

PREFABRICACIÓN DE LA NUEVA TORRE DE CONTROL

AEROPUERTO BARAJAS. MADRID.

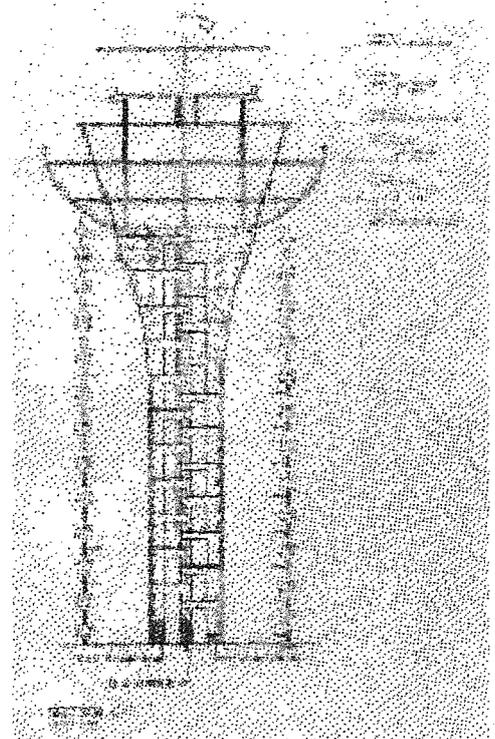
Jose Luis Lleyda Dionis.

Ingeniero de Caminos.

Director Técnico de ALVISA.

1.- ANTECEDENTES

De los 18 proyectos presentados al Concurso de diseño de la Nueva Torre de Control del Aeropuerto de Barajas a finales de 1.996 el ganador, G.O.P. Oficina de Proyectos, ofrece un plazo de ejecución varios meses inferior al resto aprovechando las posibilidades de la prefabricación. El fuste de la torre, de 43 m. de altura, se concibe por superposición de elementos prefabricados de hormigón armado, cosidos verticalmente con barras pretensadas y rematados en una losa superior sobre la que descansa la gran burbuja que alberga las dependencias del control aéreo con todos sus servicios e instalaciones. Motivos estéticos y, sobre todo, de rapidez de ejecución decidieron la utilización de la técnica de prefabricación de piezas conjugadas para llevar a cabo esta obra singular.



2.- DESCRIPCION DEL FUSTE

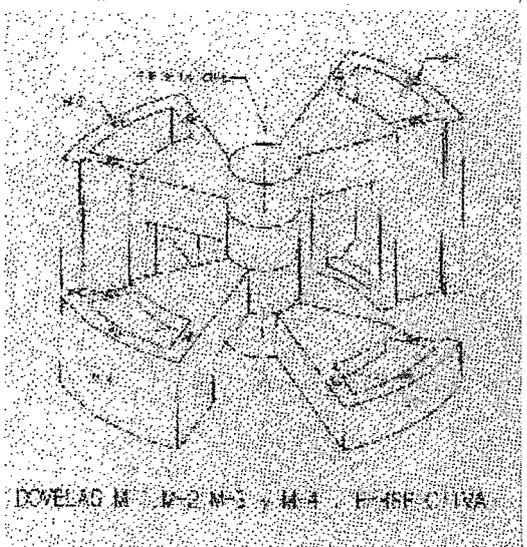
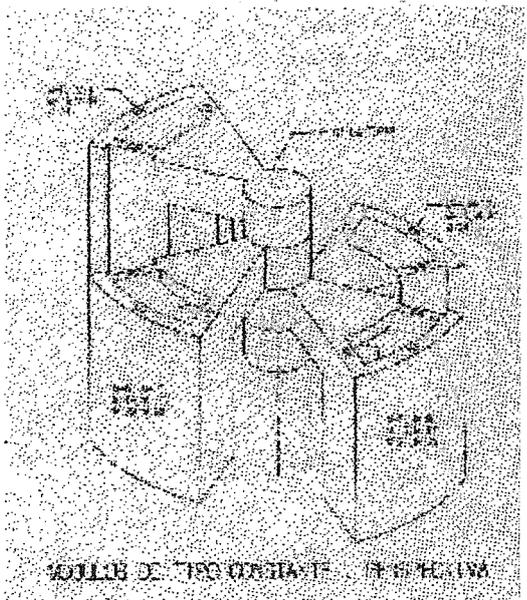
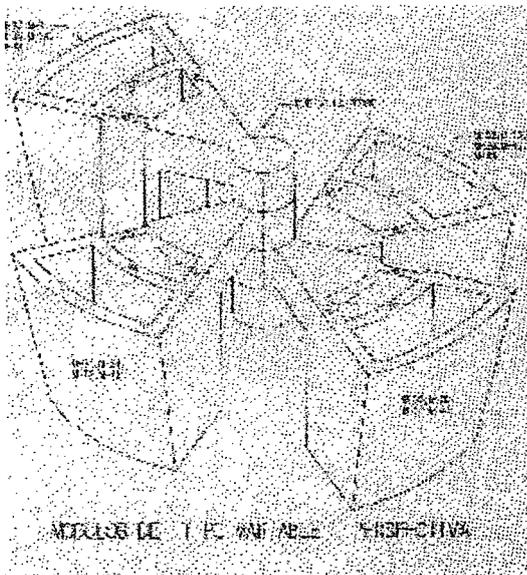
Está formado por 48 dovelas de las que 26 tienen sección constante (y son prácticamente iguales, salvo la disposición de vainas y anclajes), y 22 evolucionan variando su sección y transformando la superficie exterior cilíndrica de las primeras 26 piezas, por una superficie de doble curvatura

circular. El tamaño de cada pieza varía desde 3'60 x 3'80 x 2'75 m. hasta la mayor con dimensiones de 4'90 m. de altura, 5'50 m. de anchura y 7'80 m. de longitud con un peso cercano a 60 Tn.

