

EL COMPORTAMIENTO RESISTENTE • DE UNA CUBIERTA LAMINAR •

POR EDUARDO TORROJA, INGENIERO DE CAMINOS

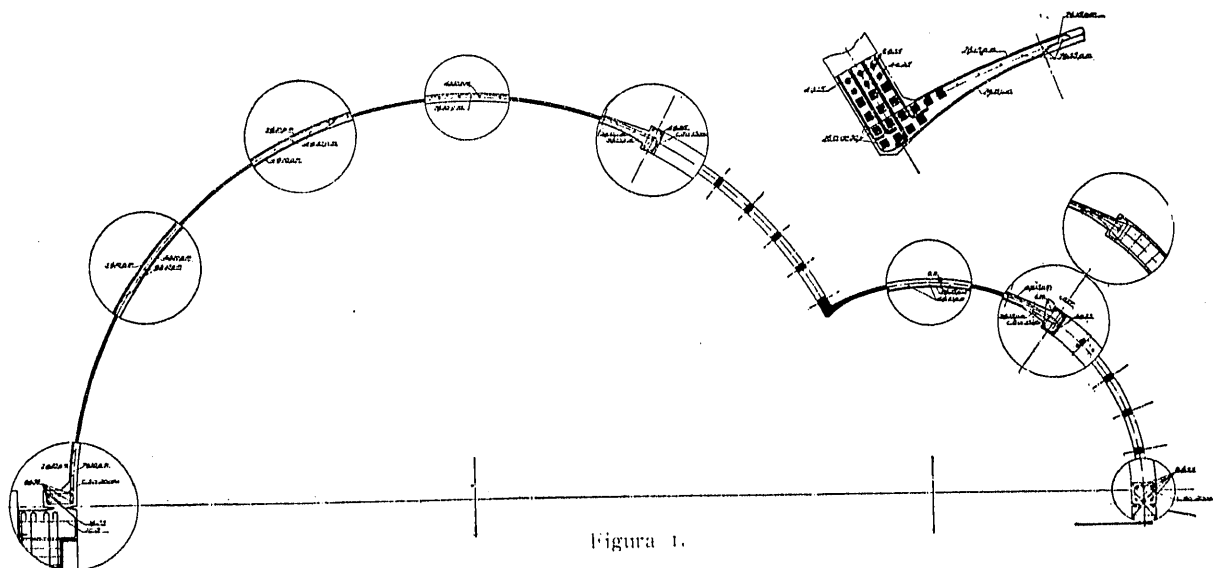
En este segundo artículo expone el autor los ensayos en modelo reducido y las observaciones en obra, comparándose ambas con los resultados del cálculo. También nos habla del proceso del hundimiento como consecuencia de las enormes deformaciones producidas por las explosiones, y termina con la copia literal de las conclusiones de la Memoria a que se viene refiriendo. Los laboriosos estudios teóricos y experimentales efectuados, unidos a la sinceridad de la exposición, así como el hecho de haber sido premiado el trabajo que aquí se resume por la Academia de Ciencias, prestan especial interés al mismo y constituyen una valiosa aportación para futuros estudios de cubiertas en lámina.

Hecho el cálculo de la lámina de cubierta, determinando los valores numéricos con arreglo a las fórmulas y métodos explicados en el artículo anterior para unas cargas de peso $P = 250 \text{ kg./m.}^2$, de viento normalmente a la superficie $V = 100 \text{ kg./m.}^2$, y de nieve $N = 65 \text{ kg./m.}^2$, se dimensionó toda la lámina y se trazaron con arreglo a estos datos los detalles de toda la estructura, y en particular, de las armaduras correspondientes, adoptando las disposiciones que se ven en las figuras 1 y 2; el espesor medio adoptado para la lámina fué de 8 cm., reforzado a 11 cm. teóricos en la parte central de la gavota.

Como las necesidades arquitectónicas de esta cubierta, que eran precisamente las que obligaban a la extraña, pero armónica, forma adoptada en doble lóbulo disimétrico, requerían la presencia de lucernarios al lado Norte en los arranques de los lóbulos, se substituyó, en esta zona, la lámina continua para

unas retículas de triángulos equiláteros, formados por barras de $15 \times 30 \text{ cm.}$ de escuadría; estas zonas reticulares resultaban asimilables a una lámina, absorbiendo los esfuerzos resultantes según las tres direcciones correspondientes a los lados de estos triángulos; ello representaba un pequeño aumento de rigidez y de peso en esta parte, con relación al resto de la lámina, que no se consideró oportuno tener en cuenta en el cálculo, para evitar una complicación todavía mayor; así, pues, se consideró para toda la lámina unos espesores virtuales medios constantes.

Antes de acometer la obra, la empresa propietaria solicitó el informe de los distinguidos Ingenieros J. E. Ribera y J. M. Aguirre, quienes lo emitieron proponiendo determinadas prescripciones, tales como el que estos lucernarios, que en el proyecto primitivo no cubrían la longitud entera de la lámina, se prolongaran hasta alcanzar las directrices extremas; que se empleara cemento aluminoso; que se exigiera



la rigidez y perfección de la cimbra, así como el descimbramiento lento, sin sacudidas; que se hiciera una prueba estática con una sobrecarga de vez y media la del cálculo, en las condiciones más desfavorables, y, con la colocación de la correspondiente instalación para la medida de deformaciones; que se asegurara la libre dilatación, defendiendo térmicamente la cubierta en lo posible; que se asegurara la indeformabilidad de los apoyos, y, en fin, que se considerara una nueva hipótesis de viento, teniendo en cuenta las posibles succiones del mismo.

Como es lógico, se procedió inmediatamente a lo que estas prescripciones obligaban, prolongando los lucernarios de extremo a extremo, proyectando la

cimbra con un gran número de apoyos y cajas de arena en todos ellos, y proyectando, también, un revestimiento exterior de placas de corcho para asegurar el aislamiento térmico.

Asimismo se repitió el cálculo, considerando como más desfavorables o extremas las dos leyes de viento: $v \sin \varphi$ y $(v \sin \varphi - 3 v \cos \varphi)$. Asimismo se tuvieron en cuenta las demás prescripciones, y aun se decidió, a propuesta de la Empresa, el estudio, de acuerdo con la Casa de Investigaciones de la Construcción, S. A., de un modelo reducido sobre el cual pudiera no solamente comprobarse la resistencia a la rotura con una carga superior a la del cálculo, sino también la correspondencia de los resultados de éste con la realidad, en la medida de lo posible.

Comprobación en modelo reducido.

