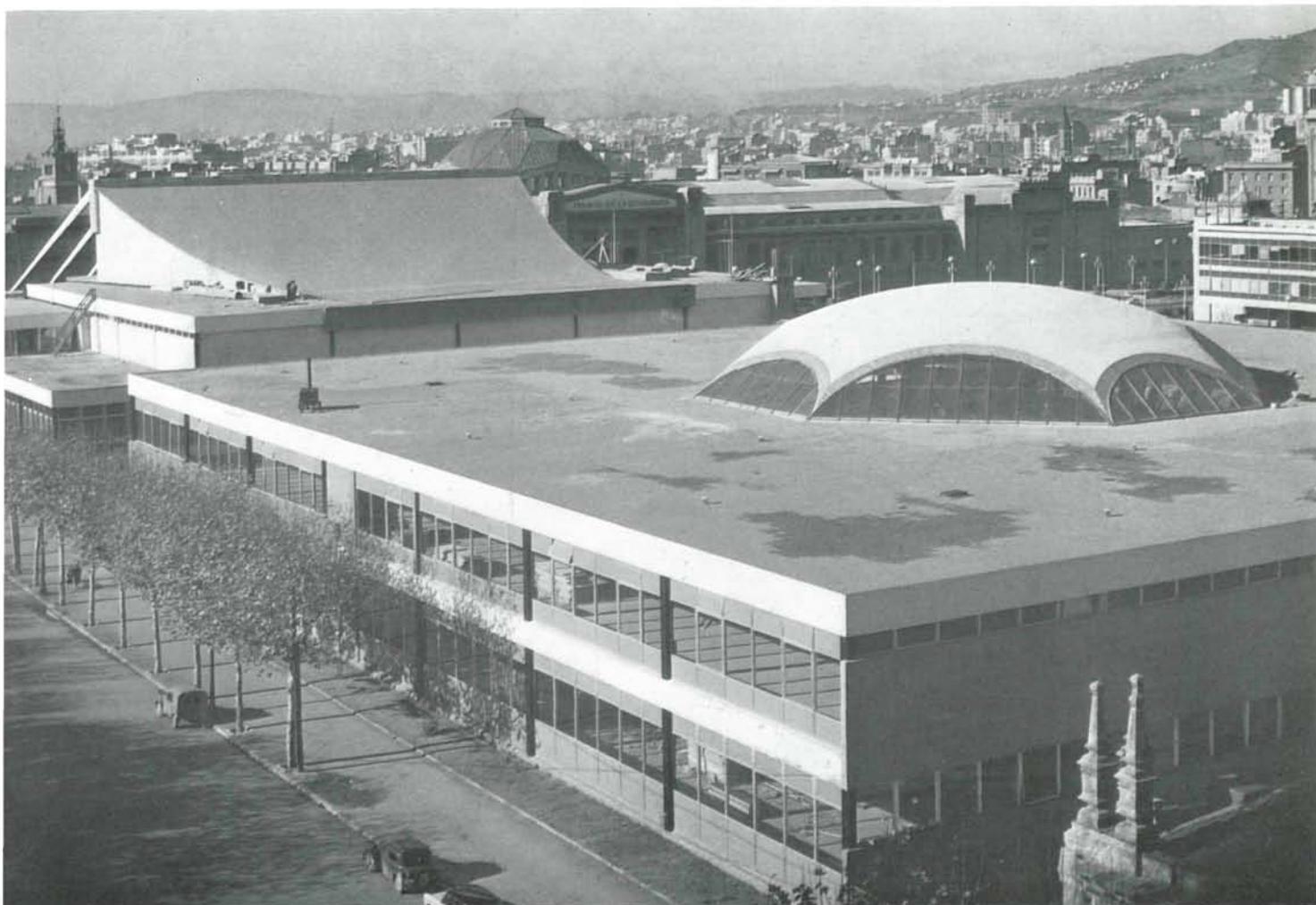


la cúpula del recinto ferial

ALFREDO PAEZ, Prof. Dr. Ingeniero de Caminos



886 - 6

sinopsis

Recientemente se han inaugurado dos nuevos pabellones en el recinto de la Feria Oficial Internacional de Muestras de Barcelona.

El patio central de uno de ellos está cubierto por una cúpula, cuyo proyecto y proceso constructivo se aparta de los sistemas usuales. Mediante unos cables provisionales se introduce, al retirarlos, un pretensado de bordes sobre los lunetos de la cúpula. Estas fuerzas aplicadas al contorno, reproducen las condiciones exigidas por el cálculo para que la cúpula trabaje como una membrana esférica en condiciones ideales. Al suprimirse por este procedimiento los momentos flectores, que de otro modo aparecerían, se elimina la posibilidad de aparición de fisuras en beneficio de la impermeabilidad de la cubierta, se reduce la cuantía de armaduras, y se consigue que el hormigón trabaje en un estado homogéneo de compresiones muy moderadas, tanto según los meridianos como según los paralelos. Los espesores se reducen a un mínimo.

En el presente artículo se describe, no sólo la idea originaria de esta nueva concepción, sino también los resultados deducidos en el ensayo efectuado sobre modelo reducido, así como las vicisitudes y etapas del proceso de construcción.

75

Un rasgo característico del carácter meridional, es el miedo al ridículo. Tan arraigado está en nuestro modo de ser, que rozamos el complejo de la timidez.

La literatura técnica de nuestras latitudes acusa esta particularidad. Por miedo a la crítica, esa crítica aguda y mordaz que también nos es peculiar, se silencian trabajos que deberían publicarse. Cuando un autor se decide a escribir un artículo, reprime sus impresiones y se limita a una exposición, fría y desapasionada, de los detalles de la obra realizada.

Impasibilidad forzada y, por consiguiente, antinatural

Pocas veces el autor arriesga un comentario sobre las razones que han motivado el tipo de estructura elegido o el estudio comparativo de las ventajas e inconvenientes de otras soluciones.

Si bien es cierto que es difícil que el autor perciba sus propios errores, también es cierto que no es fácil para el crítico enjuiciar una realización cuando desconoce las causas que motivaron las características generales de la obra ejecutada. Con la omisión de tales datos se favorece la crítica de la crítica.

No es de mi incumbencia la descripción general u ordenación funcional de los edificios. Corresponde a los arquitectos, señores Ros de Ramis, Lozoya, Puigdemongas y Mañá, cosechar los elogios que se merecen por el innegable acierto con que han sabido resolver, en sus múltiples aspectos, el difícil problema planteado. Como autor del proyecto de las cubiertas pretensadas de ambos pabellones, sólo me cumple reseñar las razones que motivaron el carácter particular de esas estructuras.

De las dos cubiertas, la cúpula del Edificio Ferial es, tal vez, la más original como consecuencia de su extraño proceso constructivo.

Admito, por supuesto, que una cúpula de 35 m de diámetro con sus 10 cm de espesor, no es un alarde estructural. Las hay mucho mayores, y ésta pudo serlo. Si no lo ha sido es porque siempre debe supeditarse el órgano a la función.

Más adelante, cuando el crítico lector penetre en la maraña de ese tejer y destejer de cables que se tensan y luego se retiran, pensará, sin duda, si el sistema seguido no está un poco desorbitado para las dimensiones, no muy grandes, de la obra. Estoy seguro, como él, de que cabría haber encontrado otra solución, menos brillante pero más sencilla. No obstante, conviene recordar que se trata del remate de un Pabellón Ferial, símbolo de una industria y de un progreso, en cuyo recinto se exponen muestras representativas de una técnica o de un arte.

Y la cúpula es eso: una muestra

Me adelanto a la crítica con una autocrítica. Las dimensiones no justifican la complicación del proceso constructivo.

Y, sin embargo, no me sonrojo al descubrir que antes de construir esta cúpula, más bien modesta, se encargó, al Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Madrid, la ejecución de un modelo reducido, a escala 1:10, en el cual se fue repitiendo, paso por paso, el proceso constructivo que, poco después, se seguiría en la realidad.

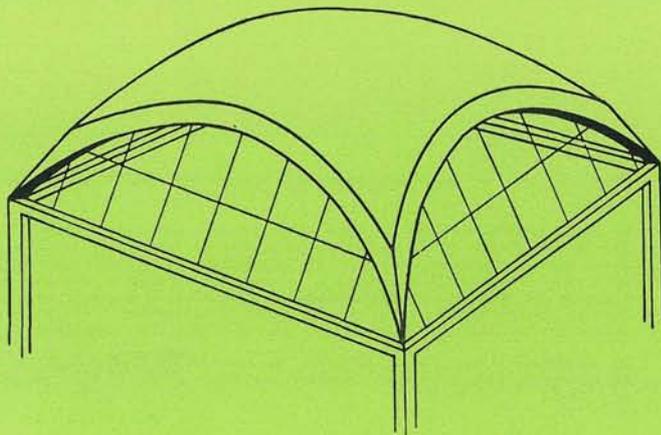
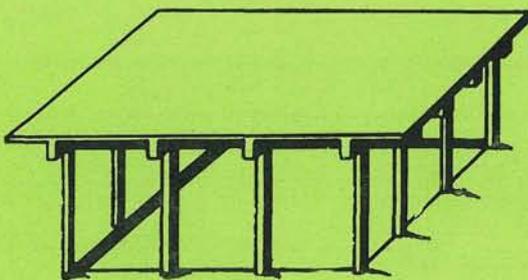
La cúpula de Barcelona no sólo cubre el patio central del Edificio Ferial. Sobre ella carga el peso ingravido de una nueva técnica constructiva. A través de las vidrieras de sus lunetos, se vislumbra un campo de ilimitadas posibilidades.

La cúpula es un prototipo

El nuevo Edificio Ferial, unido al Palacio de las Naciones por el corredor de enlace, es un pabellón destinado a la instalación de «stands». La original disposición de sus plantas en planos sucesivos desarrollados como un helicoide alrededor de un eje central, permite la cómoda disposición de unas rampas ascendentes de comunicación continua de unos pisos con otros, dejando un patio central de acusada personalidad, que, al llegar a la cubierta del edificio, la interrumpe, dibujando un hueco con su intersección.

Fig. 1. Solución en linterna.

Fig. 2. Solución de cúpula con lunetos.



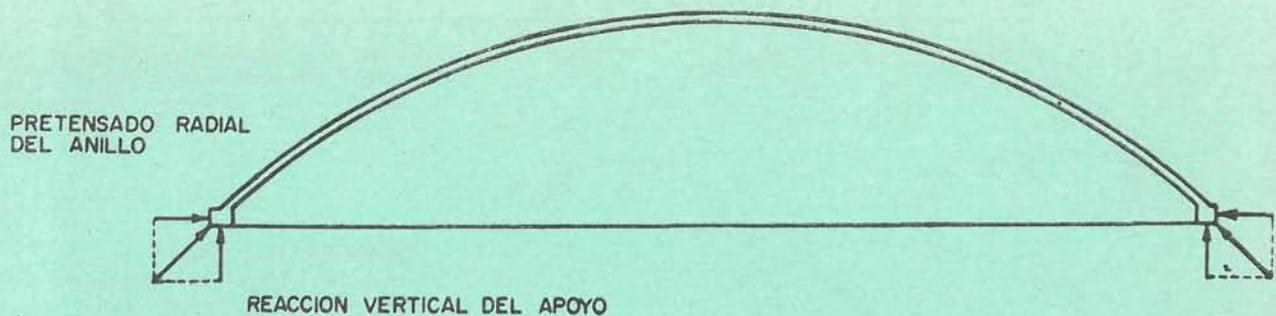


Fig. 3. Sección de una membrana esférica sin lunetos.