Las dovelas están ejecutadas en hormigón con cemento blanco y árido de color, tienen terminación de chorro de arena y se han fabricado cada una sobre la correspondiente anterior para conseguir las juntas horizontales conjugadas.

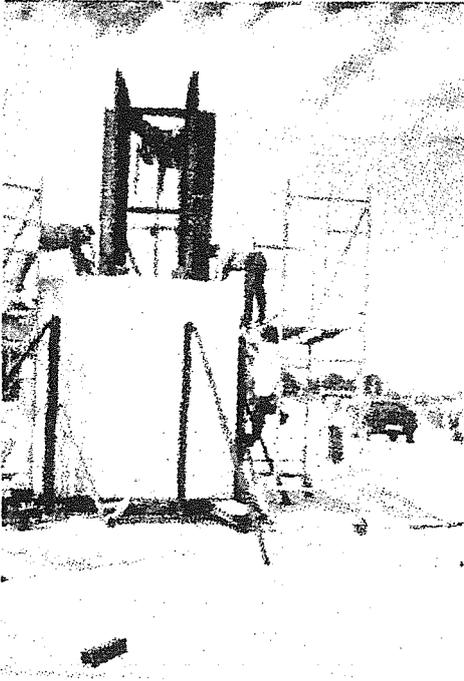
La disposición de las dovelas en la torre forma un conjunto de 4 módulos unidos en el centro por un núcleo cilíndrico de 1'20 m. de diámetro constante, con un proceso similar al de una escalera de caracol.

De esta forma, cada pieza no sólo está en contacto con una pieza por encima y otra por debajo sino que, si numeramos sucesivamente todas las dovelas en sentido ascendente helicoidal, la dovela n está en contacto por encima con la n+1 (núcleo) y n+4 (exterior) y por debajo con la n-1 (núcleo) y n-4 (exterior).



No es posible fabricar las piezas conjugadas simultáneamente con 2 piezas por cada lado (sería preciso ejecutar la torre entera en fábrica, desmontarla y volver a montarla en obra), por lo que se optó por conjugar las superficies correspondientes a los cuerpos exteriores diseñando junta húmeda de 15 mm. de espesor en el núcleo cilíndrico central.

Con estas premisas, para llevar a buen término esta realización fue preciso plantear desde el comienzo un proceso de fabricación y montaje con condicionantes muy diferentes de los usuales en la industria prefabricadora.

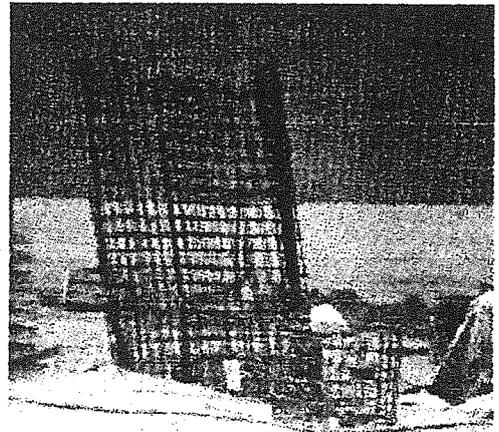


3.- FABRICACIÓN:

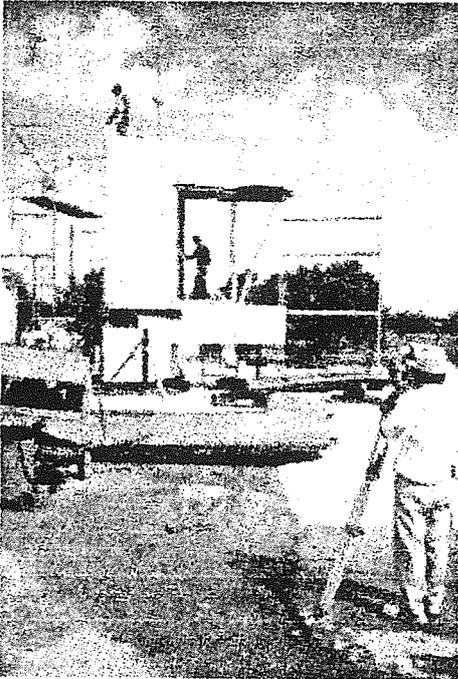
Se vio condicionada por la siguiente problemática:

- La altura del conjunto de 2 dovelas impedía la ubicación de las

bases de fabricación en el interior de las naves de producción, obligando al establecimiento de un área de prefabricación en el exterior, implementada con andamios, grúas, bases de topografía, etc. Afortunadamente la climatología durante los meses de fabricación (final de Julio-principios de Octubre) fue favorable no siendo precisa la utilización de una cubierta ligera de lona prevista para proteger el área de trabajo en caso de tormenta.