Estudiadas las diferentes posibilidades de materiales y métodos de fabricación, se decidió construir el modelo, a escala undécimo, con mortero especial o material armado, para lo cual se establecieron las condiciones siguientes:

Características físicas del material:

Carga de rotura a compresión	De 200 a 250 kg./cm. ²
Idem a tracción.....	30 - 50 "
Coefficiente de dilatación térmica	Entre 1 y 0,5 de la armadura.
Coefficiente de Poisson.....	Entre 0,10 y 0,20.
Módulo de elasticidad.....	Entre 250 y 350 000 kg./cm. ²
Adherencia a las armaduras.	Normal, sin especificarse límites.
Las armaduras de acero dulce con una carga a tracción	35-45 kg./mm. ² , un límite elástico de 20-25 kg./mm. ² y un alargamiento 25-30 %.

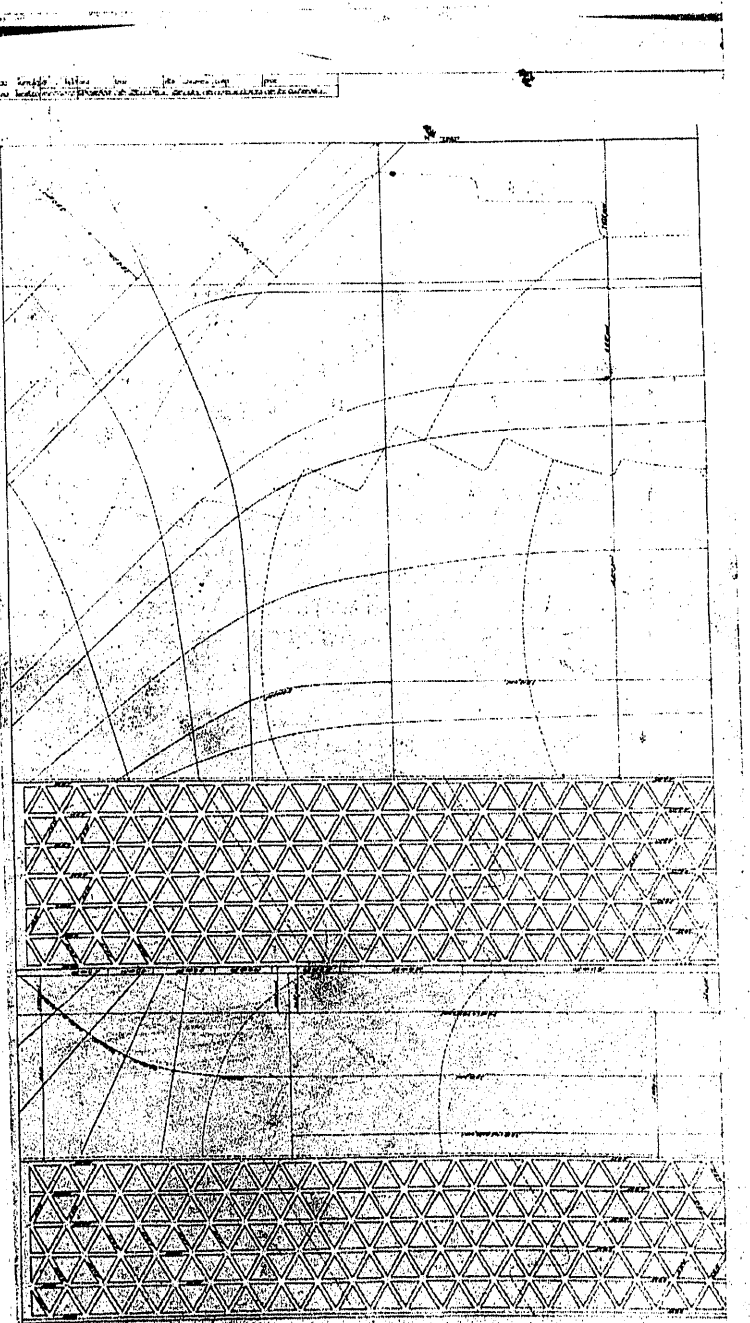
Las sobrecargas de peso muerto, viento y nieve, habían de poder establecerse conjunta o separadamente, pudiendo hacer todas las operaciones de carga y observación sin necesidad de entrar debajo del módulo cargado, para evitar toda posibilidad de accidentes.

Las cargas repartidas podrían sustituirse por pequeñas cargas concentradas equivalentes, no espaciadas en ningún sentido a más de 20 cm.

En caso de rotura, la carga de peso muerto, que era la principal, había de desaparecer automáticamente al sobrepasar el descenso de un centímetro, para poderse estudiar la iniciación y desarrollo de la rotura, deteniendo ésta en los primeros momentos.

La rotura o el fallo de un elemento que provocase la desaparición de cualquiera de estas sobrecargas debía provocar, obligada e instantáneamente, la de todas las demás o, por lo menos, las de toda la directriz correspondiente, para evitar la rotura del modelo por desigualdad de carga no realizable en la obra.

Las sobrecargas habían de ajustarse a las leyes de repartición previstas sobre la directriz, con variaciones



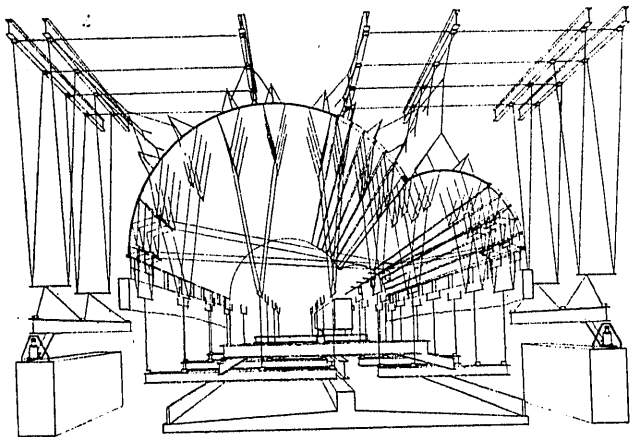


Figura 3.

menores del 15 por 100, y ser uniformes a lo largo de las generatrices.

El modelo debía comprender no sólo la lámina, sino las palizadas de sustentación de los piñones y el sistema de bielas y anclajes, montándose todo ello sobre muros o vigas similares al marco de apoyo real.

Por último, los aparatos de observación debían preverse para determinar transversalmente los recorridos de la directriz media, con apreciaciones de décima de milímetro, y longitudinalmente, el alargamiento de la gaviota, con apreciaciones de la milésima de milímetro.

La Casa ICON ponía el modelo, los aparatos y medios de observación y un ayudante operador, durante quince días, a disposición de la Dirección Técnica y del personal de observadores que ésta designase, y se reservaba la composición del material y los métodos de ejecución y puesta en obra.

Con estas condiciones como norma, se proyectó y construyó el modelo, adoptando la disposición que se ve en las figuras 3 y 4.

