

Elevación de la cubierta del Palau Sant Jordi(*)

Por JULIO MARTINEZ CALZON

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Consultor Dirección Facultativa.

y JAVIER ASENCIO MARCHANTE

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Jefe del Servicio Técnico de Estructuras DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES, S. A.

La cubierta del Palacio de Deportes Olímpico de Sant Jordi en Barcelona presenta notables características, tanto en cuanto a su diseño estructural, como al procedimiento seguido para su ejecución, con montaje en tierra y elevación conjunta del sistema total, que se describen en el artículo.

El proceso constructivo de la cubierta principal del Palacio de Deportes Sant Jordi tiene unas especiales características, ya presentes en el diseño inicial del Ingeniero M. Kawaguchi, donde suponía un **procedimiento especial** de construcción. Dentro de la gran envergadura de la obra en su conjunto, la maniobra fundamental es la construcción, la elevación conjunta del sistema total ensamblado en tierra y su posterior desapeo.

Este artículo pretende mostrar el interés específico, desde el punto de vista técnico, de la citada maniobra. Se señalarán los principales criterios, las secuencias fundamentales, las exigencias que han permitido llevar a cabo la maniobra prevista con una total exactitud, poniendo de manifiesto las cualidades que el método constructivo ofrece.

Este método, la propia concepción y dimensiones de la cubierta son los elementos diferenciales que aporta el Anillo Olímpico de Barcelona a la construcción de estructuras de nuestro tiempo. DRAGADOS, realizando la ejecución y el montaje de esta estructura, alcanza un alto nivel internacional en esta tecnología, y pone de manifiesto la calidad y capacidad de la técnica española en la actualidad.

1. GENERALIDADES

La estructura espacial de la cubierta del **Palau S. Jordi** (Barcelona) presenta dos zonas

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 28 de febrero de 1989.

claramente diferenciadas: una, **central**, que en planta conforma un cuadrilátero de lados curvos de aproximadamente 80 x 60 m y que constituye una especie de **cúpula** y otra, **perimetral**, que contornea a la anterior; integrando ambas un conjunto de 128x462 m. En la arista de unión de ambas zonas, cúpula y zona perimetral, se produce un brusco cambio de pendiente que marca claramente la discontinuidad entre las mismas.

La estructura de la cubierta está constituida por una malla espacial de doble capa formada por **nudos esféricos** en los que confluyen **barras** que son tubos atornillados axialmente a dichos nudos mediante el sistema estructural ORTZ. Los esfuerzos principales se canalizan a través de dos anillos, uno de los cuales bordea la cúpula central, justamente en la línea donde se produce el cambio brusco de pendiente, mientras que el otro, que es periférico, se apoya a lo largo de su contorno en una serie de **pórticos perimetrales** cuyos dinteles se articulan a la cubierta, mientras las bases de los fustes lo hacen mediante rótulas a una viga de hormigón armado perimetral que forma parte de la estructura del Palacio. Ambos anillos se unen entre sí en las esquinas de la superficie, mediante dobles tubos soldados, constituyéndose en conjunto la estructura por cinco subestructuras tubulares, separadas por dichas diagonales y el anillo central (Figura 1).

El esquema previamente descrito corresponde a la estructura en su fase final o de servicio, ya que durante la fase de elevación durante el proceso constructivo, el esquema de la misma es bien distinto. En dicha elevación, la **cúpula**

ELEVACION DE LA CUBIERTA DEL PALAU SANT JORDI

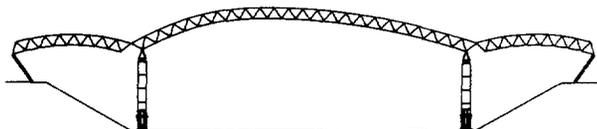
PALACIO DE DEPORTES SAN JORDI ESQUEMAS IZADA DE LA CUBIERTA



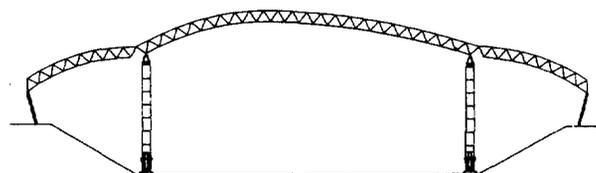
(Posición inicial).



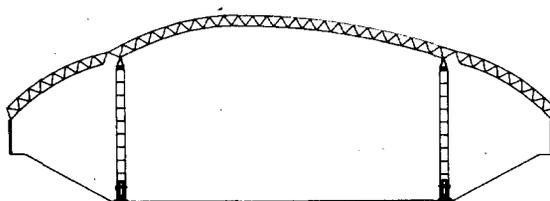
(Izados dos módulos).



(Izados cuatro módulos).
Distorsión máxima soportes periféricos.



(Izados siete módulos).



(Posición final izados nueve módulos).
Soportes periféricos verticales.

central, con su anillo de borde, se encuentra ya en su estado definitivo soportando toda la cubrición y los elementos auxiliares que por necesidades de explotación cuelgan interiormente de ella. La **zona perimetral** por el contrario no funciona en esta fase como un conjunto sino que se encuentra montada dividida en una serie de zonas o **gajos** independientes entre sí, que en un extremo se articulan en el anillo de la **cúpula** y en el otro sobre los dinteles de los pórticos perimetrales. Estos están formados por tramos del anillo exterior y vigas armadas y están articulados en la base (Figura 2).