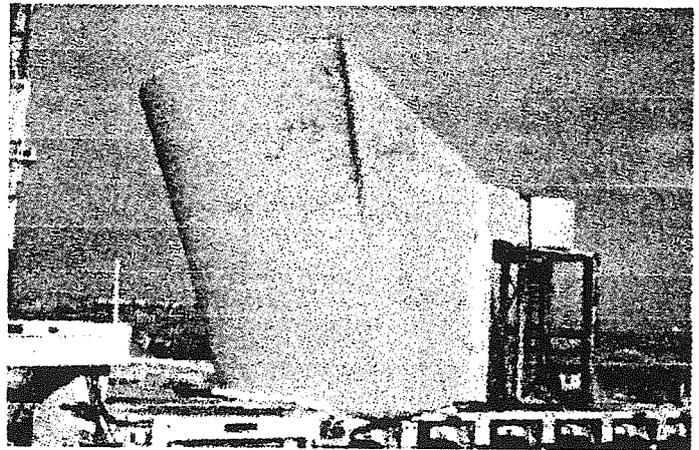
- Las superficies de doble curvatura, variando evolutivamente de dovela en dovela, exigieron un sistema complicado de moldes de difícil manejo.



- Los moldes debían ser acoplados sobre una pieza ya fabricada, con una precisión inusual teniendo en cuenta el tamaño y complejidad del elemento. Se comprobaban topográficamente 16 puntos estratégicos tanto en el molde como en la pieza terminada, admitiéndose 2 mm. de desviación sobre la posición teórica.

- Se exigió un hormigón H-45 que necesariamente debía ser de consistencia fluida ya que la densidad de armaduras, vainas, anclajes, chapas con patillas, enganches, etc. hacía difícil la penetración de los vibradores internos manejados con 5 ó 6 m. de manguera (la altura de las dovelas estaba entre 3'60 y 4'90 m.) para conseguir que el hormigón llegase a todos los rincones, y no era posible confiar la compactación del hormigón a vibración externa puesto que el molde debía quedar rígidamente fijado a la pieza conjugada. No obstante, la vibración interna se completó con unos pequeños vibradores-lapa que se dispusieron superficialmente en las zonas de peor acceso.

Naturalmente había que evitar la disgregación de la masa de hormigón en la altura de los elementos que, entre otros inconvenientes, habría producido distorsiones en la terminación superficial, manifestada por el tratamiento de chorro de arena.



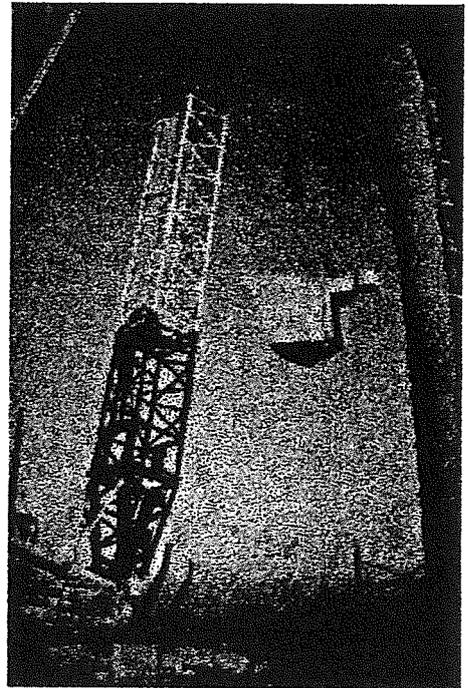
- La conjugación de juntas horizontales entre elementos dispuestos sucesivamente en vertical reviste una dificultad importante en comparación con la técnica utilizada en

- juntas verticales entre elementos de evolución horizontal (vigas). Podemos centrar esta dificultad en 3 aspectos:

1°.- Imposibilidad de fijar el molde en una base fija, fuerte y constante.

2°.- Rugosidad y heterogeneidad de la junta ya que no se trata de superficie moldeada sino superficie libre de hormigonado, salpicada de múltiples extremos de vainas, cazoletas de anclaje de pretensado, pernos de elevación, llaves de centrado y cortante, etc.

3°.- Sistema de estanqueidad de los extremos de vainas y cazoletas de anclaje, sometidos a la gran presión producida por la altura del hormigón (hasta 4'90 m.) vertido sin solución de continuidad en una sola fase.



- El ritmo de ejecución exigido por la brevedad del plazo disponible (4 meses y medio para la totalidad de la fabricación, transporte y montaje, de los que los 2 primeros meses se emplearan en la construcción de los moldes) impidió la posibilidad de ferrallar las piezas en el emplazamiento de hormigonado. La ferralla se elaboró y montó por completo en el taller de la factoría en posición invertida, se transportó en camión hasta la base de prefabricación, se descargó, dio la vuelta a su posición correcta, y se instaló sobre la dovela anterior. Encajó siempre en el molde con pequeñísimos retoques, lo que puede considerarse casi "milagroso" teniendo en cuenta el tamaño, forma y evolución cambiante de las piezas.

