

Ing. Sergio Merino Cisternas

La ingeniería en España

Introducción

Allá en el extremo de Europa, separada de ella por el murallón Pirenaico y mirando siempre el océano que la aleja de su antiguo Imperio, está el territorio de España. Nacionalidad varia y distinta, tan múltiple como sus regiones, tan interesante como su folklore, tan perenne como su destino histórico. En ella se aúna la multiplicidad de caracteres regionales con lo unitario de su espíritu occidental y cristiano; la veneración por lo antiguo, por todo aquello que constituye su rica tradición y la aceptación entusiasta de lo nuevo; en fin su profundo sentido humano que no la hace desdeñar sino más bien encauzar los progresos de la ciencia y los adelantos de la técnica.

Esa es la España que conocí y sentí: la de los barrios medioevales con sus graciosas callejuelas serpenteantes, frente a las nuevas poblaciones de trazados geométricos y rodeadas de parques y jardines; la de los acueductos modernos que con rubor levantan sus paredes de hormigón armado al lado de sus predecesores de piedra que manos romanas construyeron hace muchos siglos; la de las catedrales góticas que levantan al cielo las agujas de sus empinadas torres de piedra y que es también la de las leves y graciosas cubiertas laminares que en un alarde de conocimientos técnicos parecen con su ligera elegancia desafiar las leyes de la estabilidad. Tradición y progreso e ahí la síntesis de España.

Sin embargo, a más de algún lector le parecerá exagerado esta expresión de síntesis, no por lo de tradición, que todos estamos de acuerdo en que la tiene, sino por lo de progreso. Nos hemos acostumbrado a mirar a España como un país anquilosado e inerte, refractario al progreso y viviendo sólo de las nostalgias de sus pasadas glorias. Jamás imaginamos a España como un país pujante y joven y pocas veces se nos ocurre que desde el punto de vista de la Técnica Moderna, haya algo siquiera que considerar, porque para la mayoría de nosotros, España vive encerrada en el sueño de su antiguo imperio, como Felipe II en la sobria mole del Escorial.

A pesar de esto, hay progresos en España, en muchos aspectos verdaderamente notables y en otros sin parangón en el mundo. Es claro que cada país debe condicionar su adelanto técnico a sus necesidades y sobre todo a los elementos de que dispone. Así puede establecerse una diferencia clara entre la técnica americana y

la europea en general. Para la primera el factor primordial es el tiempo de ejecución de una obra y se dispone de grandes cantidades de materiales y maquinarias apropiadas. En Europa y en España, lo fundamental es el costo y por lo tanto el ahorro de material. Por esto se ha llegado a costa de ingenio y del estudio de los materiales a hacerlos trabajar con su máximo de posibilidades evitando así todo exceso innecesario. Dos tipos de obras reflejan este criterio en la técnica española: los tranques de bóvedas tipo Peña Boeuf a base de arcos isostáticos independientes que permiten un gran ahorro de hormigón y que con gran éxito se han adoptado en obras hidráulicas en el Júcar y en el Tajo y las cubiertas laminares, tipo de construcción en la cual España figura con varios records mundiales y al cual dedicaré este artículo.

Quien vaya a España con ojos abiertos para ver, sin ideas preconcebidas, y recorra en sus ciudades sus centros científicos, sus Institutos de Investigación, sus escuelas profesionales y Universidades, conozca a sus hombres de ciencia y sus publicaciones, podrá darse cuenta de nuestro absoluto desconocimiento de la técnica española. Ello se debe en primer lugar al apasionamiento con que siempre se consideran las cosas de España: se le admira o se le denigra, se le ama o se le desprecia, totalizando en una sola actitud de admiración o desdén, aspectos tan diferentes como los políticos y los religiosos con los científicos y técnicos; o todo es bueno o no hay nada digno de interés. El desconocimiento que trae consigo esta actitud apasionada que tenemos frente a España, se ve influenciada, en el terreno científico por la falta del sentido de propaganda que tiene el profesional español. Si un ingeniero ha proyectado una obra magnífica digna de toda admiración, apenas si le importa que esta obra se conozca no sólo fuera de las fronteras nacionales sino aun dentro de ellas. Si hay muchos españoles que no saben que su país descuella entre los primeros del mundo en obras hidráulicas, que el puente en arco de concreto del Esla aun no ha sido superado, que sus cubiertas laminares son de las más audaces que se han concebido, no es extraño que estas cosas no se conozcan afuera. (Ver fotografía de pág. 19).