El conjunto **gajo-pórtico perimetral** (Figura 3), constituye una doble biela que permite, durante la **izada**, la elevación, global o conjunta, de toda la cubierta. De esta forma, la cúpula en su movimiento ascensional empujada por las 12 **torres-soporte**, dispuestas uniformemente distribuidas en el perímetro de la misma, arrastra al citado conjunto manteniéndonos en todo momento el apoyo perimetral y garantizándose de forma permanente la estabilidad de la estructura frente a acciones horizon-

tales. Este es el esquema base del **sistema Pantadome** para la elevación de cubiertas ideado por el prof. Kawaguchi autor del proyecto de ésta.

El montaje de la estructura de la cúpula en su posición inicial, previa a la **izada**, se realizó mediante grúas de gran capacidad que posicionaban módulos de la totalidad de la anchura de la misma, que se iban ensamblando en la propia pista del Palacio, y se montaban posteriormente sobre apeos provisionales de borde y centrales, quedando el conjunto formando un sólo cuerpo. A continuación se montó el anillo de borde de la zona de cúpula central, uniéndose al resto de la malla de dicha cúpula, mediante barras soldadas al anillo y atornilladas en sus esferas correspondientes.

Los **gajos perimetrales** se ensamblaron en el suelo, fuera del palacio, montándose con una grúa que actuó desde tres posiciones exteriores transportando y montando los mismos. Cada montaje de gajo finalizaba con el embulonado de las rótulas interiores y exteriores entre anillos correspondientes, operación que exigía un alto grado de precisión dadas las grandes

ELEVACION DE LA CUBIERTA DEL PALAU SANT JORDI

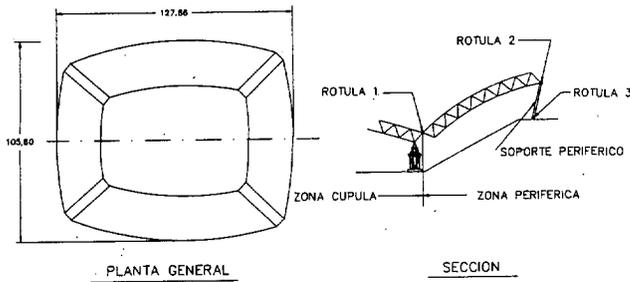


Figura 1.

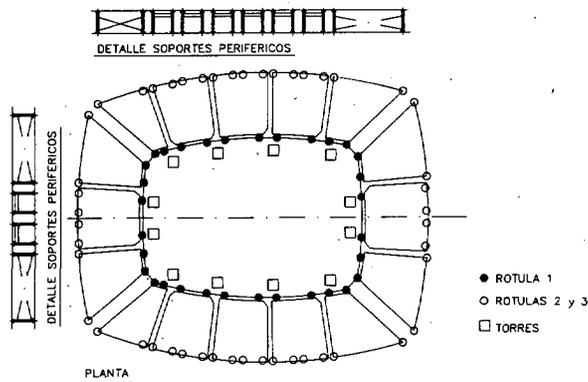


Figura 2.

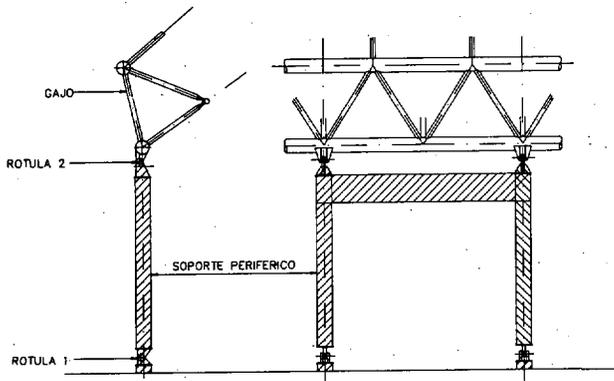


Figura 3.

dimensiones, pesos y distancias de montaje, junto con la mínima holgura de los bulones.

Una vez montados todos los gajos primarios se estaba en condiciones de iniciar el proceso de izada que pasamos a describir en detalle.

2. PROYECTO DE IZADA

El proyecto general de la izada consta de una serie de proyectos de actividades parciales

que son las siguientes:

- Proyecto de cimentaciones.
- Proyecto de torres de elevación y estructuras auxiliares.
- Selección de equipos hidráulicos y controles de nivel.
- Proyecto de comunicaciones.
- Proyecto de arriostamientos en fase de izada.
- Prueba de carga de la torre.
- Manual de operaciones.
- Plan de formación de personal.
- Proyecto de instrumentación y control.

a) Proyecto de cimentaciones

Las cimentaciones de las doce torres de elevación exigían por una parte el diseño de un elemento que transmitiese las cargas a la subestructura del Palacio, y por otra la comprobación de la capacidad portante de aquella, ya que la pista de éste, desde el punto de vista estructural, constituye la losa de un entramado de vigas riostras apoyadas en pilotes, diseñada para una sobrecarga de 900 kg/m^2 , mientras que la carga media transmitida por torre era de 80 Tm.