La de peso muerto se estableció por medio de una serie de balancines, de tal modo dispuestos; que la rotura de un hilo cualquiera llevaba consigo la descarga de todo el sistema, como tuvo ocasión de comprobarse por dos veces durante el desarrollo de las observaciones.

La carga total de peso muerto venía representada por una losa inferior de hormigón armado, que quedaba suspendida de los balancines al accionarse desde el exterior los gatos hidráulicos.

La descarga se hacía rápidamente, con sólo accionar la llave de escape de los gatos; pero, además, como éstos sólo se descargaban hasta despegar la losa del suelo, el menor asiento de la cubierta bastaba para descargarla, volviéndose entonces a elevar los gatos para recuperar la carga a voluntad.

Las succiones de viento se establecían en una forma análoga, suspendiendo los muertos exteriores por medio de otros dos gatos hidráulicos, y las leyes de distribución de los esfuerzos se podían variar, trasladando en los balancines de estos muertos el punto de suspensión.

Las presiones centrípetas de viento se establecían por medio de pequeños pesos interiores que tensaban los balancines correspondientes a estas cargas en los extremos de los faldones; pesos que, por su menor importancia, se colocaban a mano antes de establecerse en cada ensayo la carga de peso muerto.

Por último, la carga de nieve se establecía directamente, sustituyéndola por arena colocada sobre la lámina.

Para la determinación de las dilataciones de la gaviota se dispuso longitudinalmente un auscultador micrométrico, en comunicación con un telemicrodeformómetro, que permitía apreciar en los 20 cm. cen-

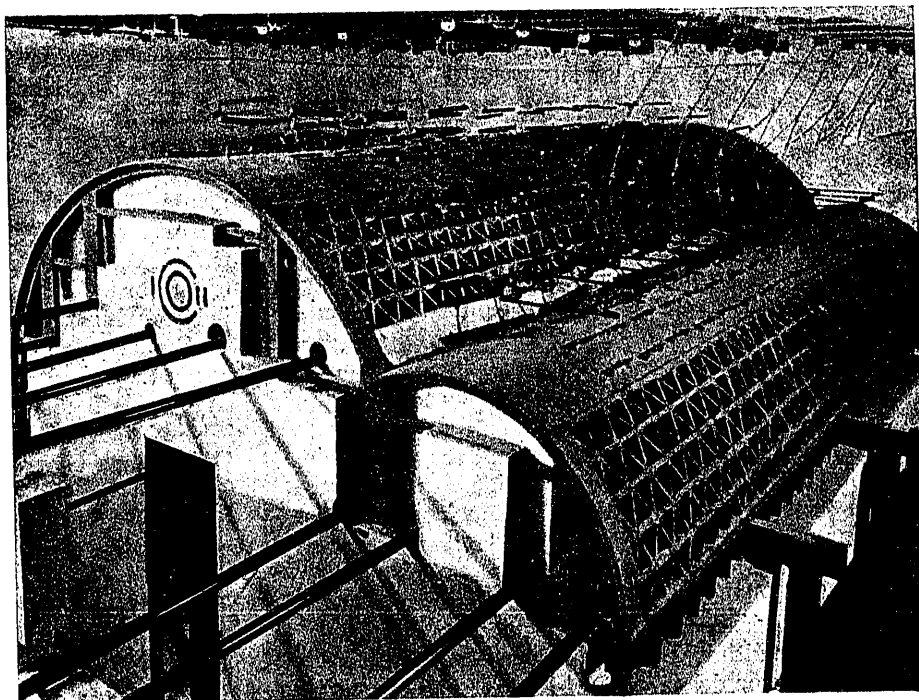


Figura 4.

trales de la gaviota dilataciones del orden de 2×10^{-7} metros, o sea el quinto de la milésima de milímetro.

Habiéndose considerado preferibles para la determinación de las flexiones transversales, particularmente interesantes de comprobar, la determinación de la elástica de la directriz central, se dispusieron en doce puntos de ésta doce sistemas formados por una plomada y una aguja vertical, sujetos a la cubierta y cuyos movimientos se observaban sobre un retículo fijo al marco base. De este modo se conocía, por el movimiento de la plomada, el recorrido horizontal del punto en cuestión; por el movimiento vertical de la aguja, el recorrido vertical del punto, y por el movimiento horizontal de la aguja con relación a la plomada (dividiéndole por la longitud de la misma), el giro de la normal o de la tangente a la directriz.

La lectura sobre los retículos desde el exterior se hacía por medio de grandes anteojos, o mejor dicho, microscopios, ya que el sistema óptico es el de éstos, gracias a los cuales se apreciaban los movimientos en décimas de milímetro; como los recorridos se salían normalmente del campo de los microscopios, éstos eran móviles; para facilitar las lecturas, las divisiones de los retículos llevaban colores diferentes cada milímetro, con lo que la localización y la lectura era suficientemente rápida.

No vamos a detallar aquí los ensayos efectuados sobre este interesante modelo, que abarcaron dieciséis series de lecturas, con cargas completas en diferentes condiciones de sobrecarga, y que ponemos a disposición de quien lo desee, lo mismo que todos los demás datos; pero dibujamos en la figura 4 las curvas resultantes por flexión en la directriz media, deducidas experimentalmente de este modelo reducido y comparadas con las de cálculo, y con las que se obtuvieron por medición directa en la obra. Dibujamos éstas porque, indudablemente, de todos los esfuerzos o tensiones que actúan sobre la lámina, las más sensibles de cálculo a las variaciones de rigidez o de sobrecarga en la obra, son indudablemente las flexiones a lo largo de la directriz, y las que con más cuidado convenía analizar, dado el exiguo espesor de la lámina, al que obligaba la condición del mínimo peso necesario para obtener una cubierta económica, ya que, con estas luces, el peso propio es, con gran diferencia, la carga fundamental.

Durante todo este conjunto de ensayos, el modelo resistió perfectamente sin acusar fatiga, con deformaciones sensiblemente elásticas; solamente se pudo apreciar alguna pequeña fisura en la lámina, en el arranque superior de las cuatro primeras diagonales en tracción del lucernario alto, con abertura y comportamiento elástico, acusándose apenas por la cara interior. Por último, una fisura apenas perceptible en la parte inferior del faldón del lóbulo grande, coincidente sensiblemente con el eje por la cara externa.

Ambas aparecieron en zonas de tracción con fuerte

cuantía de armadura, en las que, dadas las condiciones del material, su presencia era obligada teóricamente, y, por otra parte, el no llegar la del faldón a aparecer por la cara interior y el reaccionar elásticamente la de los lucernarios bajo la acción de cargas repetidas superiores a las normales de la obra, no permitía considerarlas como síntoma de defecto de resistencia.