El problema que se plantea es cubrir ese hueco

La cubierta, no sólo debe defender el patio de la intemperie y de la lluvia, sino que, además, debe permitir, tanto la ventilación del edificio como la iluminación natural de las rampas que ascienden alrededor del patio.

En esquema, una primera solución es la representada en la figura 1. Aparte de que su aspecto no es el adecuado, tampoco lo es su disposición constructiva. Las vigas de 33 m que cuadriculan el emparrillado resistente tendrían que poseer un canto superior al metro, con fuerte cuantía de armaduras. La linterna formada por esta sobreelevación del techo, transmite una penosa sensación de pesadez donde todo debería ser ligereza.

Es cierto que una solución metálica podría aliviar el peso de ese templete, pero, tanto si se deja vista la estructura como si se oculta con un cielorraso, la solución sigue siendo inadecuada. Sin expresión en un caso, desaliñada en el otro.

El marcado eje vertical que dibuja el patio central del edificio hace pensar en una superficie de revolución o en una pirámide, soluciones ambas que participan de la propiedad de presentar su punto más alto en el propio eje, como condición necesaria para conducción del agua de lluvia a los laterales. Abandonada la última, como inconveniente desde el punto de vista constructivo, queda la cúpula como expresión lógica de la cobertura de este espacio.

Sin embargo, el casquete esférico, tan indicado como solución resistente, no permite, en este caso, ni la necesaria iluminación, ni la conveniente ventilación. Para satisfacer estas condiciones, y conjugar aspectos tan diferentes, se hace necesario adicionarle unos lunetos (fig. 2), cortando la esfera mediante planos inclinados.

Pero al abrir estos lunetos, se altera profundamente el comportamiento resistente de la cúpula.

Inicialmente, cuando el casquete se apoyaba en todo su contorno, el material que materializa la superficie esférica, trabajaba en óptimas condiciones. Los meridianos estaban sometidos a moderados esfuerzos de compresión en todo el espesor de la cúpula. Los paralelos sólo soportaban débiles compresiones.

La superficie esférica podía materializarse en una delgada membrana de hormigón, que, por estar comprimida según los meridianos y los paralelos, cierra toda posibilidad de aparición de fisuras, ya que ningún esfuerzo perturbador de flexión altera su tranquilo y cómodo régimen de esfuerzos internos.

Esta es la razón por la cual la solución ideal para una cubierta de hormigón es, siempre que sea posible, la solución de membrana, entendiéndose como tal, la velaria que, por ser antifunicular de las cargas exteriores aplicadas (incluyendo entre ellas el peso propio y las reacciones de apoyo en los bordes), tiene sus esfuerzos centrados en su superficie media, sin excentricidades, quedando libre de la acción de momentos flectores en las dos direcciones principales.

Siendo nulos los momentos, el peligro de la fisuración desaparece. Los espesores, y por consiguiente el peso propio, disminuyen hasta el límite impuesto por la inestabilidad y la impermeabilidad.

Cuando una cúpula se apoya en todo su contorno, la reacción de apoyo debe ser tangente a la superficie de la lámina. Cuando, contrariamente, la reacción ejercida por el resto de la estructura es vertical, se recurre a la tradicional solución de apoyar la cúpula sobre un anillo horizontal de apoyo que se pretensa para introducir una componente radial horizontal que, junto con la vertical de apoyo (fig. 3), restablezca las reacciones de los mismos.

Pero cuando la cúpula, en vez de apoyarse sobre el anillo continuo de la figura 3, está cortada por lunetos (figura 2), el contorno lobulado que ahora aparece define unos puntos aislados de apoyo en donde se concentran las cargas.

Esta concentración de cargas y este desigual reparto de esfuerzos, que no encuentran en el borde la reacción que los equilibra, desorganizan el estado de tensión propio de una cúpula esférica. La alteración producida crea unos importantes esfuerzos de flexión y torsión, origen de fuertes tracciones. La cubierta deja de ser una membrana para pasar a ser una lámina cuyos espesores hay que aumentarlos, así como las armaduras, para que sean capaces de absorber los momentos que ahora aparecen creando fisuras.

Y todo porque ha desaparecido la continuidad en el apoyo. Todo porque en los bordes de los lunetos no actúan ahora las reacciones continuas de apoyo que antes (fig. 3) se ejercían a lo largo del borde.

Sin los lunetos, cuando el casquete esférico se apoya sobre un anillo o cinturón perimetral, el régimen tensional que resulta en meridianos y paralelos, con su simetría radial, se calcula fácilmente mediante las conocidas expresiones de la cúpula como membrana esférica.

Cuando se disponen los lunetos, el cálculo se complica de un modo extraordinario. A veces, las más, es inabordable.

Para resolver el problema planteado, se recurre a procedimientos simplificados que, en la mayor parte de las ocasiones, acaban por desnaturalizar la lámina y romper la belleza de su expresividad.

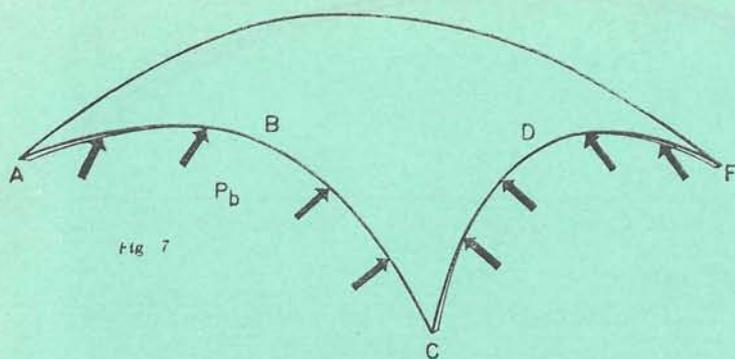


Fig. 4. Esfuerzos a lo largo de unas secciones arbitrarias en una membrana esférica, o cargas que habría que aplicar en los bordes de una lámina para transformarla en una membrana ideal.

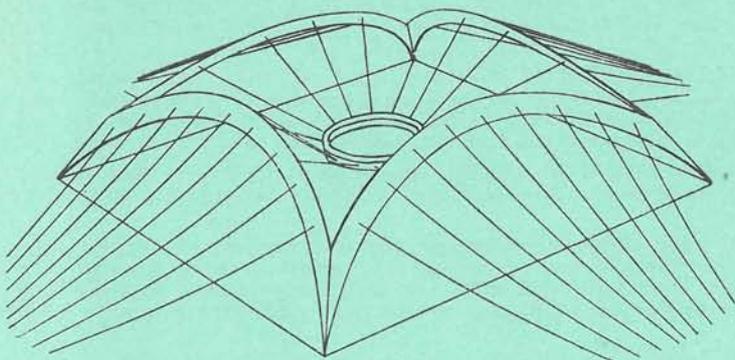


Fig. 5. Materialización, mediante cables, de los esfuerzos exteriores que se desean introducir.

Ambos efectos introducen momentos, tracciones y torsiones que obligan a un aumento sensible en el espesor de la cúpula. Para que estos esfuerzos secundarios no sean excesivos, el arco de borde tiene que poseer gran rigidez.

La cúpula del Palacio de la O.N.U. en la exposición de Bruselas, realizada con arreglo a la técnica más moderna, y de unas dimensiones similares, presenta unos arcos de borde de $1 \times 1,50$ m de sección. Actualmente se la considera como una de las más brillantes realizaciones en el campo de las estructuras laminares, a pesar de que sus arcos de borde pesan demasiado en el juego de volúmenes del conjunto.

La solución adoptada para la cúpula del Edificio Ferial tiene su origen en unos principios totalmente diferentes.

Según se acaba de exponer, la importancia del arco de borde obedece a una razón de limitación de los giros y las traslaciones en el borde del casquete esférico. Si unos y otras se anulan, se restablece el régimen de membrana, con el consiguiente beneficio para el estado tensional del casquete esférico comprendido dentro de los lunetos, al quedar liberado de los momentos de flexión y torsión.

Imaginemos el casquete esférico completo original, y supongamos que las reacciones continuas en el cinturón perimetral de apoyo son las que se deducen de las condiciones de sustentación representadas en las equivalentes de la figura 3.

La cúpula, libre ahora de momentos y esfuerzos secundarios, trabaja en las condiciones óptimas de una membrana. Sólo existen débiles compresiones en meridianos y paralelos. El cálculo de estos esfuerzos es muy sencillo. Fácilmente pueden deducirse las compresiones que actúan en un punto cualquiera de la cúpula.

Cortemos ahora el casquete por los planos que contienen los lunetos (fig. 2). Si en cada uno de los puntos de intersección suponemos aplicada, como una carga exterior, una fuerza igual a la compresión que en ese punto existiría en el caso anterior de cúpula sin lunetos (fig. 4), resultaría que el casquete esférico que ahora queda trabaja en las mismas condiciones de membrana que al principio, ya que, por hipótesis, se satisfacen las condiciones de contorno en sus bordes.

El objetivo está plenamente alcanzado. La única dificultad que resta, es la de materializar estas fuerzas exteriormente aplicadas a lo largo de los círculos menores de los lunetos.

En la práctica, la introducción de estas fuerzas no encierra una gran dificultad.

Basta con comenzar por construir los arcos de contorno que materializan los círculos menores de intersección de los lunetos con el casquete esférico. Las dimensiones de la sección transversal de estos arcos ya no es la necesaria para dotarlos de una gran rigidez, como exigía el cálculo laminar. Ahora basta con las mínimas precisas para resistir la aplicación de unas cargas iguales y contrarias a las que queremos introducir en el borde libre del casquete superior.

Construidos previamente estos arcos de contorno, arcos que estarán contenidos, cada uno de ellos, en el plano inclinado del correspondiente luneto, se los mantiene en esa posición mediante unos cables exteriores que, a modo de vientos, se anclan provisionalmente en el forjado de la cubierta (fig. 5).

Es muy frecuente descomponer la cúpula en una serie de arcos radiales y cubrir con una plementería los espacios entre arcos.

Nada queda de la cúpula como forma resistente

Si se dejan visibles los nervios, se acusa la falsedad de la cubierta. Si se tapan con un doble forjado, se obtiene una solución de una marcada pesadez a causa del incongruente espesor aparente de la inexistente cúpula.

Otras veces, las menos, se recurre a la solución valiente de acometer, sin vacilación, el cálculo laminar. Un anillo rígido festonea la cúpula. Cada luneto queda enmarcado por unos arcos, muy robustos, que bordean el casquete esférico. Al descimbrarse la cubierta, el casquete esférico delimitado por los arcos de borde, carga, con cierta oblicuidad, sobre ellos, deformándolos y torsionándolos.

Unos importantes esfuerzos hiperestáticos aparecen en el borde de contacto del casquete inscrito, con los arcos que lo limitan. Si éstos se deforman por la presión ejercida por aquél, también el casquete se abre por los paralelos inferiores, mientras su borde de unión con los arcos sufre un giro no despreciable.