Se modelizaron las zonas de influencia de las cargas y se proyectaron zapatas armadas cuyas dimensiones tipo eran de $4.50 \times 3.00 \times 0.50$ pero que hubo que variar en algunos puntos para poder llevar las cargas a elementos portantes, cuya capacidad se comprobó en cada caso.

b) Proyecto de torres de elevación y estructuras auxiliares

Dentro del conjunto del proyecto la parte relativa a las torres y estructuras auxiliares constituía el eje alrededor del cual giraban el resto de las actividades de proyecto. En primer lugar se trataba de buscar un tipo de torre «Standard», ya que la utilización de otro tipo de elementos proyectados y fabricados expresamente hubiese supuesto un coste de tal magnitud que haría inviable, no sólo esta operación, sino el propio sistema constructivo. La sección de torre elegida fue la formada por cuatro paneles

tipo **Acrow** de 3.00×1.50 , unidos mediante angulares de esquina, conformando un cuadrado de unos 2.00×2.00 m, con elementos portantes en ocho esquinas correspondientes a las cabezas de los paneles.

Una vez resuelto el problema del tipo de torre, hubo que fijar el punto en el que ésta podía transferir la carga a los elementos externos a través de los cuales se transmite a aquella el movimiento de elevación.

El sistema proyectado se basa en un elemento móvil, **marco de elevación**, que abraza a la torre empestillándose a ella en las ocho cabezas resistentes. Dicho marco asciende empujado por dos grupos de cables anclados en dos vigas que forman parte de él. El marco se eleva arrastrando el conjunto de la torre hasta el punto en que se pueda introducir bajo ésta un nuevo módulo de 3.00 m que se une al tramo anterior. Con un ligero descenso del conjunto la torre se apoya en la zapata a través de unos soportes, también «standard», revestidos de neopreno en la cara inferior para permitir los giros y homogeneizar las cargas. A continuación se desciende el marco mediante diferenciales de cadena hasta su posición inicial desde la que se empestilla al módulo recién introducido para iniciar un nuevo ciclo.

El movimiento ascensional se consigue por medio de dos **gatos hidráulicos huecos** de 70 Tm situados en cada torre, a través de los cuales pasan los cables anclados en el marco de elevación. Estos gatos se sitúan en otra estructura auxiliar que llamamos **bastidor** constituida por un pórtico de unos 5.00 m de altura en cuyo dintel apoyan como guía del marco de elevación.

El esquema de funcionamiento de las torres, de acuerdo con el sistema de elevación, era el de soporte biarticulado de forma que no opusiesen ninguna coacción a los movimientos horizontales de la cubierta, cuya estabilidad frente a estos esfuerzos estaba garantizada como se ha comentado anteriormente. Este esquema de biarticulación exigía la libertad de giros en todas las direcciones tanto en cabeza como en base de torre. El giro en cabeza se garantizaba mediante una pieza, tercera de las estructuras auxiliares proyectadas, en forma de **tetraedro**

que constituía una especie de balancín espacial articulado en dirección normal a la barra que unía las dos esferas y que transmitían la carga al **asiento esférico**, situado en el tirante superior del tetraedro. La transmisión homogénea de las cargas del tetraedro a las torres se aseguraba a través de un marco de gran rigidez que transfería dichas cargas desde los dos puntos de giro del tetraedro a las ocho cabezas portantes de la torre.

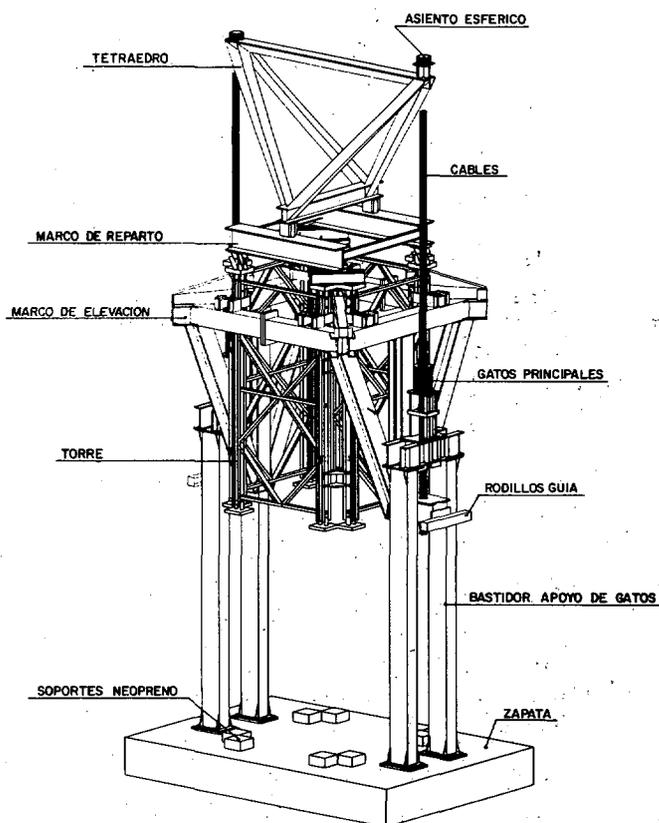
En base del balancín, los giros debían permitirse tanto en fase de elevación como de estructura apoyada directamente en las torres. En la primera se conseguían en un sentido a base de disponer, bajo cada gato de tiro, una pareja de gatos hidráulicos, **compensador hidráulico**, de forma que los cuatro gatos hidráulicos de cada torre, en circuito cerrado, hacían el efecto de colchón de aceite, compensando la diferencia de cargas entre los dos gatos huecos de la misma, ya que de lo contrario el giro implicaría una diferente longitud en los cables de tiro. En el sentido normal el giro se garantizaba por sí mismo ya que el eje coincidía con la viga inferior del propio marco de elevación. **Los rodillos-guía**, en ambas direcciones, que se desplazaban respecto al marco de elevación, estaban además revestidos de neopreno para facilitar los giros precisos.