Sin embargo, y como consecuencia de todo ello, se reforzaron las armaduras de estas diagonales en obra, sensiblemente al doble de la sección proyectada, dado que el coste de este refuerzo resultaba insignificante en el conjunto de la obra; se aumentó a tres metros la entrega de estas armaduras en la lámina contigua y se reforzó o prolongó el aumento de espesor de la unión de la lámina con el lucernario, entendiéndose que, por lo demás, las observaciones efectuadas ratificaban la disposición y secciones adoptadas en el proyecto.

La construcción y el descimbramiento.

La construcción se llevó, con la Casa Huarte y C.^a, a una gran velocidad, por necesidades de la Empresa propietaria, empezándose la excavación de cimientos el 10 de septiembre y terminando el 23 de diciembre del mismo año el descimbramiento de la cubierta, después de haber hormigonado las cinco plantas del edificio; ello y las condiciones impuestas en la cimbra, obligaron, naturalmente, a emplear una gran cantidad de madera, y solamente con el empleo del cemento aluminoso en las últimas plantas, pudo alcanzarse esta velocidad; toda la lámina de cubierta quedó encofrada simultáneamente; las armaduras se colocaron en la forma usual, atando unas con otras con alambre, sin dificultades especiales; las armaduras delgadas se colocaron enterizas, y las de gran diámetro se empalmaron con ganchos solapados, contrapeando debidamente los empalmes.

No era posible utilizar este sistema de empalme para el cordón de gaviota, cuya armadura estaba formada por un paquete de 16 cuadrados de 50 mm., alojados en muy reducido espacio.

Sus empalmes se hicieron con soldadura eléctrica por la Casa Esab Ibérica, S. A., haciendo la soldadura en V, previo corte en bisel, de las barras.

Se comenzó el trabajo empleando electrodos OK 47, con una carga de rotura de 48-51 kg./mm.² y un alargamiento de 28 por 100; pero la necesidad de aumentar la marcha de los trabajos, que venía limitada por esta operación, y la falta de suficiente número de operarios de toda confianza, obligó a sustituir este tipo de electrodo por el OK, con carga de rotura y alargamiento de 47-50 kg./mm.² y 12 por 100, respectivamente.

Se fué particularmente exigente en la elección de los soldadores, obteniéndose en las diferentes pruebas roturas en las barras por fuera de las soldaduras; en

cuanto a la disminución del alargamiento con el cambio de electrodo, el hecho de no haber cargas alternativas ni flexiones o esfuerzos transversales en las barras después de soldadas, indujo a aceptarlo también sin inconveniente. Es interesante observar, aun cuando sea ahora fuera de lugar, que ni una sola soldadura falló, a pesar de los enormes esfuerzos que hubieron de soportar en los últimos momentos.

El hormigón, como se ha dicho, fué de cemento fundido electroland, con una dosificación media de 300 kg. de cemento por metro cúbico. El garbancillo de San Fernando y la arena de Manzanares, se proporcionaron experimentalmente para obtener la máxima compacidad, y el agua para obtener una consistencia plástica blanda, favorable al apisonado.

La elevación de temperatura por fraguado, aunque bien apreciable, fué pequeña por lo reducido de los espesores, y sin importancia en la época fría en que se hizo el hormigonado.

Éste se hizo en seis días, siguiendo para las juntas las líneas indicadas al efecto en el proyecto y trazadas a la vista del plano de isostáticas, con objeto de dejarlas en lo posible normales a los esfuerzos principales de compresión, de disminuir la longitud de juntas en zonas a tracción, y en fin, de permitir la libre contracción de fraguado y enfriamiento de cada zona de hormigonado, ciñendo a límites prudenciales sus dimensiones para evitar agrietamientos por contracción dentro de cada zona; además, aquellas juntas en que podía tenerse alguna abertura de fraguado, por unir dos zonas de hormigonado de gran longitud o fondo normal a la junta, se dejó ésta con una anchura de unos veinte centímetros, los cuales se hormigonaron después de terminada la contracción de las zonas contiguas.

Cumpliendo las prescripciones del informe, se había mandado montar rápidamente los aparatos necesarios para la determinación de las flechas y recorridos de la cubierta durante el descimbramiento, así como de las cargas reales de trabajo en los puntos principales de la estructura, tanto durante el descimbramiento como durante el período siguiente. Dada la altura (25 metros) de la cubierta sobre la cancha, dadas las grandes dimensiones de la sala y el estar atravesada por la cimbra, resultaba imposible hacer la medida de flechas en la forma corriente, refiriéndolas a puntos fijos del terreno, y no eran tampoco de fiar las medidas topográficas que se pudieran hacer, dada la falta de puntos fijos inmediatos a la cubierta; la determinación de recorridos o movimientos se hizo, pues, con un sistema de flexímetros de hilo autorreferentes, con los que se podía apreciar bien el milímetro, y en cuanto a las tensiones de trabajo, se prepararon auscultadores embebidos en la masa del hormigón.

Para el descimbramiento se montó una plataforma o caseta de mando, a 18,50 metros de altura sobre el piso de la sala, y a 7 metros por debajo de la clave

de la cubierta, para, desde allí, poder dirigir la operación.

Esta plataforma de mando comunicaba telefónicamente con la cabina de auscultación y con otros dos teléfonos colocados sobre la clave de cada uno de los lóbulos.

En la cabina de auscultación, un operador tomaba las lecturas de la instalación de control y las observaciones que le comunicaban los observadores situados sobre la cubierta, y con todas ellas, un delineante apuntaba las cargas de trabajo y dibujaba las curvas de descenso o elásticas de siete directrices igualmente espaciadas a lo largo de toda la cubierta, de tal modo que en la caseta de mandos se conocían periódicamente todos estos datos y se podían ordenar con toda seguridad las maniobras de descenso, que iban a su vez dirigidas por tres ayudantes en comunicación directa con la caseta a través de las pasarelas que unían las cajas de arena.

El gran número, quizá excesivo, de estas cajas, hacía que estas operaciones fueran lentas, a pesar de disponer de suficiente número de peones para que cada uno no tuviera que manejar más que dos cajas. Cada peón disponía de bolsas de litro y medio de capacidad, en las que iba recogiendo la arena que sacaba de la caja cada vez que recibía la orden correspondiente, y una vez comprobado por el jefe de equipo que todas las bolsas estaban llenas, se repasaban todas las cajas, golpeándolas con maza para ayudarlas a descender, pues la escasa carga de trabajo que soportaban y el estar los puntales unidos por los arriostamientos, dificultaba mucho y retrasaba el descenso.

El descenso de la lámina durante todo el descimbramiento fué perfectamente regular a lo largo de todas las generatrices, y por consiguiente, todos los movimientos se acusan bien en la figura 5, en la que se ven los movimientos de la directriz central comparados con los del cálculo y con los obtenidos en modelo reducido.