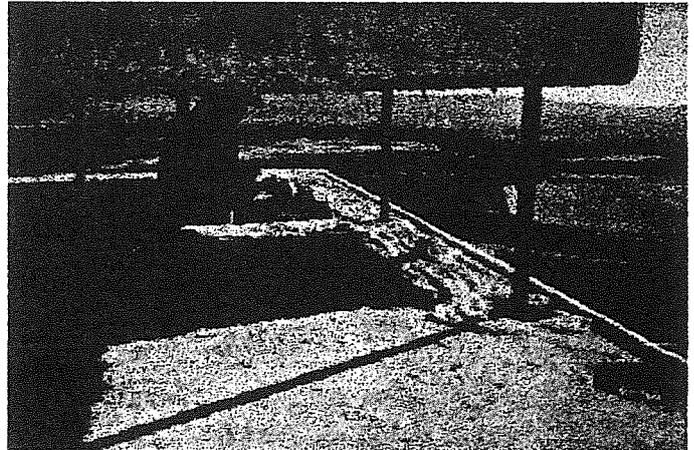
4.- TRANSPORTE:



- Todas las piezas sobrepasaban, sobre el vehículo, la altura de transporte máxima permitida por lo que se precisó el correspondiente permiso especial. Aunque la distancia entre factoría y obra era sólo de 30 Km. fue preciso actuar sobre multitud de tendidos eléctricos y de telefonía y otros obstáculos variados. A pesar de utilizar un vehículo-góndola especial con control de peraltes, la altura con una de las dovelas durante el recorrido era de más de 6'00 m., lo que, unido a los 5'00 m. de anchura, da idea de las dificultades sorteadas.

5.- MONTAJE:

- El montaje se inició con una grúa hidráulica automóvil de 150 Tn.



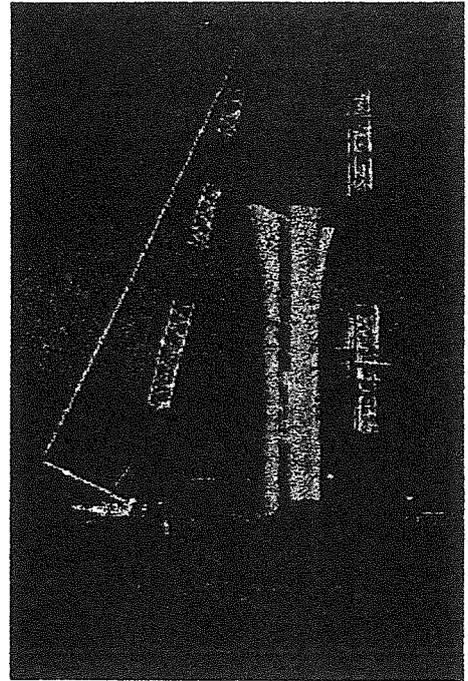
de capacidad, que fue sustituida, para las dovelas más altas, por otra grúa de celosía, sobre orugas, de 550 Tn. de carga máxima. De esta manera las operaciones



de montaje se realizaron con la precisión exigida sin ningún tipo de problemas, con un seguimiento topográfico constante. Se intercaló resina epoxi en las juntas conjugadas para conseguir el sellado requerido por la inyección posterior de las vainas de postesado, realizada con alta presión, en

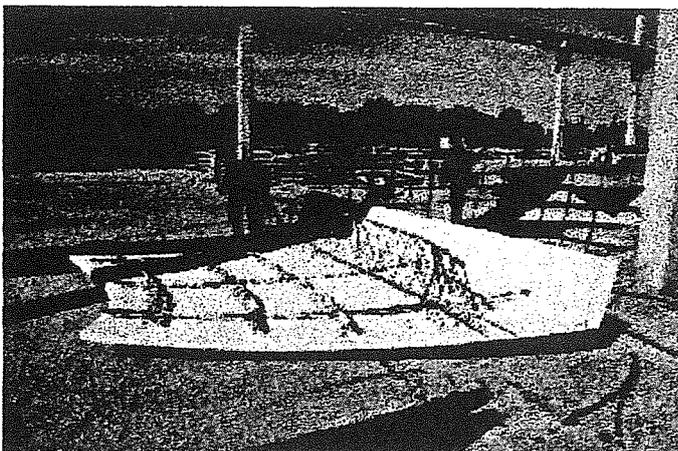
consonancia con la altura de la torre.

- No fue necesario disponer ninguna precaución especial de sellado en las vainas situadas en el cuerpo exterior puesto que, aunque penetrase algo de la resina extendida en la junta, no presentaba problema de obstrucción en ningún caso. Sin embargo en el núcleo central con junta húmeda, inyectada tras el montaje de cada pieza, era vital disponer de un sellado efectivo para impedir que el mortero fluido de la inyección rellenase y obstruyese las vainas. Se diseñaron unos anillos elásticos de neopreno que debían ser capaces, por un lado, de impedir el paso del mortero a presión y, por otro, no debían producir sobre la dovela superior un empuje ascendente que impidiese su situación correcta. Para ello se realizaron en fábrica diversas pruebas con anillos de neopreno de durezas Shore diferentes, reproduciendo condiciones similares a las que se iban a presentar en obra.



- Paralelamente al montaje de la torre, se construía en el suelo la estructura metálica de las plantas de instalaciones que deben albergar los sistemas de control y la sala de controladores.