Los giros en las bases de las torres, necesarias para compatibilizar los movimientos de la estructura en las fases de viento, sin provocar empotramientos en las mismas en los momentos de apoyo en la zapata, se conseguían a base de deformación de los **neoprenos-soporte**, lo que en realidad suponía un cierto empotramiento, minimizado a base de un gran espesor de aquellos (60 mm).

c) Selección de los equipos hidráulicos y controles de nivel

La elección del **equipo hidráulico** y su **auto-control** supuso un trabajo minucioso ya que había que unir a la capacidad de **izada** la garantía de seguridad y la exigencia de proyecto de no tener una elevación diferencial entre dos puntos cualesquiera de la cubierta, superior a 30 mm. El sistema elegido fue el de la firma suiza **VSL**, que, además de cumplir con las exi-

ELEVACION DE LA CUBIERTA DEL PALAU SANT JORDI



Final fase de elevación.

gencias mencionadas, presentaba la ventaja de una integración del **sistema de control de nivel** con el **sistema hidráulico de elevación** de forma que aquél comandase la operación.

El **sistema de elevación** se basa en unos **gatos huecos** a través de los que pasa un grupo de siete torones de diámetro 0,6 pulgadas con posibilidad de anclarse en dos anclajes de cuña distintos, uno superior y otro inferior. Cuando el pistón del gato avanza, el cable se fija en el anclaje superior y se produce la elevación del conjunto; cuando se termina la carrera del embolo, (12-14 cm), se inicia la retracción, desanclándose los cables del anclaje superior y anclándose automáticamente en el inferior por arrastre de las cuñas. Este sistema confiere una gran seguridad a la operación ya que cualquier fallo, siempre posible, del sistema hidráulico que implique un descenso del embolo fija automáticamente la carga en el anclaje inferior con un descenso mínimo del conjunto debido al arrastre de cuñas (máx. 10 mm).

Parte del éxito del **control de nivel** se basa

en conseguir igualar los caudales que llegan a cada torre. Para ello se disponen seis grupos motobomba, tarados, suministrando caudal cada grupo a una pareja de torres. Cada grupo motobomba lleva incorporado un partididor de caudal que garantiza un 50 por 100 del mismo a cada una de las torres. Esto evidentemente no es exacto y no supone más que una similar elevación en cada torre sin garantizar con precisión una máxima diferencia en la elevación.

La precisión en el control de niveles se consigue mediante un sistema de alambres tensos, uno junto a cada torre, fijados a la cubierta. Estos, al elevarse esta, se desenrollan de una rueda de un cierto diámetro, que al girar, envía mediante un sensor impulsos equivalentes a elevaciones de 2 mm. Cada 20 mm de ascenso, el sensor corta automáticamente el suministro de aceite a la torre correspondiente. Hasta que todas las torres no llegan al escalón de 20 mm no se inicia el siguiente, con lo que se garantiza un ascenso diferencial máximo de 20 mm entre dos cualesquiera de las mismas.

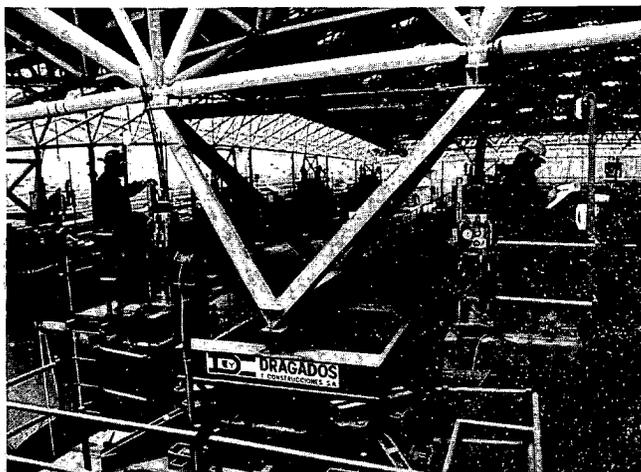
Todo el comando de la operación se centraliza en un **centro de control** desde donde el operador visualiza tanto las presiones como los ascensos de la cubierta en cada torre mediante un sistema de indicadores luminosos. Una **válvula de seguridad** en cada circuito hace que el sistema se detenga automáticamente si la presión sube por encima de una prefijada con anterioridad.

Todo lo anterior constituye lo que podríamos llamar **autocontrol** del sistema, que unido a otros **sistemas de control externos** a este, integran al conjunto de controles de la operación que más adelante describiremos.

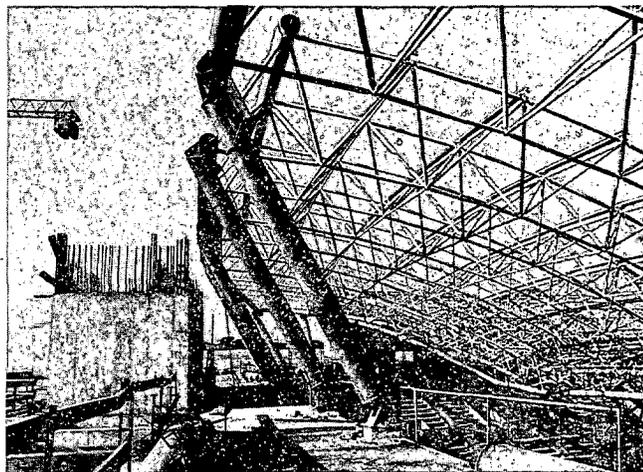
d) Proyecto de comunicaciones

Especial énfasis se puso en la elaboración del proyecto de comunicaciones durante la operación que incluía tres sistemas de comunicación interna. El primero lo constituía un **sistema megafónico** operado desde la caseta central de control por medio del cual se impartían las instrucciones comunes a todas las torres y se anunciaban los inicios y finales de cada fase de operación. Se proyectó asimismo un **sistema telefónico** que funcionaba en las dos direc-