Frente al espíritu propagandístico, el español pone la propia satisfacción de su obra y con eso le basta. Sin embargo, este modo de ser va siendo superado y ya nos empiezan a llegar excelentes publicaciones que mostrándonos las realizaciones de la Ingeniería española nos están permitiendo apreciarla en sus verdaderas dimensiones.

Cubiertas Laminares

Generalidades: Esta solución difiere mucho de las que pudiéramos llamar clásicas, en las que las bóvedas, aunque fuesen de hormigón armado se calculaban con las mismas normas y tenían igual aspecto que las bóvedas de piedra o de ladrillo.

Posteriormente a fin de aligerar las construcciones se proyectaron las bóvedas de hormigón armado, dejando nervios meridianos como la parte verdaderamente resistente y las pantallas que unían unos nervios con otros para cerrar la bóveda, se suponían resistiendo como losas corrientes.

Con la observación y crítica detenida de algunas realizaciones de este tipo se vió que su forma de trabajo no respondía a la hipótesis de cálculo en que se basaba, pues las membranas que iban de unos nervios a otros transmitían a los apoyos la mayor parte de las cargas de la bóveda y la sollicitación a la flexión, trabajando como losa entre dos nervios, era muy pequeña.

Generalizando este concepto de que la membrana transmita por sí misma sus esfuerzos a los apoyos, se llegó a la construcción de las bóvedas membranas, cubiertas laminares o bóvedas cáscaras, de las que actualmente existen en Europa numerosos ejemplos que causan verdadero asombro al contemplarlas.

La técnica de estas bóvedas ya se encuentra muy avanzada: habiendo salido ya del campo teórico, las sucesivas realizaciones han sido aprovechadas para poner a prueba todas las hipótesis en que se basa su cálculo, y dar así mayor confianza a nuevos proyectos.

Según la forma de la bóveda, pueden clasificarse en cilíndricas, de revolución, hiperbólicas, etc., teniendo como es lógico el cálculo modalidades propias para cada uno de estos tipos.

De las de tipo cilíndrico tenemos como ejemplo el Mercado de Frankfurt en el que se cubre una superficie de $220 \times 36,70$ por 15 bóvedas, dispuestas transversalmente y teniendo cada una 14 m. de luz y 7 cm. de espesor. Mayor todavía es la cubierta del Mercado de Budapest con una longitud de bóveda entre tímpanos de 41 m. y un espesor de 6 cm. Los hangares de Hamburgo y Turín son soluciones parecidas aunque de menos importancia. Fig. 1.

