

EL PALAU SANT JORDI EN BARCELONA

Por Julio Martínez Calzón, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos *

La presencia de este edificio en el Anillo Olímpico de Barcelona 92 ha sido ampliamente difundida y documentada en todo tipo de medios de información desde la fecha de la espectacular elevación de su estructura de cubierta, llevada a cabo en diciembre de 1988, hasta su utilización en diversas competiciones de los juegos y culminando en la final de baloncesto con el «dream team» y la televisión, que la proyectó a todo el mundo. Previamente, la instalación había dado muestras de su carácter multifuncional siendo escenario de actividades de la más variada categoría en un recinto cerrado: motocross; windsurfing; conciertos y recitales; espectáculos sobre hielo; etc. que han puesto sobradamente a prueba la totalidad de las instalaciones, sistemas y estructuras.

La inclusión de un artículo más sobre el Palau en el número de la renovada Revista de Obras Públicas dedicado a Barcelona, debía por ello plantearse desde una perspectiva muy de resumen y cierre de todo cuanto el edificio supone desde una

El complejo que constituye el Palau está formado por tres cuerpos conectados entre sí, cuyas dimensiones totales conforman un conjunto de 210 x 135 m.

perspectiva estructural, insistiendo con cierta precisión sobre algunas reflexiones e ideas que todo el proceso de realización ha puesto de manifiesto, y no sólo refiriéndolo a la cúpula principal sino a todo el conjunto de sus instalaciones.

La presentación se divide en cuatro apartados genéricos:

1. Descripción general y tipologías.
1. Análisis de la estructura de la cubierta principal.
3. Proceso de ejecución de la gran cubierta.
4. Control del proceso de ejecución de la cubierta y consideraciones finales.

1. Descripción general y tipología

Aunque primordialmente conocido por la imponente presencia de su gran cubierta principal, que corona el diseño arquitectónico de Arata Isozaki (1), el Palau Sant Jordi engloba un gran complejo

(1) Con Juan Carlos Cardenal como arquitecto español colaborador.

* Proyecto Estructuras de Hormigón y Consultor y Director de Obra de la totalidad

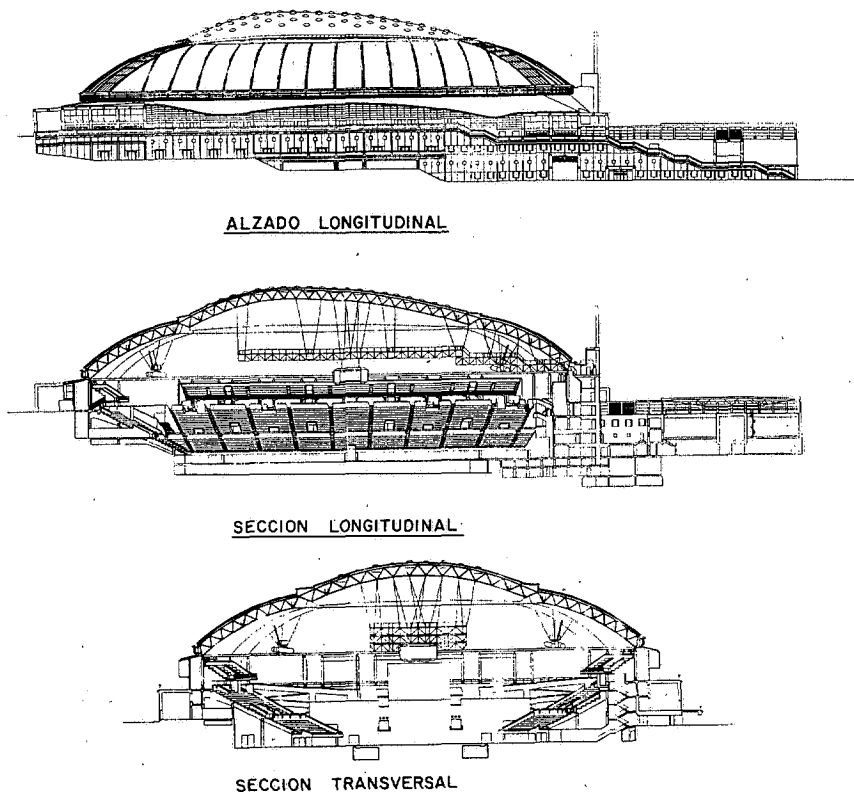


Figura 1.

para uso público polivalente, con una serie de importantes instalaciones y sistemas que han requerido una amplia gama de sistemas estructurales que incluyen algunas soluciones de notable interés. Se desea aquí ofrecer una visión suficientemente completa de esta formidable obra que dé el merecido alcance a dicha totalidad y no sólo a la gran cubierta espacial que ciertamente la singulariza.

Parece también adecuado exponer algunas aclaraciones iniciales de índole muy general que permitirán comprender en la mejor forma las razones y el carácter de la solución en su conjunto, tanto en sus aspectos arquitectónicos como estructurales.

Inicialmente, el proyecto fue concebido para su ubicación en otra zona más alejada del Estadio y dentro de una disposición urbanística del Anillo Olímpico muy diferente de la finalmente realizada. Al efectuarse la campaña de sondeos previa al proyecto constructivo, se comprobó la existencia de unos potentes estratos de basuras, fruto de relleno de grandes excavaciones de antiguas canteras en la colina de Montjuich, que obligó al traslado de su posición, de manera indecisa durante algún tiempo, en el cual, sin embargo, debían efectuarse avances importantes en dicho proyecto constructivo. Ello dió lugar a la elección de una disposición de proyecto de carácter muy compac-

to y escalonado, que permitiera su reubicación en el lugar que finalmente se decidiera, pero que en todo caso se situaría en una zona a media ladera.

Asimismo, el proyecto inicial contemplaba —como puede verse de manera muy clara y brillante en los dibujos del propio Isozaki en las publicaciones de las Ref. 1 y 2— la realización de una solución arquitectónica cuya imagen principal ofrecía una especie de reflejo abstracto del perfil del propio Montjuich con el mar en su base; lograda mediante la disposición, totalmente en continuidad con la cubierta principal, de otra cubierta ondulada espacial en la zona inferior de instalaciones y pabellón auxiliar. Por motivos económicos, esta solución fue modificada por la realizada, adoptándose una cubierta plana que elimina ese carácter totalizador; permaneciendo únicamente, como reflejo de la idea base, la ondulación en la cubierta periférica de la pista principal, como un simple oleaje envolvente.

Así pues, el complejo quedó finalmente constituido en la forma que muestra la *Figura n.º 1*, cuyo alzado y sección longitudinal permite reconocer claramente los tres cuerpos principales de que consta el conjunto:

- | | |
|------------------|--|
| <i>Inferior.</i> | Pabellón auxiliar polivalente. |
| <i>Medio.</i> | Patios y atrios del conjunto de instalaciones y servicios incluida una central térmica que requiere una chimenea de considerable altura. |
| <i>Superior.</i> | Graderíos y cubierta de la pista principal. |

todos ellos conectados a través de grandes escalinatas exteriores, además de su continuidad y maclas interiores.

El sistema en conjunto dadas sus grandes dimensiones, 210 x 135 m., presenta una serie de juntas de dilatación que influyen de manera importante en algunos de los sistemas estructurales, llegando en ocasiones a requerir soluciones singulares para hacer frente a los requerimientos funcionales y resistentes. En la *Figura n.º 2* se muestra la disposición en planta de estas juntas, que permitirá entender las descripciones que seguidamente se exponen relativas a los aspectos tipológicos y de detalles fundamentales de los tres cuerpos antes citados que componen la totalidad del edificio.

1.1. Cuerpo inferior

Esencialmente constituido por el denominado Pabellón Polivalente, al que se adosan pequeños graderíos en uno de sus laterales, y pasarelas superiores periféricas. Puede emplearse aisladamente, de forma autónoma, tanto para uso propio interior o para espectáculos públicos; o en combinación con la pista principal como auxiliar de ésta: pista de calentamiento; formación; cámara de llamadas; etcétera.

Este recinto consiste en una gran sala paralelepípedica de 101 x 36 m. en planta y una altura de 15 m.

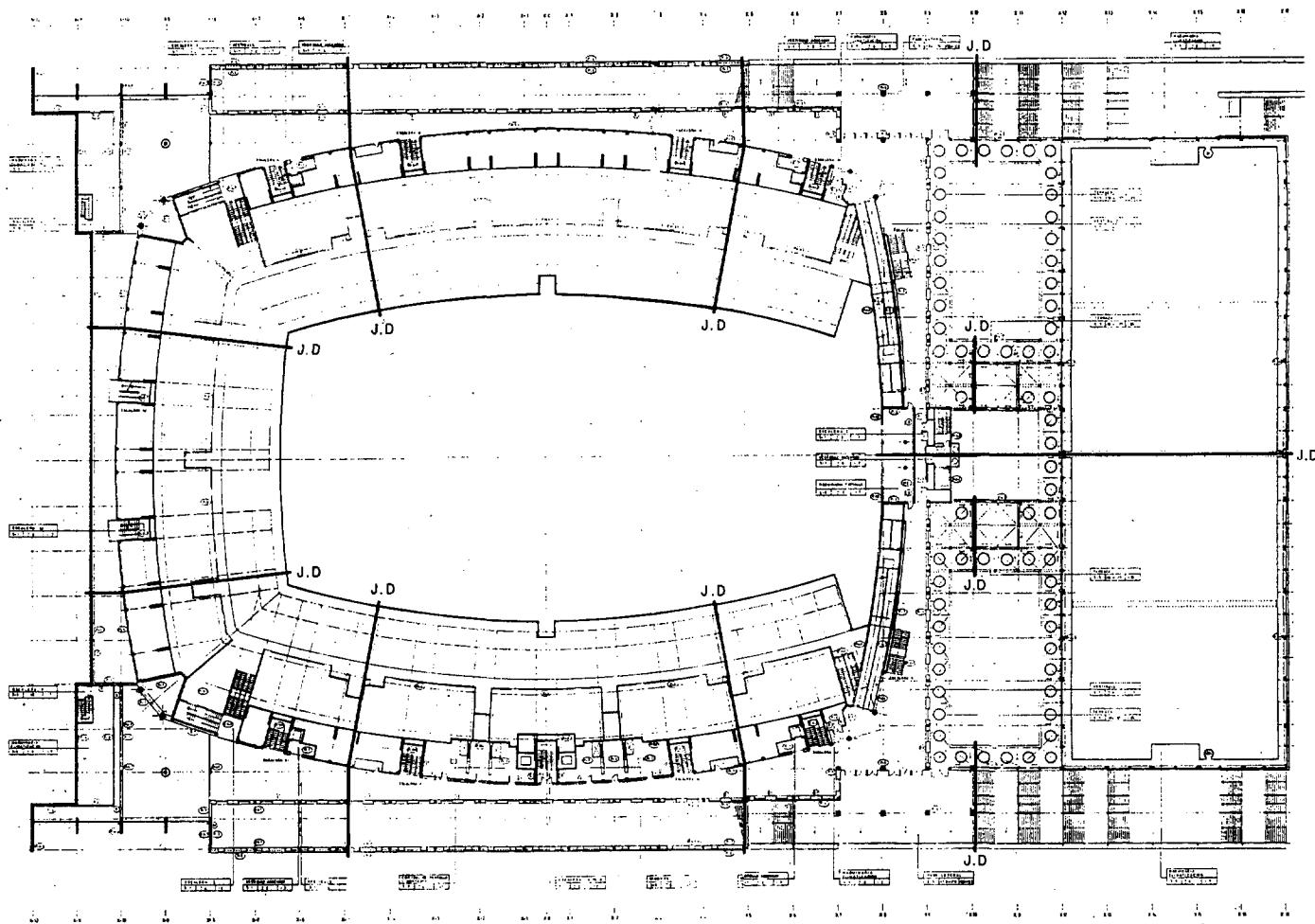


Figura 2.

La estructura de esta sala presenta algunas soluciones singulares dignas de mención, motivadas por las interrelaciones entre el diseño arquitectónico y las necesarias condiciones de estabilidad.

Su cubierta es plana y se constituye mediante cerchas especiales de tipo triangular-trapezoidal, planteadas como alternativa arquitectónica a las conocidas formas triangulares (ver *Figura n.º 3*). Por dicha razón, el cordón superior presenta una apreciable capacidad flexional, para adaptarse los esfuerzos que se producen en el mismo, de tipo híbrido entre piezas de tipo Vierendel y triangulares.

Por otra parte, la fachada exterior con una longitud total de 101 m. y totalmente exenta debía ofrecer un carácter de estructura muy transparente a pesar de su gran altura y exposición directa al viento. Por ello, se consideró necesario que el ligero entramado de soportes y riostras de hormigón armado que la constituían se apoyara en forma articulada en el plano horizontal de la cubierta, empotrándose en la cimentación. La cubierta, actuando como gran viga pared en su plano transmitía la totalidad de estas acciones a los pórticos de hormigón situados en los extremos laterales de la sala, unidos parcialmente con el cuerpo intermedio, ya que en el lado opuesto a la fachada exterior longitudinal la existencia de los

grandes patios y la sobre elevación de la cubierta imposibilitaban la disposición de apoyos intermedios. Sin embargo, la presencia de la junta de dilatación en el centro de la planta daba lugar a la ruptura del sistema resistente antes descrito.

Para solventar todas estas dificultades se diseñó un mecanismo especial de transmisión de acciones que debía permitir el libre desplazamiento longitudinal de los dos cuerpos separados por la junta, cuando se presenten las acciones de tipo térmico, retracción, etc.; y, sin embargo, hacer frente a las solicitaciones de tipo de flexión y cortante con el plano de cubierta, manteniendo el carácter de elemento estructural global de la totalidad. En las *Figuras n.ºs 3 y 4* y también en las *fotografías n.ºs 5 y 6*, pueden apreciarse las características de dicho mecanismo formado esencialmente por dos planos de pletinas articuladas que como un salvamanteles permiten el desplazamiento paralelo de sus extremos, pero en el que las pletinas centrales impiden los movimientos de signo contrario (apertura, cierre) de dichos extremos que los efectos de flexión producen. En el centro de las jacenas de junta, otro sistema de pletinas impide asimismo el desplazamiento transversal entre semicubiertas (Detalle 5).

El comportamiento de este mecanismo tanto en las pruebas como en su funcionamiento ordinario

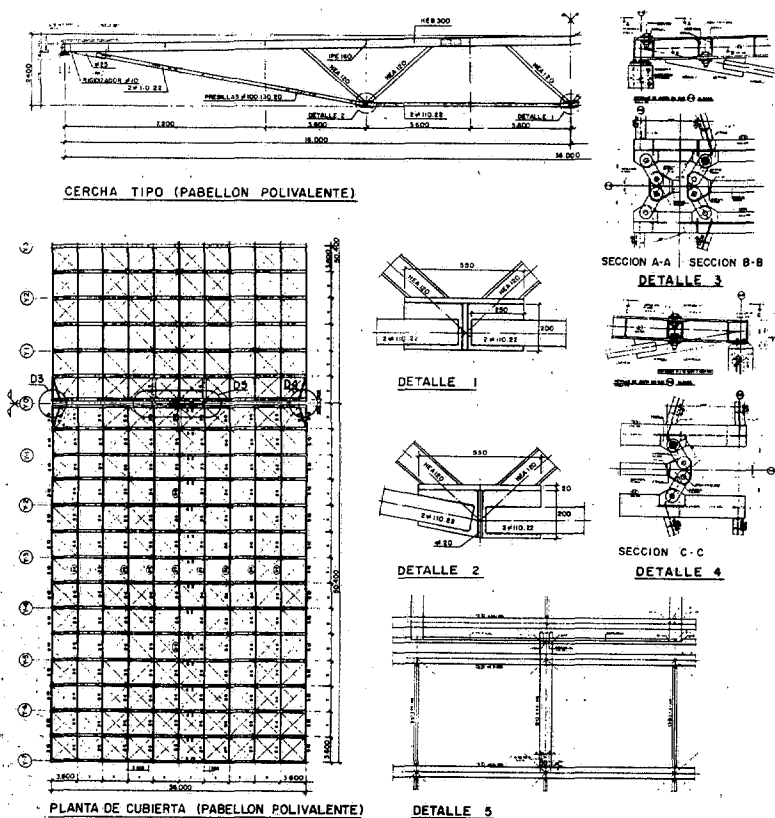


Figura 3.

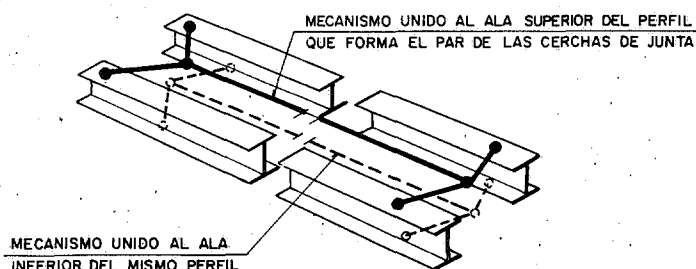
ha sido enteramente satisfactorio por su gran simplicidad intrínseca a pesar de la aparente complejidad.

1.2. Cuerpo intermedio

Actuando como nexo de unión entre las dos grandes salas, este elemento encierra la práctica totalidad de las instalaciones y servicios del complejo deportivo. Presenta una altura total equiva-

Figura 4.

MECANISMO DE JUNTA DE DILATACION DEL PABELLON POLIVALENTE



lente a diez plantas y en su parte inferior se sitúan los grandes depósitos de agua y combustible, así como las salas de maquinaria de importantes dimensiones y alturas; y se producen las conexiones con la galería de servicio que circunda subterráneamente la pista principal.