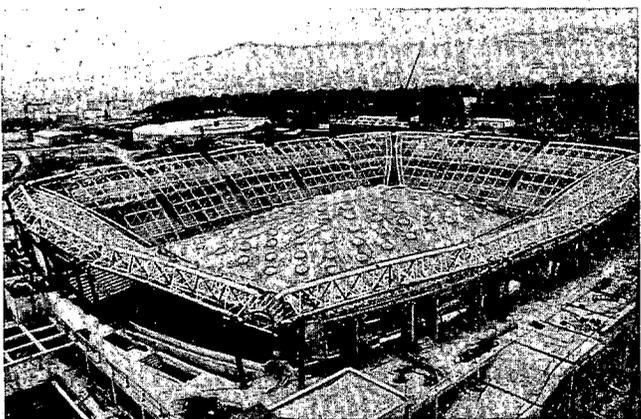
ELEVACION DE LA CUBIERTA DEL PALAU SANT JORDI



Detalle de la estructura de coronación de las torres de elevación.



Estado de los pórticos perimetrales con dos módulos por torre.



Estado de la cubierta con un módulo por torre.

ciones torres-centro de control y viceversa y un tercero, **sistema de rojo-verde**, comandado en cada una de las doce torres, mediante el cual el jefe de cada torre advertía de forma rápida al centro de control de cualquier anomalía, o bien indicaba la disponibilidad o no de su torre para pasar de una a otra actividad.

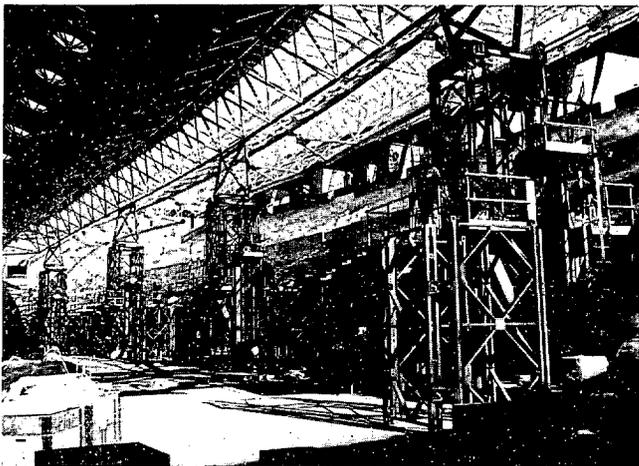
e) Proyecto de arriostamiento en fase de izada

El proyecto de **arriostamiento** se hizo necesario al profundizar en los efectos de la acción del viento sobre la estructura en fase de izada y comprobarse mediante un modelo dinámico de ésta, que la gran flexibilidad que pre-

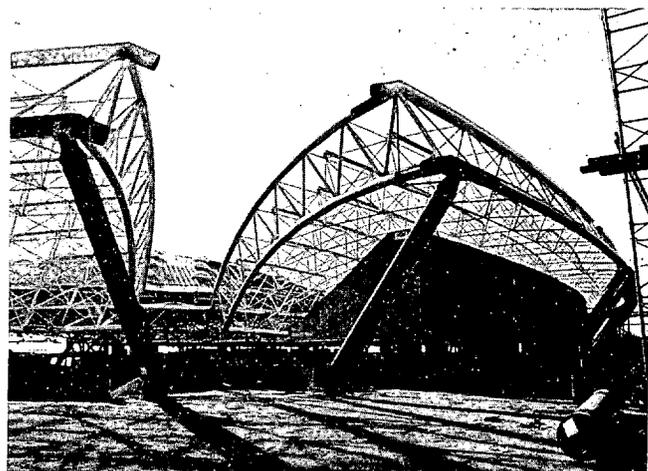
sentaba en esta fase en dirección transversal, aproximaba peligrosamente el periodo propio de vibración en ese sentido con el tiempo de paso de viento a través de ella. Se decidió, pues, fijar, o tener la posibilidad de fijar, la estructura en cualquier instante uniendo las cabezas de los fustes de los pórticos perimetrales a la estructura de hormigón del Palacio. Dado el amplio movimiento de dichos pórticos hubo de proyectarse un sistema de cierta complejidad, con cables y barras Dywidag, que permitiese además actuar sobre la cubierta para corregir posibles desplazamientos en la elevación debidos a holguras o a otras causas.

f) Prueba de carga de la torre

El conjunto del sistema de elevación se había proyectado y revisado minuciosamente pero aun así existían ciertas incertidumbres respecto a su buen funcionamiento, ya que, suponía una gran novedad en todos los aspectos. De esta forma, se llegó al convencimiento de la necesidad de efectuar una **prueba de funcionamiento y carga** del conjunto de una torre. Estas pruebas se llevaron a cabo en los talleres de **Dragados y Construcciones** en Zaragoza y si bien dieron lugar a pequeñas correcciones en el diseño de los elementos, eliminaron en gran manera las incertidumbres existentes en cuanto a su buen funcionamiento, demostrando una vez más la bondad de la escala 1:1.