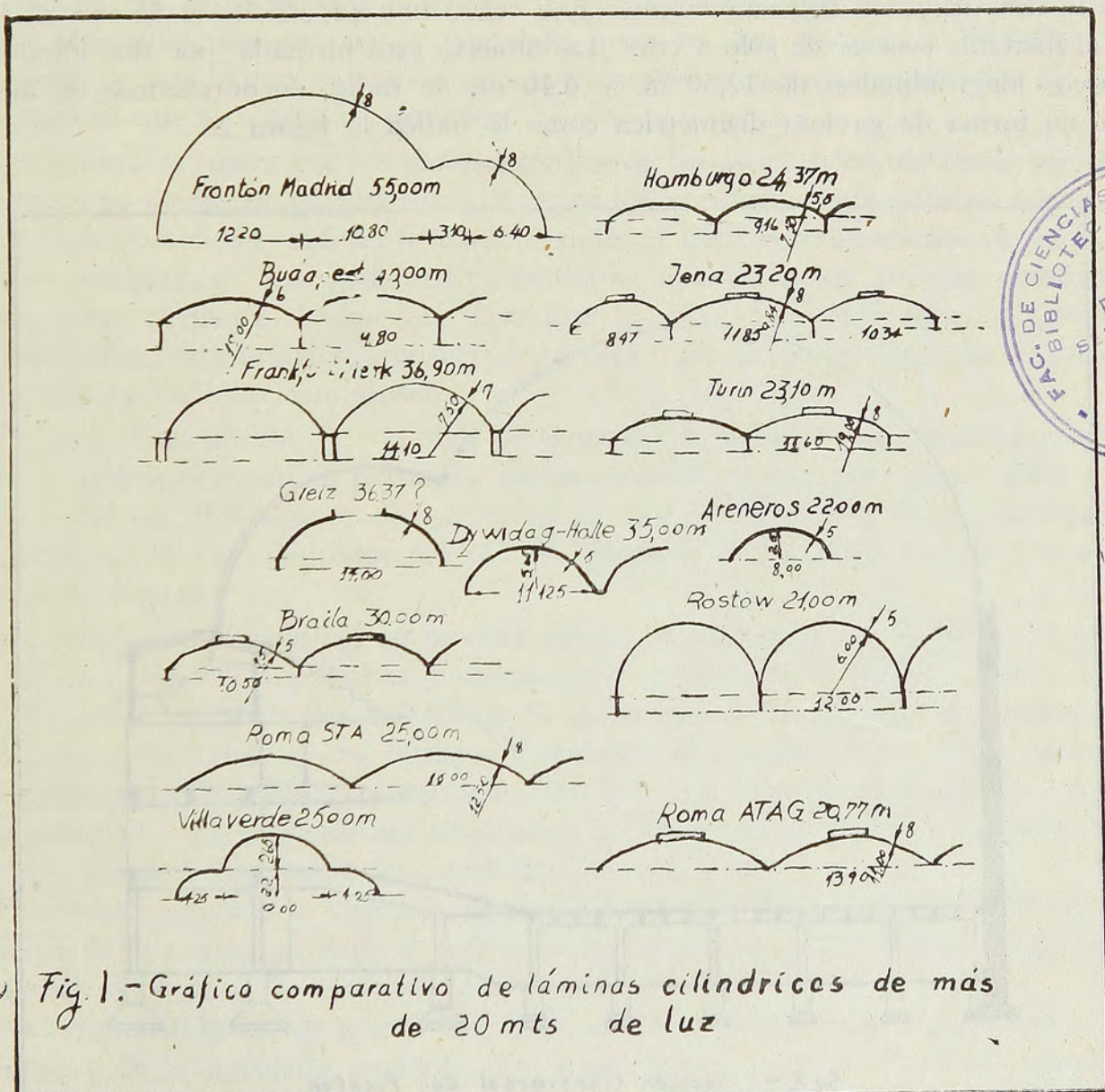


Fig. 1.- Gráfico comparativo de láminas cilíndricas de más de 20 mts de luz

En España este notable tipo de construcción está representado por la Escuela Elemental de Trabajo, por la Iglesia Villaverde de Madrid y por el Frontón Recoletos, record mundial en cubierta laminar cilíndrica.

De los tipos de bóveda de revolución tenemos salas octagonales hasta de 76 m. de luz como las de Leipzig y Basilea con espesores de 7 cm. y en España la del Mercado de Algeciras y finalmente, en cubiertas hipérbólicas es el Hipódromo de Madrid el que presenta más excepcionales características.