La simple vista de la figura basta para acusar la perfecta correspondencia entre los valores acusados por el modelo y los correspondientes a la obra, y la proximidad de todos ellos a la curva de cálculo, de la que se separan solamente para marcar una pequeña disminución de las flechas en el lóbulo pequeño, con el correlativo aumento en las del lóbulo grande a la

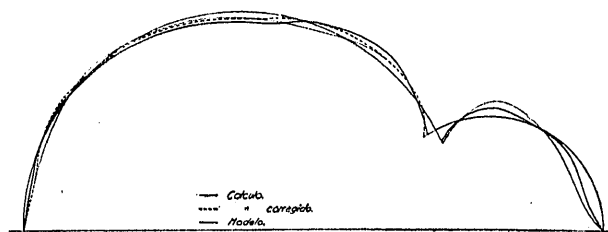


Fig. 5. — Diagrama comparativo de flexiones.
Escala, 1 cm. <> 50 mkg.

salida del lucernario alto, fenómeno provocado por la ya indicada diferencia de rigidez y de peso de estas zonas con el resto de la lámina.

Es satisfactorio observar la correspondencia de las deformaciones o elásticas y la presencia de los cuatro puntos de inflexión de la ley de flexiones previstos en el cálculo, con diferencias menores de 15" en la directriz.

Tanto durante el descimbramiento como durante las pruebas de sobrecarga, que se hicieron en los días siguientes con sacos de tierra, la membrana se comportó perfectamente; las juntas de hormigonado resultaron eficaces, sin aparecer fisuración en ellas, y a pesar de la rapidez con que se hizo el hormigonado y las grandes dimensiones de la cubierta, solamente se observaron pequeñas fisuras locales sin importancia resistente en los puntos siguientes: arranques de las barras en tracción del lucernario alto, junto a los apoyos que, lo mismo que los correspondientes del modelo reducido, correspondían perfectamente al alargamiento elástico teórico del acero en estas piezas, en las que, al cambiar bruscamente el tipo de sección, el escaso volumen de hormigón que rodeaba las armaduras no era suficiente para evitar la fisuración, y, por consiguiente, no tenía importancia.

Otras, sin interés en cuanto a la resistencia de la lámina, pero que son interesantes de señalar a los efectos de construcciones análogas, son las que se hacían apenas perceptibles en la lámina del lóbulo menor, a unos tres metros de la gaviota, hacia los extremos de ésta con inclinación de 45° con relación a ella y solamente por la cara superior. Un estudio detenido en ellas, indicó claramente que no se trataba de un alargamiento de la armadura a esfuerzo cortante, como pudiera pensarse en el primer momento, sino de una combinación de la tensión cortante con los fenómenos de torsión, cuyo efecto resistente no se había tenido en cuenta en el cálculo.

Por último, se pudo apreciar también una pequeña fisura no completa, que seguía aproximadamente la generatriz de clave del lóbulo grande, como consecuencia de la flexión producida en esta zona, según se había observado ya en el modelo, por el exceso de peso y de rigidez del lucernario, que en la obra se extendía no solamente a esta zona, sino también en la parte continua de la lámina, por haber prolongado el refuerzo de las armaduras de las diagonales en tracción, como consecuencia de las observaciones hechas en el modelo; además, el exceso de peso del lucernario se había aumentado mucho durante la última parte del descimbramiento, por quedar la cimbra colgada de esta parte al agarrarse el encofrado al lucernario y a la parte inmediata de la gaviota, por efecto de su mayor concavidad, siendo necesario, al final, desclavar los puntales del encofrado para desarmar éste, con lo que la fisura volvió prácticamente a cerrar.

Aparte de esto y contra lo que se había previsto,

no se observó ninguna grieta en el resto de las zonas muy armadas a tracción, con pequeños espesores, donde son siempre frecuentes.

Los efectos de una explosión.

La obra se comportó perfectamente, sin nada que señalar, hasta el año 38, en que recibió varios impactos que atravesaron la lámina, provocando algunos de ellos el destrozo de la misma y la desaparición completa del hormigón en varios metros cuadrados por cada agujero, sin que de momento se hiciera ningún reconocimiento a fondo de la obra.

Regresado, por mi parte, a Madrid, después de la liberación, hice una primera inspección de la obra, observando un gran movimiento en la gaviota y una fuerte dislocación en la clave, lo que me hizo aconsejar, en el oportuno informe, la reparación o refuerzo de la cubierta. Como no podía observarse, por la altura y por los recubrimientos térmicos, impermeabilizantes, etc. que llevaba la lámina, la totalidad de las fisuras o agrietamientos que pudieran existir, y habiendo sido arrancado en el verano de 1936 las conexiones y aparato central de los auscultadores, por confundirlo con una radio clandestina, no era posible, por desgracia, tener todos los datos posibles, que seguramente hubieran sido de gran interés técnico para estudiar el fenómeno de la rotura inicial de la lámina. De todos modos, la inspección de la obra, lo más detallada y concienzudamente que pudo hacerse, permitió reconstruir con bastante seguridad el proceso en la forma que vamos a exponer, como fué comprobándose después al iniciar la reparación e ir descubriendo la estructura.

Más que los impactos en sí, lo que perjudicó a la lámina fué la producción de una fuerte onda explosiva, consiguiente a alguno de los impactos, que se debió producir con un centro exterior e inmediato a la bóveda. Induce a creerlo así, el que no sufrieran en general los vidrios de los lucernarios que se encontraban en la cara opuesta, y el que, por el contrario, saliera totalmente arrancado y despedido el recubrimiento de uralita en una amplia zona alrededor del punto de impacto; fenómeno que no se acusaba en otros boquetes.

Considerando el fenómeno en el momento de onda positiva, es decir, de presión centrípeta sobre el lóbulo, éste debe sufrir un recorrido radial hacia adentro muy grande (curva 1, fig. 6). El lucernario tiende a levantarse; pero no sólo su mayor rigidez, sino la misma curvatura de la bóveda hacen que un recorrido radial produzca, necesariamente, una flexión mucho más fuerte de la directriz entre la clave y el lucernario, y que, por consiguiente, allí se produzca una deformación plástica de la armadura, con una dislocación completa de la sección. En el momento de onda negativa o de vacío (curva 2, fig. 5),

el fenómeno se invierte y el lucernario desciende. En la clave se producen también recorridos horizontales, y particularmente la componente horizontal de la onda de succión tiende a recorrer la clave hacia la izquierda y abrir la grieta de rotura por tracción.

Una vez perdida la resistencia a flexión en este punto, el lucernario desciende, perdiendo curvatura; la clave sube y el trabajo del lucernario, trabajando como alma de viga en gaviota, aumenta importantemente. La línea de la gaviota, por tanto, sufre un recorrido hacia abajo, en sentido tangencial al lóbulo grande, con variaciones pequeñas en el recorrido radial.