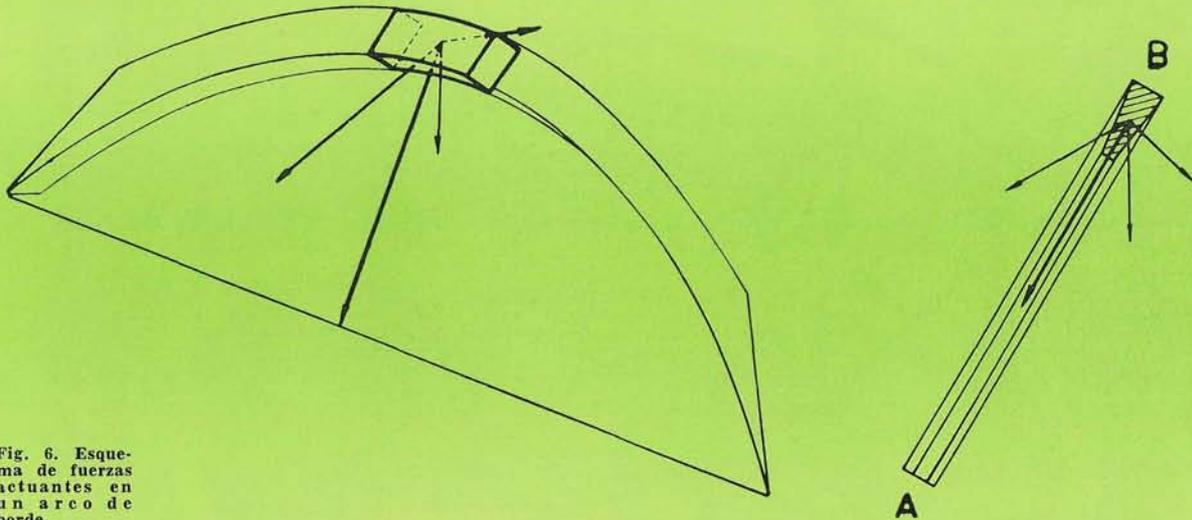


Fig. 6. Esquema de fuerzas actuantes en un arco de borde.

La inclinación de estos cables está perfectamente definida. Su dirección corresponde con la de las cargas que la cúpula esférica, como membrana, ejerce a lo largo del contorno de los lunetos o trasdós de los arcos.

También la magnitud del esfuerzo ejercido por cada uno de estos cables está determinada. En consecuencia, será preciso regular, mediante los oportunos gatos hidráulicos, la tensión que cada uno de ellos debe realizar.

Los arcos, exentos, inclinados el ángulo preciso, reciben, en su trasdós, la carga transmitida por estos cables. Definidas, como lo están, estas fuerzas en posición y magnitud, los cables vencerán el peso de los arcos inclinados y tenderán a volcarlos hacia afuera (fig. 6).

Para impedir este vuelco, se disponen, radialmente, unos tirantes adicionales (fig. 5) que pueden ser horizontales, pero que es preferible sean inclinados, bajando hacia el centro geométrico de la cúpula.

Siendo necesaria la instalación de una lámpara monumental bajo la cúpula, para la iluminación nocturna del patio central, se anclan los tirantes interiores a un anillo, colgado de ellos, de 10 m de diámetro y 23 t de peso (fig. 7).

Si los tirantes se dispusieran radiales, horizontales y de arco a arco, las variaciones diferenciales de temperatura entre cúpula y tirantes daría lugar a unos esfuerzos secundarios perturbadores. Anclándolos en un anillo central, y regulando la tensión mediante gatos, la acción ejercida por los tirantes interiores es constante e independiente de las variaciones térmicas, deformaciones lentas, etc.

Sometidos los arcos de contorno a este estado artificial de cargas, su posición es estable. La resultante de las cargas ejercidas por los cables exteriores e interiores, actúa en el plano de los arcos (fig. 6). La línea de presiones coincide casi exactamente con la directriz. Cualquier defecto improbable, pero posible, de construcción, se acusa en este instante crítico de la ejecución, en el que los arcos están sometidos a un régimen de cargas exactamente igual al definitivo.

Una vez efectuadas estas maniobras, dispuestos los vientos, reglados los esfuerzos, se hormigona la cúpula apoyándose en su cimbra.

Cuando el hormigón ha endurecido, se retiran los apeos que mantenían el casquete esférico. Ninguna flecha se aprecia en esta maniobra. Ningún movimiento se produce, porque, a medida que entra en carga la cúpula, se procede al destensado de los cables exteriores hasta retirarlos por completo.

Cada cable que se suelta es una fuerza exterior que se introduce sobre el casquete esférico. Al final, se habrá creado el conjunto de fuerzas precisas para lograr el comportamiento como lámina (fig. 4).

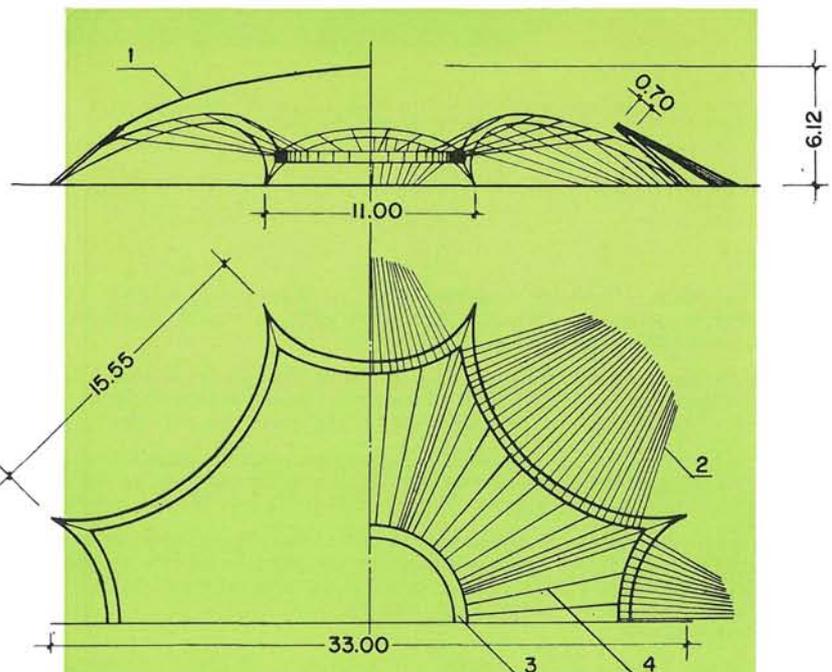


Fig. 7. Planta y alzado-sección de la cúpula del Pabellón Ferial de Barcelona.

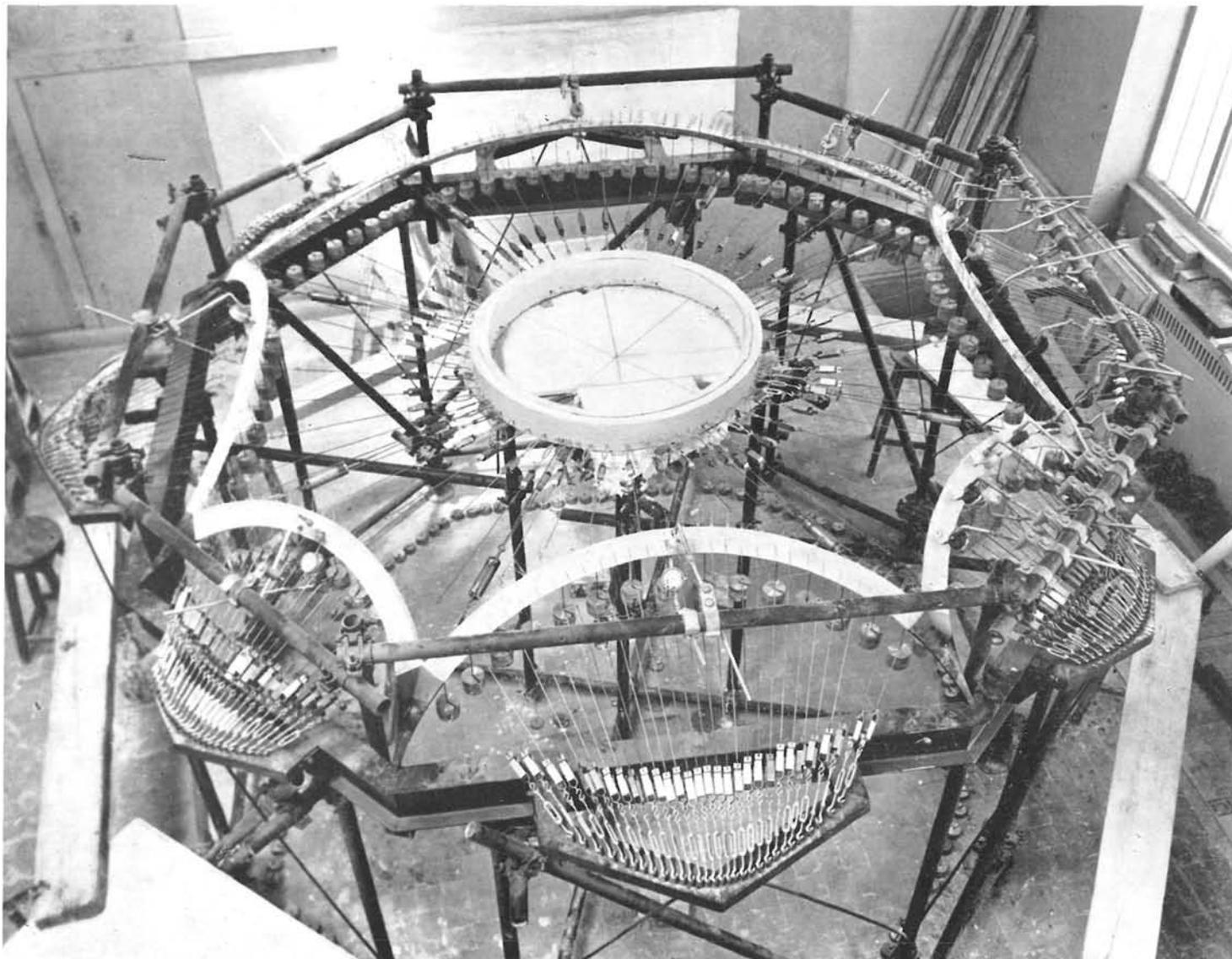


Fig. 8. Modelo a 1:10. Fase previa de construcción. Los arcos y el anillo están exentos bajo la carga total. Obsérvese la extrema delgadez de los arcos.

En su detalle, el proceso constructivo es, en cierto modo, inverso. Son los vientos exteriores los que, guardando una simetría radial, se desbloquean gradualmente. Al suprimirse las fuerzas perimetrales por ellos ejercidas, se produce un automático descimbrado de la cúpula.

Por razones de modulación y ajuste, con la estructura del resto del edificio, el hueco que delimita el patio central es un octógono en vez de un cuadrado. Si en las figuras anteriores se ha representado el hueco por un cuadrado, ha sido con el único propósito de simplificar los esquemas para facilitar su representación y su comprensión.

En la figura 7 aparecen dibujadas en semi-planta y semi-alzados las verdaderas dimensiones de la cúpula del Edificio Ferial. El octógono de la base no es regular, ya que las patas de la cúpula, que se materializan en agudas conteras hipercónicas, tienen que coincidir con la cuadrícula de 11×11 m que forman los soportes en planta.

La mitad derecha de la figura representa la fase constructiva intermedia, en la que los arcos, ya contruidos, permanecen en equilibrio bajo la acción de los cables exteriores provisionales y de los tirantes internos de suspensión de la lámpara-contrapeso. Estos arcos de directriz circular, de 11 y 15,55 m de luz alternativamente, tienen una sección de $0,15 \times 0,70$ m, dimensiones bien distintas a las de $1 \times 1,50$ m de la sección del arco de contorno de la cúpula de Bruselas.

El cálculo laminar de una cúpula con lunetos, se basa en la identificación de los giros y de los recorridos de las diferentes secciones de los arcos de contorno, con los correspondientes bordes del casquete esférico. Esta identidad hiperestática se funda en la hipótesis, siempre dudosa, de una pretendida elasticidad lineal de los materiales, y en la estimación, siempre errónea, de unos inciertos módulos de elasticidad de los hormigones.

Fig. 9. Dispositivos de medida para detectar todo posible principio de pandeo lateral de los arcos.

