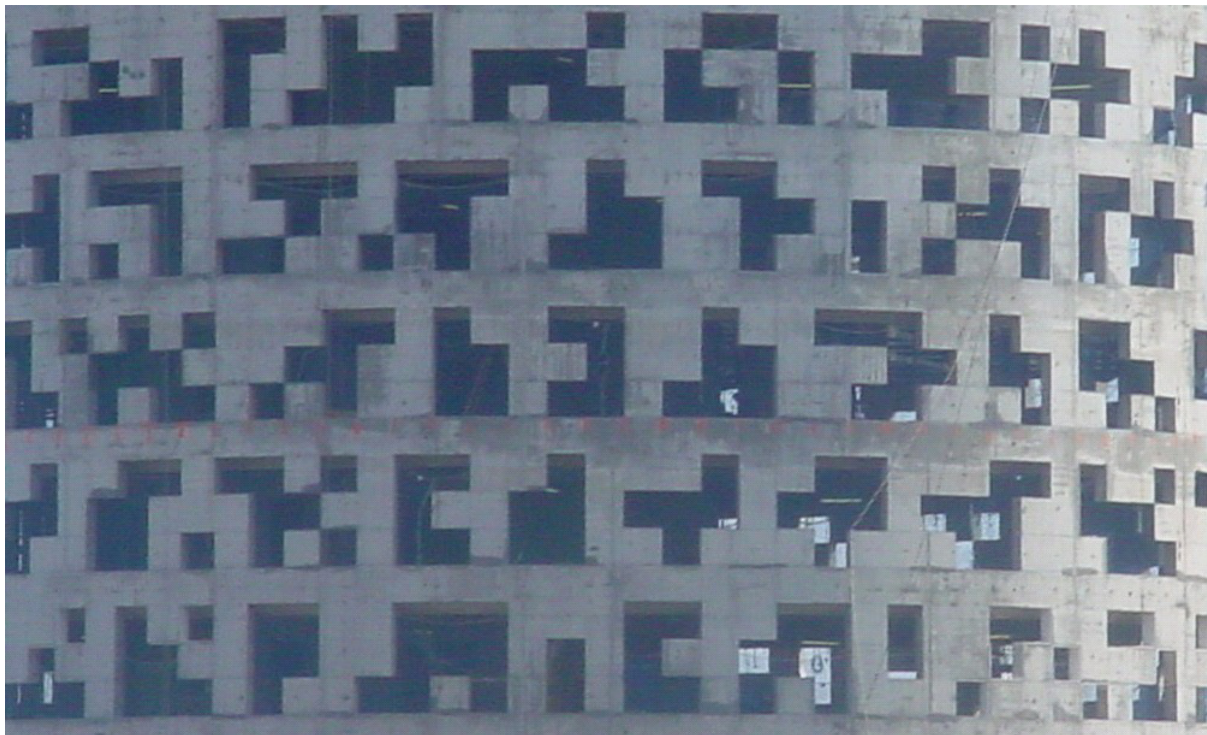


Trabajos en las vigas de coronación de la cimentación del núcleo.

1.2.2 Muro exterior

BOMA

El muro exterior arranca en la cimentación y asciende hasta la planta 26, a unos 110m sobre la rasante de la calle, como ya se ha comentado. La pared presenta de entrada una singularidad determinante: el planteamiento del proyecto arquitectónico a la hora de diseñar las oberturas necesarias en cualquier paramento para satisfacer las necesidades de los espacios interiores. El muro en cuestión contempla una retícula teórica, de módulo cercano a los 92.5cm por 92.5cm, que cubre toda la fachada; sujeto siempre a esta retícula se disponen las aberturas de un modo aparentemente aleatorio. Es este hecho el que obliga a que el perímetro exterior sea un gran muro de carga de hormigón armado, ya que no permite el planteamiento de pórtico alguno, o siquiera el tránsito vertical de la carga hasta la cimentación, resultando por tanto que se proyecta un muro de hormigón armado “in situ” que contempla las oquedades del diseño.



Tramo de muro exterior ya finalizado

El grueso del elemento en cuestión es variable, de manera que contempla diferentes espesores para ciertos tramos, conservando dentro de cada tramo, eso sí, una anchura constante. Así, en toda la profundidad de los sótanos el grueso proyectado es de 50cm. Una vez por encima de la Planta Baja se consideran tres tramos, cuyos límites vienen a coincidir con la división de los 110 primeros metros de la torre en tercios. En el primer tercio el espesor consiguado se mantiene en los 50cm, en el segundo se pasa a los 40cm, mientras que el último tercio se trabaja con un ancho de 30cm. El

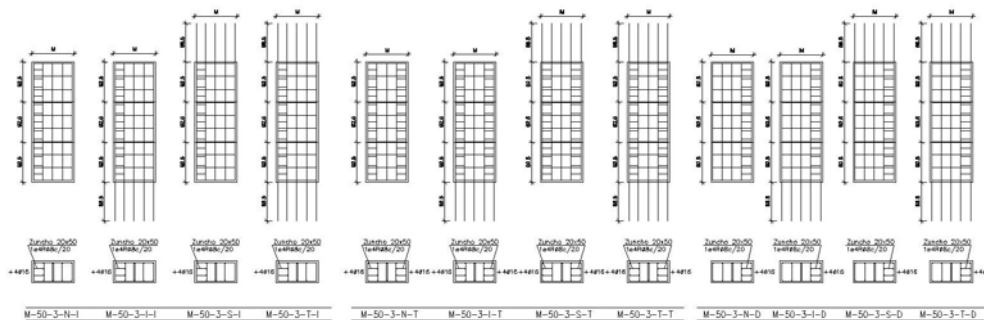
BOMA

intradós del muro asciende de manera continua, de modo que los cambios de espesor explicitados se producen siempre por la cara exterior del paramento.