Al aumentar el trabajo de viga en el lucernario, aumenta la tensión, tanto en el cordón longitudinal de la gaviota como en las diagonales estiradas del lucernario, particularmente en las partes extremas, junto a las directrices de apoyo, siendo probable la fisuración de estos elementos, muy sobrecargados de hierro y con poca sección de hormigón. Efectivamente: la existencia de estos agrietamientos, que no habían podido observarse en la primera visita, y cuya posibilidad se indicaba ya en el informe, se comprobó al empezar la revisión más detallada de los lucernarios, apreciando grietas de más de dos milímetros en las seis diagonales extremas de cada lado.

Es particularmente importante señalar que, una vez producido un movimiento importante de las generatrices altas del lucernario hacia el interior del

edificio, estas generatrices, que están comprimidas, tienen una tendencia muy fuerte a pandear.

Considerando el elemento formado por uno de los montantes o elementos del lucernario que sigue la dirección de la generatriz, podemos observar que

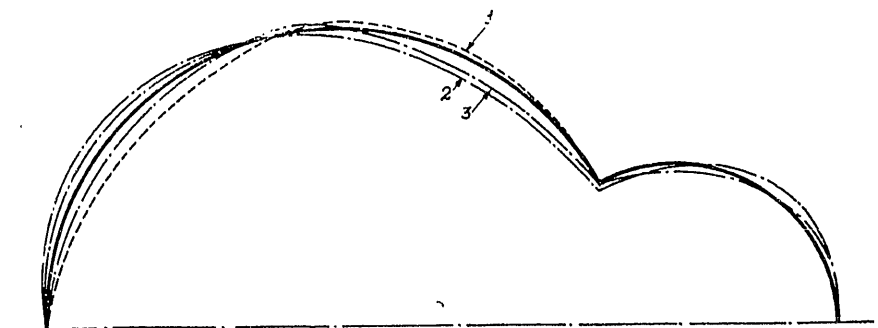


Figura 6. — Deformaciones por onda explosiva.

la esbeltez de esta pieza o relación entre la longitud total de la misma y su escuadría, es enorme, y que el pandeo está limitado prácticamente por la resistencia a flexión de las directrices.

La generatriz, comprimida y curvada hacia adentro, tiende, naturalmente, a aumentar esta deformación, y sufre, por efecto de la misma, un aumento en su carga de compresión longitudinal, así como las directrices sufren también aumentos muy fuertes de flexión. Las deformaciones lentas del hormigón en esta nueva condición, aun cuando sean pequeñas porque la edad del hormigón fuera ya grande, pueden producir, dada la esbeltez de la pieza, deformaciones radiales grandes en un período de tiempo suficientemente largo; por consiguiente, cabía perfectamente la posibilidad de que, encontrándonos en condiciones de estabilidad de forma precaria, la deformación y el peligro de rotura aumentase con el tiempo. Por esta razón, se indicaba en el informe la conveniencia de establecer nuevamente un sistema de medida, para asegurar si esta deformación continuaba o no, y era también importante el determinar la ley de variación de las contra-deformaciones que se pudieran obtener al aplicar cargas sucesivas en la clave.

Encauzando el problema con todos estos datos y posibilidades, se hizo el anteproyecto de una posible reparación de la cubierta (fig. 7), consistente en hormigonar unos anillos armados sobre el lóbulo grande hasta el lucernario, fuertemente anclados en la generatriz de éste, por un lado, y en la parte vertical del faldón por otro, y proveyendo a estos anillos de unos

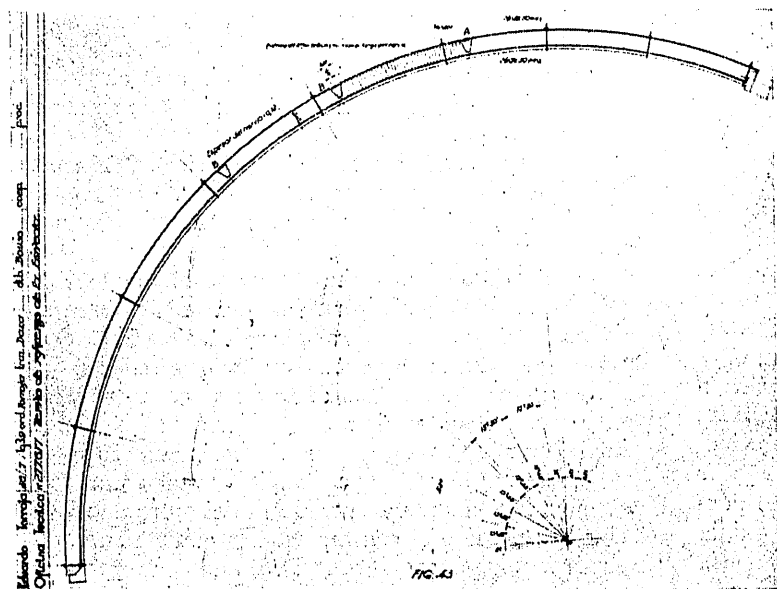


Figura 7.

tensores en la armadura principal exterior y de unos estribos de anclaje a la lámina, unidos también con tensores a la cara exterior del anillo.

Con estos elementos se proyectaba hacer la reparación, tensando la armadura exterior (punto A, figura 5) del anillo para producir un empuje centrípeto, con el consiguiente descenso de la clave y el cierre de la grieta, de tal modo, que el lóbulo tendiera a volver a su posición primitiva, levantando el borde alto del lucernario y bajando la clave.

La maniobra se proyectaba, para completarla, hormigonando los anillos de tal forma que quedaran separados en determinadas zonas algunos centímetros de la lámina para tirar de ella, mediante los estribos regulables, hasta ponerla en contacto con el anillo, produciendo, con ello, un recorrido radial hacia afuera de esta zona para asegurar más el ajuste de las directrices a su nueva posición.

Esta corrección hubiera podido ser necesaria en la parte del faldón grande, ya que el momento flector que se produce en la clave, al tensar la armadura para cerrar la grieta, tiende a producir recorridos radiales en las partes laterales del faldón grande.

Para compensar este fenómeno, se disponían también tensores suplementarios de la armadura longitudinal exterior de los nervios (punto B, fig. 6) en esta zona, con objeto de tener mayor número de variables a disposición para corregir la forma de cada directriz. No se hizo un cálculo completo de la resistencia de estos elementos, ya que su coste era relativamente pequeño, y era preferible, por consiguiente, ir con un exceso de hierro, y por otra parte, no se tenía, *a priori*, un conocimiento exacto de los esfuerzos que habría que producir, principalmente porque se desconocía hasta qué punto las deformaciones eran de carácter elástico o habían adquirido ya un valor plástico, en cuyo caso, para deshacerlo y volver a la posición primitiva, hubiera sido necesario producir reacciones mucho mayores de las que proporcionaría un cálculo elástico.