Como elemento especial de remate, con gran impacto visual y riesgo estético, aparece una doble chimenea de servicio de la central térmica del edificio que presentaba una cierta complejidad constructiva al tener que construirse una vez completadas las coberturas de las dos grandes salas y sin la posibilidad de empleo de grúas apropiadas. Por ello se eligió una solución prefabricada mediante dovelas mixtas de 4 m. de longitud, constituidas por una chapa de 8 mm. de espesor con elementos refractarios interiores y un recubrimiento exterior de hormigón conectado a dicha chapa. Las uniones se efectuaban por soldeo en obra de las chapas y posterior relleno de grout de la zona exterior de dichas uniones.

La estructura de este cuerpo es de hormigón armado y su única particularidad radica en la inexistencia de juntas de dilatación en toda la estructura en la zona situada bajo el nivel de pistas incorporándose las solicitaciones producidas por la retracción y las pequeñas variaciones térmicas previstas. A partir de la cota de pistas, las juntas se materializaban en las posiciones indicadas previamente en la Figura n.º 2.

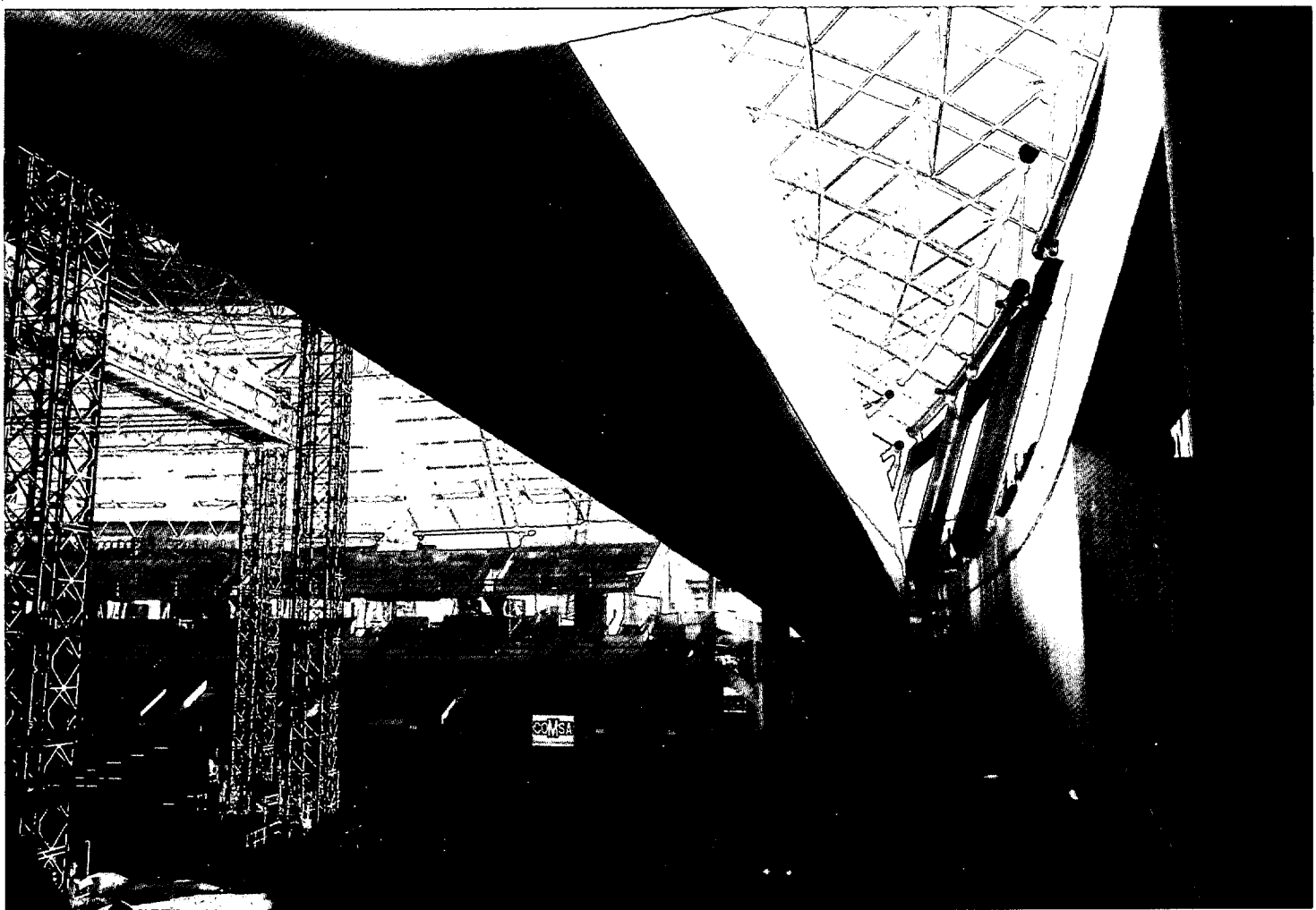
Dentro de este conjunto, el cuerpo de grandes muros-pantalla y rampas que forma la pared interior frontal de la sala principal y que recoge las cargas de la gran cubierta en dicho lado, efectuando una función de macla entre ambos cuerpos, presentaba también algunas peculiaridades de análisis y constructivos que pueden intuirse a partir de la Fotografía n.º 7 en una fase de construcción, y en la planta de la Figura n.º 2.

1.3. Cuerpo superior

En esta zona se incluyen: la pista principal del Palau, sus graderios inferiores y superiores, la gran cubierta espacial y las áreas y cubiertas periféricas de acceso al conjunto, conectadas a su nivel superior con la gran plaza del Anillo Olímpico.

Todo el conjunto de estructuras, a excepción de las cubiertas, están constituidas básicamente por pórticos de hormigón armado dispuestos en direcciones radiales y circunferenciales principalmente, para hacer frente a las solicitaciones horizontales de viento y sismo, propias y transmitidas por la gran cubierta, así como a los empujes del terreno, en cada uno de los cuerpos separados por las juntas de dilatación. Las acciones verticales en estos pórticos se deben a graderios, accesos, almacenes y las cargas transmitidas por los apoyos de la cubierta principal. Un pórtico radial tipo se expone en la Figura n.º 8 en la que se aprecia cómo en ocasiones los soportes de hormigón armado, para limitar sus dimensiones, se adaptan a piezas mixtas.

En las zonas de esquina, además de la interacción determinada por el cruce de los tres sistemas de modulación: radial y circunferencial de la



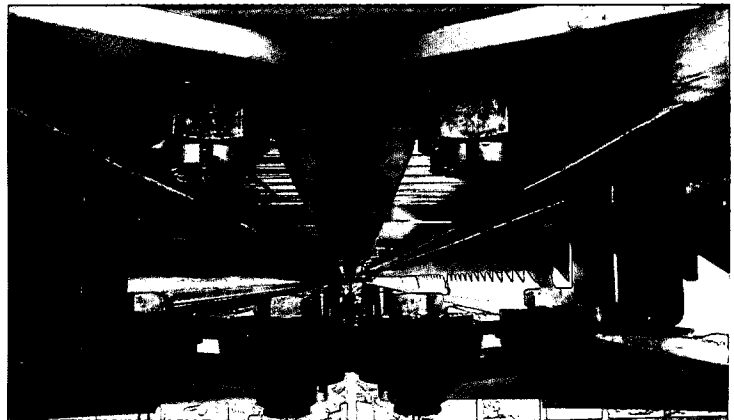
Fotografía 7.

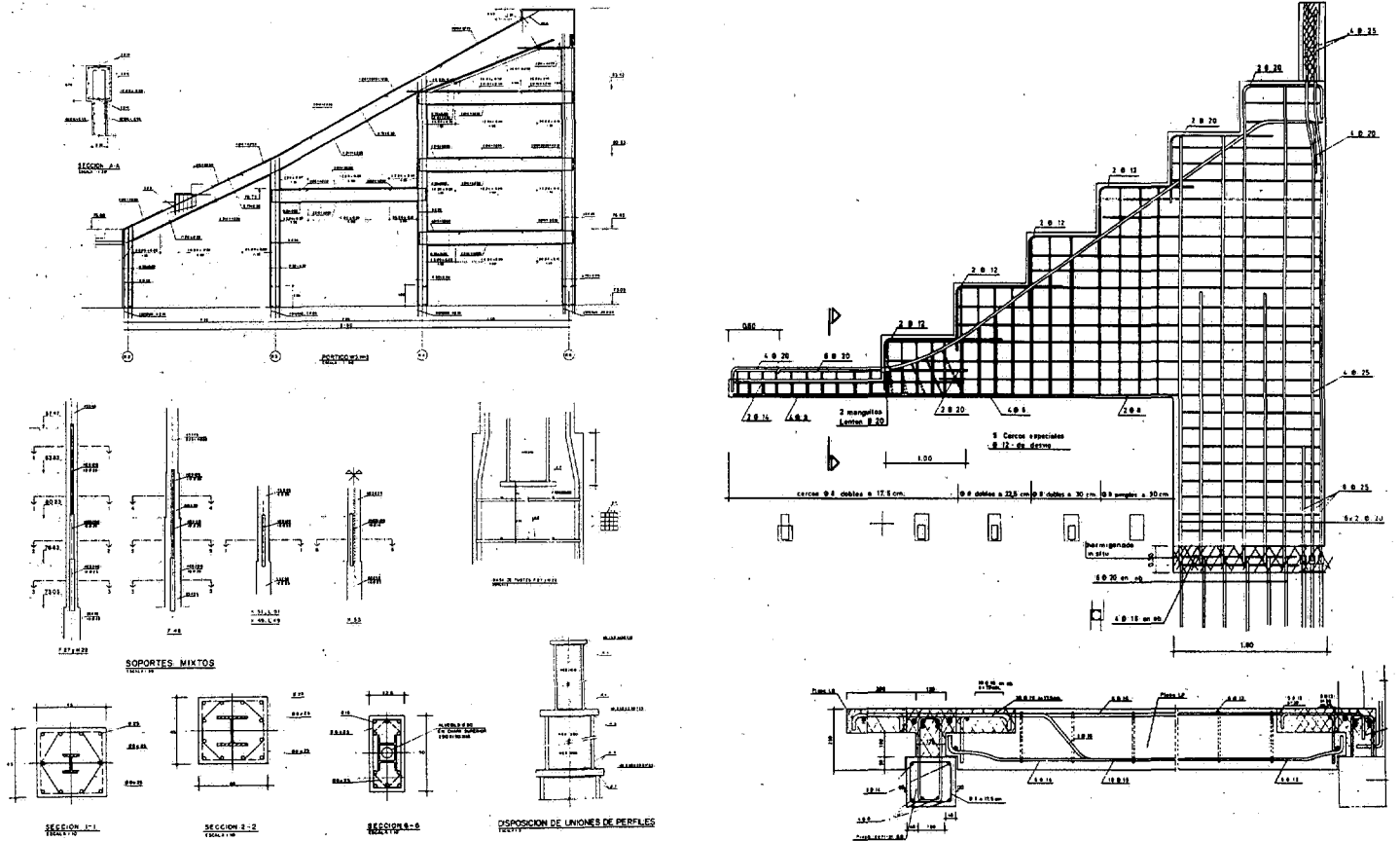
zona de graderios, y ortogonal de las zonas de acceso en el contacto con el perímetro se produce una cuarta alineación diagonal, producida por las grandes entradas a pista y graderios requeridas, dando lugar a un sistema estructural de gran complejidad incrementada por la presencia de las mayores cargas puntuales transmitidas por la cubierta principal, que se producen precisamente en los ocho pilares de las cuatro esquinas de la misma.

En la planta de la *Figura n.º 9* se pueden apreciar estas circunstancias.

Los planos horizontales están realizados con forjados unidireccionales aligerados con bloque de hormigón y sólo en las zonas periféricas de transición entre las alineaciones curvas y las rectas del exterior, así como en escaleras y rampas, se emplean losas macizas de hormigón, normalmente de 30 cm. de espesor.

Fotografías 5 y 6





Figuras 8 y 10.

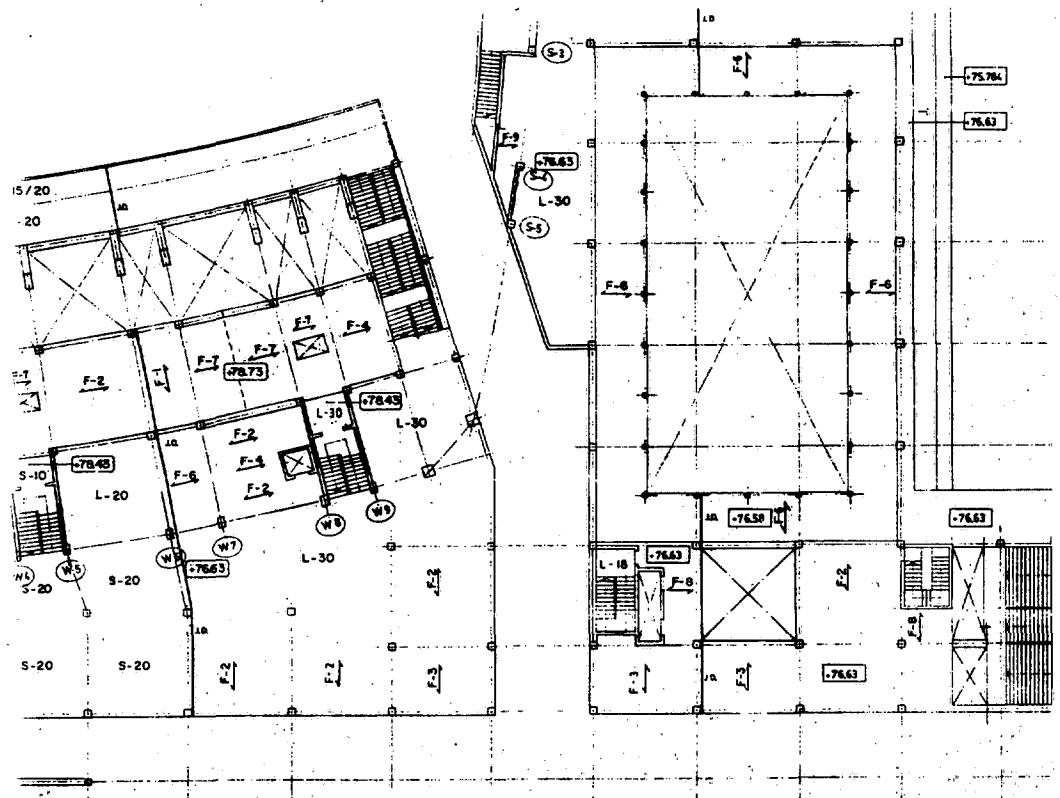
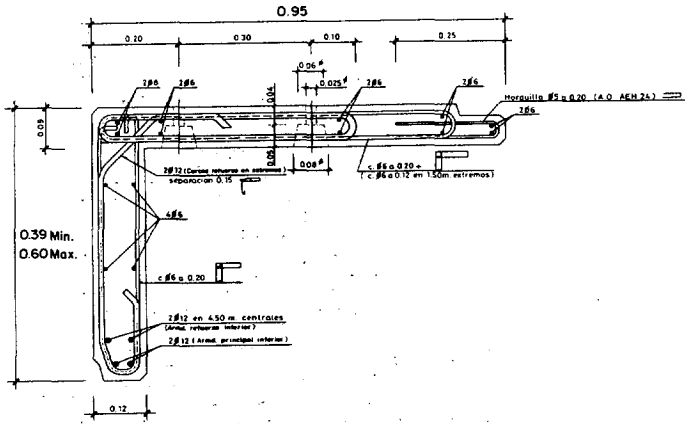


Figura 9.



DETALLE DE ARMADURA DE GRADAS

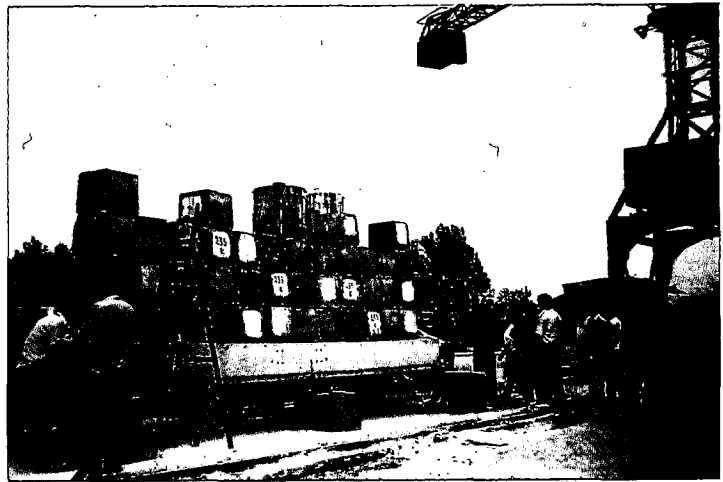


Figura 11 y fotografía 12.

Posteriormente a la realización de la mayor parte de la estructura se incorporaron, en algunas zonas que habían quedado huecas o en áreas de doble altura, forjados para palcos que se llevaron a cabo mediante soluciones mixtas con vigas metálicas y forjados mixtos de chapa plegada.