Fig. 10. Aspecto inferior del modelo terminado antes de la aplicación de las cargas.

Fig. 11. Dispositivo de cargas en el ensayo.

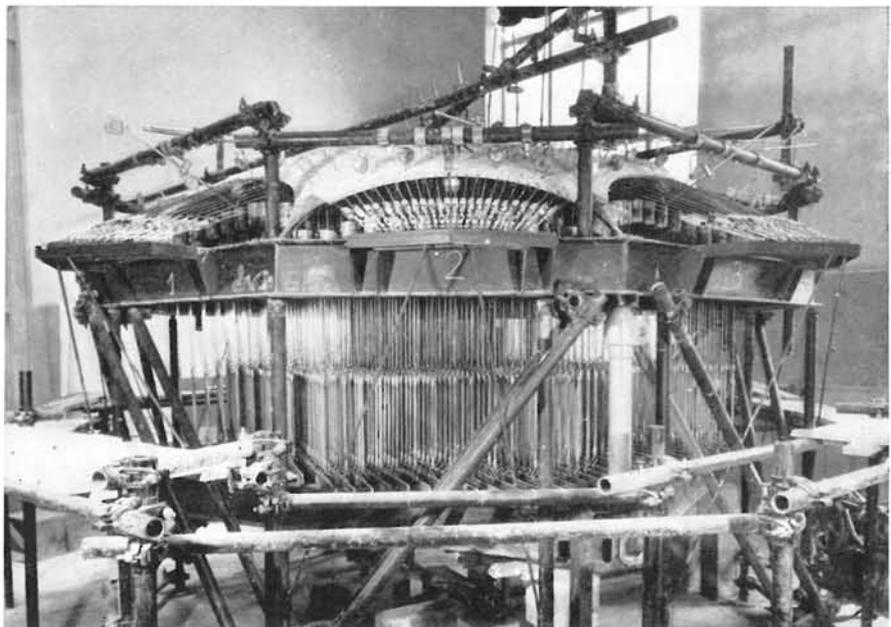
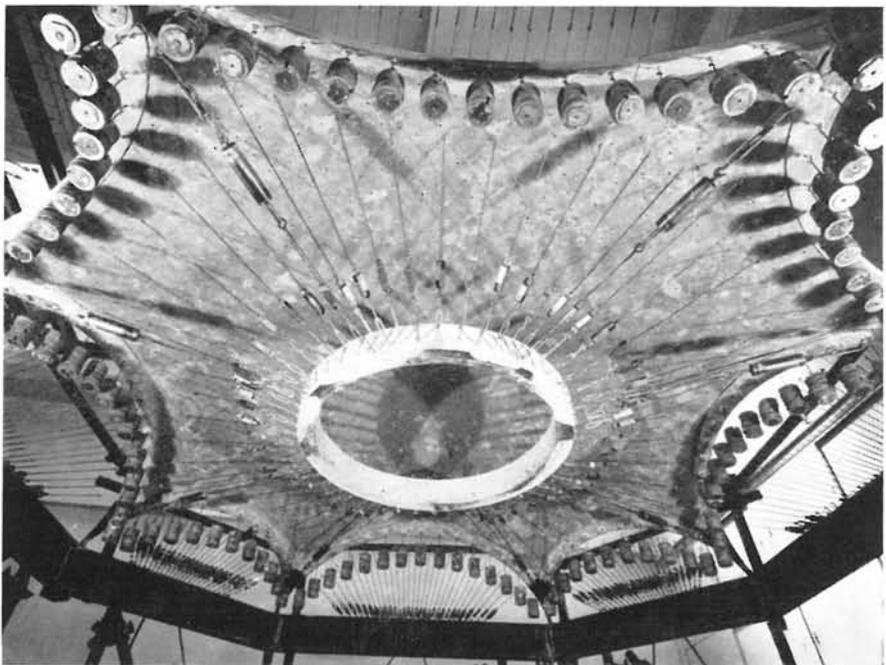
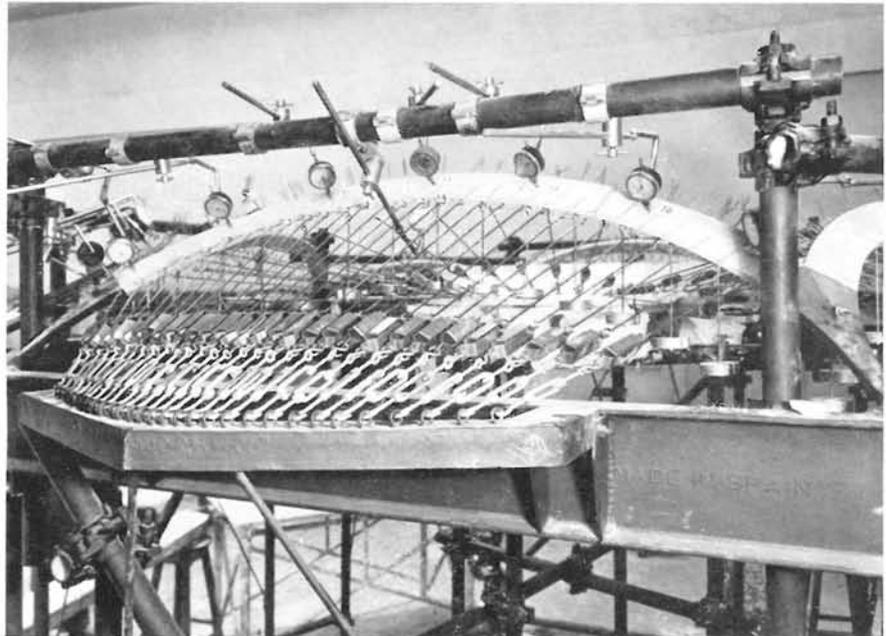
Con el sistema que se propone desaparece esta forzosa imprecisión. Los arcos de contorno se deforman previamente bajo la acción de unas cargas exteriores artificialmente introducidas y cuya magnitud se conoce por lectura directa en los manómetros de los gatos, siendo susceptibles de corrección.

Ninguna hipótesis se precisa admitir sobre la magnitud de las flechas y giros, ya que la cúpula se hormigona sobre los bordes de unos arcos previamente deformados. A su vez, estos últimos, al no tener coartados sus movimientos, se deformarán libremente, con arreglo a sus verdaderas características mecánicas, sin que la presencia de posibles deformaciones no elásticas suponga una objeción a la validez del procedimiento. Sólo importa que sean resistentes y, para ello, el propio sistema constructivo encierra una prueba de carga completa.

La lámina recupera la plenitud de su forma expresiva. Todo es funcional en sus líneas. Hasta el pesado anillo que, como una lámpara monumental cuelga de la cúpula, tiene una específica misión resistente.

Los espesores de la cúpula son mínimos: 10 cm en el casquete esférico; variable entre 15 y 20 cm en los arcos de contorno. Una cubierta muy ligera, como corresponde al remate de un edificio.

Conscientes de la novedad del proceso constructivo y de la ausencia total de precedentes, se estimó conveniente encargar, al Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Madrid, el ensayo en modelo reducido, a escala 1:10, de la cúpula, siguiendo, paso a paso, el orden de construcción que pocos meses después se desarrollaría en la realidad. Todos los resultados obtenidos coincidieron plenamente con las previsiones teóricas. Durante la dura prueba de carga que para los arcos supone la fase intermedia de construcción de la figura 8, no se observaron deformaciones precursoras de un proceso de inestabilidad lateral o en el plano, de los arcos.



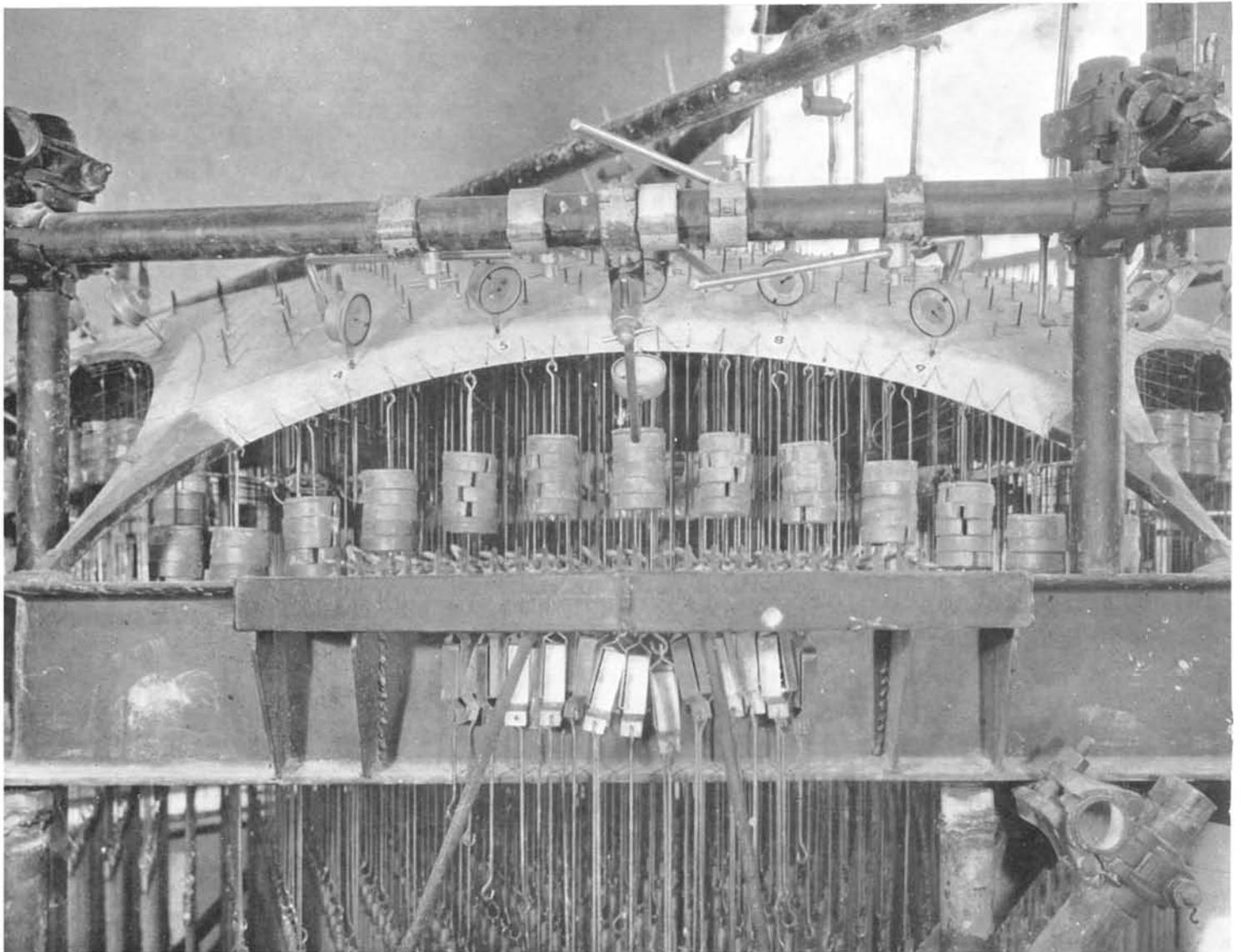


Fig. 12. Detalle de los aparatos de medida.