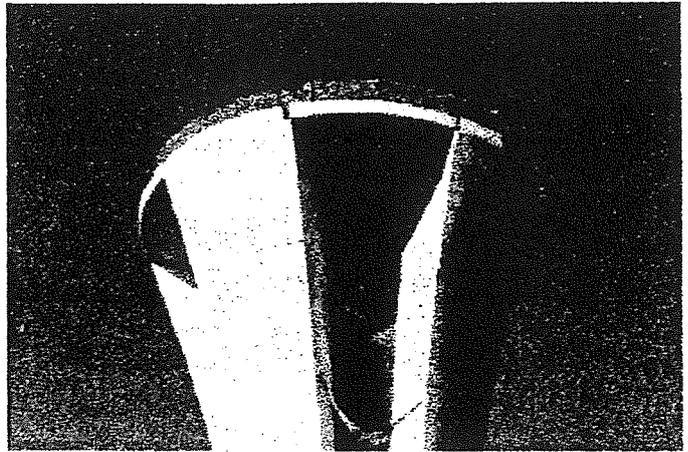
- Una vez montadas las 48 dovelas en sentido espiral ascendente, con un desplome en



coronación, inferior a 20 mm., la torre se culminó con 4 prelosas prefabricadas, de superficie esférica, que sirvieron de encofrado a una losa ejecutada "in situ", sobre la que se asentó la estructura elipsoidal de 200 Tn. de peso ejecutada junto a la torre, que fue izada y montada por la misma

grúa utilizada en el montaje de las dovelas, ayudada por otra de capacidad similar, facilitada también por el grupo de la empresa prefabricadora.

- Fue posible culminar esta obra singular con una desviación de cinco días sobre el reducido plazo establecido inicialmente.



Proyecto: G.O.P. OFICINA DE PROYECTOS, S.A.

CARLOS FERNANDEZ CASADO, S.L. OFICINA DE PROYECTOS

Propiedad: AENA.

Contratista general: AGROMAN, S.A.

Empresa prefabricadora, responsable de la fabricación, transporte y montaje: ALVISA.

Molde metálico: IMETAL, S.A.

I CONGRESO DE PUENTES Y ESTRUCTURAS DE ACHE
Sevilla, Noviembre de 1999

NUEVA TORRE DE CONTROL
AEROPUERTO DE MADRID-BARAJAS

Javier Gil Araujo
Ingeniero Industrial
AGROMAN, E.C.S.A.

**NUEVA TORRE DE CONTROL
AEROPUERTO DE MADRID-BARAJAS**

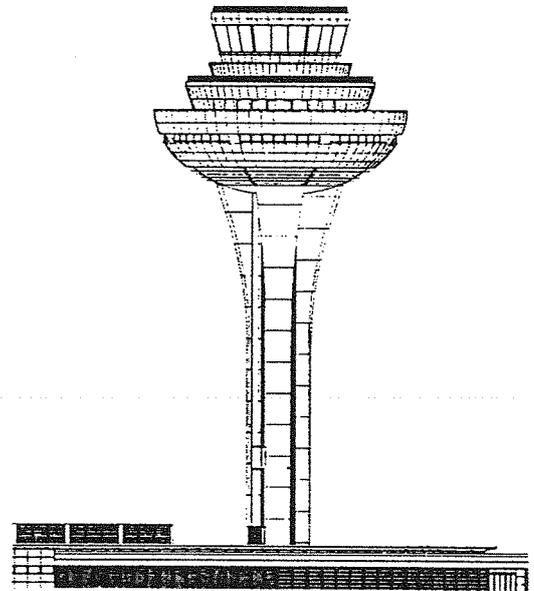


1. INTRODUCCIÓN

Enmarcado en el Plan Barajas promovido por AENA, y para posibilitar el control del tráfico aéreo y el uso conjunto de todas las dependencias y pistas, se desarrolla el proyecto de la Nueva Torre de Control dotada de los últimos adelantos en la tecnología de navegación aérea. El proyecto de G.O.P. Oficina de Proyectos, S.A., siendo el desarrollo específico de la estructura, del Estudio de Carlos Fernández Casado, S.L. Se adjudica la construcción a AGROMAN en 1.381 Mptas. y plazo de 9 meses.

2. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS Y GEOMÉTRICAS

La Torre tiene una altura de 71 m y se organiza en 3 espacios bien diferenciados: la planta baja que se sitúa semienterrada en 3 niveles dedicados a aparcamientos, áreas de descanso para los controladores, cafetería, salón de actos y cuartos de instalaciones; el fuste que es el elemento de comunicación entre la planta baja y las plantas superiores; y la corona superior o copa en la que se pueden distinguir 6 niveles: campo de antenas, planta del fanal (de forma octogonal), entreplanta técnica,



sala de apoyo y área de descanso, sala de equipos y finalmente en el nivel inferior de la copa, la planta de aire acondicionado.

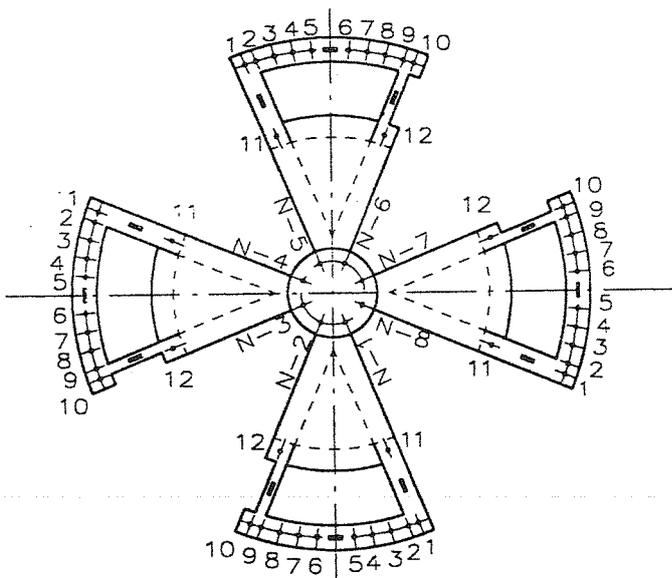
El diámetro máximo de la copa superior es de 28,8 m.