Uno de los sistemas estructurales más logrados del Palau, en cuanto a su calidad arquitectónica, estructural, funcional y estética, lo constituye el conjunto de las piezas prefabricadas de los graderios, petos, vomitorios y escaleras de la sala principal. Inicialmente, se pensaba incluso en haber prefabricado los elementos laja que soportan los graderios superiores (Figura n.º 10) pero final-

mente fueron realizados in situ con una disposición análoga, a excepción de los anclajes tipo Lenton sustituidos por esperas normales.

Las piezas prefabricadas de las gradas (Figura n.º 11) con una longitud tipo de 7,20 m., fueron controladas mediante ensayo hasta rotura de algunos ejemplares (Fotografía n.º 12). En el Gráfico n.º 13 se exponen los resultados medidos y su comparación con los valores teóricos, para una luz de ensayo de 6,9 m.

Finalmente, en la Fotografía n.º 14 se pueden apreciar diversos tipos de piezas prefabricadas instaladas durante la ejecución de la obra.

Fotografía 14.



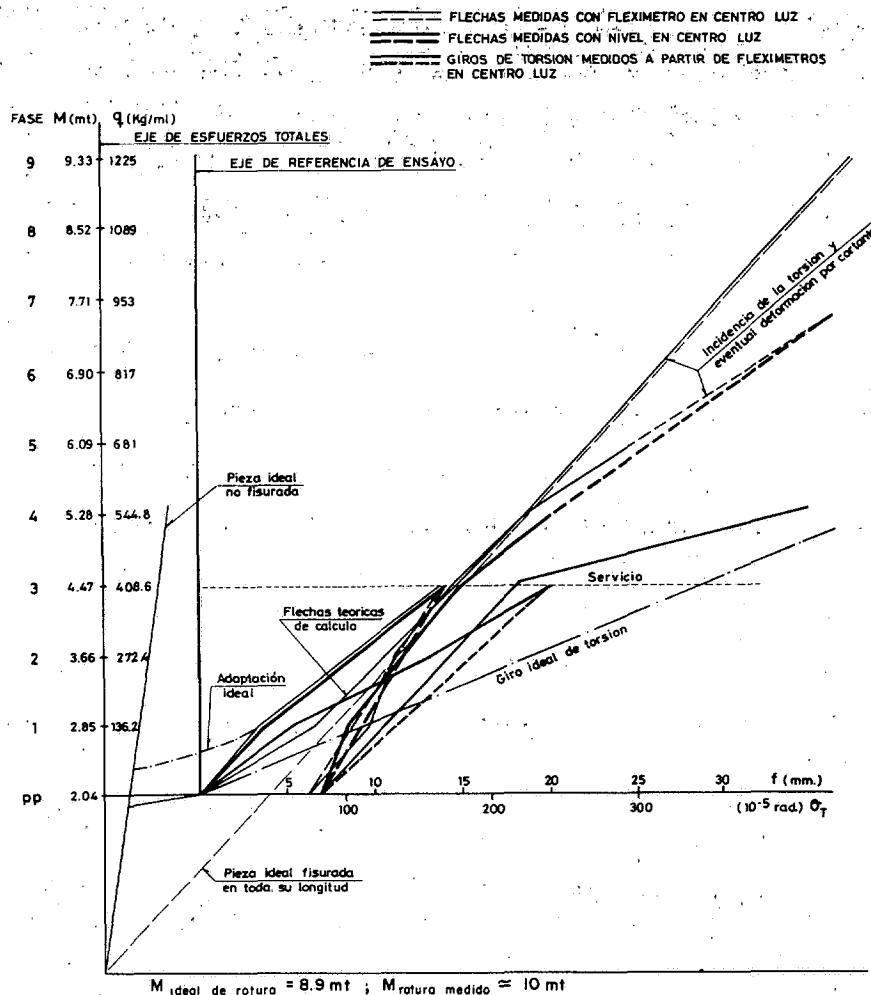


Gráfico 13. Flechas y giros de torsión en el ensayo de una pieza de graderio.

1.4. Cubierta principal

Pero evidentemente, y superando a todo el conjunto descrito con anterioridad, la estructura espacial de la cubierta principal presenta una importancia destacada; y no sólo por su especial forma y grandes dimensiones, ni incluso por la singularidad del método de construcción empleado, sino porque su visión incorpora en una forma especialmente sintética la profunda interacción que el arquitecto ha sabido obtener en la forma, la función y el proceso constructivo previsto logrando hacer perceptible en forma intuitiva, latente, su gran coherencia.

En un elemento estructural de las dimensiones de la cubierta del Palau Sant Jordi, 128 x 106 m. (Figura n.º 15), el diseño arquitectónico y su realización estructural deben responder a un profundo proceso dialéctico que pone en juego factores muy diversos. Una bella y precisa secuencia del desarrollo de esta compleja trama de relaciones puede verse en las referencias 1 y 2 antes mencionadas, en las que Arata Isozaki mediante una serie de dibujos y croquis expone la evolución del proceso creador de la cubierta, apreciándose de manera clara como, de forma gradual, el propio

proceso constructivo va interviniendo en la evolución formal de la obra.

Se percibe de forma rotunda como la forma de la cubierta es el resultado de incorporar a una idea primera, originaria, consistente en lograr una referencia o imagen ideal de la montaña de Montjuich mediante un elemento cupular de leve irregularidad, el tratamiento espacial y técnico necesario para cubrir una planta aproximadamente rectangular, acoplándose todo ello al método de construcción PANTADOME basado en la elevación desde el suelo, mediante un sistema de rótulas, torres y gatos, la práctica totalidad de la estructura de cubierta ya montada, e incluso con gran parte de los elementos de cobertura y pasarelas de servicio interiores.

La estructura elegida para la cubierta consiste en una malla espacial de doble capa de 2,40 m. de espesor y constitución híbrida. El carácter híbrido de la solución viene dado por la combinación resistente de dos conceptos estructurales diferentes:

- Por un lado, un entramado espacial principal continuo formado por grandes piezas tubulares soldadas que, a modo de esqueleto, recibe y transfiere a través de sus unidades la mayor parte de las cargas hasta la sustentación exterior.
- Por otro un conjunto de malla espaciales comunes, de carácter industrializado, formadas mediante nudos esféricos y barras tubulares atornilladas a las mismas, que constituyen las superficies envolventes del espacio del edificio y que reciben las cargas exteriores y las canalizan hacia los elementos del entramado principal.

Esta unión o simbiosis estructural permite resolver de manera excelente la cobertura de grandes espacios con formas arquitectónicas especiales, alejadas de las formas simples bien conocidas. En efecto, las mallas espaciales actuando como sobreestructuras conectadas al sistema principal desarrollan un trabajo resistente básicamente de tipo membrana; es decir, con la mayor parte de sus esfuerzos canalizados en forma axil en el interior de las propias superficies y, por tanto, económicamente; y con muy pocas flexiones, es decir, básicamente sin esfuerzos transversales a su superficie, que implican mayor coste.

Las reacciones de estas subestructuras son recogidas por el esqueleto principal y conducidas de forma muy directa hasta los apoyos exteriores aprovechando la gran capacidad portante de sus piezas.

Esta forma de canalizar los esfuerzos fundamentales a través de grandes piezas singulares que delimitan zonas parciales en las que predomina el trabajo membrana, consigue de manera clara una intensa correspondencia entre la forma arquitectónica deseada y un trabajo estructural activo y eficaz.

Pero además, en el ámbito del proceso constructivo, la presencia de los elementos singulares

permite establecer esquemas y procedimientos de gran creatividad que utilizan de manera perfecta las grandes posibilidades que la técnica actual ofrece, y que en el caso del Palau consistió en el empleo del sistema Pantadome de elevación, que se expondrá posteriormente, desarrollado por Mamoru Kawaguchi, consultor de Arata Isozaki y uno de los más prestigiosos ingenieros del mundo en el campo de las cubiertas espaciales y neumáticas.

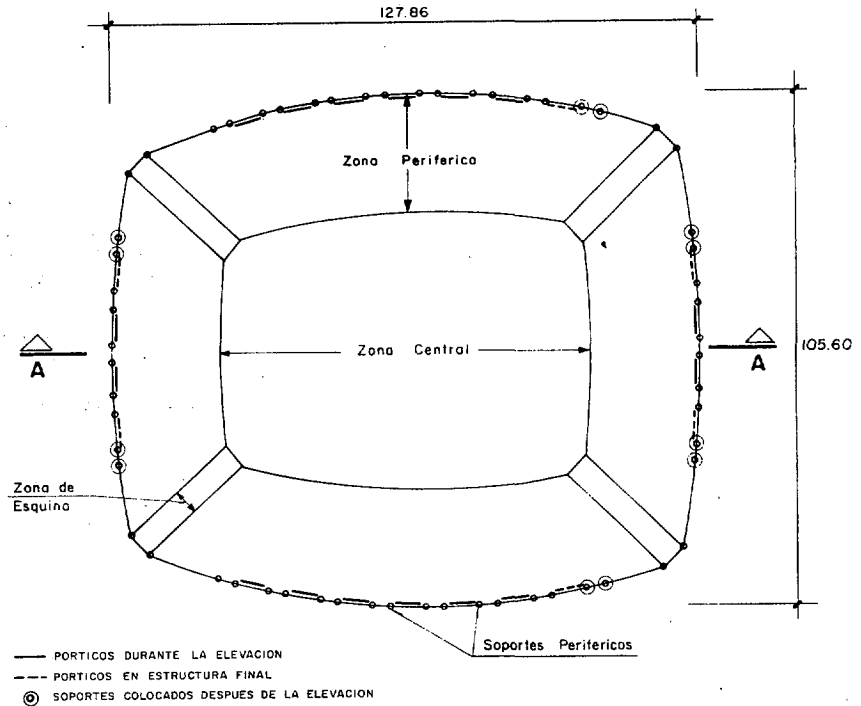
Así pues, la conjugación completa entre forma, estructura y proceso constructivo resulta óptima y confiere a la estructura una altísima entidad interna.

La subdivisión de la cubierta principal del Palau Sant Jordi se produce de la manera siguiente (Figura n.º 15):

- Una zona central de 73 x 50 m., con forma de cúpula muy rebajada (1/12), asimétrica longitudinalmente, con un perímetro en forma de rectángulo de lados curvilíneos que refleja exactamente la forma de la pista del área de juego.
- Una zona periférica de tipo toroidal, de anchura ligeramente variable entre 26 y 29 m., situada entre la cúpula central y el contorno exterior del graderío y que, externamente presenta también la misma forma de rectángulo curvilíneo.

El sistema tubular principal lo constituyen:

- Cuatro anillos que siguen los contornos rectangulares curvilíneos, dos para cada contorno (Figura n.º 16).
- Cuatro elementos de esquina que unen entre sí, dos a dos, los anillos.
- Un conjunto de 60 soportes perimentales pendulares (52 durante el proceso de elevación) vinculados al anillo inferior, exterior y que transfieren la totalidad de las cargas a la sustentación.



PLANTA DE CUBIERTA

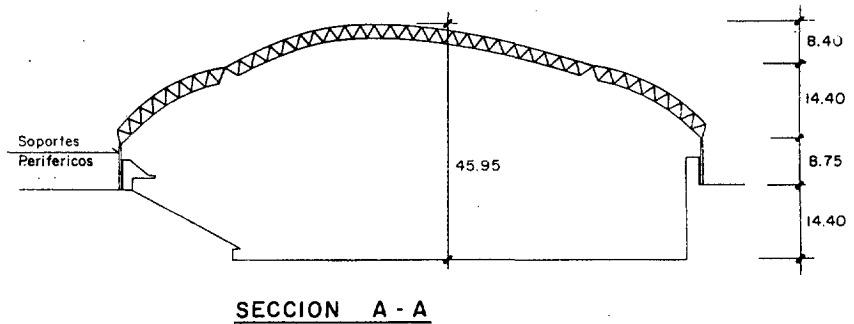


Figura 15.

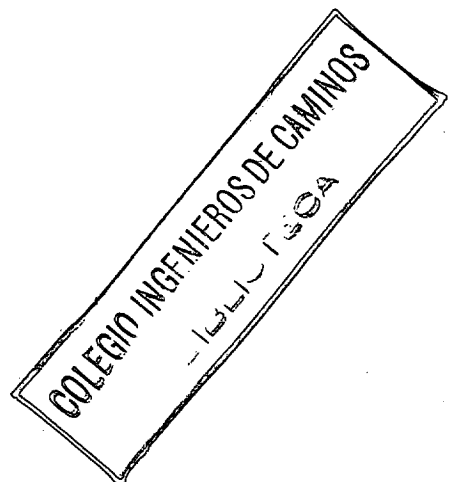
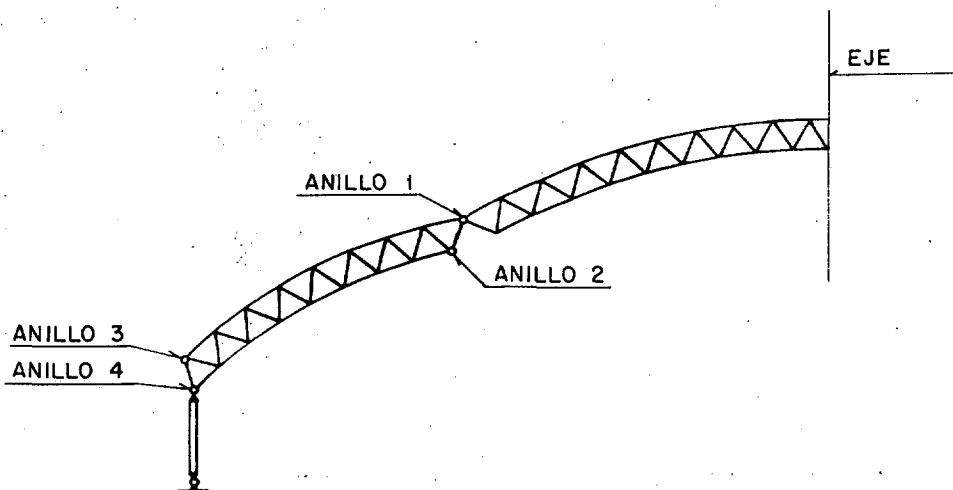


Figura 16.

La conducción de los esfuerzos en el trabajo estructural de la cubierta puede ser visualizada claramente mediante la combinación de dos mecanismos (Figura n.º 17):

- 1) Las fuerzas aplicadas a la zona central determinan un trabajo membranial reaccionando sobre el anillo de borde del sistema principal, constituido por un gran tubo soldado de 406 x 20 mm. Este anillo n.º 1, traccionado se incorpora al segundo mecanismo.
- 2) Las zonas periféricas reciben en su cordón del contorno interior superior, formado por el mismo anillo número 1, las acciones de la zona central, reaccionando como lo haría un conjunto de cuatro grandes vigas de gran canto solicitadas en su plano: fuertes tracciones en las barras del perímetro exterior, elemento principal constituido por dos tubos soldados de 508 x 25 mm. (anillos de 3 y 4) vinculados entre sí; compresiones en los anillos 1 y 2 superiores; y compresiones importantes en las barras diagonales extremas del sistema principal dispuestas en las esquinas, que reciben el equivalente al cortante de las citadas vigas.

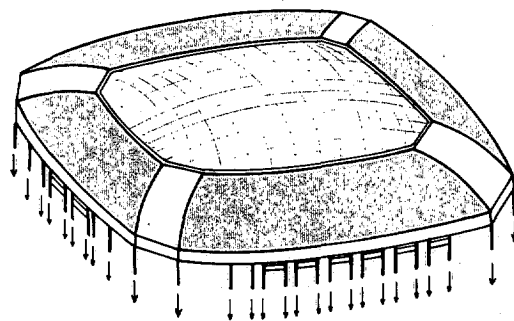
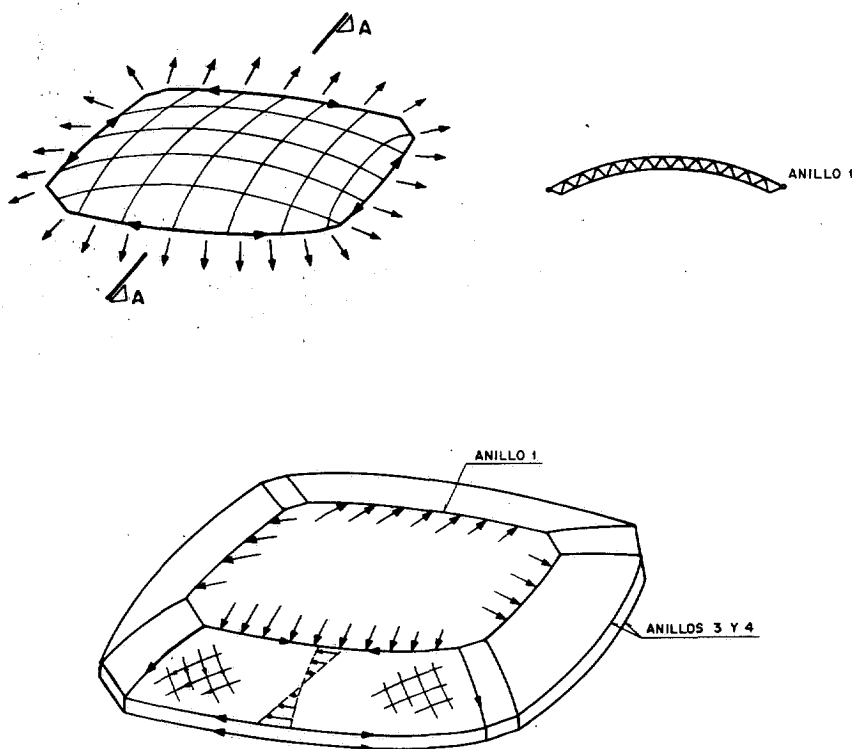
El anillo interior número 1 queda en conjunto comprimido por la mayor incidencia de las acciones del segundo mecanismo respecto al primero, al estar además presentes las acciones propias de

las zonas periféricas. La compatibilidad global del conjunto reajusta los esfuerzos en la cúpula central y transmite parte de las cargas a los soportes periféricos de los lados, pero con una marcada incidencia de las reacciones en los soportes de esquina. Reacciones que son puramente verticales frente a las acciones gravitatorias, debido al carácter del péndulo de los soportes, articulados en su base y en su coronación (Figura n.º 18).