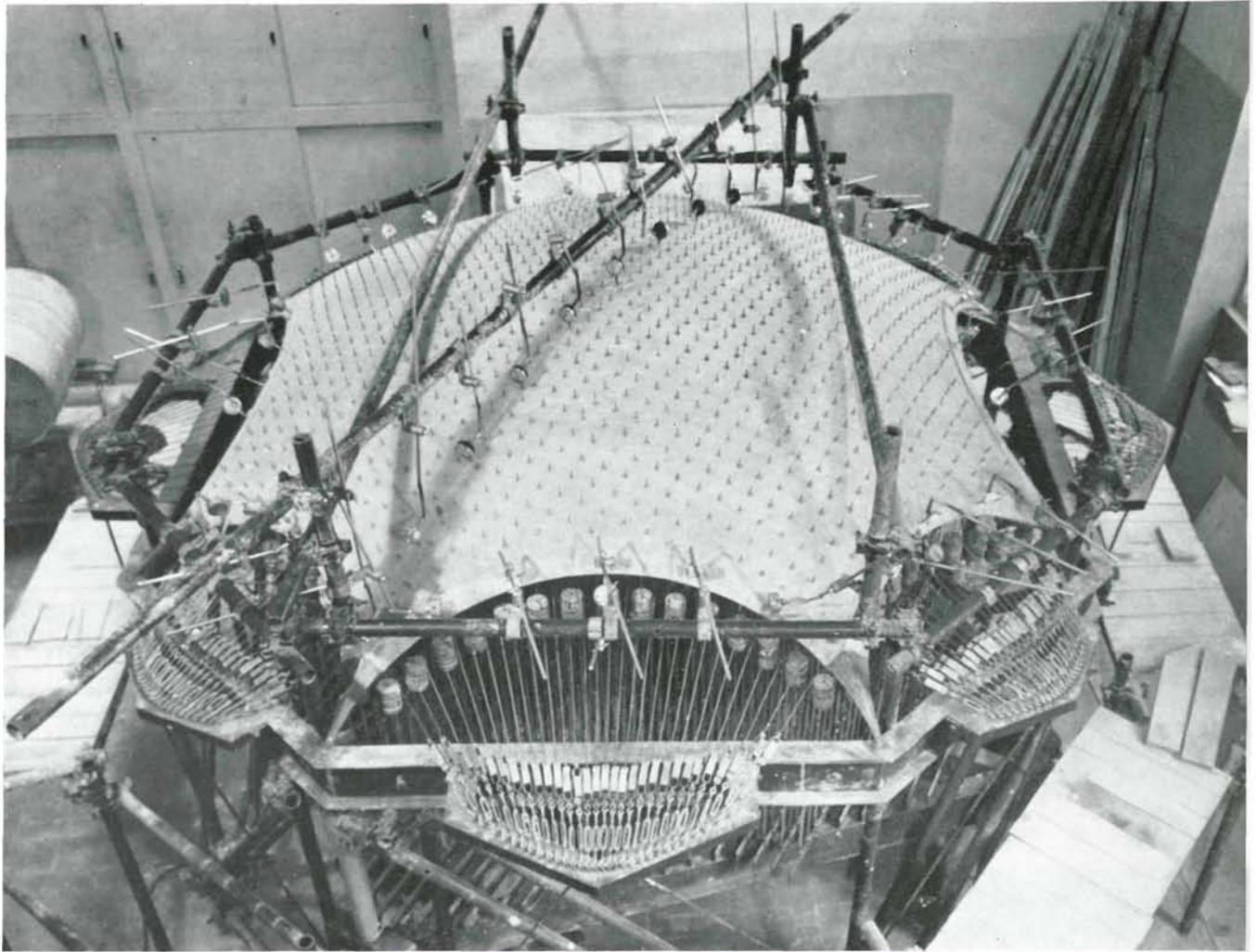
Con el fin de conseguir la necesaria precisión en la magnitud de los esfuerzos introducidos, los gatos del pretensado de los alambres estaban representados por los muelles dinámicos que se aprecian en las fotografías adjuntas. Con ellos, la maniobra de corrección y ajuste de esfuerzos exigió varios días.

Terminado el modelo, con el hormigonado del casquete y la supresión de los alambres exteriores, se realizó una primera prueba de carga, que consistía en aplicar una carga uniformemente repartida sobre todo el casquete. En este primer ensayo, se logró alcanzar una sobrecarga equivalente a los 950 kg/m^2 , sin que apareciesen fisuras ni señales de agotamiento resistente alguno. Agotados con esta carga los gatos que la producían, por ser muy superior a la prevista, se llevó a cabo un segundo ensayo, consistente en cargar solamente medio casquete, como una imagen de un posible huracán que sólo presionara sobre dicha mitad. Bajo esta carga, más dura que la anterior por su asimetría, la cúpula resistió de nuevo la sobrecarga equivalente a los 950 kg/m^2 , aplicada en un semi-casquete, estando descargada la otra mitad, sin que tampoco pudieran observarse fisuras ni deformaciones lentas después de mantenida la carga por espacio de varios días.

Ante la imposibilidad de romper el modelo por la aplicación de cargas, se decidió mantener una sobrecarga uniformemente repartida de 350 kg/m^2 , triple de la máxima prevista, y proceder a una gradual supresión de los alambres que soporta la lámpara o contrapeso central. A pesar de que los movimientos observados fueron entonces mucho más sensibles, se llegó a la supresión total de todos los alambres centrales, quedando la cúpula sin el contrapeso de la lámpara. Tampoco pudieron observarse fisuras bajo este estado brutal de cargas.

A continuación se procedió a un aumento gradual de cargas sobre la cúpula sin el anillo ni cables centrales, apareciendo las primeras fisuras bajo una carga equivalente a los 900 kg/m^2 , observándose, para esta carga, un principio de separación de la chapa metálica de las patas del mortero que las rellena interiormente.

Con el fin de alcanzar la rotura, se descargó medio casquete, y se dejó el otro cargado a razón de los 900 kg/m^2 precedentes. La amplitud de las fisuras aumentó sin lograrse, por ello, alcanzar la rotura.

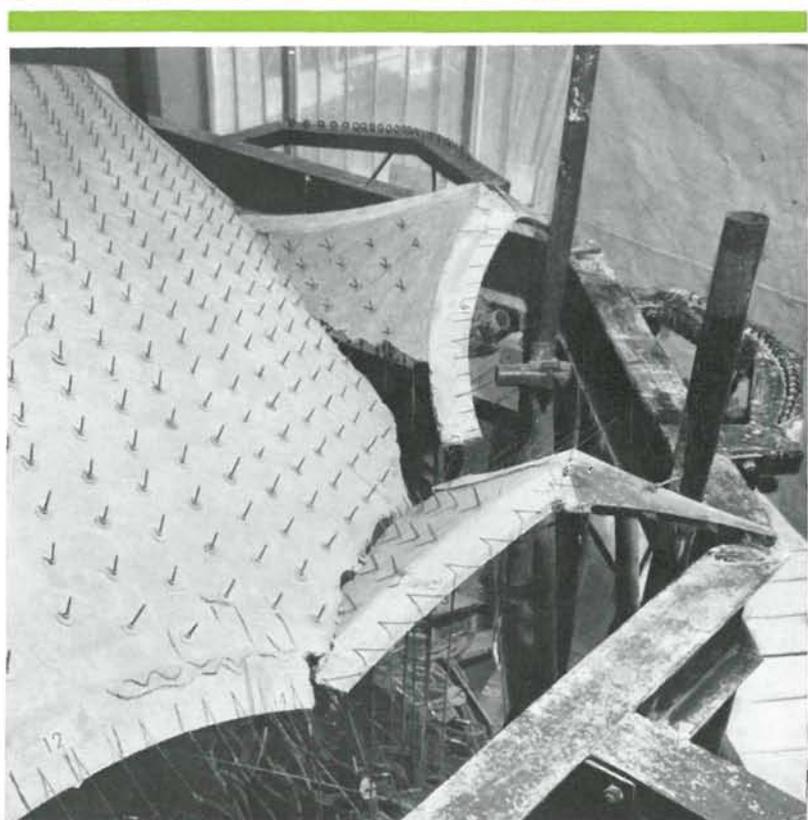


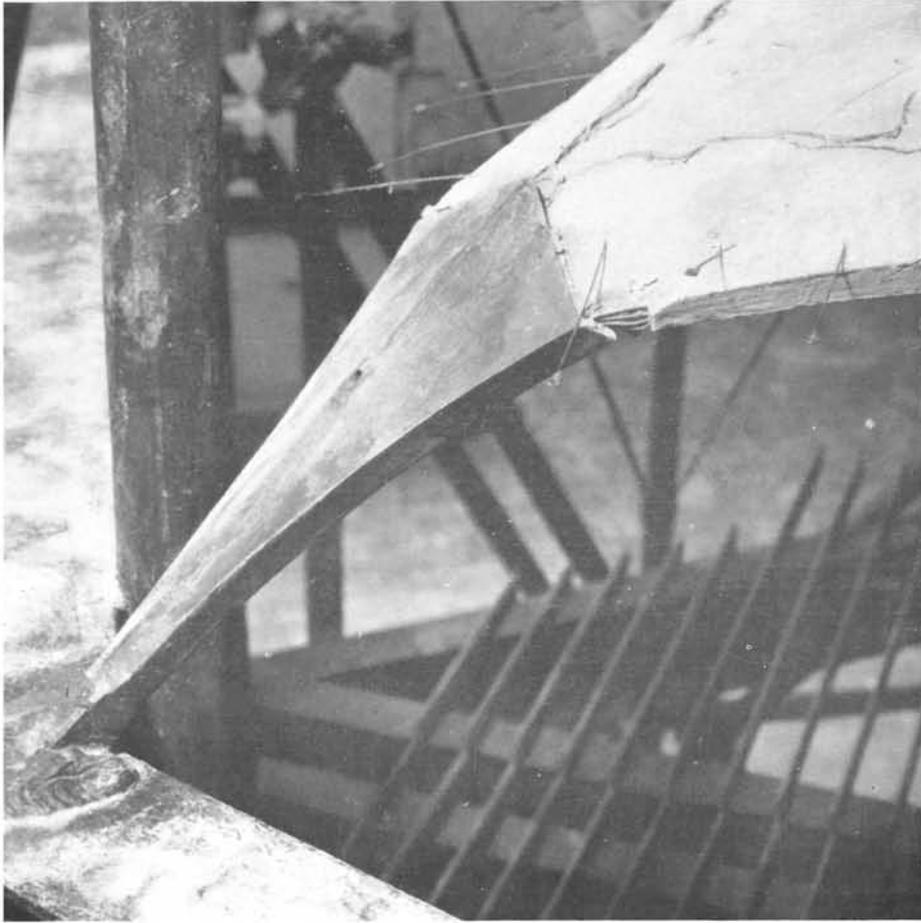
Para romper el modelo, no hubo más procedimiento que cambiar el dispositivo de carga con gatos más potentes. La rotura se alcanzó cuando la sobrecarga, actuando sobre la cúpula sin anillo de contrapeso, llegó a 1.250 kg/m^2 . La ausencia de los alambres interiores hizo que las patas, excéntricamente cargadas, reventaran hacia afuera en la forma que se aprecia en la fotografía.

En la obra, el proceso de construcción fue más sencillo de lo que se había imaginado. Los arcos se hormigonaron en su posición definitiva, y para simplificar su encofrado, se utilizaron, como armaduras, se utilizaron, como armaduras, perfiles laminados. Las aristas del trasdós se definieron mediante angulares.

Fig. 13. Ensayo bajo carga asimétrica. Obsérvese la disposición de los flexímetros registradores de los movimientos de un meridiano.

Fig. 14. Rotura final del modelo. La supresión del anillo de contrarresto ha creado la rotura por flexión de las patas.





El intradós, con sus 15 cm de anchura, se materializó con una platabanda metálica de la citada anchura.