El diámetro exterior del fuste en su zona recta es de 7,20 m. El pilar cilíndrico central es de 1,20 m de diámetro.

3. PROYECTO DE ESTRUCTURA

La estructura resistente (dejando a un lado los 3 niveles de planta baja) se compone de 3 zonas diferenciadas: cimentación, fuste y coronación.

La cimentación estaba diseñada a base de una losa circular de hormigón armado, rigidizada con paredes verticales radiales y circunferenciales, que transmitía la carga a 28 pilotes de 1 m de diámetro y 10 metros de longitud. Posteriormente y bajo la dirección del Departamento de Geotecnia de AGROMAN, se cambió el proyecto de cimentación y ésta se hizo sin pilotes.



El fuste se diseñó en su zona de sección uniforme, a base de un pilar central de 1,20 m de diámetro y 4 sectores circulares (de $\approx 45^\circ$, simétricas) huecos en su zona externa y con una losa en la zona del vértice para la formación de los descansillos de la escalera de caracol que sube a las plantas superiores.

El proyecto contemplaba la ejecución del fuste a base de dovelas prefabricadas postensadas. Esta circunstancia es uno de los puntos principales del proceso de ejecución que desarrollaremos en el apartado siguiente. El fuste se remata con una losa de hormigón armado in situ sobre unas prelosas.

La coronación se proyecta a base de una estructura metálica de perfiles laminados desarrollada radialmente y que sirve de soporte a los forjados de hormigón armado sobre chapa colaborante.

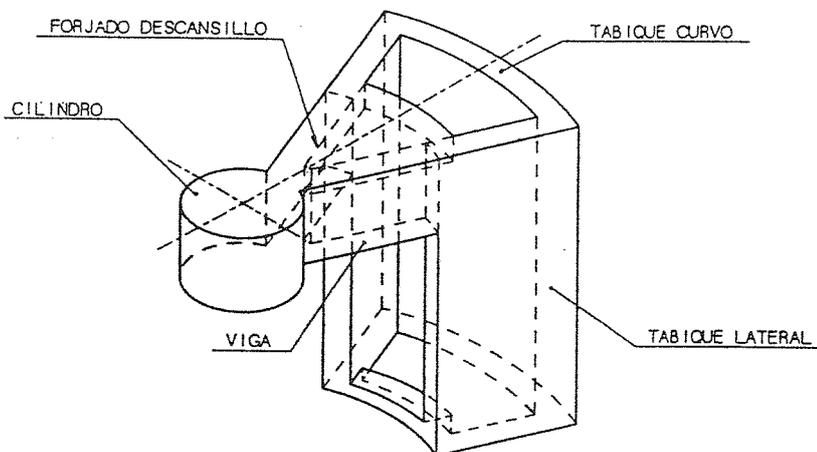
4. EJECUCIÓN DE LA ESTRUCTURA

4.1. Cimentación

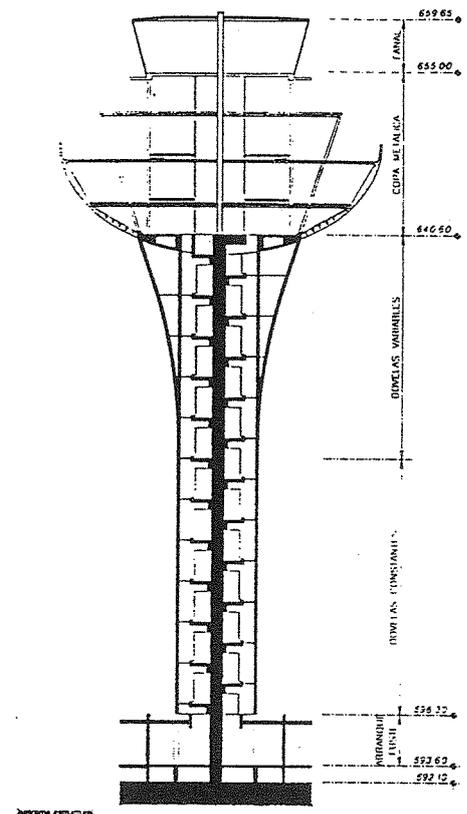
Como se ha dicho anteriormente, estaba prevista una cimentación profunda con pilotes, pero después de realizar una serie de sondeos y el correspondiente informe geotécnico se decidió ejecutar una cimentación directa mediante una losa de 17 m de diámetro y 2 m de canto con una cuantía aproximada de 50 kp/m^3 de acero B500 S de límite elástico $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$.

Dicha losa está rigidizada por paredes verticales radiales y circunferenciales y se apoya en el estrato de arcillas arenosas duras, el llamado tosco, que configura una gran parte del subsuelo de la ciudad de Madrid.