La propia rigidez interna y autónoma de la gran cubierta permite resistir las acciones horizontales de viento y sismo por medio de mecanismos internos similares a los anteriores. Adoptando un doble juego de pórticos periféricos, situados en los cuatro lados del perímetro exterior de la cubierta, y obtenidos al unir rigidamente, mediante dinteles, dos a dos los soportes, se consigue transferir las resultantes de este grupo de acciones hasta la sustentación exterior en las estructuras de hormigón; actuando uno u otro conjunto de pórticos periféricos según la orientación de las solicitaciones (Figura n.º 19).

El proceso constructivo elegido incorpora una reflexión adicional a los conceptos anteriores, referente a la interacción entre la forma y la estructura, combinada con la seguridad durante la ejecución. En efecto, la realización de la cubierta mediante un proceso de elevación con configuración variable durante el proceso requiere una construcción con gran precisión geométrica de todos sus elementos, para permitir que funcione libremente la movilidad del conjunto y se logren las grandes dislocaciones de las rótulas provisionales y definitivas que conectan las diversas partes durante

Figuras 17 y 18.



el proceso. Esta precisión lleva aparejado un gran control de todos los elementos que, obviamente, se traduce en seguridad.

Pero aún más importante: cuando se ha completado la elevación y se han efectuado las uniones definitivas de todos los sistemas, la estructura está prácticamente acabada y con la mayor parte de sus acciones permanentes aplicadas. Al retirar lentamente el apoyo proporcionado por las torres de elevación, el sistema se pone en carga en forma completa pero supercontrolada. Cualquier defecto, error o vicio oculto de ejecución, caso de producirse, determinaría un inmediato reapoyo en el sistema de torres, permitiendo comprobar y reparar el eventual defecto, sin ningún tipo de incidencia. Es decir, se lleva a cabo una prueba de carga total de la estructura garan-

tizada a través de los apoyos levemente retirados.

El control y medición de las principales características tensionales y de los principales movimientos de la estructura, tanto en el inicio de la elevación, como en el proceso de descarga de gatos y retirada de torres, garantiza que el funcionamiento obtenido se ajusta al previsto.

Debe señalarse por otra parte, y ello ofrece también otra innegable garantía, que durante todo el proceso de elevación el sistema, mecanismo frente a las acciones verticales, mantiene una capacidad resistente semejante a la estructura cerrada frente a las fuerzas horizontales de viento y eventual sismo, sin necesidad de introducir elementos adicionales significativos.

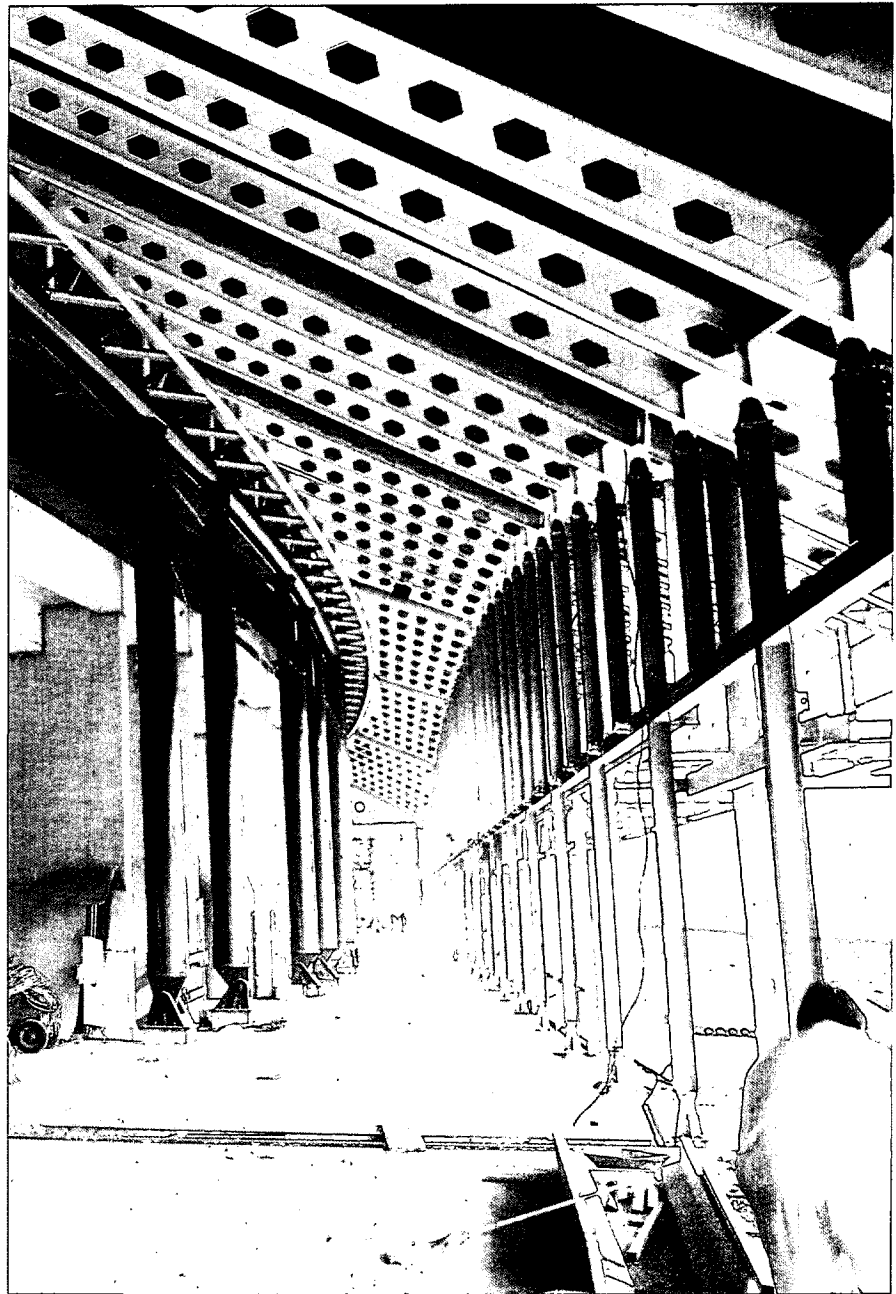
La gran interacción existente entre forma, estructura y proceso constructivo reflejado intensamente en el diseño, la tipología y la ejecución, se manifiesta de manera sensible en la estructura terminada a través de sutiles aspectos que confieren a la cubierta una sensación de gran energía.

Así la concavidad espacial existente entre la zona central y la periférica vista desde el interior, con el desvío de fuerzas que conlleva, determina una intensidad visual que no se produce en los sistemas continuos, reflejando de forma perceptible esa energía interior de la estructura, antes aludida; que se combina de manera muy intensa con la serenidad que la forma cupular ofrece. Esta dualidad estático-dinámica, esta relación tensión quietud nos retrotraen a los grandes principios del arte griego, y hace que esta energía de la quietud supercontenida inunde el espacio interior del Palau y le vincule con otras grandes obras de arte.

Las zonas periféricas de la cubierta se resuelven mediante estructuras asimismo pendulares, constituidas por dinteles en viga Boyd articulados al anillo n.º 4 de la cubierta principal a través de una celosía triangular, y soportes ligeros que recogen la fachada y se articulan también en su base, en la unión con la estructura de hormigón.

El fuerte cromatismo adoptado para la pintura de las vigas y de la cobertura interior de madera de estas zonas, contrasta con la blancura de la malla espacial destacando sus diferentes esquemas estructurales (*Fotografía n.º 20*).

Finalmente otra estructura, de cierto interés en sí, corresponde a las pasarelas de servicio o catwalk, constituidas por una serie de celosías tubulares espaciales triangulares, pero que deben pa-



Fotografía 20.

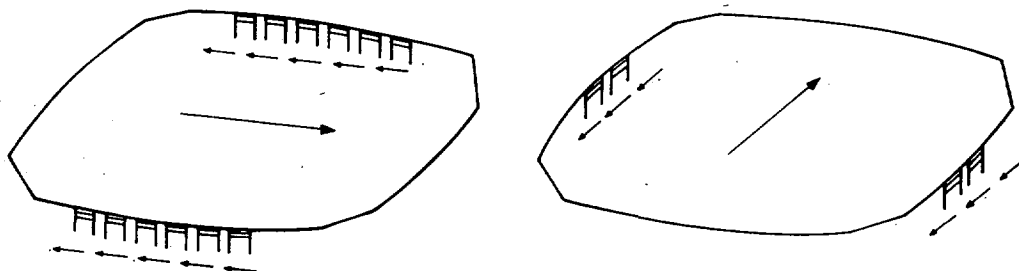
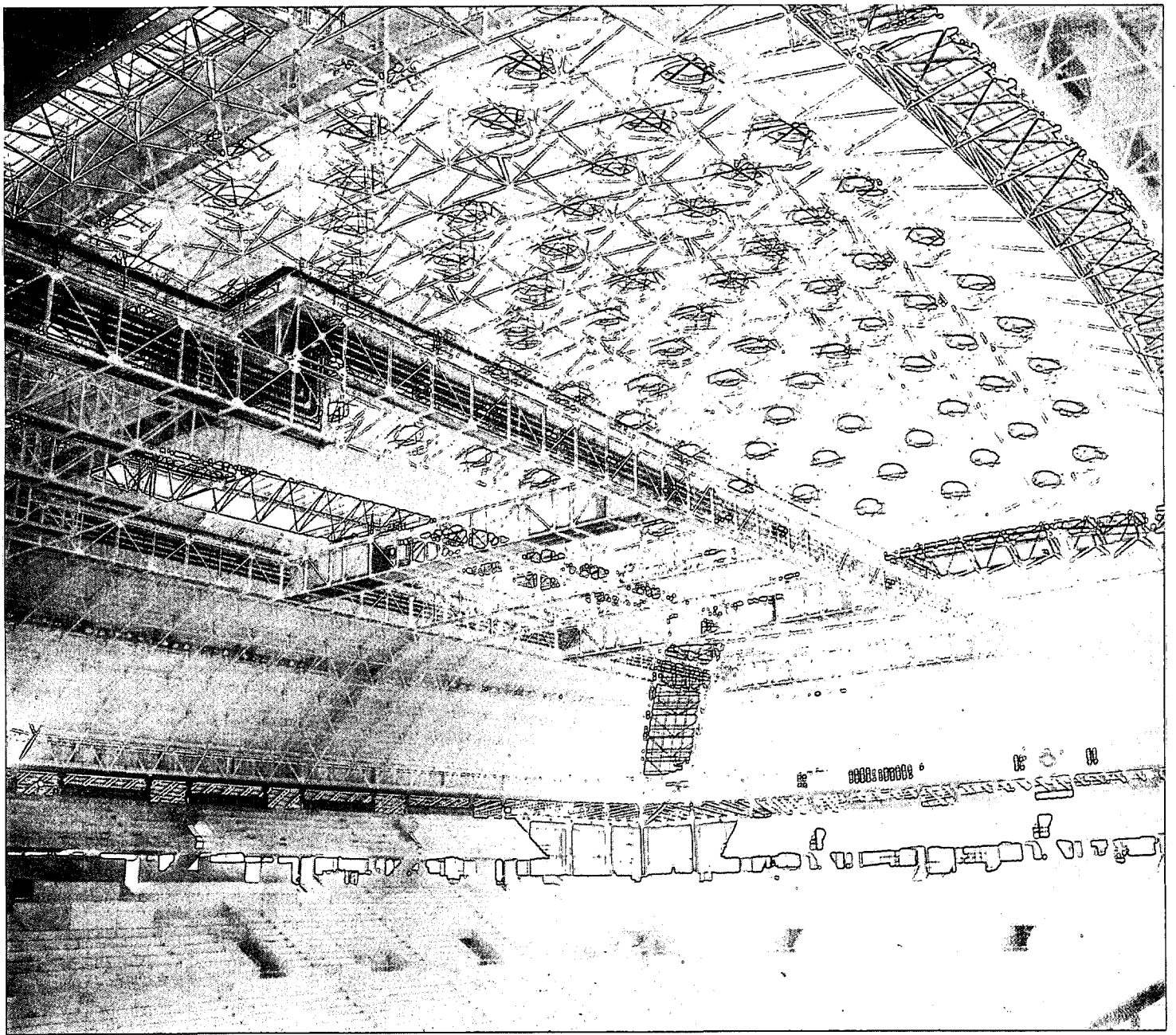


Figura 19.



Fotografía 21.

sar en los cruces a trabajar en forma de Vierendel para permitir los pasos y conexiones, suspendida de la cubierta principal por un gran conjunto de cables galvanizados. Su incidencia visual es relativamente importante en el conjunto (Fotografía n.º 27).

2. Análisis de la estructura de la cubierta principal

El estudio de las restantes estructuras del edificio, aunque incluyó una serie muy completa de análisis especiales de muy diferente tipo y debían tenerse en cuenta los aspectos relativos a las exi-

gencias de calidad y dimensiones muy estrictas, es tradicional y apenas requiere comentarios más allá de los derivados de las tipologías estructurales ya descritas.

La cubierta espacial, por el contrario, dadas sus características y dimensiones precisaba de un riguroso análisis en sus aspectos tanto estáticos como dinámicos, y tanto en las condiciones de estructura determinada como en las diversas fases de ejecución: montaje, elevación, desapeo, cosido y aplicación del resto de acciones.

El análisis inicial fue realizado por M. Kawaguchi, determinando las dimensiones iniciales de los elementos de la estructura y la respuesta de la misma a las diversas acciones.

Los valores de criterios de aplicación de las principales acciones fueron los siguientes:

Peso propio

Peso propio promedio (excluidos soportes) 72 kg/m.²
 Aunque su inclusión se efectúa directamente en cada elemento en función de sus dimensiones consideradas.

Carga muerta (Valores promedio)

- Acabados**
- Zona central 88 kg/m.²
(revestimiento de cinz; lucernarios; rastreles; varios)
- Franjas de lucernario 43 kg/m.²
(policarbonato; carpintería metálica; persianas; varios)
- Zona periférica 112 kg/m.²
(tejas; rastreles; varios)
- Lucernarios de esquina 55 kg/m.²
(policarbonato; carpintería metálica; persianas; varios)
- Instalaciones** (pasarelas servicio; turboventiladores; etc.)

Se sitúan lineal o puntualmente según su presencia y en total representan una carga de 335 t. equivalente idealmente a un promedio de 25 kg/m.².

Sobrecargas

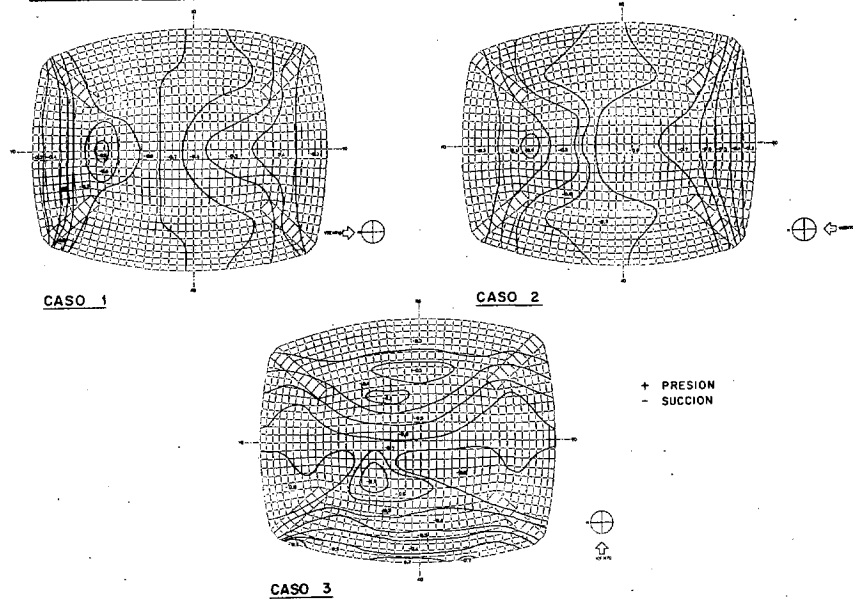
- Sobrecargas especiales**
- Ganchos de 1 t. con un total de 144 puntos que se sitúan repartidas en zonas. Carga equivalente 12 kg/m.²
- Nieve**
- Distribución uniforme. 40 kg/m.² aplicada sobre la totalidad; sobre media cubierta tanto longitudinal como transversal; o en cuartos aislados.

Viento
 Presión dinámica $q_w = 100 \text{ Kp/m.}^2$ y coeficientes eólicos definidos a partir de la Ref. 3 (Figura n.º 22) y un coeficiente eólico de presión interior +0,4.
 No se realizaron análisis en túnel de viento dada la similitud de la estructura con una cúpula tipo de curvatura suave, forma de la que se conoce perfectamente su respuesta eólica.