Estado de la cubierta con dos módulos por torre.



Estado de los pórticos perimetrales con cuatro módulos por torre.



Estado de la cubierta con cuatro módulos por torre.

g) Manual de operaciones

Una vez completado el proyecto y pruebas se pasó a la fase de preparación de la operación que tenía dos vertientes. Por un lado, la redacción de un **manual de operaciones** y por otra, la preparación y ejecución de un plan de **formación del personal** que iba a intervenir en la operación de izada.

Se editó un manual de operaciones en el que se describían detalladamente éstas, enumerando cada una de las actividades que formaban parte de cada operación incluidas las de montaje de las torres y estructuras auxiliares, elevación propiamente dicha y desapeo. Ade-

más de la citada descripción el manual incluía una serie de esquemas gráficos donde se veía la situación de cada uno de los operarios y la composición de cada equipo para las distintas operaciones con indicación de los tiempos pre-visibles, máximos y mínimos de duración de éstas. A partir de estos tiempos se establecía un cronograma de actividades diarias.

En el manual se definían asimismo las funciones del **jefe de torre** y se enumeraban los equipos y herramientas necesarios.

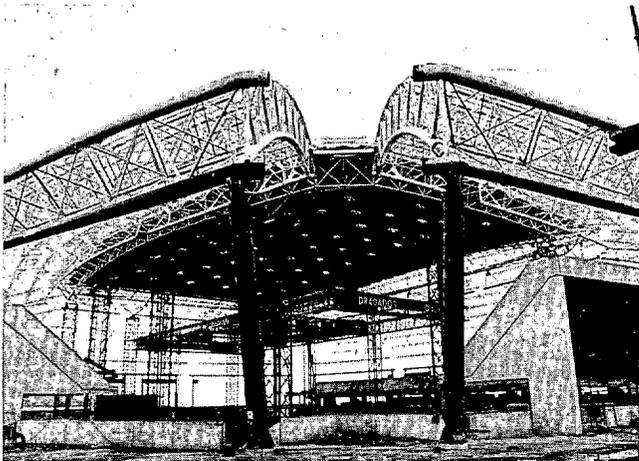
h) Formación del personal

Por último se consideró de gran importancia la **formación del personal** que habría de participar en la operación. Para ello, se elaboró un plan de formación con dos vertientes; una práctica, para lo que se instaló el conjunto de una torre incluso los gatos principales en el Parque de Maquinaria de **Dragados y Construccio-**

nes en Viladecans (Barcelona), y por el que pasaron en grupos los Jefes de torre practicando un gran número de veces todas las operaciones que componían la izada, y otra, donde se dieron una serie de cursos teóricos en los que se instruyó al personal sobre el funcionamiento de los equipos hidráulicos explicándoseles además el esquema general de la operación, utilización de los sistemas de comunicaciones e instrucciones de carácter general en cuanto a comportamiento, ubicación y esquemas de mando. Además de familiarizar a los trabajadores con los medios y procesos que de otra forma les resultarían nuevos, el citado plan sirvió para seleccionar a los que serían Jefes de torre y componer los distintos equipos.



Estado de la cubierta con ocho módulos por torre.



Estado de la cubierta con nueve módulos por torre.

i) Instrumentación y control

La operación de izada se planteó con dos tipos de controles; un **control interno** intrínseco a la operación y otro **externo** a ella.

El primero la constituían el control por sensores de nivel ya descrito y el control continuo de presiones visualizando gráficamente de forma permanente y controlado a sus valores máximos por válvulas de seguridad que detenían automáticamente el proceso, en caso de producirse una sobrepresión.

El control externo realizado por **Geocisa** se ocupaba de tres aspectos diferentes: geométrico exterior, estado tensional y condiciones ambientales.

El **control geométrico exterior** se realizó por medio de topografía de alta precisión proporcionando de forma discontinua, cada cambio de módulo en general, las coordenadas absolutas de veinticuatro puntos de la cubierta, doce de los cuales correspondían a la cabeza de las torres. Para ello, hubo que crear una extensa red de hitos ya que a medida que la cubierta iba ascendiendo había que cambiar el posicionamiento de los aparatos por problemas de visibilidad y pérdida de precisión. Dentro de este control geométrico se preveía además la medición mediante clinómetros eléctricos de una serie de fustes de los pórticos perimetrales.

Para conocer en cada instante el **estado tensional de la estructura**, se instrumentaron 16 barras de la cubierta cada una con tres bandas extensométricas a 120° . Asimismo se instrumentaron de forma similar cuatro soportes de borde y los tirantes de los tetraedros de las doce torres para obtener de forma indirecta la reacción en cada una de ellas y comprobar de esta manera las obtenidas por lectura de manómetros.

Como ya hemos dicho, el tercer tipo de control era el de las **condiciones ambientales**. En este apartado se incluyó la colocación de un sensor de temperatura en cada una de las barras instrumentadas proporcionando aquella en el instante de la lectura de deformaciones de bandas. Además de esta medida se dispusieron otros dos sensores para medir la temperatura ambiente en dos zonas de la estructura aleja-



Estado de la cubierta con diez módulos por torre.

das entre sí. Finalmente, se instalaron dos anemómetros, uno de ellos con avisador luminoso visible en la caseta de control, tarado para avisar a 10 m/s, y un segundo anemómetro con indicador de velocidad de 0 a 35 m/s, con apreciación de 0.5 m/s, y un indicador de dirección de 10 en 10 grados, instalado en la caseta de control de **Geocisa**.