Con esta utilización de los perfiles en lugar de los redondos, se hizo posible la construcción de esta autocimbra en taller. Construido el esqueleto metálico de los arcos, y situadas las patas, asimismo metálicas, el montaje de aquéllos no tuvo la menor dificultad. El encofrado se redujo a un entarimado de madera plano, dispuesto con la pendiente prevista. La estructura metálica de los arcos no tenía así más que descansar lateralmente sobre el entarimado. El fondo del encofrado estaba constituido por la platabanda metálica del intradós, platabanda que al quedarse al exterior permitió después la unión, por soldadura, de la carpintería metálica de sujeción de las vidrieras de los lunetos.

El hormigonado se efectuó sin dificultad. Una regla o bandeja vibradora, apoyándose arriba y abajo en los bordes metálicos del intradós y del trasdós, permitió una enérgica consolidación del hormigón y alisado perfecto del paramento exterior. En la masa del hormigón se quedaron perdidos los tacos de anclaje, tanto de los vientos exteriores como de los tirantes arco-anillo.

Simultáneamente se encofró y hormigonó el anillo. Los tirantes penetraban en su interior, a través de un tubo, para efectuar la maniobra del tensado de los alambres de 7 mm de diámetro, aplicando los gatos sobre el paramento interior del anillo. Estos alambres interiores, por quedar vistos, sin más protección que una ligera pintura de plástico, tuvieron que disponerse de acero inoxidable, de 1.250 kg/cm² de carga de rotura y 7.500 kg/cm² de tensión convencional de fluencia, características ambas que se comprobaron antes de su colocación para asegurar que las deformaciones lentas previsibles por la acción mantenida de su esfuerzo quedaban comprendidas dentro de las tolerancias admisibles.

Una vez terminado el hormigonado de los arcos, y situados los tirantes interiores, se anclaron a la terraza los vientos exteriores. Dado el esfuerzo oblicuo que estos vientos provisionales ejercían fue preciso armar ligeramente el forjado de la terraza en las zonas de anclaje, así

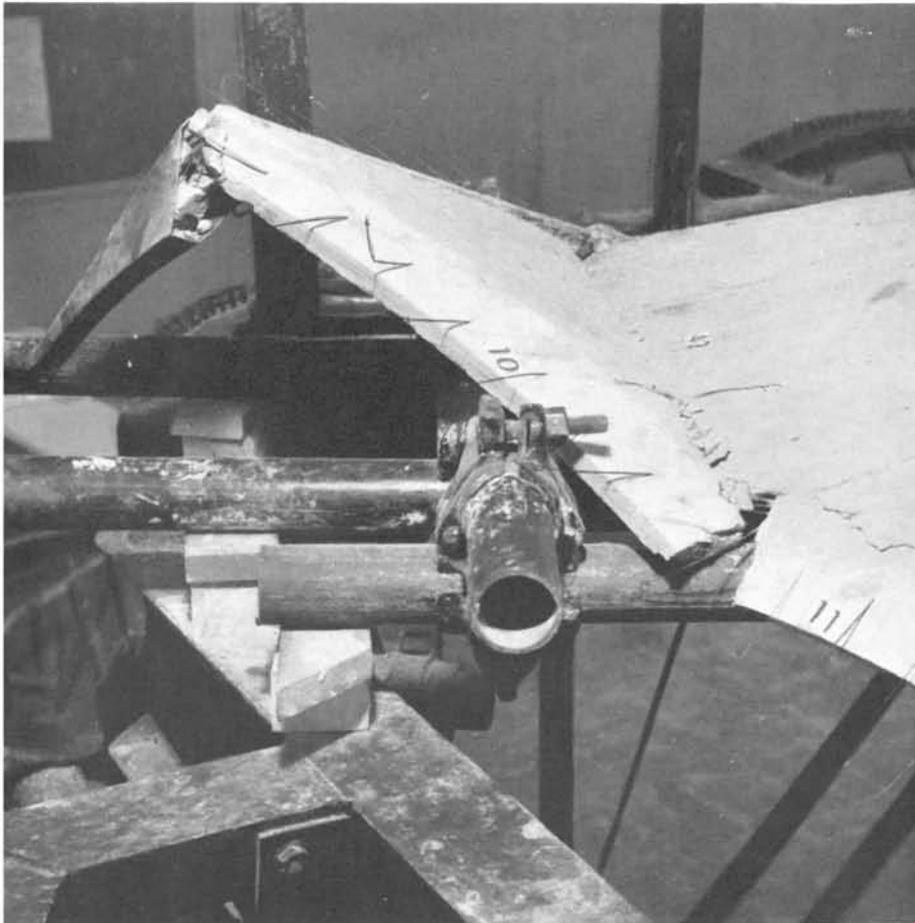


Fig. 15. Detalle de las grietas en las inmediaciones de una de las patas rotas.

Fig. 16. Detalle de la rotura de otro apoyo.

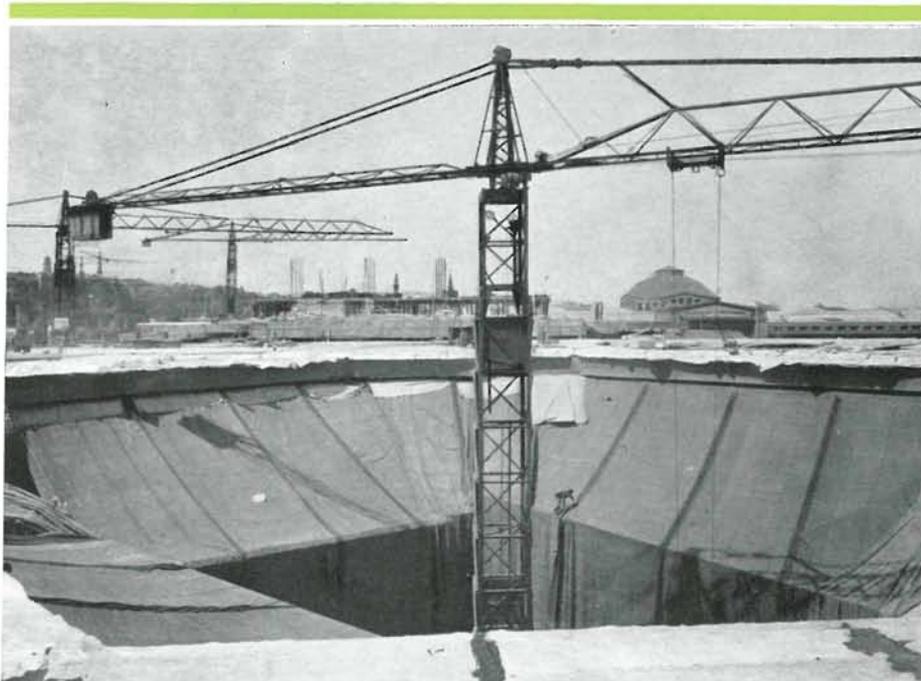


Fig. 17. Pabellón Ferial durante la XXX FERIA Oficial Internacional de Barcelona (junio 1962).

Fig. 18. Detalle del hueco que enmarca la cúpula.

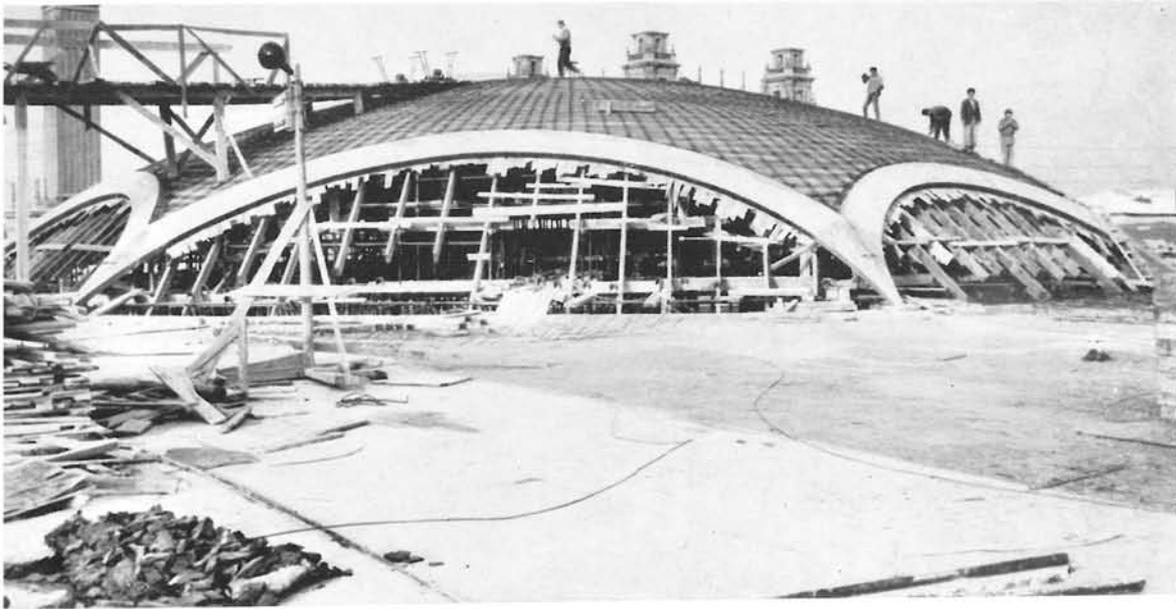


Fig. 19. La cúpula durante el encofrado y colocación de armaduras del casquete esférico. Los arcos de borde reposan aún sobre el andamiaje.

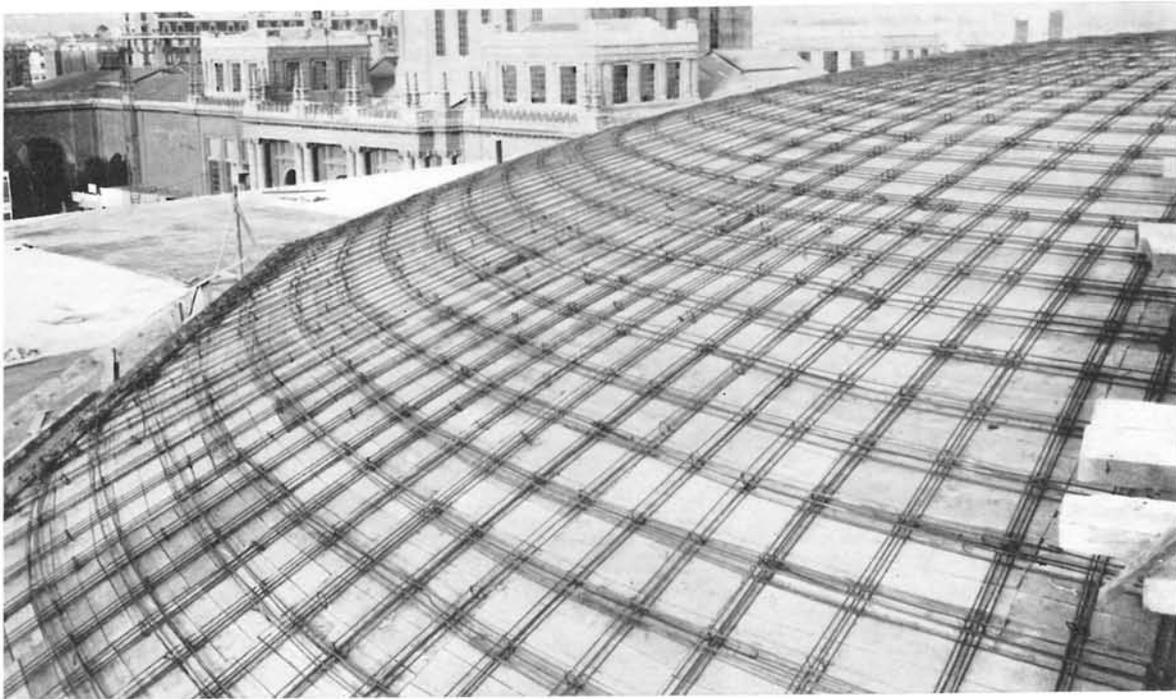


Fig. 20. Detalle de armaduras.