- Térmicas** $\Delta T = \pm 20^\circ \text{ C}$ respecto a la temperatura de cierre de ejecución
- Sísmicas** Coeficiente sísmico básico 0,05
 Peso total permanente 3.011 t
 $F_H \approx 150,6 \text{ t.}$

En la Figura n.º 23 se exponen las frecuencias y periodos propios, junto con las deformadas de los cuatro primeros modos de vibración, para el control dinámico del viento sobre la estructura. El

DISTRIBUCION DE COEFICIENTES EOLICOS EN LA SUPERFICIE DE LA CUBIERTA



periodo fundamental $T_1 = 0,963 \text{ seg.}$ se encuentra muy alejado del tiempo de paso requerido a través de la dimensión menor de la estructura 105 m., para la máxima velocidad del cálculo supuesta en la estructura terminada $40 \text{ m/seg.} = 144 \text{ Km/hora}$, que resulta $t = 2,625 \text{ seg.}$ y, por tanto, sin posibilidad de producirse resonancia en la estructura.

Por el contrario, en la estructura abierta en la fase de elevación se obtenía un periodo fundamental de 2.649 seg. muy similar al de paso del viento en las condiciones previsibles. Ello hizo recomendable establecer un dispositivo de fijación y bloqueo de la estructura en la fase de elevación

Figura 22.

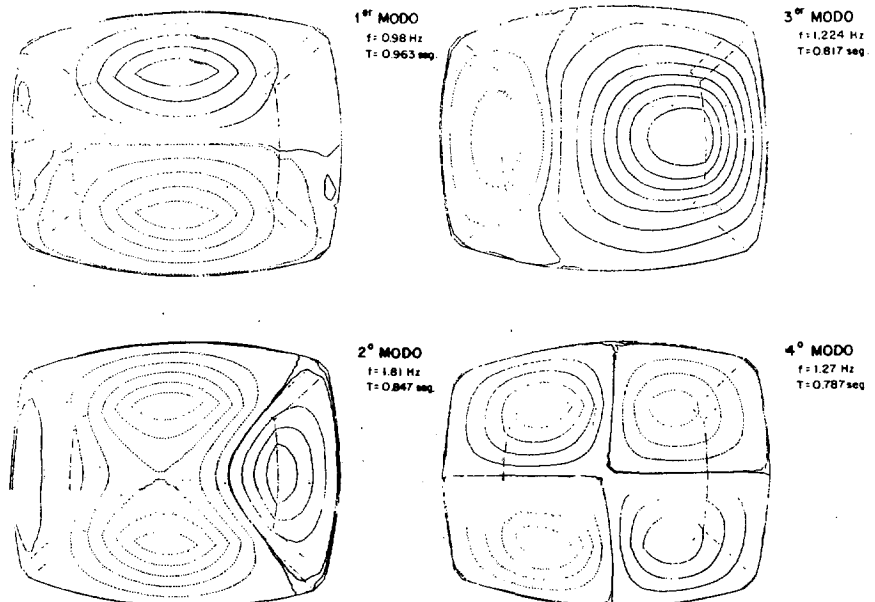


Figura 23.

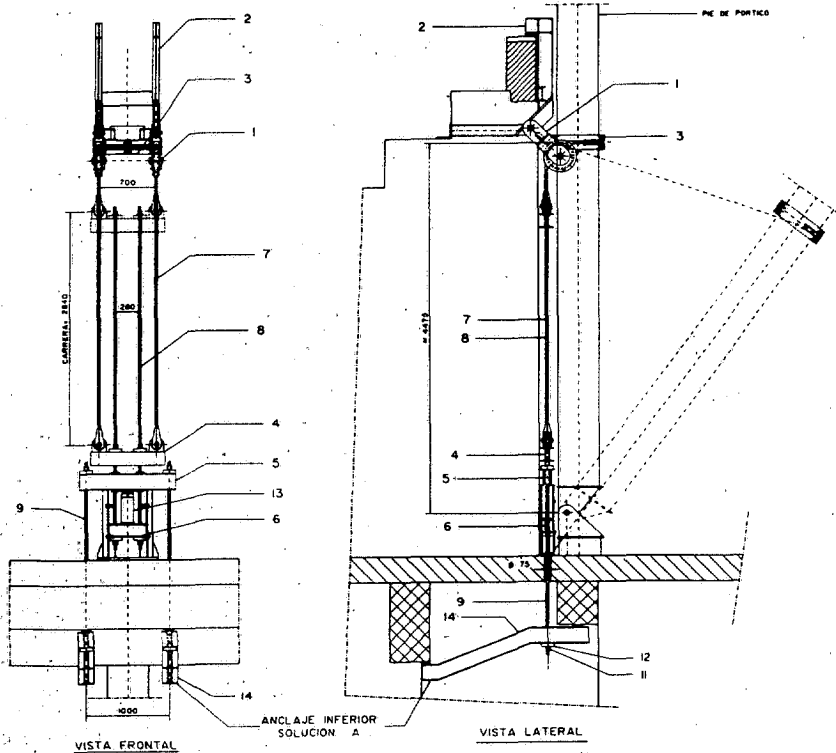
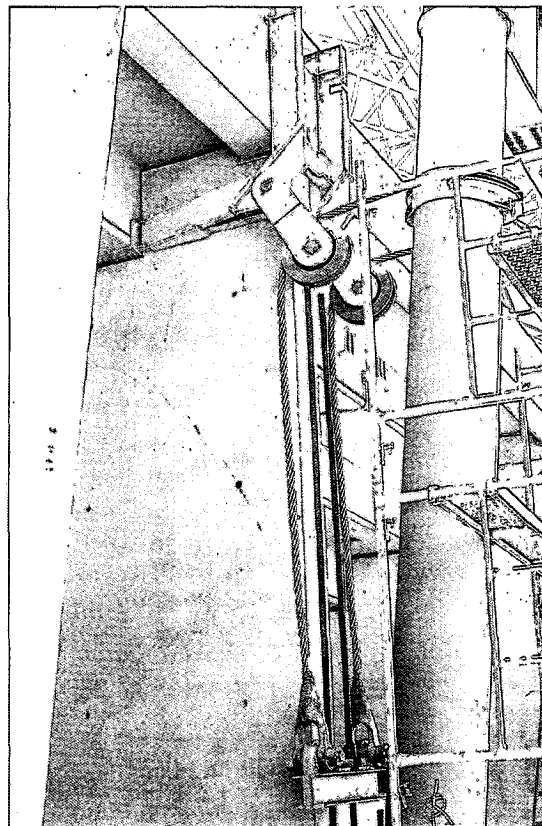


Figura 24.



Fotografía 25.

que, en caso necesario, pudiera activarse en muy breve tiempo, independientemente del ángulo en el que los soportes de la cubierta se encontraran.

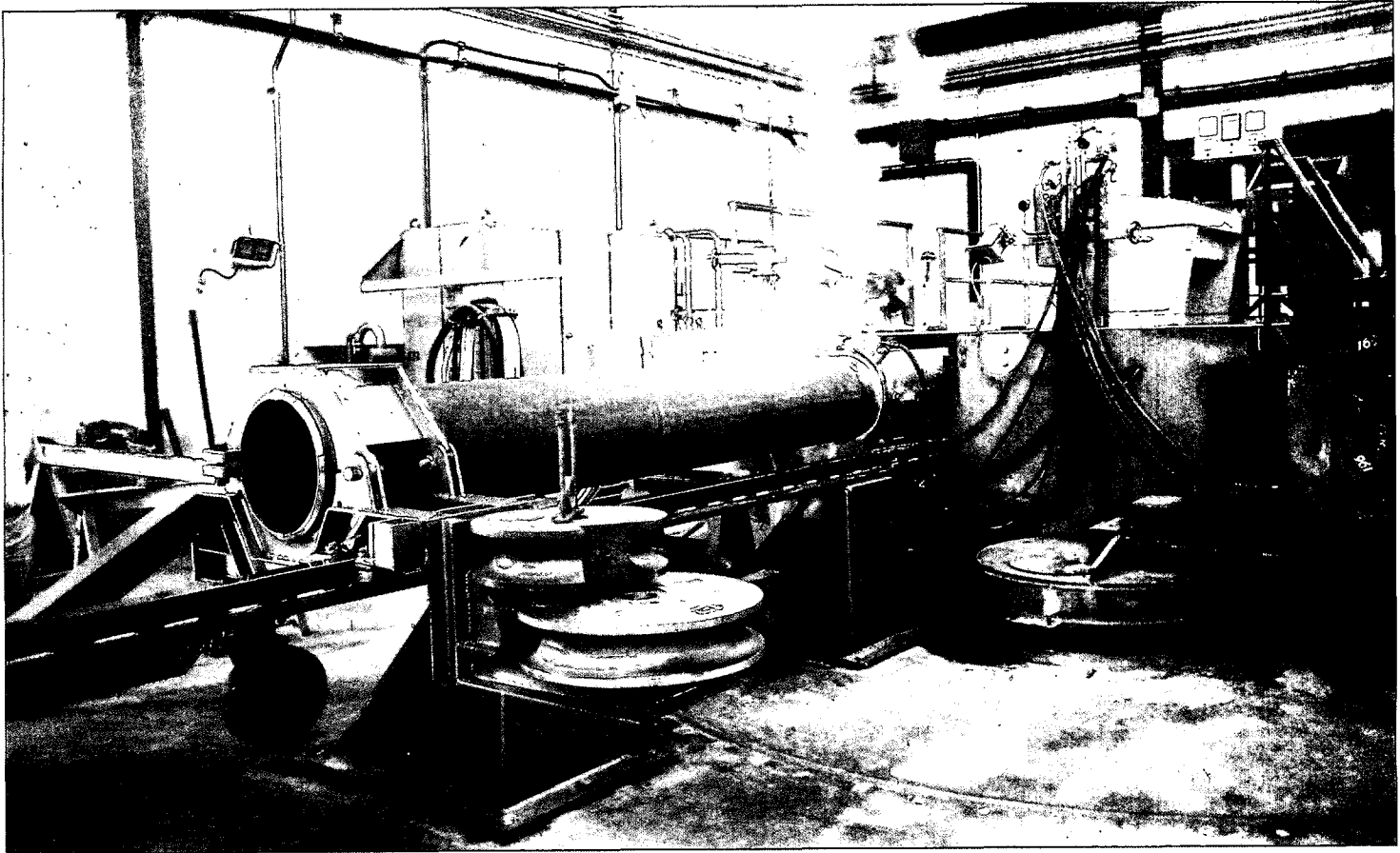
En la Figura n.º 24 y en la Fotografía n.º 25 se detallan estos elementos dispuestos exclusivamente en dirección transversal (8 unidades; 4 en cada lado longitudinal) ya que en la dirección longitudinal no se daban circunstancias problemáticas.

Este dispositivo tenía además la posibilidad de permitir efectuar ligeras correcciones de posicionamiento del conjunto de la cubierta para lograr la máxima verticalidad en las torres caso de presentarse desviaciones durante la elevación, o en los soportes definitivos al completar el cierre de la estructura. No fue necesario emplearlo al conseguirse en todo el proceso un desarrollo prácticamente nominal.

Se controlaron también las barras aisladas durante la fase abierta para evitar su resonancia modificándose las secciones de aquellas que se comprobaron ser susceptibles de presentar efectos vibratorios.

A partir de la solución de proyecto, el equipo español que llevó a cabo la Dirección de Obra y la ejecución a la cubierta realizaron nuevos análisis completos de la solución definitiva de la cubierta que incorporaba numerosas variantes y consideraciones directamente establecidas por dicho equipo y aceptadas por el consultor del proyecto. Estas variaciones fueron, principalmente:

- Modificación de la solución poligonal de los cuatro anillos principales por otra curva, que incluía flexiones en estas piezas, pero que mejoraba ampliamente el aspecto visual de la obra. La ejecución del incurvamiento de estos grandes tubos fue realizado mediante calentamiento local por inducción y guiado de gran precisión, por la firma TSE de Granollers (Fotografía n.º 26).
- Análogamente las vigas de los dinteles de los pórticos también se realizaron siguiendo la curvatura en planta de la alineación en que se sitúan.
- Modificación de la rigidización exterior prevista para los nudos de intersección de los anillos y diagonales principales y de las uniones mallas-anillos, adaptándola mediante diafragmas internos, lo cual requirió un cuidadoso control del proceso de ejecución y un tratamiento de distorsionado en horno previo a la inclusión de dichos nudos en el adecuado lugar de las zonas anulares.
- Análisis completo de la cubierta de fases reales de ejecución, elevación, cierre, cargas parciales y estructura completa incorporando las verdaderas condiciones de coacción de empotramientos rígidos y elásticos de las uniones entre mallas, anillos y rótulas; a resultados de los cuales se llevaron a cabo algunas modificaciones de barras y acartelamientos en los contactos



Fotografía 26.

de grupos de barras con las rótulas internas entre anillos 1 y 2, principalmente. La solución general no obstante se ajustaba suficientemente, como era de prever, a la solución ideal articulada completa, del proyecto inicial.

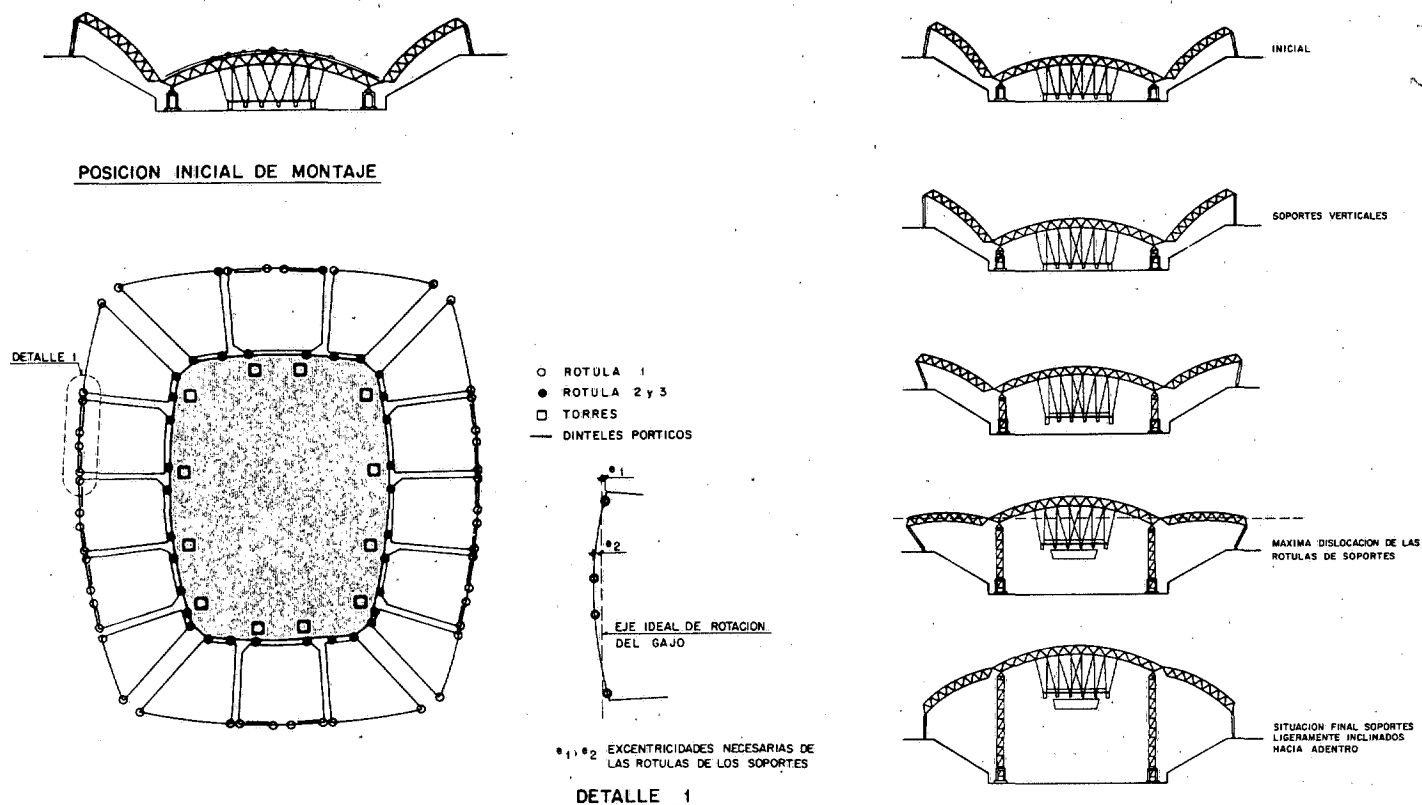
- Control e introducción de la flexibilidad de las uniones esféricas, decidido según criterios del industrial fabricante y controlados por ensayos adecuados de subconjuntos barras-esfera.

De esta forma, y en conjunción con el análisis riguroso de los sistemas y mecanismos de elevación, se contó en todo momento con una garantía del comportamiento de la estructura y unos valores de los movimientos de los nudos y deformaciones en las barras, que permitieron su sucesivo control a lo largo de las diversas etapas características del proceso constructivo.