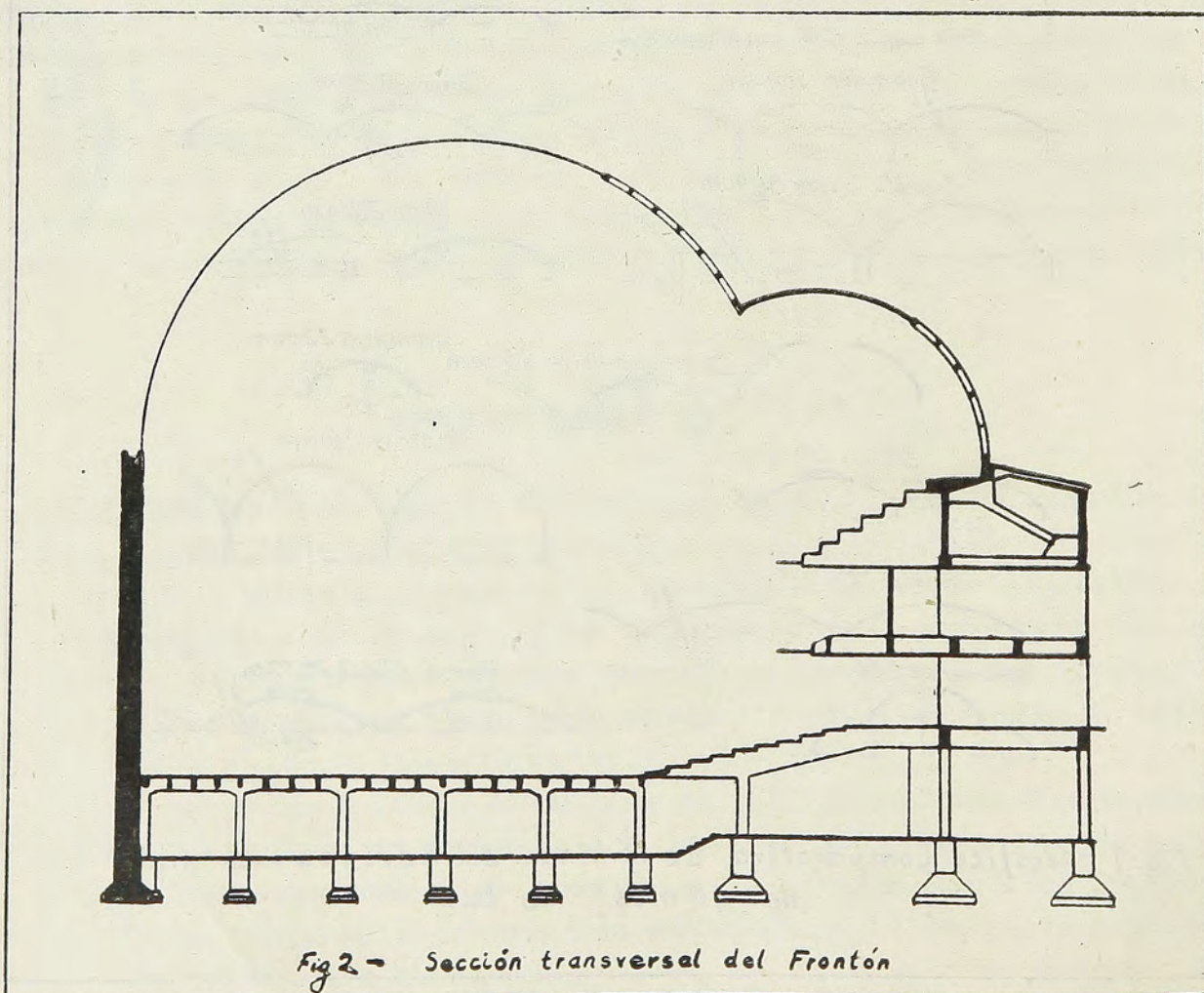
Estas construcciones de las que analizaremos con algún detalle las españolas basan su cálculo en dos principios fundamentales.