En esta losa de cimentación van situados los anclajes pasivos de las barras de postesado sobre las que se ensartan las dovelas del fuste. El replanteo de estos anclajes se hizo mediante una plantilla metálica gemela de la que se utilizó para la situación de las vainas en las dovelas prefabricadas.

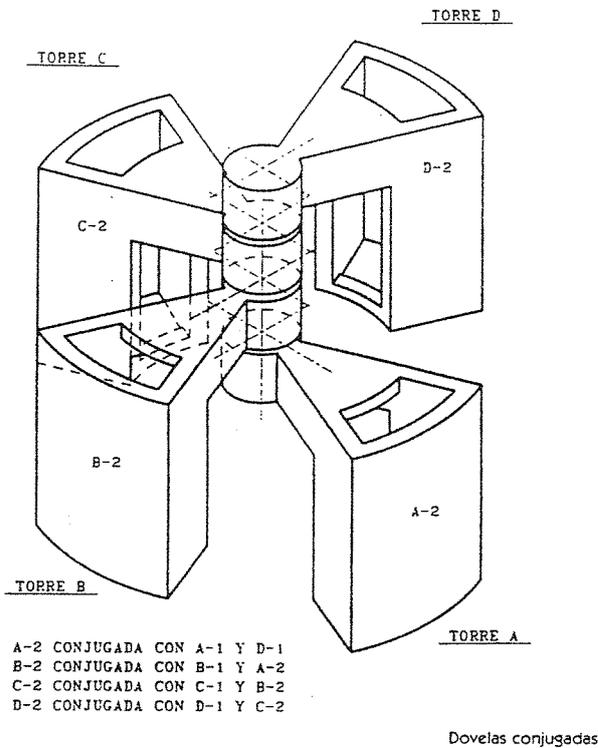


Vista general de una dovela



4.2. FUSTE

El fuste arranca hormigonado in situ. A partir del arranque, se desarrolla una zona de diámetro exterior constante a base de 48 dovelas prefabricadas que conforman una sección



estructural formada por una columna central de 1,20 m de diámetro de la que parten 4 lóbulos, cada uno en forma de sector circular de 45° situados simétricamente, según se explicó en el apartado 3.

La zona superior del fuste es de diámetro exterior variable que se consigue añadiendo una nueva pared inclinada que conforma una celda adicional variable en las dovelas.

Como hemos dicho, la construcción del fuste se hizo por dovelas prefabricadas, lo que condiciona de forma muy significativa tanto el proyecto como la ejecución de la obra. La altura de cada dovela es de 3,6 m, en tanto que su pared horizontal y el cilindro central es de 90 cm, de tal forma que con 4 dovelas giradas cada una 90° respecto a la anterior, se conforma una vuelta completa que va dejando los descansillos de la escalera en desarrollo helicoidal.

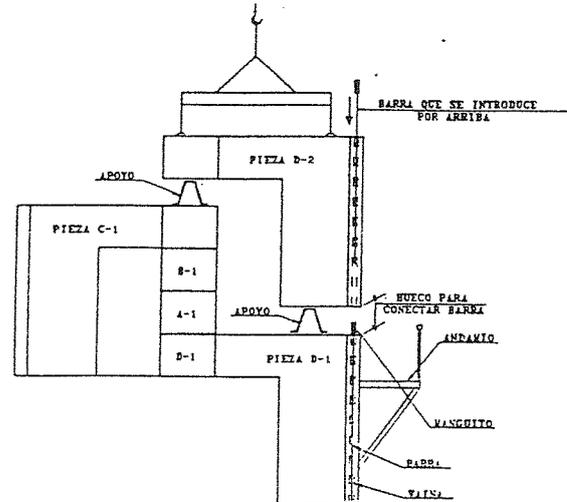
La fabricación de las dovelas se hace teniendo en cuenta que las paredes de la zona exterior de la dovela tienen que coincidir milimétricamente con las de las dovelas contiguas superior e inferior. Para ello, cada dovela se hormigonará sobre la inmediata inferior, esto es, serán conjugadas. Como la coincidencia del núcleo cilíndrico central se produce consecutivamente mientras que la coincidencia del exterior es cada 4 dovelas, cada una queda hipotecada hasta la fabricación de las 4 dovelas siguientes.

La coincidencia de las paredes exteriores es por tanto milimétrica de una dovela con la siguiente y por tanto su unión se hará a modo de junta seca con una imprimación de resina y

sometiéndola a compresión mediante las barras de postesado. En el cilindro central se dejó una holgura de ≈ 20 mm que se inyectó con un mortero de resina, previo sellado del perímetro exterior.

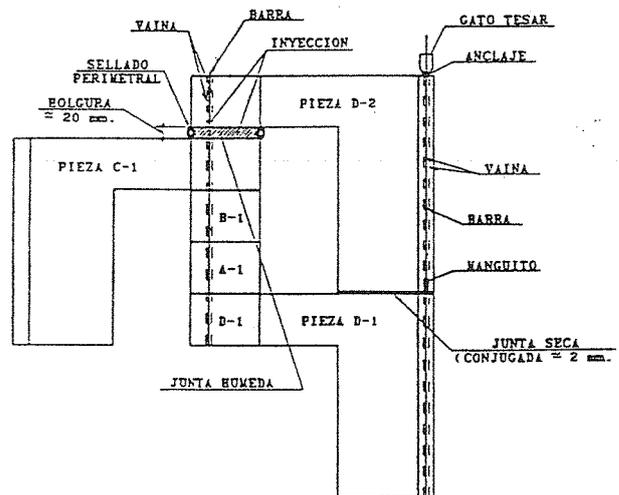
Fase 1:

Situación de la dovela suspendida de la grúa encima de los topes provisionales. Introducción de barras de postesado conectándolas con manguitos a las inferiores. Retirada de topes provisionales (Ver figura).