3. Proceso de ejecución de la gran cubierta

El método PANTADOME de ejecución por elevación de la cubierta, se planteó para la estructura del Palau Sant Jordi en la forma siguiente:

- 1) La zona central de la cubierta se constituye en su totalidad en la posición más próxima posible al suelo, incorporando en esta situación todos los materiales de cobertura y acabados, así como las instalaciones, pasarelas, accesos, etc., que se sitúan en la cubierta o colgadas de la misma, en su posición definitiva (*Figura n.º 27*).
- 2) Las zonas laterales se construyen exclusivamente en su parte estructural y no totalmente completas, sino divididas en diversos sectores o gajos, separadas por estrechas franjas abiertas, normales a los anillos limitadores de esta zona. La unión entre la estructura central y los gajos perimetrales se efectúa a través de parejas de rótulas soldadas al anillo n.º 1 (*ver Figura n.º 16*) y dispuestas en nudos frontales de los gajos.
- 3) Los soportes periféricos pendulares, aislados o combinados en pórticos por parejas, según su pertenencia o no a un pórtico contraviento, se disponen suficientemente inclinados hacia el interior del recinto, de manera que los gajos de la zona toroidal quedan posicionados apoyados en ellos, a través de las rótulas superiores de los soportes, y en las rótulas del anillo número 1.



Figuras 27 y 28.

El sistema así formado constituye un mecanismo frente a las acciones verticales; por el contrario, frente a las acciones horizontales los pórticos, combinados con los gajos, ofrecen una capacidad resistente muy elevada, permitiendo resistir las posibles sollicitaciones de viento y sísmico.

Estas propiedades del sistema permiten, mediante la colocación de un conjunto de gatos en la parte inferior del anillo n.º 1, elevar la totalidad de la cubierta hasta su forma de estructura final, pasando por diversas fases que pueden seguirse en la Figura n.º 28, que van desde la posición ini-

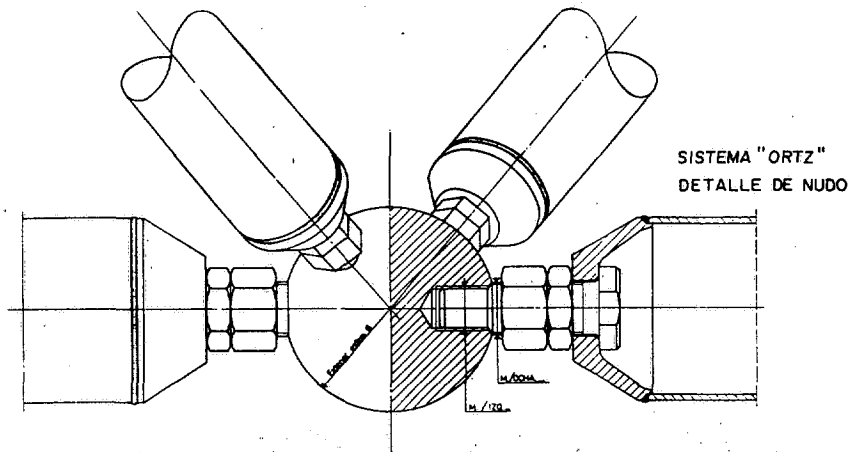
cial ya descrita, pasando por una intermedia con soportes verticales, hasta otra de máxima dislocación con los soportes fuertemente inclinados hacia afuera en el instante en que las rotulas números 1 y 2 se sitúan a una misma cota; momento a partir del cual los soportes comienzan a retornar hacia la vertical para quedar finalmente con una leve inclinación de nuevo hacia adentro.

En la posición final de elevación se procede a realizar la continuidad de los anillos 2, 3 y 4, la fijación de las rótulas n.º 1 y el cierre o cosido de las franjas entre gajos, instante en que se completa la estructura y puede procederse a la retirada gradual y paulatina de los gatos, con lo que las acciones sobre los mismos se incorporan como cargas a la estructura completa. Finalmente, la cobertura y acabados de las zonas laterales culminan la realización de la estructura.

Estas dos últimas fases de carga sobre la estructura completa provocan deformaciones elásticas de la misma que sitúan las cabezas de los soportes en su posición final vertical ideal bajo las acciones permanentes.

La ejecución de la estructura de cubierta mediante este método fue sacada a concurso y adjudicada, en litigio con empresas japonesas y alemanas, a la agrupación temporal española DRAGONA, constituida por DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES como contratista general y realizador de montaje, ensamble y ejecución; y por ORONA, como empresa realizadora de los elementos estructurales de barras y esferas, realizados conforme al sistema patentado ORTZ (Figura n.º 29).

Figura 29.



La realización de una estructura de esta envergadura y con la peculiaridad del sistema constructivo previsto requiere por parte de sus constructores una capacidad técnica muy elevada que se centra básicamente en los aspectos de:

- Construcción de elementos con alta automatización de la producción, dada la irregular forma de la estructura que exige longitudes de barras, ángulos y esferas completamente diferentes en todos sus puntos;
- Máximo control de calidad, para lograr el cumplimiento de las tolerancias de ejecución previstas;
- Análisis sistemático de todos los estados intermedios de ejecución, motivados por los despieces de montaje, variaciones de sustentación, adaptación de barras y nudos reales; etc. aplicables a los diversos modelos de apoyo y evolutivos de la estructura en su proceso de ejecución;
- Importantes equipos de diseño para proyectar una perfecta realización del sistema de elevación y garantizar que durante este proceso las tolerancias de movimientos entre puntos de sustentación se mantengan dentro de los estrictos márgenes requeridos;
- Instrumentación y control de seguimiento de diferentes parámetros de movimientos y deformaciones para mantener la garantía de respuesta de la estructura en todas sus fases: intermedias y finales.

Como importante alternativa del proyecto de elevación presentado por DRAGONA puede destacarse la reducción del número de torres de elevación previsto en proyecto de 24, a la mitad, mediante la disposición de balancines en coronación de cada una de las torres, para mantener el número de apoyos del conjunto en 24, de manera que las reacciones locales no superaban la capacidad de las barras de la estructura. Ello hizo necesario la modificación del sistema de cimentación previsto, así como nuevos cálculos de comprobación de la estructura en los modelos de elevación y finales por cuanto las reacciones se integran de forma diferente a las supuestas en proyecto.

El proyecto general de elevación comprendió las siguientes partes principales:

A. Cimentaciones

Se realizaron zapatas armadas de dimensiones tipo 4,50 x 3 x 0,50 m. para lograr repartos medios de 0,9 t/m², admisibles en la losa de pista, y/o acciones locales adicionales sobre las vigas riostra de la misma.

B. Torres de elevación (Figura n.º 30)

Este sistema, junto con los gatos elevadores, constituyen la clave del proceso constructivo. El sistema se compone de las siguientes unidades:

■ Fustes

Se diseñó un tipo de elemento de torre especial, formado por cuatro paneles standard tipo ACROW de 3 x 1,50 m. unidos mediante angulares de esquina, formando un cuadrado en planta de 2 x 2 m., con elementos portantes en las ocho esquinas de las cabezas de los paneles.

■ Marcos de elevación

Elemento móvil que abraza el módulo inferior de torre, empestillándose al mismo en las ocho cabezas resistentes.

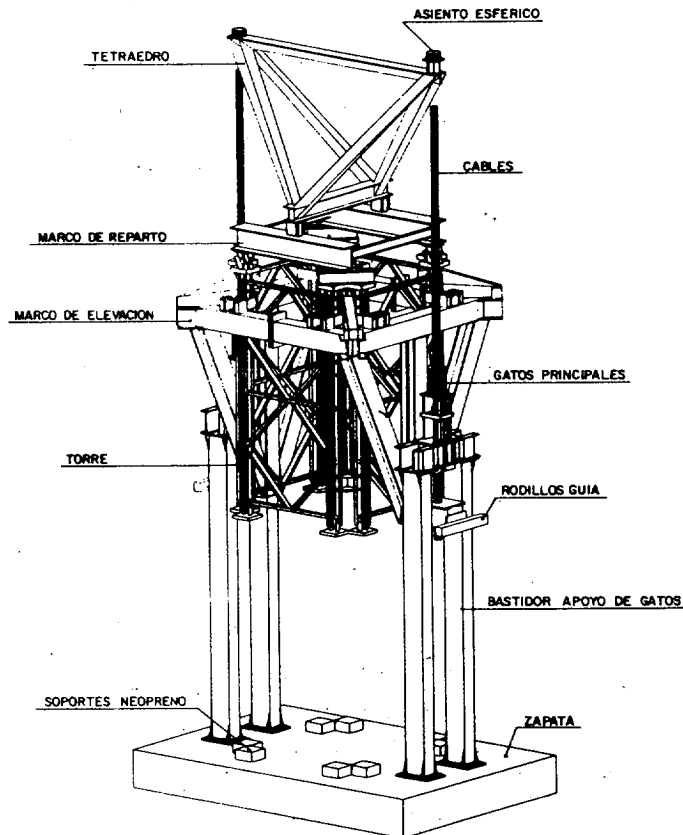


Figura 30.

FINAL FASE DE ELEVACION DE UN MODULO DE TORRE

- A Proyecto de cimentaciones, para las reacciones de 80 t. transmitidas por cada torre, aproximadamente.
- B Proyecto de torres de elevación.
- C Equipos hidráulicos y sistema de control, y que se describen seguidamente.

La clave del proceso constructivo reside en el sistema de torres de elevación y de los gatos elevadores.

Se completa con dos piezas en V verticales que en su vértice inferior reciben el anclaje de los cables de elevación.

El marco se eleva arrastrando al conjunto de la torre hasta una altura en la que se puede introducir bajo dicha torre, el nuevo módulo de 3 m. de altura que se une al tramo anterior superior. Con un ligero descenso del conjunto, la torre se apoya en la zapata de cimentación, a través de unos soportes de neopreno dispuestos provisionalmente en el extremo inferior. Seguidamente, el marco de elevación se desciende, mediante diferenciales de cadena, a la posición inicial inferior para iniciar un nuevo ciclo.

□ Bastidores de apoyo de gatos

Pórticos estrechos de 5 m. de altura que soportan en su dintel superior los gatos, dejando pasar los cables de suspensión en su interior. Mediante oportunos rodillos guía revestidos de neopreno permiten regular el proceso de guiado vertical y horizontal, permitiendo los pequeños giros requeridos en base de torres.

□ Balancín

Sistema dispuesto en la parte superior de la torre, con forma de tetraedro, apoyado sobre un marco de reparto que transfiere a las esquinas de la torre la carga transmitida por la cubierta en los extremos de la arista superior del tetraedro, que cuenta con dos apoyos esféricos debidamente nivelados para recibir las esferas correspondientes de los nudos de la cubierta.

El esquema de funcionamiento de las torres, de acuerdo con lo expuesto exige una condición de biarticulación en cabeza y en base en las fases de elevación y reposo. El giro de cabeza se garantiza en una dirección mediante el balancín y los apoyos esféricos; en la ortogonal mediante la inclusión, entre cada gato de elevación y el bastidor,

de una pareja de gatos hidráulicos de cada torre, en circuito cerrado, que hacen el efecto de colchón de aceite, compensando la diferencia de cargas entre los dos gatos de elevación, y manteniendo con el giro apropiado los requerimientos de la estructura de cubierta sin variar la igualdad de longitud de los cables de tiro.

Los giros en las bases de torres, necesarios para compatibilizar los movimientos de la estructura en cabeza de torre, en las fases de viento, sin provocar empotramientos en las mismas, se consiguen a base de deformación de los neoprenos de soporte en las fases de estructura apoyada, y con ligeros desplazamientos de los rodillos guía en las fases de elevación, por deformación de los neoprenos de revestimiento de los mismos. En realidad se crean empotramientos de pequeña entidad perfectamente aceptables por las torres y cimentaciones.

C. Equipos hidráulicos y de control

Debían mantener la elevación de la cubierta sin movimientos diferenciales entre los puntos de apoyo superiores a 30 mm.

Se eligieron gatos huecos, de la firma suiza VSL que integraban el sistema de control de nivel en el propio sistema hidráulico de elevación, de manera que aquél comandase la operación.

Los gatos permiten el paso de un cable de siete torones de 0,6" que se puede anclar en dos puntos: uno superior y otro inferior al gato.

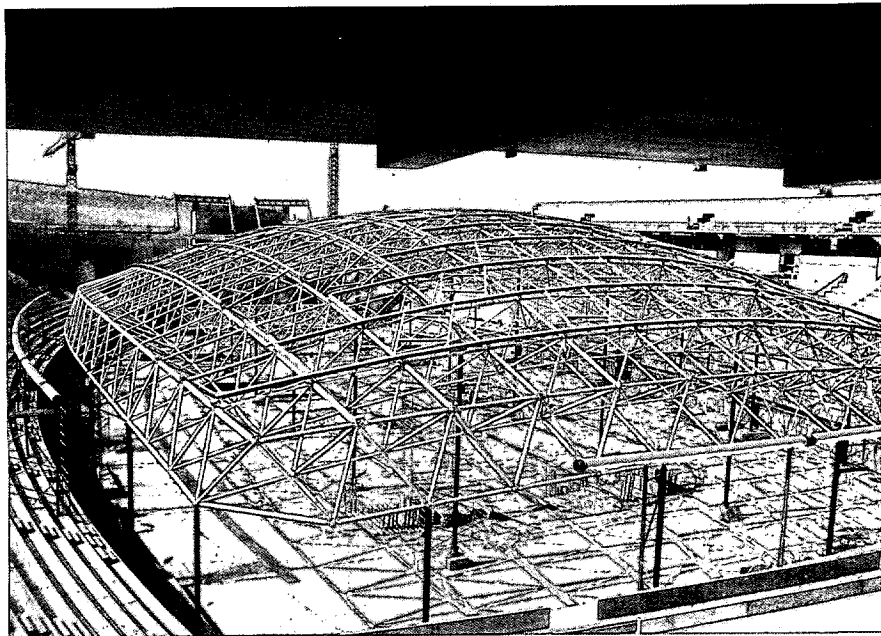
Cuando el pistón del gato avanza, el cable se fija en el anclaje superior y se produce la elevación del conjunto; cuando se termina la carrera del émbolo, 12 a 14 cm., se inicia la retracción del mismo, desanclándose los cables del anclaje superior y anclándose automáticamente en el inferior por arrastre de las cuñas. Este sistema confiere una gran seguridad a la operación, ya que cualquier fallo del sistema hidráulico que implique un descenso del émbolo fija automáticamente la carga en el anclaje inferior, con un descenso parásito pequeño del conjunto, debido al arrastre de cuñas, del orden de 10 mm. máximo.

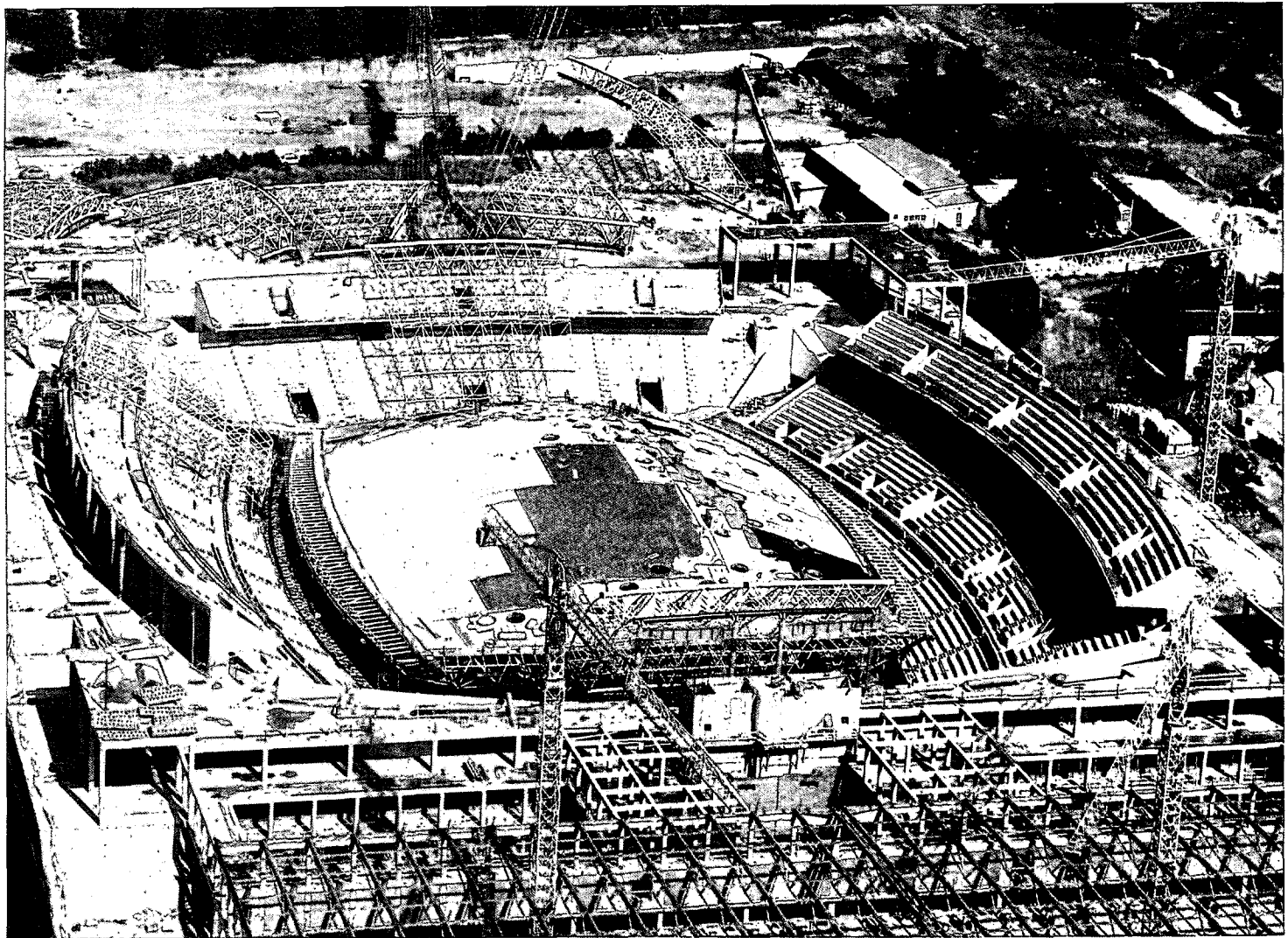
La igualdad de caudal a cada torre se controlaba mediante seis grupos motobomba tarados, con partidador de caudal para garantizar un 50 % a cada una de las torres suministradas por cada grupo.