I. Nulidad de los esfuerzos de torsión y de los de flexión alrededor de la tangente a la directriz de cada elemento diferencial de la lámina a todo espesor, los que dada la delgadez de la lámina en relación a sus dimensiones superficiales son evidentemente despreciables.

La nulidad de esta flexión que no debe confundirse con la flexión longitudinal general de la lámina, implica la nulidad de los esfuerzos cortantes correspondientes a la misma.

II. Nulidad del módulo de Poisson. Propuesta por Dischinger en el proyecto de su obra en Budapest.

El frontón Recoletos de Madrid.—La parte más interesante de esta construcción la constituye su cubierta laminar que cubre una superficie de 55 m. \times 32,50 con el increíble espesor de sólo 8 cm. La cubierta está formada por dos lóbulos cilíndricos longitudinales, de 12,50 m. y 6,40 m. de radio, encontrándose en ángulo recto en forma de gaviota disimétrica como lo indica la figura 2.



La luz entra por las celosías de triángulos equiláteros de 1.40 m. de lado y 0.15×0.30 de escuadría y ocupan sobre el cilindro o lóbulo inferior la zona inmediata a la generatriz de borde y sobre el mayor la inmediata a la generatriz de intersección.

Llama a primera vista la atención la total disimetría de la sección, nueva en este género de estructuras, pero que venía claramente impuesta por la necesidad funcional de abrir dos grandes ventanales situados precisamente en esa posición y con esa inclinación para iluminar directamente la cancha con el más alto, mientras el otro envía luz complementaria a las tribunas altas sin perjudicar la visibilidad sobre la zona de juego. La cubierta tenía pues seis puntos obligados, los dos arranques y los cuatro bordes de los ventanales, y como el valor arquitectónico de la sala impedía colocar tirantes o cerchas vistas por el interior, se impuso la cubierta laminar cilíndrica de doble lóbulo que con la máxima ligereza permite cubrir ese enorme vano. Fig. 3 y Fig. 4.

En alguna estructura de tipo análogo se ha dispuesto una viga laminar de gran altura bajo la línea de intersección de los lóbulos, con el objeto de disminuir la importancia de la armadura, pero aquí se suprimió porque rompería con su sensación de pesadez, la armonía de líneas del conjunto. Por otra parte es necesario establecer que no se trata de dos bóvedas de cañón corrido que descansan en una viga de descarga longitudinal, sino que si existe viga ésta es la formada por la gaviota misma, que apartándose del estrecho marco mecánico de las piezas prismáticas, desarrolla un proceso resistente más complejo y completo, pero no por eso menos definido. La explicación de este fenómeno nos llevaría a desarrollos analíticos que se salen del marco de síntesis que este artículo pretende.

La lámina se sujeta por los puntos medios de las generatrices de borde mientras las directrices extremas apoyan sobre entramados verticales embutidos en los muros huecos, con elasticidad suficiente para permitir el libre desplazamiento de estas directrices rigidizadas. Las generatrices de borde, aparte de los anclajes antedichos, apoyan sobre pequeñas bielas, que permiten la dilatación longitudinal. Como es muy explicable, la dilatación transversal no ofrece problema por la gran elasticidad que la lámina tiene en este sentido.

Se hizo el cálculo total de la obra de acuerdo con las hipótesis generales ya planteadas y las que sugerían en particular las condiciones de ella, pero para mayor seguridad, dadas las dimensiones excepcionales de que se trataba, se hizo una rigurosa comprobación de los resultados del cálculo, primero en modelo reducido y después en la obra misma.

La instalación de control en la obra misma, respondió a los siguientes propósitos: determinación de las flechas y corrimientos durante el descimbramiento, determinación de las cargas reales de trabajo en los puntos principales de la estructura y determinación de corrimientos radiales y transversales de la placa. Todas estas determinaciones se hicieron por intermedio de distintos tipos de auscultadores de radio mínimo, para que pudieran ser alojados en la estructura sin debilitarla, teleflexímetros de resistencia eléctrica, telemicrodeformómetros, etc.