Cabe decir que, cuando el muro se sitúa en el entorno de la cota 76.5m de proyecto, comienza a inclinarse sobre sí mismo, formando una curva poligonal hasta la Planta 26; cada tramo recto de dicha poligonal transcurre de forjado a forjado.

Al optar por dos cilindros elípticos de hormigón armado para sustentar los sucesivos forjados, muro exterior y núcleo interior, de manera que uno contiene a otro mucho menor en su interior, resulta evidente que es el exterior el que va a encargarse de la estabilización del edificio frente a la actuación de las acciones transversales, por su mucha mayor inercia respecto al interior. Asimismo, cabe significar que la esbeltez máxima de la torre es calificable de moderada, hecho que, sumado a la condición elíptica de la planta, provoca que la incidencia de las cargas horizontales debidas a la acción del viento no sea muy relevante en el comportamiento resistente global. Por otra parte conviene reseñar que las acciones derivadas de un hipotético movimiento sísmico, en base a lo establecido por la norma de referencia, *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación NCSE-94*, resultan en este caso de menor intensidad que las provocadas por el viento.

Para el armado del muro podía descartarse de entrada cualquier método convencional de colocación de mallazos de armadura y refuerzos, debido a la irregularidad de cualquier sector de muro; al efecto se concibió un sistema a base de jaulas de armadura de un ancho igual al valor del módulo base, 92.5cm, que se ligaban posteriormente con la armadura horizontal correspondiente y complementadas con armadura de refuerzo allá donde los mayores grados de sollicitación lo exigiesen.

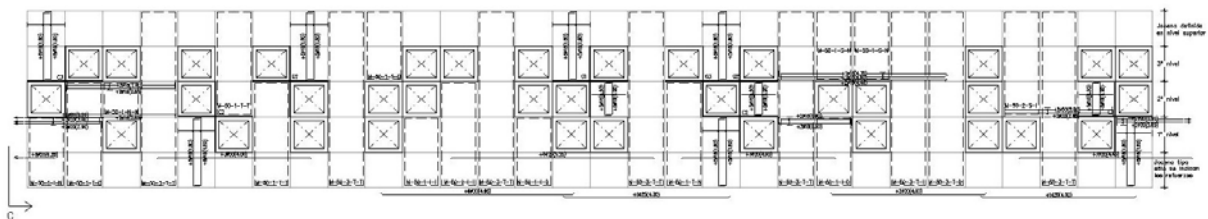


Proyecto de diferentes jaulas de armadura.

Estas jaulas se colocaban sobre las esperas nacientes del último nivel hormigonado, habiendo dispuesto previamente los moldes de encofrado de ventana correspondientes. El hormigonado se

BOMA

planteaba en dos tongadas por planta para facilitar, en la medida de lo posible, el flujo de hormigón a todas las partes y su obligada compactación. Posteriormente se ha tenido que revisar este planteamiento debido fundamentalmente a incompatibilidades con los plazos de ejecución, resultando finalmente que las jaulas de armadura se han presentado con un ancho correspondiente a unos diez módulos de los de la retícula base, y resultando por otra parte que el hormigonado ha contemplado una única tongada por planta. El planteamiento final ha conllevado, por un lado, la provisión de tubos de suministro de hormigón a través de múltiples huecos de ventana con el fin de que el mencionado hormigón colmatase todos los espacios previstos y, por otro, la aceptación de la aparición de ciertos defectos de menor importancia en el hormigón que posteriormente serían repasados.



Desarrollo de la armadura de un tramo de muro.

Las jaulas de diez módulos de ancho se montan a pie de obra sobre una estructura auxiliar adecuada a los radios de cada sector de planta, que permite que la jaula se conforme con la curvatura exigida. Para la construcción del muro se ha hecho uso de un encofrado autotrepante.

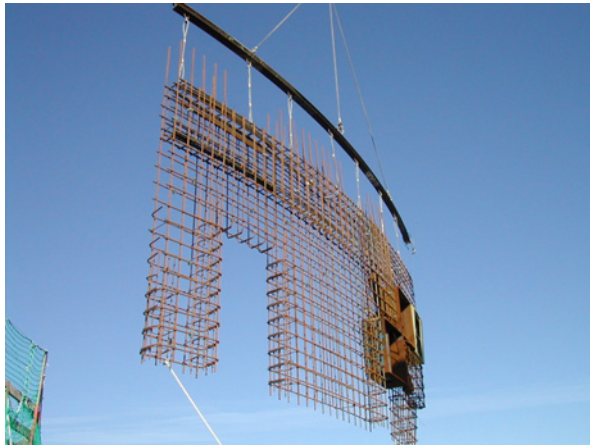


Trabajos de preparación de una jaula en el taller de ferralla a pie de obra.



Jaulas ya preparadas para ser ascendidas.

BOMA



Ascensión de la jaula hacia la coronación de la obra



Jaula a punto de entrar en el encofrado



Jaula entrando en el encofrado



Trabajos en una jaula ya colocada.



Tramo de muro ejecutado donde se hacen patentes los morteros de reparación

BOMA