Como se indicaba en el informe, se presentaban dos posibilidades de asegurarse de las condiciones de estabilidad de la obra: una, la de hacer una prueba de carga en las peores condiciones posibles y mantener la obra en observación para asegurarse de que las deformaciones perjudiciales no aumentaban con el tiempo, y otra, hacer esta reparación, cuya finalidad fundamental era la de volver la lámina a su posición de trabajo primitiva y dejarla reforzada; se adoptó, justificadamente, esta segunda solución, no solamente porque con ella se había de mejorar las condiciones resistentes de la estructura, sino porque el hacer solamente la prueba de carga exigía hacer un apeo total de la obra en grandes condiciones de seguridad, para que el personal pudiera colocar la carga sin peligro, en unos momentos en que iba a

carecer por completo de un coeficiente de seguridad previsible.

Sin embargo, para asegurar más las posibilidades de éxito de la reparación y de las condiciones de seguridad en que se ejecutara, se consideró conveniente hacer una reparación preliminar, consistente en concentrar la carga muerta de la zona alta del lucernario grande a lo largo de las zonas más inmediatas a las generatrices rotas de clave, con objeto, en primer lugar, de mejorar las condiciones resistentes del conjunto, y en segundo lugar, de ver si al hacer esta operación y obligar a descender con ello la clave, reaccionaban efectivamente las generatrices altas del lucernario, con recorridos radiales hacia el exterior, o, por el contrario, si la estabilización producida por la deformación plástica les impedía este movimiento, en cuyo caso habían de proveerse los anillos de reparación para unos esfuerzos mucho mayores, ya que se había de vencer, elásticamente, la gran deformación plástica producida, y la reparación era no solamente más costosa, sino de una eficacia más problemática.

El hundimiento.

Para llevar a cabo las operaciones que acabamos de indicar, cuyo comienzo, por desgracia, hubo de retrasarse aún algunos meses por causas diversas, se empezó a elevar un andamiaje y a descubrir la lámina, levantando el revestimiento de uralita y corcho de la parte superior y los cristales de los lucernarios, con objeto también de hacer una revisión más detallada de la obra. Asimismo se colocaron diferentes flexímetros y fisurógrafos para poder acusar cualquier variación de forma de la estructura y evitar accidentes, dada la situación peligrosa de la obra, que hacían más difíciles las maniobras inherentes a esta operación.

En estas condiciones, en la tarde del 15 de agosto, coincidiendo con una tormenta bastante violenta, se acusó la iniciación de un nuevo descenso del lucernario.

Antes de media noche sobrevino el hundimiento, por continuación de los movimientos iniciados en una forma análoga a la indicada en la figura 8, es decir, provocado por un aumento muy importante en la pérdida de curvatura de las directrices centrales del lucernario, con giro inicial importante de éstas y con una elevación fuerte del empuje horizontal en la clave, que empujó al lóbulo grande, cayendo una parte de él en la zona lateral, por fuera del muro de rebote. Una vez perdido el contrarresto, la gaviota sufrió un giro por torsión, muy grande, volcando en parte sobre las tribunas y en parte sobre la cancha, sin que el andamiaje iniciado, y que no había llegado a la altura

de la lámina, pudiera, naturalmente, impedir el fenómeno. El giro de la gaviota se produjo a lo largo de una generatriz del lucernario pequeño, como se indica también en la figura 7.

Desde la gran altura del edificio, el hormigón quedó, en general, totalmente deshecho. Como ya dijimos antes, el trabajo longitudinal que la viga en gaviota hubo de desarrollar, fué mucho mayor que el esperado, pero quedaron en gran parte intactas las zonas extremas del lucernario que sufren los máximos esfuerzos cortantes correspondientes a la viga gaviota, y el cordón o armadura principal de ésta, formada de dieciséis cuadrados de 50 mm., soldados eléctricamente a tope y envueltos con una sección de hormigón relativamente pequeña, quedó arrancado del hormigón, sin romperse ninguna de las soldaduras, a pesar de los enormes esfuerzos que debieron sufrir en los últimos momentos.

Prescindiendo de detalles e hipótesis sobre las causas inmediatas del hundimiento, es importante destacar, desde un punto de vista técnico, que la rotura se produjo, indudablemente, no por un defecto en el trabajo que pudiéramos considerar principal de la estructura, es decir, en el trabajo longitudinal de piñón a piñón, sino exclusivamente por una falta de rigidez transversal de las directrices centrales del arco en el lóbulo grande, provocada por la rotura y brusca deformación de estas directrices bajo la acción de la onda explosiva.

Siendo esto así, extraña a primera vista el que el hundimiento no se produjera simultáneamente con la explosión; sin embargo, hay que tener en cuenta, de una parte, que pudo haber ese día pequeños factores capaces de iniciar la rotura, dadas las malas condiciones de resistencia en que ésta se encontraba, y por otra parte, que una vez producido, por efecto de la explosión, un recorrido radial permanente de las generatrices altas del lucernario, hacia el interior de la bóveda, las generatrices correspondientes que están trabajando a compresión sufren un efecto de pandeo importante, que tienden a aumentar el recorrido centrípeto, como ya se ha indicado anteriormente, y que la deformación lenta de tipo plástico, consiguiente a las altas cargas de trabajo en que se encuentran anormalmente estas generatrices, puede hacer que el efecto de pandeo vaya aumentando muy lentamente, pues ya se sabe que estas deformaciones importantes en el hormigón duran varios años y, por tanto, al cabo de los meses la obra se encuentra en unas condiciones de estabilidad de forma mucho peores que en el momento inicial del accidente.

Las conclusiones.

Para determinar esta ligera exposición, copiaremos de la Memoria ya citada y de cuyo texto hemos entresacado estos dos artículos, las conclusiones finales, que dicen:

"La combinación de lóbulo cilíndrico de diferente radio y la sustitución de la lámina por sistema reticulado triangulares, formando parte esencial de aqué-

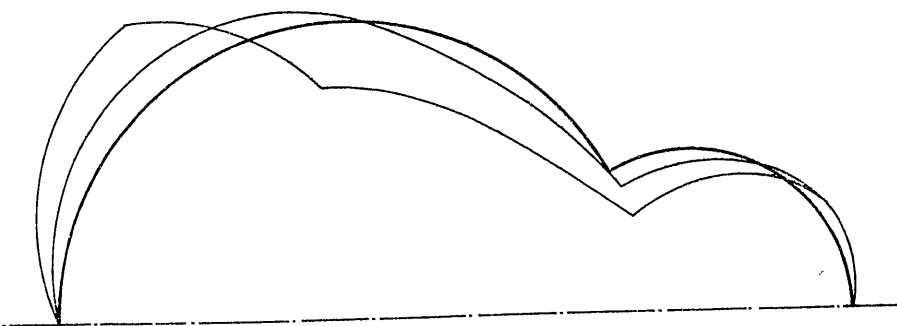


Figura 8. — Procesos finales de movimiento.

llos, se comporta perfectamente, prestándose a gran número de soluciones.