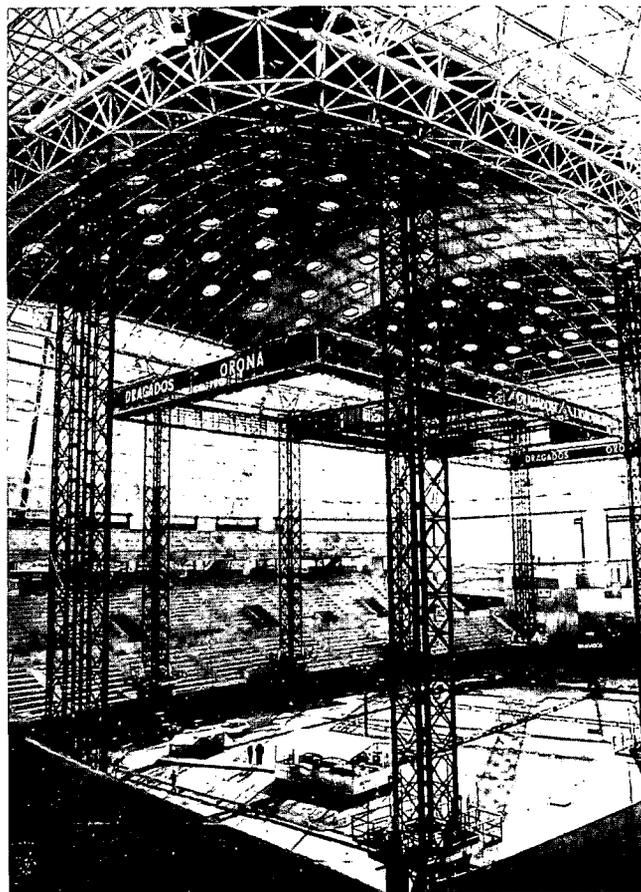
La captación de los datos se realizó a través de una unidad de registro externo de 32 Kb de memoria que permitía la transmisión a un ordenador HP 5 9000 que procesaba los datos y editaba los resultados.

El equipo de medida para bandas extensométricas estaba basado en un Data Acquisition/Controlunit modelo HP 3497 con capacidad para 60 canales de lectura conectado a un ordenador que permitía la grabación de los datos y su posterior presentación mediante listados de impresora o gráficos editados por plotter.

Existía además otro control de tipo geométrico consistente en unas cintas métricas metálicas unidas a la cubierta, tensadas convenientemente y arriostradas a la torre cada cierta altura, en las que en un cursor fijado a la pista se podía leer en cualquier instante la altura real de elevación, lectura que efectuaban los Jefes de torre cada metro de elevación aproximadamente.

3. EJECUCION DE LA OPERACION

La operación de izada se realizó entre los días 21 de Noviembre y 2 de diciembre de 1988



Estado de la cubierta con diez módulos por torre.

habiéndose descansado el sábado y domingo intermedios. Se elevaron en total 28,63 m correspondientes a 9 módulos y medio de torre.

Se respetó rigurosamente el esquema inicial previsto en lo que a distribución de personal, equipos y centros de control se refiere.

En la pista, además de las doce torres con sus correspondientes **Jefes y Ayudantes** situados en las plataformas junto a cada gato, se situó la **caseta centro de control** en posición casi central mientras que en una **caseta perimetral** se encontraban todos los elementos de control externo provistos por **Geocisa**.

La caseta centro de control de 8x4,50 m en planta estaba enteramente revestida de metacrilato para poder tener visión directa de todos los puntos. En una primera zona de la caseta de control se encontraban los paneles de comando de la operación junto con los indicadores luminosos de nivel en cada torre y una pan-

talla gráfica donde se leía de forma digital la presión en bares correspondientes a los gatos de cada torre. Asimismo de forma gráfica por barras verticales se visualizaba de forma continua la relación entre la presión teórica y la real medida en cada una de las torres, con una línea horizontal correspondiente al 100 por 100 y dos de tolerancia al 90 y 110 por 100 respectivamente. En esta misma zona se ubicaba además un monitor de televisión que mostraba la altura de cinta de una de las torres que tenía una cámara de vídeo fija enfocada a la misma a su paso por el cursor.

En la otra zona de la caseta se situaban las centales telefónica y megafónica y un PC por medio del que se iban obteniendo las tensiones y reacciones esperadas en cada instante, en función de la altura de elevación y las condiciones ambientales del momento para comparar con las medidas realmente. Asimismo todos los días se daban las reacciones estimadas previstas para ese día para introducirlas en el monitor gráfico de presiones. En la caseta se encontraba de forma permanente el grupo de dirección de la operación, formado por técnicos de **Dragados y Construcciones**, y los operadores de los sistemas hidráulicos y de control interno, formado por técnicos de **VSL Int.**

El ciclo diario teórico para elevación de un módulo se componía de las siguientes operaciones:

1. Control geométrico total. Lectura de cintas.
2. Soltar arriostamiento contraviento.
3. Elevación de 40 mm. Corrección posición torres.
4. Elevación hasta un metro - retirada de zapatas de apoyo de torres.
5. Lectura de cintas. Lectura de bandas.
6. Elevación segundo metro.
7. Lectura de cinta. Lectura de bandas.
8. Elevación tercer metro.
9. Introducción de nuevo módulo (3 equipos).
10. Lectura de cintas y bandas. Colocación de las zapatas de torres.
11. Revisión de suplementos.
12. Descenso aproximado de 20 mm para apoyar las torres.