Fase 2:

Tesado de las barras. Sellado perimetral del cilindro central. Inyección con mortero de resina.

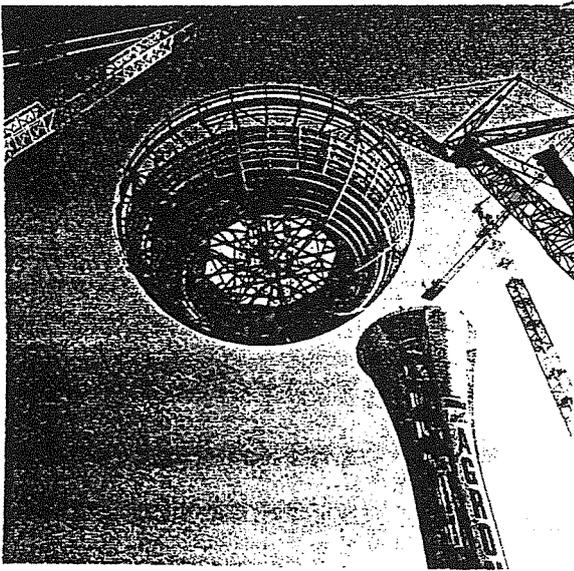


La situación en plana de las barras de postesado es la que se indica en planta en el dibujo de la página 2. Puede verse que aproximadamente el 70% de las barras se sitúan en la periferia del fuste.

4.3. Plantas de coronación

El fuste se remata con una losa alveolar hormigonada in situ sobre unas prelosas. Esta losa proporciona una gran rigidez al fuste y sirve de asiento a la estructura metálica que conformará las 6 plantas de coronación.

Esta losa tiene un diámetro de 14,40 m y el mayor diámetro de las plantas de coronación es de 28,80 m, por tanto la estructura superior sale en voladizo sobre el fuste 7,2 m simétricamente en todo el contorno.



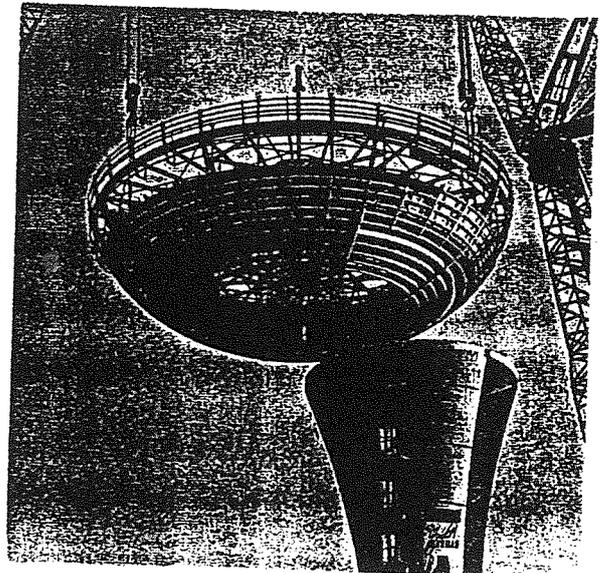
El esqueleto estructural es de perfiles de acero laminado que forman una estructura espacial en la que se han dimensionado como elementos principales los perfiles radiales y como secundarios los circunferenciales.

Debido a las limitaciones de plazo, durante la ejecución del fuste, se fue fabricando la estructura metálica superior y se decidió montar a nivel de suelo la mayor parte de ella y posteriormente izarla sobre el fuste y una vez

solidarizada con él, completar el resto de estructura metálica y forjados.

Concretamente se fabricó la estructura correspondiente a los cuchillos o cuadernas radiales y las vigas de 3 niveles de forjados.

Cuando se conformó toda esta estructura, se estudiaron dos estructuras auxiliares para transmitir el peso propio a los puntos de



cuelgue y también se añadieron una serie de perfiles provisionales para que sirviesen de arriostramiento y rigidización horizontal entre tanto no se ejecutaban los forjados.

Posteriormente se procedió al izado de esta estructura que pesaba 200 t y situarla encima de la losa de remate del fuste en la que se habían dejado ancladas las placas metálicas de conexión a las que se soldó la estructura. Para manejar esta estructura se utilizaron 2 grúas de 800 t, una fija y otra móvil.

5. RESUMEN

Como resumen, vamos a enumerar las principales características de la obra:

- Altura sobre el terreno de cimentación..... 71 m
- Diámetro de la losa de cimentación..... 17 m
- Diámetro mínimo del fuste..... 7,2 m
- Diámetro máximo de coronación 28,8 m
- Volumen de excavación..... 45.000 m³
- Peso de acero estructural..... 650 t
- N° de dovelas prefabricadas..... 48
- Peso propio de cada dovela 20 a 60 t
- N° de barras de postesado..... 56
- Superficie construida 3.871 m²
- Plazo de ejecución..... 9 meses
- Presupuesto..... 1.361 Mpts.