La supresión de la viga de descarga de la gaviota, si bien obliga a un aumento de armadura, simplifica la ejecución y favorece enormemente el valor funcional y estético del conjunto; pero la gran flexibilidad de la gaviota con relación al resto de la lámina, provoca esfuerzos de torsión que no deberán olvidarse en caso de sobrepasar las proporciones adoptadas, y probablemente convendrá entonces disminuirlos con el empleo de anillos transversales de refuerzo, para cuyo cálculo puede considerarse la lámina heterogénea sin excesiva complicación.

El sistema de cálculo empleado, permite, efectivamente, la determinación de los esfuerzos en cualquier punto de la lámina, si bien la complicación es grande y requiere un núcleo relativamente amplio de personal bien especializado y de una buena organización de trabajo para evitar errores graves.

Esta complicación es mayor en nuestro caso, por ser el perfil asimétrico bastante peraltado, lo que obliga a considerar leyes para la repartición sobre la directriz de las cargas de peso, de viento y nieve, y por el deseo de obtener en el cordón de la gaviota, bajo la acción simultánea de todas las cargas, una tensión de trabajo económica, previamente fijada."

Los resultados del cálculo y las observaciones en la obra han venido a comprobar, una vez más, que no puede prescindirse de las flexiones transversales ni admitir una ley lineal para los esfuerzos longitudinales, asimilando el problema a los de membrana pura o viga recta.

La influencia del segundo término de la serie de Fourier (en que se han de considerar desarrolladas las cargas exteriores a lo largo de las generatrices), ha resultado muy pequeña, y prácticamente hubiera podido prescindirse de ella, sin error grave en este caso; pero esto no puede generalizarse.

La diferencia de rigidez y de peso entre los lucernarios y las láminas ha acusado, tanto durante la experimentación sobre modelo como en la observación de la obra, alteraciones en la ley de reparto de flexiones sobre la directriz, acusándose una gran sensibilidad de estas flexiones bajo las heterogeneidades de la lámina o acciones exteriores, por lo cual consideramos recomendable proyectar las armaduras correspondientes con cierta amplitud.

Las dilataciones térmicas y contracciones de fraguado no son inconveniente para la realización de cubiertas de este tipo con mayores dimensiones.

Tanto la instalación en modelo reducido como la de control mecánico-elástico de la propia obra han proporcionado datos utilísimos para la corrección y comprobación de los resultados teóricos, acusándose el gran partido que puede sacarse de ellos y la tranquilidad que representan para la ejecución de una obra delicada.

El nuevo tipo de instalación adoptado para el modelo reducido con sistema de cargas representa un gran avance en esta rama de la técnica, permitiendo la repetición rápida y cómoda de las cargas con toda seguridad en el trabajo.

El empleo de flexímetros autorreferentes o de hilo de tensión constante, ha sido particularmente útil y satisfactorio durante el descimbramiento; hubiera sido, sin embargo, interesante, completar la instalación con el empleo de clinómetros, para determinar con precisión la ley real de flexiones de la directriz durante el descimbramiento.

La ejecución de la obra no presentó dificultades especiales. No correspondiéndonos la dirección económica de la obra, que fué llevada por administración, no podemos dar datos sobre el coste de la misma, y únicamente podemos indicar como orientación sobre este punto, que la cubicación arroja las cifras medias por metro cuadrado de cubierta de 0,086 m.³ de hormigón y de 13,8 kg. de acero en armaduras, excepto en la zona de la gaviota, donde aumenta a 44 kg./m.², y que estas unidades no presentaron mayor complicación de ejecución que una obra corriente.

La colocación de las armaduras en la lámina es sumamente sencilla y rápida, presentando mayor trabajo únicamente en los lucernarios, cuyas barras van armadas con pequeños pilares y el cordón de la gaviota, en el que se recurrió con éxito a la soldadura eléctrica para concentrar la armadura a un límite al que no hubiera podido llegarse con los tipos corrientes de empalme.

La cimbra, en cambio, hubo de representar, en el caso particular de esta obra, una parte importante del coste total, porque la gran rapidez a que hubo de trabajarse, por razones financieras, impidió preparar el estudio y el material necesario para hacerla sin cimbra o con cimbra parcial, único procedimiento de obtener las máximas ventajas económicas de este tipo de cubierta, en cuanto la altura de la sala es algo grande.

Los movimientos de la obra durante el descimbramiento acusaron una interesante analogía con los resultados del cálculo, y particularmente, con los datos obtenidos en modelo reducido.

Como en toda obra de gran esbeltez, se observó durante los primeros meses una continuación de los movimientos de descimbramiento de carácter amortiguado, debidos a las llamadas deformaciones lentas del hormigón que, con el cemento fundido empleado en esta obra, parece presentar un amortiguamiento menor que el cemento portland, si bien las incidencias de la guerra impiden el aportar datos concretos sobre este punto.

Los efectos del impacto, simplemente, no han acusado perjuicios generales sobre la estructura, produciéndose el taladro en la forma corriente. La superficie interesada, sin embargo, es mayor de la que normalmente interesa en las placas del mismo espesor con mayor rigidez.

Por el contrario, una onda de centro probablemente exterior a la lámina, al producir oscilaciones muy importantes en ésta, produjo su dislocación en la clave y, como consecuencia de ello, un desequilibrio de los trabajos resistentes longitudinal y transversal y una traslación relativa permanente muy importante entre un lado y otro del lóbulo de 60 centímetros.

El gran aumento de tensión de trabajo consiguiente, unido a la fuerte tendencia a pandeo de las generatrices de compresión deformadas permanentemente, produce el incremento lento de estos movimientos por pandeo plástico bajo la acción de las bien conocidas e importantes deformaciones lentas del hormigón, provocándose al final la rotura por un aumento ocasional de las condiciones de sobrecarga.

La viga gaviota, formada por el enlace de dos almas cilíndricas, ha resistido perfectamente, aun en condiciones mucho más desfavorables de las de cálculo, sobreviniendo el fallo, sin duda, exclusivamente por la rotura y deformación permanente importante de las directrices centrales, vencidas a causa de la explosión por exceso de flexión.

Es probable que el establecimiento previo de unos ligeros anillos de refuerzo de la lámina en la zona maciza de poco espesor, hubiera sido suficiente para localizar los efectos de la explosión, si bien no puede asegurarse.