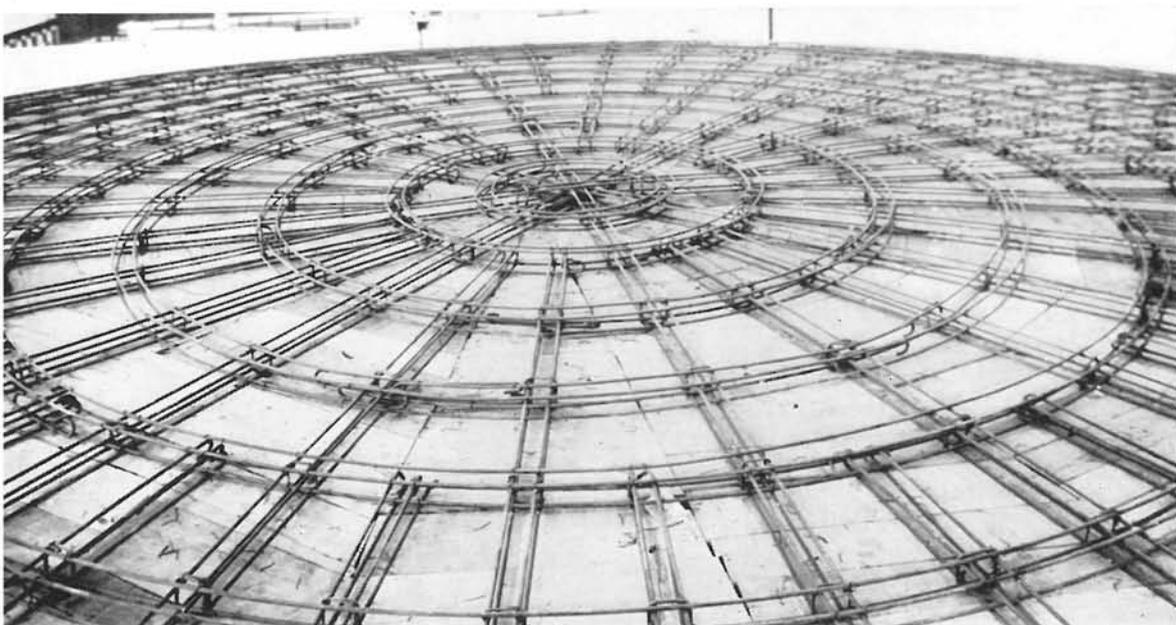


Fig. 21. Polo de la cúpula. Disposición de armaduras.

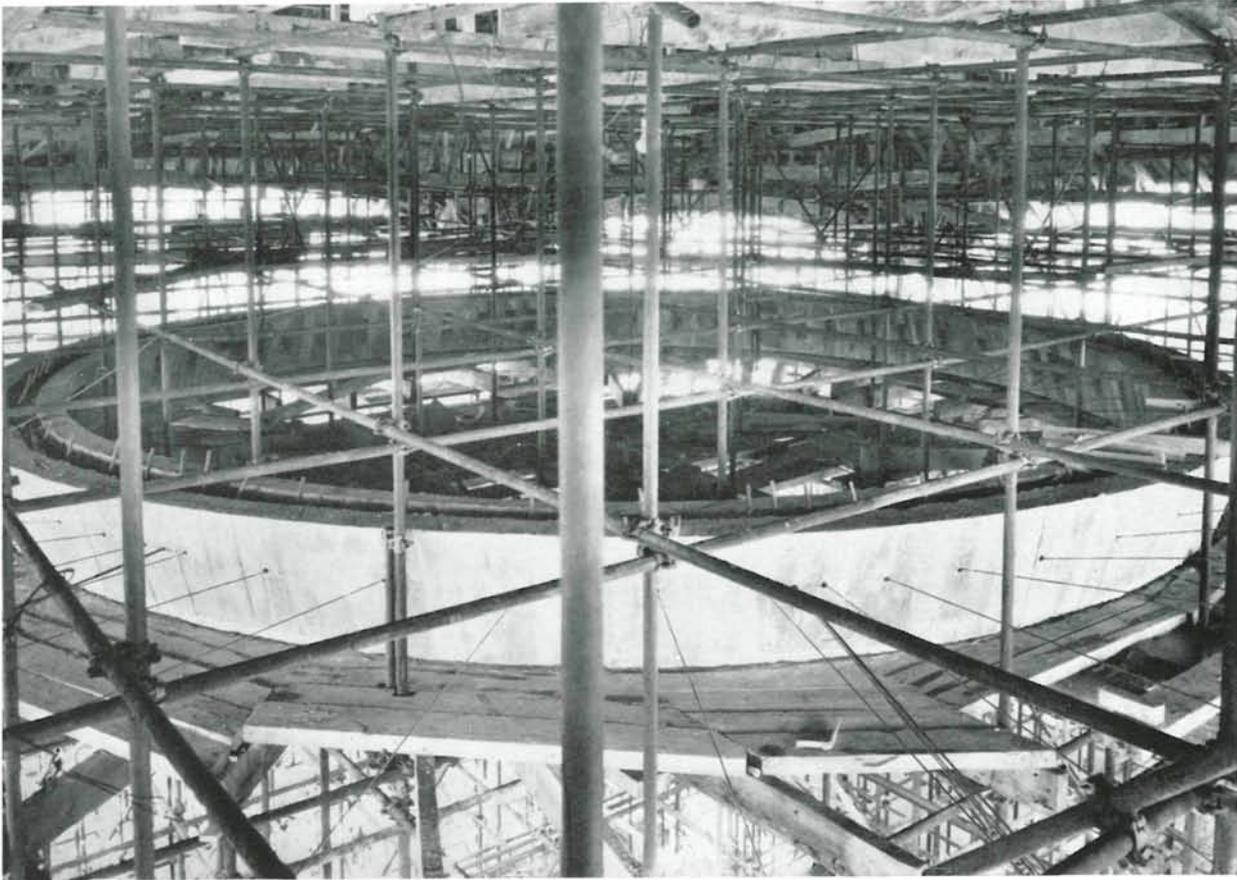


Fig. 22. El anillo central de contrarresto, aún descansando sobre el andamiaje. Obsérvense los alojamientos interiores de los tacos para las varillas pretensadas.

Fig. 23. Descimbrado de los arcos de borde. Los sacos terreros colocados compensan, con su peso, la componente vertical de los tirantes provisionales.

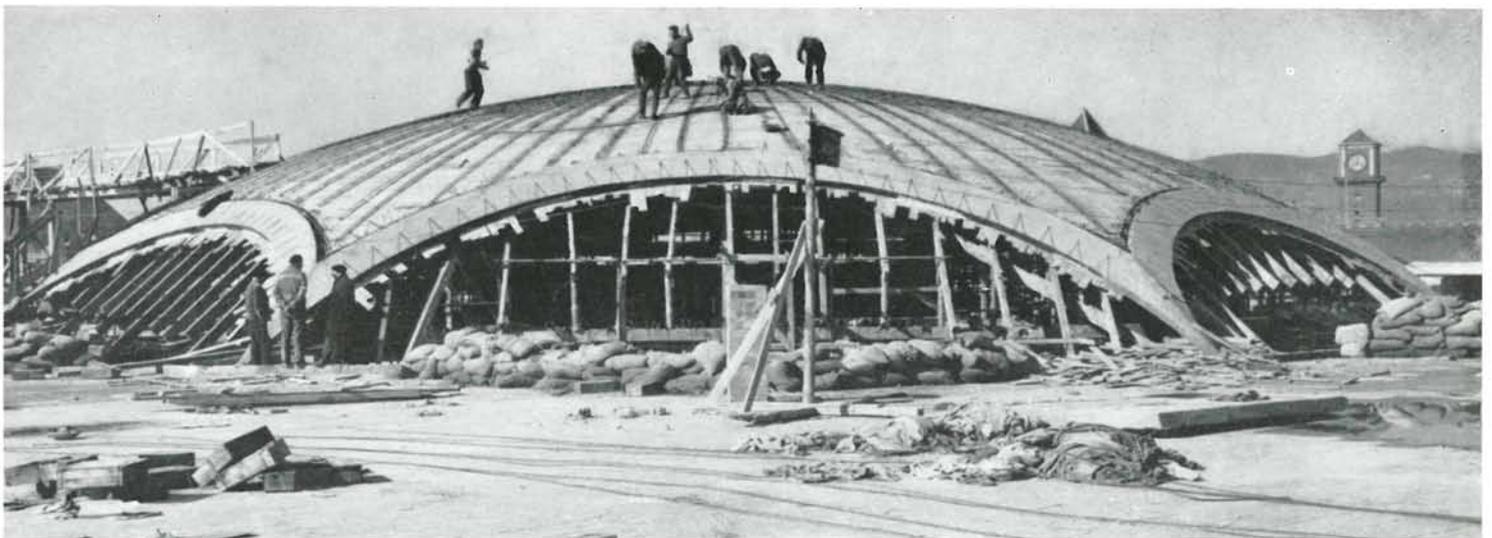
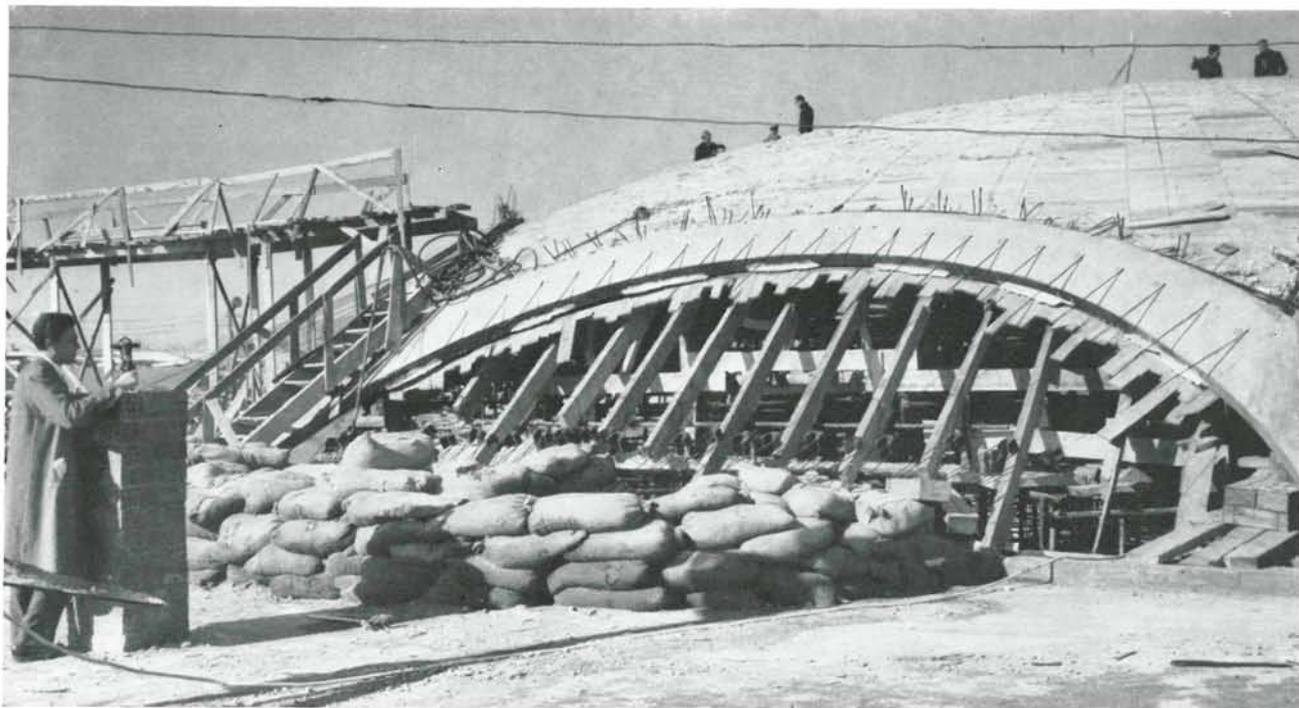




Fig. 24. Detalle de la maniobra de pretensado. Obsérvese la disposición de las ues soldadas a las barras de acero ordinario, así como los tacos de retención de los alambres $\varnothing 5$ de acero de alta resistencia.