La precisión en el control de niveles se consigue mediante un sistema de alambres tensos verticales, fijados a la cubierta y arrollados a una rueda 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 han alcanzado el escalón de 20 mm. correspondiente no se inicia el siguiente, lo cual mantiene la garantía de niveles en los márgenes citados.

Todo el comando de esta operación se localiza en un centro de control que permite visualizar tanto las posiciones como los ascensores de la cubierta en cada torre mediante indicadores luminosos. Una válvula de seguridad en cada circuito

Fotografía 31.





Fotografía 32.

hace que el sistema se detenga automáticamente si la presión sube por encima de una prefijada con anterioridad.

■ Proceso de elevación

La elevación de la cubierta fue ejecutada entre los días 21 de noviembre y 1 de diciembre de 1988, izándose en total 28,63 m. correspondientes a 9 módulos tipo de torre y un semimódulo.

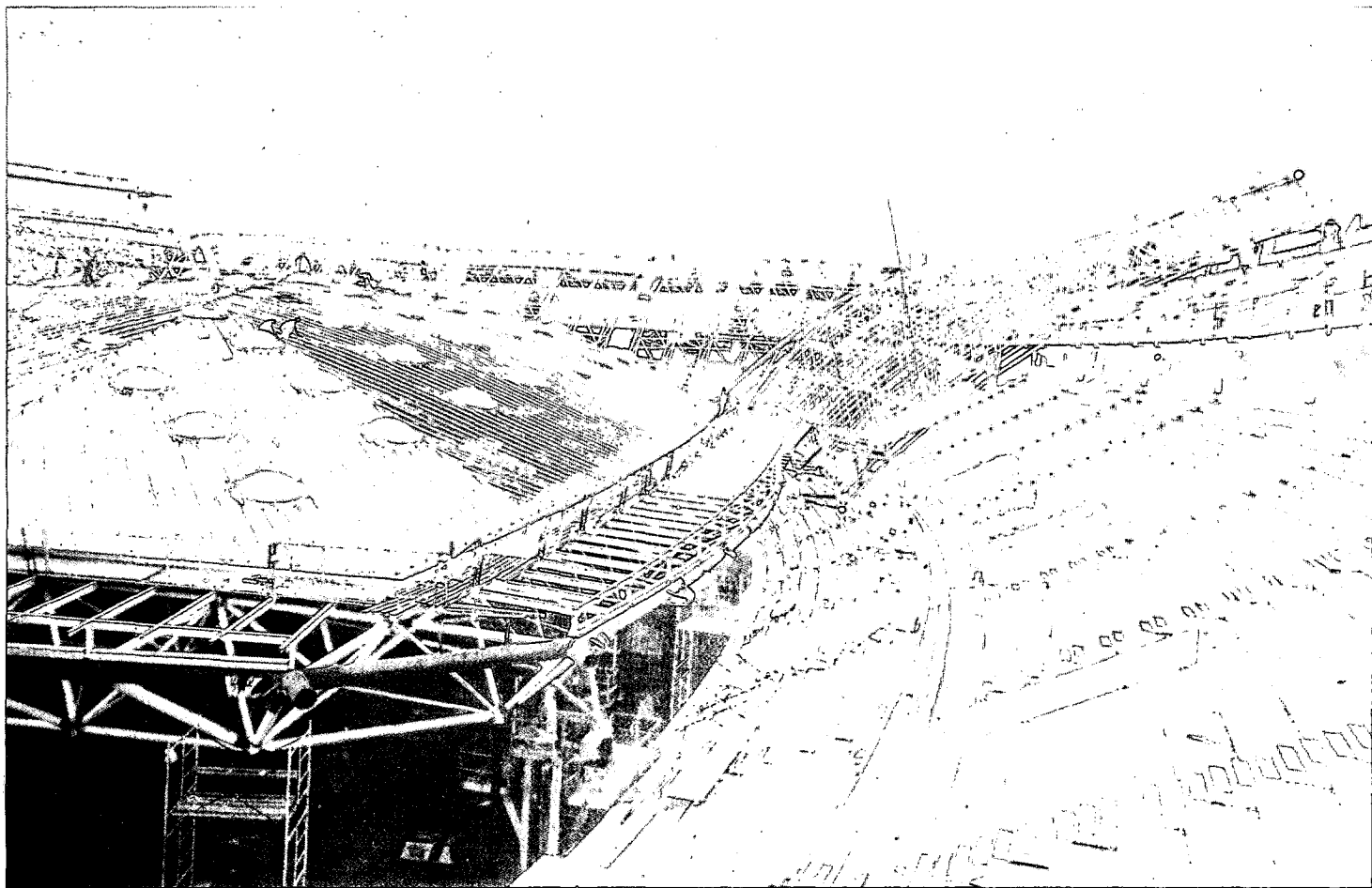
Todo el plan de realizaciones en cuanto a tiempos previstos, personal, operaciones, visitas, controles, etc. fue respetado rigurosamente, siguiéndose con extremado vigor todos los puntos del Manual de Operaciones que previamente se había establecido de manera muy precisa, dado el gran número de personas y operaciones que debían concentrarse y la presencia casi continuada de visitas exteriores que requería una ordenación muy cuidadosa de todo el dispositivo y secuencias.

El primer día se efectuaron sólo pruebas de arranque y control de todos los sistemas de aparatos, para a partir del segundo día mantener los ritmos de un módulo diario, susceptible de duplicarse en caso necesario si las condiciones am-

bientales hubieran retrasado el proceso en alguna de las fases. Solamente el último día, durante la mañana, se experimentaron vientos de 35 Km/h. con ráfagas muy sistemáticas que alcanzaban los 70 Km/h., por lo que de acuerdo con el Pliego de Condiciones de la elevación, que indicaba suspensión de las operaciones con vientos superiores a los 40 Km/h., se postergó la elevación final hasta la tarde de ese día una vez que el viento amainó.

Al final del segundo día se puso en carga la gran estructura de pasarela de 60 x 22 m. en planta y peso de unas 83 t., incluidas las instalaciones, que va suspendida de la cubierta por medio de cables y que había de elevarse con ella. Los controles de reacciones, movimientos y deformaciones determinaron con total precisión los valores producidos por esta incorporación.

No se produjo ningún tipo de imprevistos durante el conjunto de la elevación, llevándose ésta en total ajuste con los valores previstos. La única incidencia observada se produjo en una de las rótulas n.º 1, en la que se observó un ligero rozamiento lateral entre los cuerpos fijo y móvil, comprobándose mediante un teodolito que una de las dos arandelas de teflón que separaban ambos



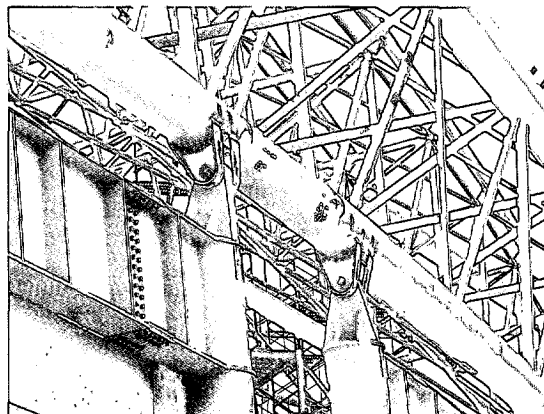
Fotografía 33.

cuerpos se había desprendido o no se había colocado, por lo que la angulación en una de las fases máximas provocó este ligero rozamiento.

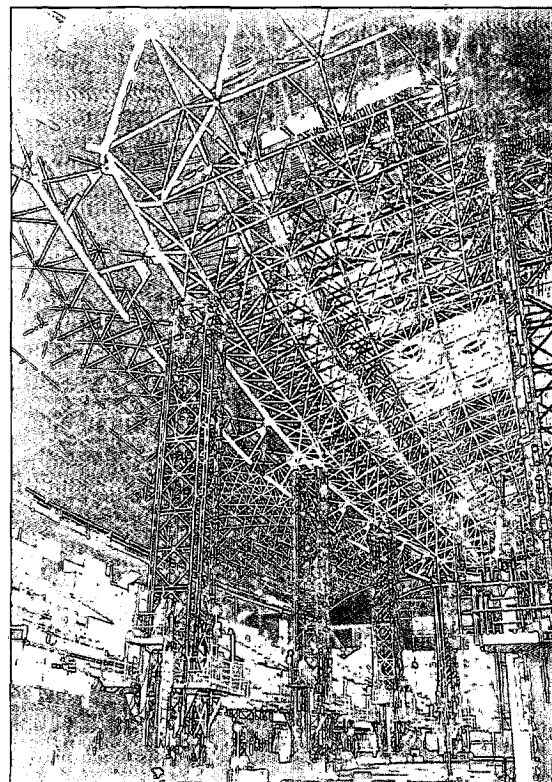
En las *Fotografías n.ºs 31 a 36* se pueden ver algunos aspectos del proceso general de ejecución de la cubierta y la posterior elevación.

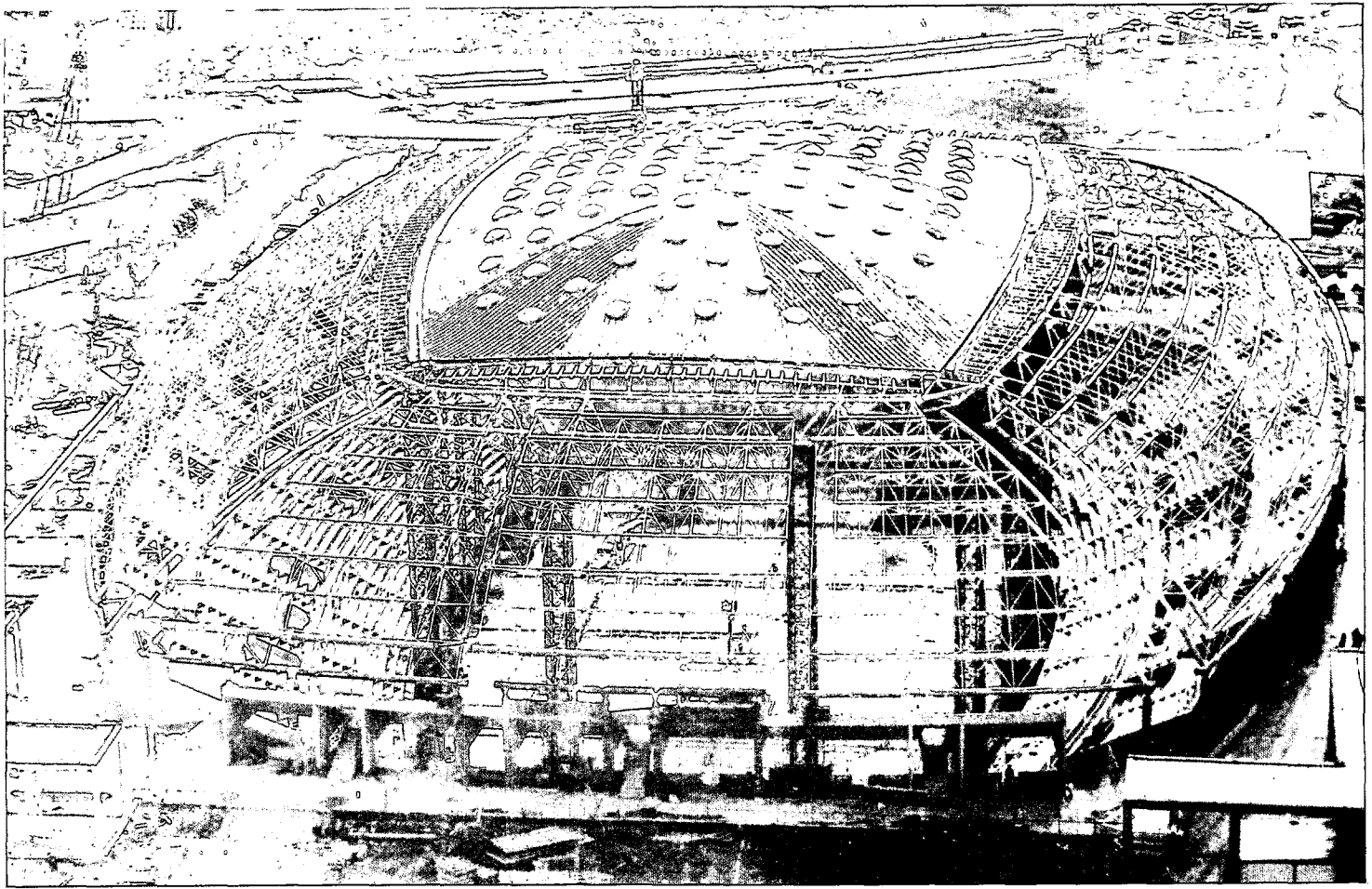
■ Proceso de cierre y cosido

En la situación alcanzada por la elevación se procedió de inmediato al cierre de los anillos principales mediante la introducción de los tramos necesarios (*Fotografía n.º 37*).

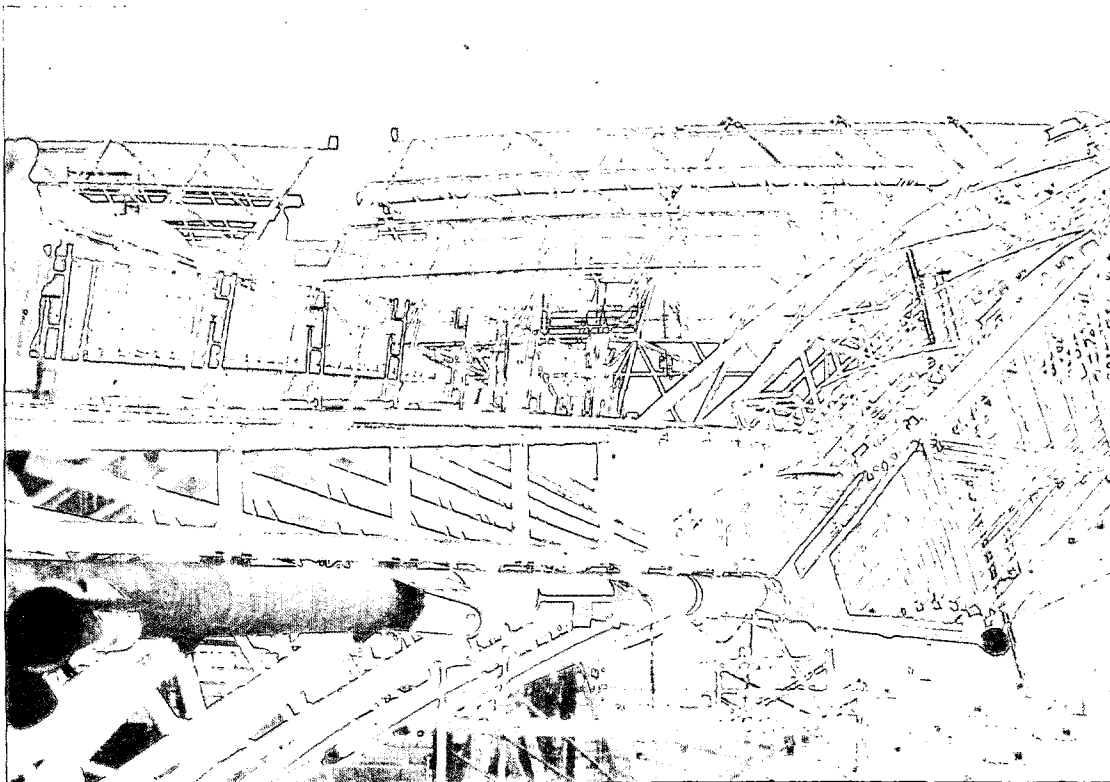


Fotografías 34 y 35.

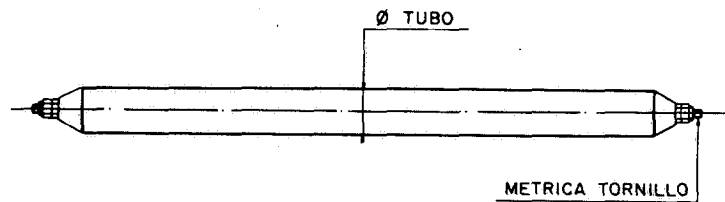




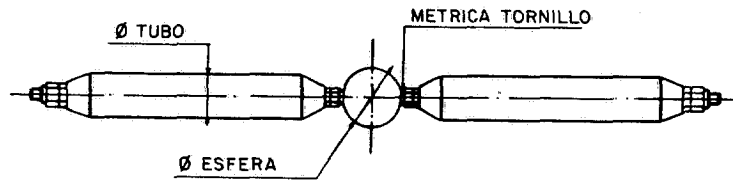
Fotografías 36 y 37.