13. Desempestillado y bajada con diferenciales del marco de elevación (GEP).
14. Empestillado del marco al nuevo módulo.
15. Protocolo de posición de base de torres.

En este momento se estaba dispuesto para iniciar un nuevo ciclo de elevación. Si este ciclo se decidía iniciarlo al día siguiente se hacía un nuevo control geométrico, se tensaban los arriostamientos y se protegían los gatos.

Este ciclo se respetó a lo largo de todo el proceso con excepción del día primero donde sólo se elevó una altura de 60 mm, de acuerdo con el plan previsto, y del octavo, en el que se subieron dos módulos coincidiendo con el ciclo planeado para tiempos óptimos de operación.

El primer día de izada se trataba exclusivamente de comprobar el funcionamiento de los equipos hidráulicos y de control y el comportamiento de las estructuras de cubierta y auxiliares en fase de elevación. El segundo día se hizo un módulo completo pero con muchas interrupciones, ya que se efectuaba una lectura de cintas cada carrera y un control geométrico total cada metro de elevación, a fin de comprobar la precisión de los sensores de nivel y aún de las propias cintas. Asimismo se comprobaban las reacciones leídas en los manómetros de los gatos principales comparándolas con las leídas en los manómetros del circuito de compensación de cargas en momentos de recuperación de embolo, y con las obtenidas por deformación de bandas en tirantes de traedro.

Al final del segundo día se puso en carga el «CAT-WALK», estructura de pasarela de 60 × 22 m en planta y peso de unas 83 Tm, incluidas las instalaciones, que va suspendida de la cubierta mediante cables y había de elevarse junto con ella.

A partir de ese momento, se entraba en fase de operaciones normales. La realidad fue confirmando día a día todas las previsiones sin aparecer ninguna anomalía de importancia a lo largo de toda la operación. Había, eso sí, que poner especial atención después de cada ciclo a la posición y corrección de las bases de las torres ya que una pequeña inclinación, debida

a movimientos de la cubierta, daba lugar, al subir la cota de ésta, a desplazamientos en la base que podrían llegar en un proceso acumulativo a absorber las holguras e impedir el empestillado. Las correcciones se hacían con la torre en elevación al principio de ésta mediante movimientos de los rodillos guía.

La limitación de viento, para fases de izada, impuesta en el pliego daba la cifra de 40 Km/h. A fin de prever la posible incidencia de esta limitación en el proceso, se hicieron una serie de estudios previos sobre datos del instituto meteorológico y del Aeropuerto del Prat. Asimismo, se organizó una sistemática de recogida de previsiones, telefónica, por medio de la cual, se obtenían dos veces al día las previsiones para las seis horas siguientes. De hecho, la acción del viento no fue importante a lo largo del proceso con la excepción del último día en el que durante la mañana hubo un viento casi permanente de unos 35 Km/h con rachas que llegaron a los 70 Km/h y que no permitieron la elevación del último módulo, que era de una longitud mitad del resto, hasta la tarde de ese mismo día, una vez que amainó el viento.

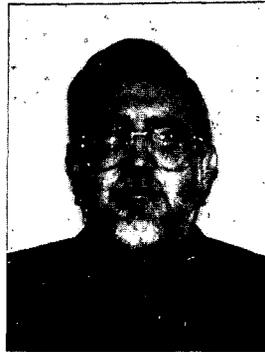
La operación terminó con la introducción del último módulo y apoyo del conjunto. Se levantó de nuevo la cubierta de 10 mm para tener datos exactos de las últimas reacciones, necesarios para prever las fuerzas a introducir y los descensos previsibles en la operación de desapeo. Las reacciones resultantes fueron muy próximas a las previstas, del orden del 95 por 100. Por la mañana del día siguiente se hizo un minucioso control geométrico del que se dedujo que la máxima diferencia de elevación entre dos puntos fue de 10 mm y el máximo desplazamiento en planta del orden de 15 mm.

A efectos de inmovilización de la estructura durante la siguiente fase que corresponde al

cosido, para pasar a la estructura cerrada, se colocaron una serie de arriostramientos entre los fustes de los pórticos perimetrales y la estructura de hormigón, intercalando elementos flexibles a fin de no coartar de forma absoluta los movimientos previsibles debidos a cambios térmicos.

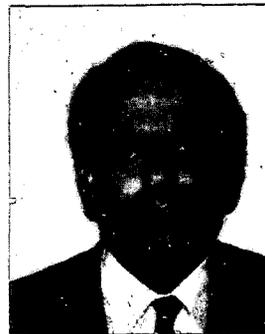
Una vez cosida la estructura, hacia finales del mes de febrero, se procederá a la operación del desapeo, que se realizará de forma cíclica y progresiva mediante los gatos de compensación de carga y chapas, ya incluidas en los suplementos dispuestos en el estado actual.

Julio Martínez Calzón.



Dr. Ingeniero de Caminos. Profesor de estructuras mixtas en la escuela de Caminos de Madrid. Director de MC2 Estudio de Ingeniería, S. A. (Madrid).

Javier Asencio Marchante.



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Departamento de Estructuras de la Dirección Técnica de Dragados y Construcciones, S. A.