Fig. 25. Comprobación de las flechas transversales de los arcos exentos. El taquimetro está situado en el plano de uno de los arcos.



como disponer sacos de tierra para, con su peso, compensar, en parte, la componente vertical de dichos vientos exteriores, sacos que se fueron colocando gradualmente a medida que se ejercía la tracción de los alambres.

La maniobra del tensado de los alambres $\varnothing 5$ de acero de alta resistencia de los vientos exteriores, así como el de las varillas $\varnothing 7$ de acero inoxidable de los tirantes arco-anillo, se efectuó con una celeridad mayor que la prevista. Bastaron dos días para conseguir el equilibrio de esfuerzos previsto, despegándose el anillo de su encofrado con toda normalidad. Los movimientos de los arcos fueron difícilmente apreciables por insignificantes.

El hormigonado del casquete esférico inscrito en los arcos no ofreció más dificultad que la relativa al mantenimiento del espesor de 10 cm. A pesar de ser este espesor constante en toda la superficie, hubo que colocar numerosas referencias —tacos de hormigon de esa altura— para no pasarse en el hormigonado de las cotas previstas.

A los doce días se ejecutó el destensado de los vientos exteriores. Estos vientos de acero $\varnothing 5$ de alta resistencia, se sujetaban en el forjado de la terraza del Pabellón Ferial mediante unos tacos situados en unas placas metálicas soldadas, a su vez, a unos tirantes cortos de acero ordinario. Estas barras, de metro y medio de longitud, estaban ancladas en el hormigón del forjado.

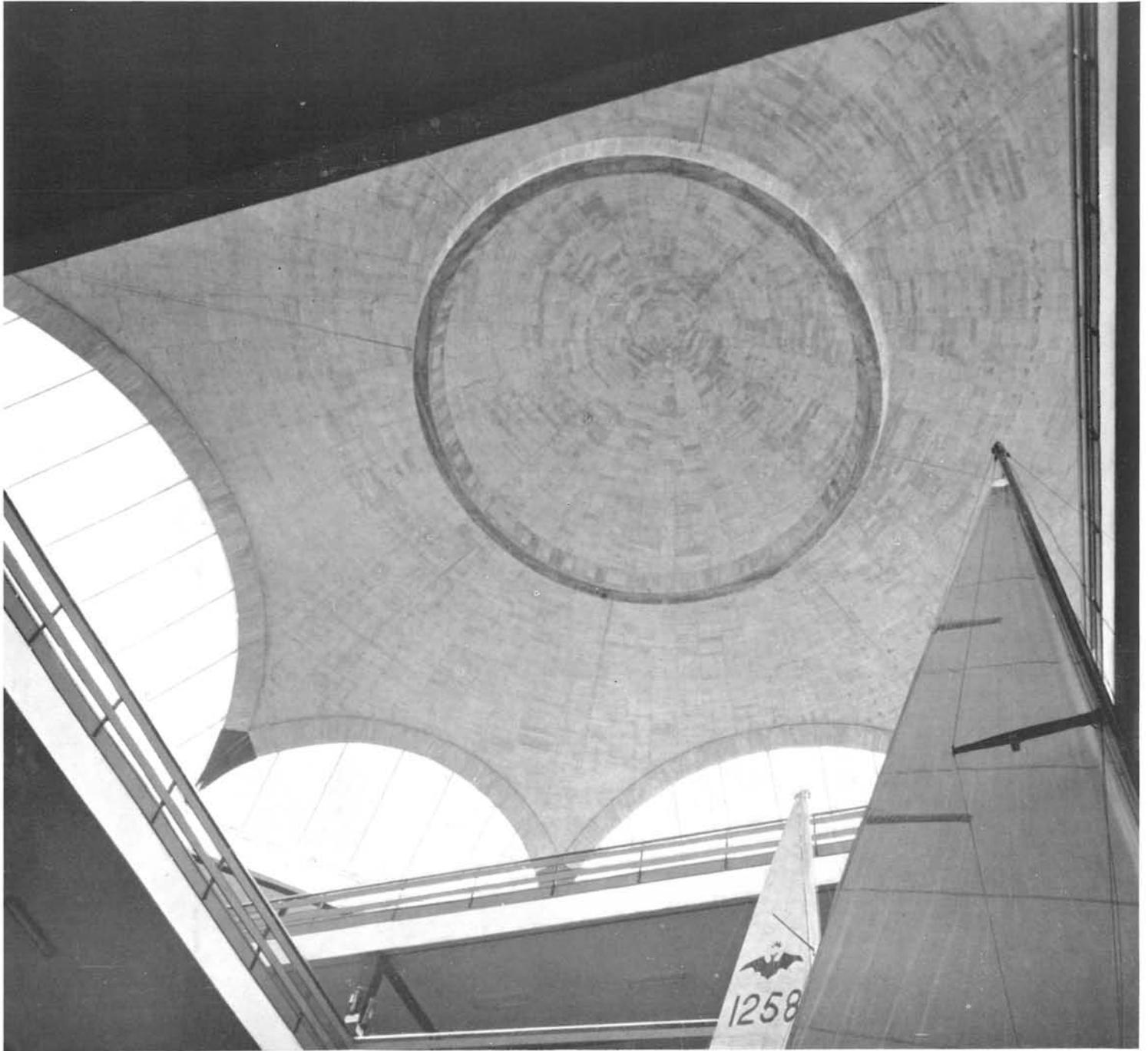


Fig. 26. La lámpara o anillo central de contrarresto.

Para destensar estos tirantes exteriores se procedió a calentar con un soplete las barras terminales de acero ordinario, sistema que, por su rapidez y posible simultaneidad, permitió la puesta en carga del casquete esférico de la cúpula, mediante el destensado de los vientos, en menos de una mañana.

Como sucedió en el ensayo sobre el modelo reducido, tampoco en la obra se observaron movimientos o flechas apreciables, pese a la precisión de la red de triangulaciones establecida en puntos fijos de la terraza. Tres días después la cúpula quedaba libre de todo encofrado y andamiaje, y una semana más tarde se abría al público.

Con el fin de destacar la belleza áspera del hormigón con toda su pureza, no se ha realizado tratamiento alguno sobre los paramentos del anillo ni sobre el intradós de la cúpula. Las marcas de los encofrados y las juntas de las maderas que sirvieron de molde, quedan a la vista como expresión sincera de las propiedades de un material y de una estructura. Sobre el anillo, unos tubos de luz fluorescente iluminan, por la noche, el intradós de la esfera tachonada con las marcas de los dados prefabricados de hormigón que sirvieron de base para la colocación de las armaduras.

La cúpula, con las vidrieras de los lunetos ya colocadas se inauguró el día 1.º de junio de 1963 con motivo de la XXXI Feria Oficial Internacional de Muestras de Barcelona. Los altos mástiles de los balandros situados bajo la cúpula, pretendían alcanzar, sin conseguirlo, la lámpara monumental del anillo de contrarresto que, con sus 23 t de peso, flotaba en el aire con la tranquila quietud de su equilibrio.

La coupole du Palais de la Foire de Barcelone

A. Páez, Prof. Dr. Ing.

Deux nouveaux Pavillons ont été inaugurés récemment dans l'enceinte de la Foire Officielle Internationale d'Echantillons à Barcelone. La cour centrale de l'un d'eux a été couverte par une coupole dont le projet et le processus de construction s'éloignent des systèmes usuels. A l'aide de câbles provisoires, s'introduit, en les retirant, une précontrainte sur les bords des lunettes de la coupole. Ces forces, appliquées au contour, reproduisent les conditions exigées par le calcul afin que la coupole travaille comme un voile sphérique en conditions idéales.

En supprimant grâce à ce procédé les moments fléchissants qui autrement apparaîtraient, on élimine la possibilité de fissuration au bénéfice de l'étanchéité de la couverture, le pourcentage d'armatures est réduit et l'on arrive à ce que le béton travaille, autant selon les méridiens que selon les parallèles, dans un état homogène de compressions très modérées. Les épaisseurs sont réduites au minimum.

Dans cet article sont décrits, non seulement l'idée originale de cette nouvelle conception, mais aussi les résultats déduits de l'essai effectué sur modèle réduit, ainsi que les vicissitudes et les étapes du processus de construction.

The cupola of the Palace of Exhibitions in Barcelona

A. Páez, Prof. Dr. Engineer.

Recently two new halls have been opened within the Official International Fairs Enclosure in Barcelona. The central patio of one of them is covered by a cupola, whose design and constructive method differs from the conventional ones. Provisional wires cause a state of prestress to arise round the edges of the cupola skylights, when these cables are disconnected. These forces, applied to the boundary correspond to the loading conditions that are necessary if the cupola is to behave as a spherical shell, under ideal conditions. As this loading system cancels out in the shell all bending moments, which would otherwise arise, the possibility that cracks develop is avoided, and consequently the cupola is rendered waterproof. This design system also reduces the necessary percentage steel, and the concrete works under uniform, moderate, compression stresses, along tangents both in the horizontal and vertical planes. Thicknesses are reduced to the minimum.

This article not only describes the original idea underlying this new design, but also the results that were obtained from tests on reduced scale models and the vicissitudes and stages of the construction process.

Kuppel des Messe-Palastes in Barcelona

A. Páez, Prof. Dr. Ingenieur.

Kürzlich wurden zwei neue Pavillons im Gelände der offiziellen internationalen Mustermesse in Barcelona eingeweiht. Der mittlere Hof eines derselben wird von einer Kuppel überdeckt, deren Entwurf und Bauverfahren von den üblichen Systemen abweicht. Mittels einiger provisorischer Kabel wird beim Herausziehen derselben eine randliche Vorspannung über den Stüchköppen der Kuppel eingeführt. Diese auf den Umriss angewandten Kräfte stellen die durch die Berechnung geforderten Bedingungen wieder her, damit die Kuppel wie eine kreisförmige Membrane bei idealen Bedingungen wirke. Da bei diesem Vorgehen die Biegemomente, die sonst erscheinen würden, unterdrückt werden, wird die Möglichkeit des Zutagetretens von Rissen zu Gunsten der Undurchlässigkeit des Daches ausgeschaltet, die Summe der Bewehrungen wird herabgesetzt, und man erreicht, dass der Beton in einem homogenen Zustande sehr gemässiger Drücke wirke, sowohl nach den Längs- als auch nach den Parallellinien. Die Dicken werden auf ein Minimum herabgesetzt.

Im vorliegenden Artikel wird nicht nur der ursprüngliche Gedanke dieser neuen Auffassung, sondern auch die bei dem durchgeführten Versuch an einem Modell in verkleinertem Massabe abgeleiteten Ergebnisse beschrieben, ebenso wie die Wechselfälle und Aschnitte des Bauvorganges.