ENSAYOS SOBRE CONJUNTOS



CONJUNTO TIPO 1



CONJUNTO TIPO 2

Asimismo se completó el cosido entre gajos de la cubierta incorporando las barras que completan la misma. También se procedió a continuar la ejecución del cuerpo de chimeneas que no podía rematarse hasta tanto los soportes de la cúpula no estuvieran prácticamente en posición vertical.

Por criterios de plazo se planteó la posibilidad de llevar a cabo la cobertura de las zonas periféricas no en la estructura desapeada, sino de manera gradual sobre la estructura apeada, en las zonas en las que se iban rematando las operaciones de cierre necesarias previas al desapeo.

Se llevó a cabo para ello un estudio de las posibilidades del sistema de torres y sus cimentaciones, junto con el análisis de la cubierta en las diferentes fases intermedias de esta circunstancia, llegándose a la conclusión de poder incorporarse todo el sistema de sustentación de las tejas cerámicas que forman el acabado final de la zona toroidal de la gran cubierta; de manera que al finalizar esta operación y producirse el desapeo tan solo sería necesario colocar las antedichas piezas cerámicas.

Operación de desapeo

Durante los días 20 y 21 de junio de 1989 se llevó a cabo la operación de desapeo, realizada de forma gradual y progresiva mediante los gatos de compensación de carga y retirada de las chapas de recalce incluidas en los suplementos dispuestos en la fase final de la elevación, puesto que los gatos principales habían sido retirados inmediatamente después de finalizar la elevación.

El proceso se ajustó de manera suficientemente precisa a lo previsto, tal como puede seguirse en el apartado descriptivo del control de la obra.

Seguidamente se procedió a completar la cobertura con la colocación de la teja cerámica, a la vez que comenzaban las operaciones de acoplamiento al anillo principal exterior de la estructura de la cubierta periférica ondulada.

4. Control del proceso de ejecución de la cubierta y consideraciones finales Resultados y conclusiones

El control y seguimiento de todo el proceso constructivo fue extremadamente minucioso y extenso, tanto en los aspectos relativos a los controles de recepción y calidad de materiales como a los más amplios de ejecución de elementos y conjuntos; geometría y tolerancias de ensamblaje y montaje; prueba de mecanismos y dispositivos de elevación; seguimiento y medición de parámetros ambientales y los relativos a los movimientos, deformaciones y reacciones de la estructura en sus diversas condiciones de montaje y maniobras, etcétera.

Los aspectos más notables de este gran programa de control fueron los siguientes:

- Ensayos no destructivos radiográficos y ultrasónicos de las uniones casquillo-tubos.
- Control de deshidrogenación en baño de sílicona de los tornillos en su proceso de cincado, para garantizarles frente a eventuales roturas frágiles.
- Ensayos hasta rotura de uniones tornillo-esfera con obtención de diagramas de deformación.
- Ensayos a rotura de conjuntos tipo 1 (formados por un tubo y sus tornillos y casquillos extremos) y tipo 2 (dos tubos y una esfera intercalada) (Figura n.º 38) con obtención de diagramas cargas-alargamientos para establecer la flexibilidad ideal del sistema de uniones.
- Control de los pares de apretadura de los ensamblajes tubo-esfera en obra.

Todo el control y seguimiento del proceso se trataba, en tiempo real, en un centro de medidas que permitía conocer, instantáneamente, el estado de cualquier parámetro.

- Controles radiográficos a doble pared de todas las uniones de los anillos principales.
- Instrumentación y control exhaustivo de las diferentes operaciones de montaje de zona central; desapeo de este sobre el anillo 1 y las torres; elevación de cúpula; suspensión del sistema de pasarelas; desapeo de la estructura cerrada; en los que se incorporaron los siguientes controles:

Geométricos y de movimientos

- Control de movimientos horizontales en todas las cabezas de las torres de elevación y control de puntería sobre 12 esferas de la cúpula mediante teodolitos informáticos.
- Control de giros en 6 soportes durante todo el proceso, mediante clinómetros Shaewitz.
- Desplazamientos en cabeza de estos mismos soportes, mediante flexímetros de 0,01 mm.

Deformaciones

- Disposición de 3 bandas extensométricas situadas a 120° en el centro de 16 barras elegidas adecuadamente (7 en capa inferior y 9 en superior).
- Análogamente en 4 soportes de los controlados en sus movimientos.

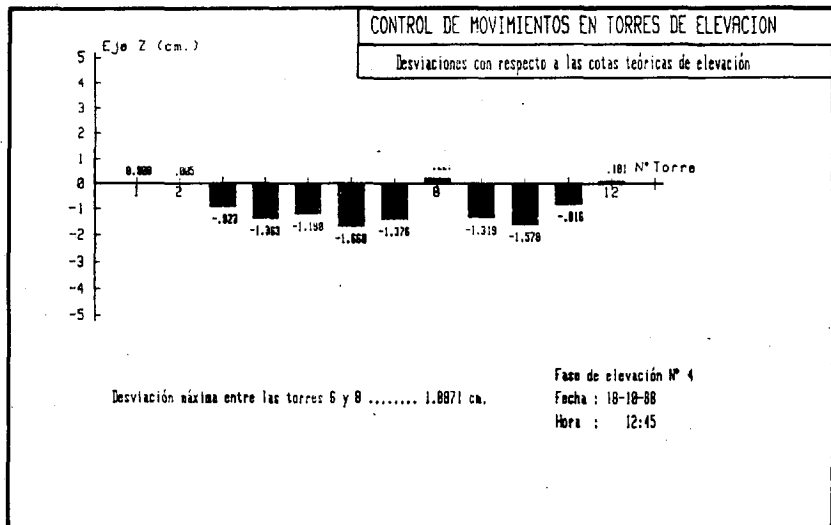
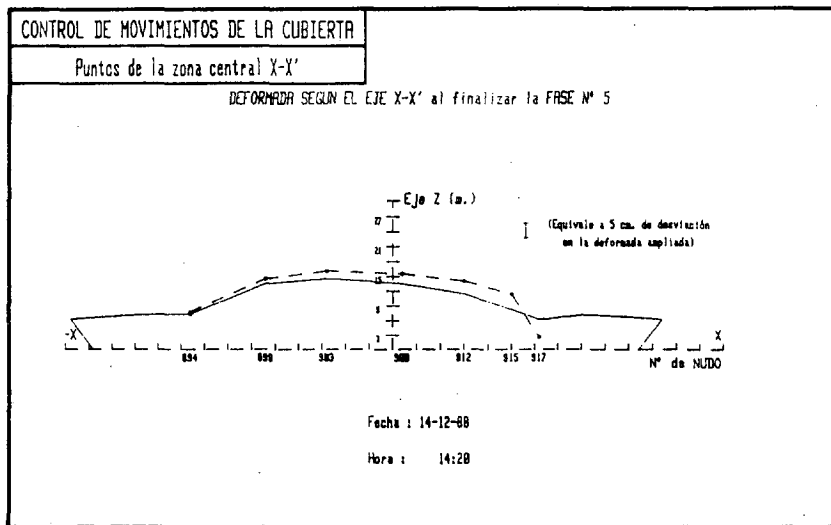
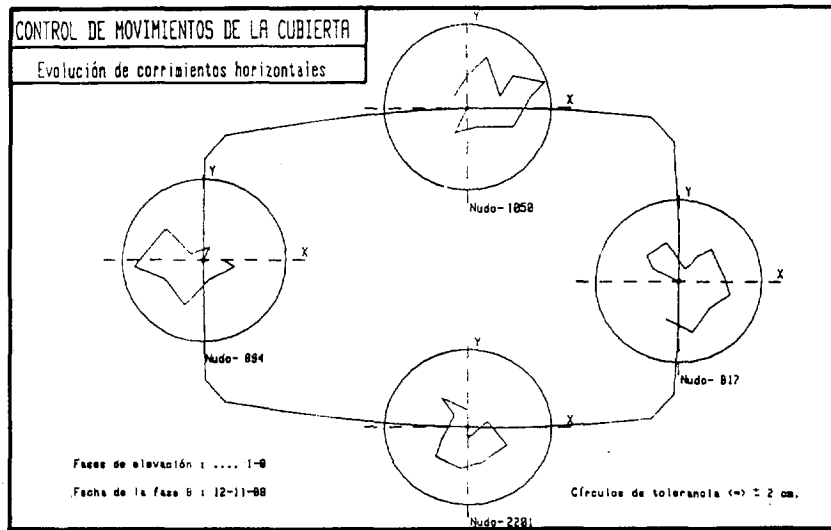
Climáticos

- Control de temperatura mediante termopares en las barras instrumentadas para controlar la deformación, considerando la incidencia de este factor.
- Control de temperatura ambiental con cuatro sensores análogos a los situados en las barras.
- Termómetro digital de termopar para control de los sensores anteriores.
- Control de viento por anemómetro y veleta con avisos luminosos y sonoros durante las fases de ejecución.

Reacciones en torres

- Mediante tríos de bandas extensométricas situadas en el tirante del balancín.

Todo este conjunto de medidas, junto con las adicionales de referencias fijas de control global, se trataba en tiempo real en un Centro de medidas que permitía conocer de manera instantánea el estado de cualquier parámetro durante los procesos, señalando además de manera expresa e inmediata si alguna medida superaba los valores de tolerancias previstos, tanto en valores absolutos, como en relativos en el caso de los asientos en las torres.



CONTROLES DURANTE LA ELEVACION

Figura 39.

En la *Figura n.º 39* se aprecian algunos de los resultados que este control iba ofreciendo durante las maniobras de elevación.

Resultados y conclusiones

Los ensayos realizados sobre los diversos tipos de conjuntos determinaron un valor de la flexibilidad adicional incorporada por las uniones atornilladas del sistema que, en valor promedio, representaba un 15 % superior al ideal de la barra entre nudos puntuales.

El control defromacional medido durante el desapeo de la zona central de la cubierta montada inicialmente a través de puntales en el suelo y transferida en dicho instante el anillo n.º 1, determinó valores ligeramente inferiores (del orden de 6 % como media en x, y, z) a los calculados con la condición antedicha, por lo que se decidió mantenerlo para el resto de los cálculos de control; sobre todo por la circunstancia adicional de que los movimientos verticales z eran muy coincidentes, mientras que los horizontales x e y eran algo más erráticos. Esta condición se plasmó mediante el criterio de adoptar un módulo de elasticidad virtual $E_{SV} = E_S/1,15 \approx 1.825.000 \text{ Kp/cm.}^2$ para la estructura.

El proceso de elevación de la cúpula, al ser prácticamente cinemático, con la excepción de la incorporación el segundo día de las cargas de la pasarela de servicio o catwalk evaluadas en unas 83 t., permitía tan solo comprobar el control de movimientos y las eventuales respuestas ante el viento y las variaciones térmicas. No se observaron anomalías de ningún tipo y el incremento de reacciones producido por la incorporación de la pasarela fue plenamente coincidente.

En la operación de desapeo, que corresponde al instante crítico de la entrada en carga propiamente dicha de la cubierta como elemento resistente global, además de servir de control y garan-

tía de la propia secuencia las medidas obtenidas —al reactivarse seis meses después de todos los sistemas de medida, con un control inicial previo— sí permiten establecer unas conclusiones adecuadas.

Los principales resultados obtenidos fueron los siguientes:

	Valor previsto	Valor medido	(%)
Descenso máximo de la torre n.º 10 (mm)	150	137	91
Descenso promedio del conjunto de torres (mm)	116	102	88
Desplome en cabezas de soportes (mm)			
Valor medio en lado Norte	38	27	
Valor medio en lado Sur	25	51	
Valor medio en lado Este	30	42	
Valor medio en lado Oeste	34	42	

y restando estos valores de los desplomes existentes al final de la izada se obtienen los:

Movimientos en los bordes de la cubierta (mm)			
Lado Norte	48	56	117
Lado Sur	67	40	60
Lado Este	88	76	86
Lado Oeste	88	80	91
Movimientos horizontales de las mallas			
Punto superior cúpula (mm)	52	48	92
Valor medio de puntos medidos (mm)	33	30	91
Tensiones en barras			
Máxima en tracción (Kp/cm. ²)	476	450	95
Máxima en compresión (*) (Kp/cm. ²)	-828	-813	98
Media de barras en tracción (Kp/m. ²)	319	304	95
Media de barras en compresión (Kp/m. ²)	-603	-525	87
(*) (En la <i>Figura n.º 40</i> puede verse el diagrama de seguimiento de esta barra en la operación de desapeo).			

Figura 40.

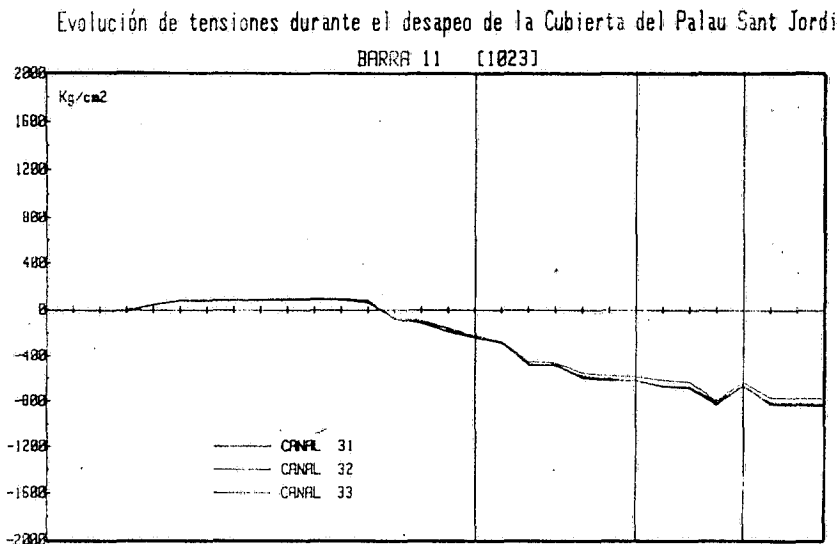
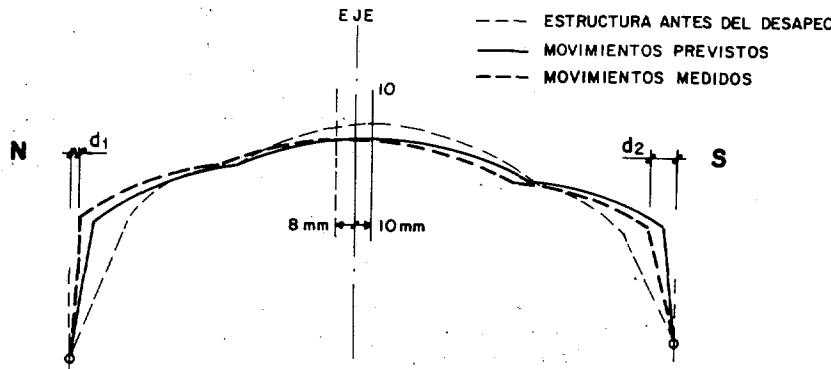


Figura 41.

MOVIMIENTOS N-S DE LA CUPULA EN LA FASE DE DESAPEO



d_1, d_2 DESPLOMES FINALES A RECUPERAR EN LA FASE DE COLOCACION DE TEJAS

Puede apreciarse una correcta correspondencia entre los valores medidos y los esperados marcando un mismo orden de relaciones que las obtenidas en el desapeo inicial de la zona central.

Las únicas diferencias apreciables fueron las correspondientes al desplome de soportes en los lados Norte y Sur en los cuales cambió incluso el signo del movimiento global de conjunto (Figura n.º 41), todo ello en órdenes relativamente reducidos. Esto puede explicarse por el hecho de que la aplicación de las cargas parciales de la cubierta toroidal en la fase intermedia entre el izado y el desapeo, realizada por fases en las que el cosido de gajos y el soldeo de anillos era secuencial y parcial, introduce movimientos asimétricos previos a la respuesta de la estructura cerrada al desapeo.

Así pues, el control de la ejecución corroboró de forma suficientemente ajustada las hipótesis previstas por lo que se consideró que la estructura definitiva se encuentra en condiciones de funcionamiento totalmente correctas.

Como final, y como corresponde a una obra de la magnitud de la descrita, toda esta tarea no hubiera sido posible sin la colaboración de un gran número de personas que con formidable dedicación impulsaron dentro de cada una de sus empresas esta labor de equipo. Quisiera con su nominación, que no puede ser, ni mucho menos, exhaustiva rendirles un cordial agradecimiento y homenaje.

Y muy especialmente al Ingeniero de Caminos Nilo Lletjós (I.O.C.) que compartió con dedicación plena las tareas de seguimiento y dirección de la totalidad de las obras.

CUBIERTAS MZOV

Cimentación.

COMSA

Estructuras de Hormigón (Sres. Barcina y Cella).

DRAGONORA

Estructuras metálicas y cubierta principal (Sres. Peigneux; Barquero; OLAGUIBEL; Casas; Prieto y Mampaso de DRAGADOS; Juan Martínez de ORONA).

ARUMI

Piezas prefabricadas de hormigón.

ESCOFET

Piezas prefabricadas de fachadas y accesos.

GEOCISA

Control de la cubierta principal (Sr. Floriano).

PAYMA

Control general (Sr. Mateu).

ARATA ISOZAKI Y ASOCIADOS

(Stra. Takahashi y Sres. Fujie; Inagawa; Tange y Delgado).

Referencias

- Ref. n.º 1. Barcelona Drawings (Gustavo Gili, 1988).
- Ref. n.º 2. «Palau Sant Jordi». Edición: COOB'92, S. A. Departamento de Publicaciones.
- Ref. n.º 3. Regles NV-65. Francia.