El modelo reducido se hizo a la escala $1/10$ y en él se reprodujeron todas las sollicitaciones de la estructura real: el peso muerto, las succiones del viento, las presiones centrípetas del viento, la carga de nieve, etc.

Así, resumiendo teoría y realidad, pudo concebirse esta obra magnífica, verdadero orgullo de la ingeniería española, que si no fuera porque sufrió en sus partes vitales el rigor de la guerra civil, aun estaría mostrando las expresiones de estética a que

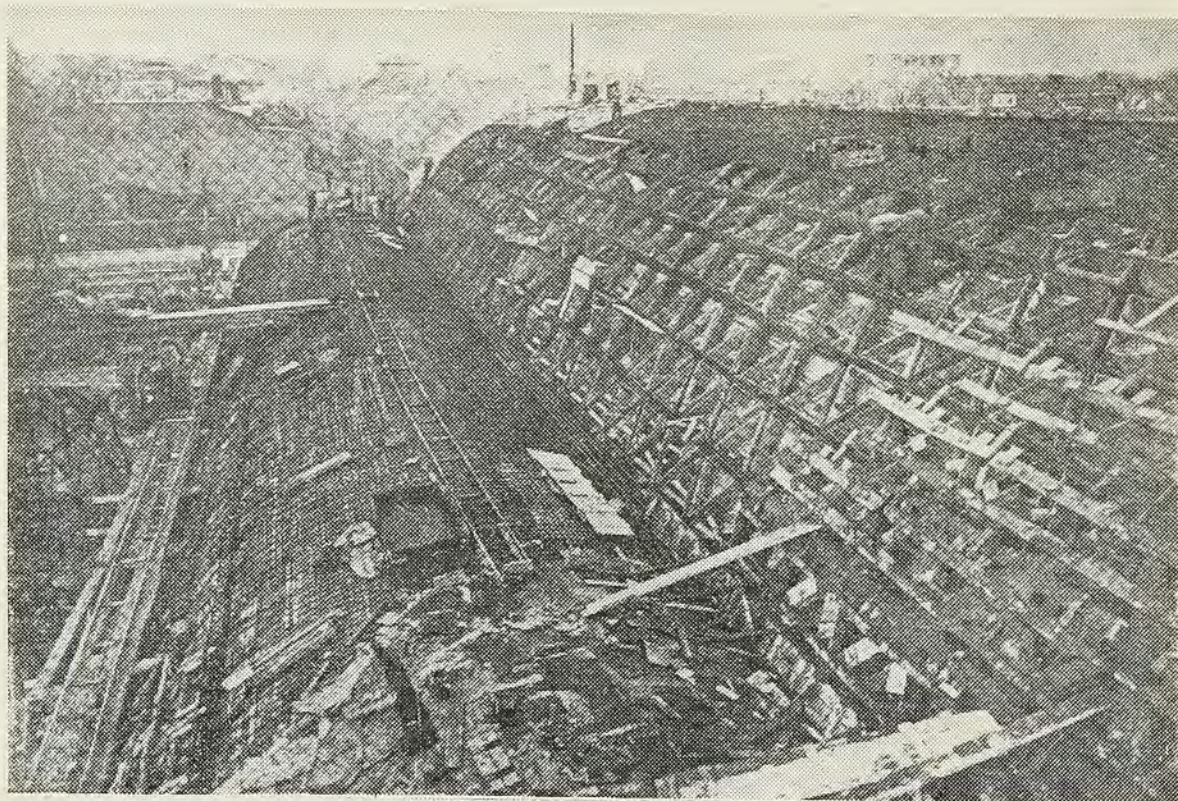


Fig. 3.—Hormigonado de la bóveda.

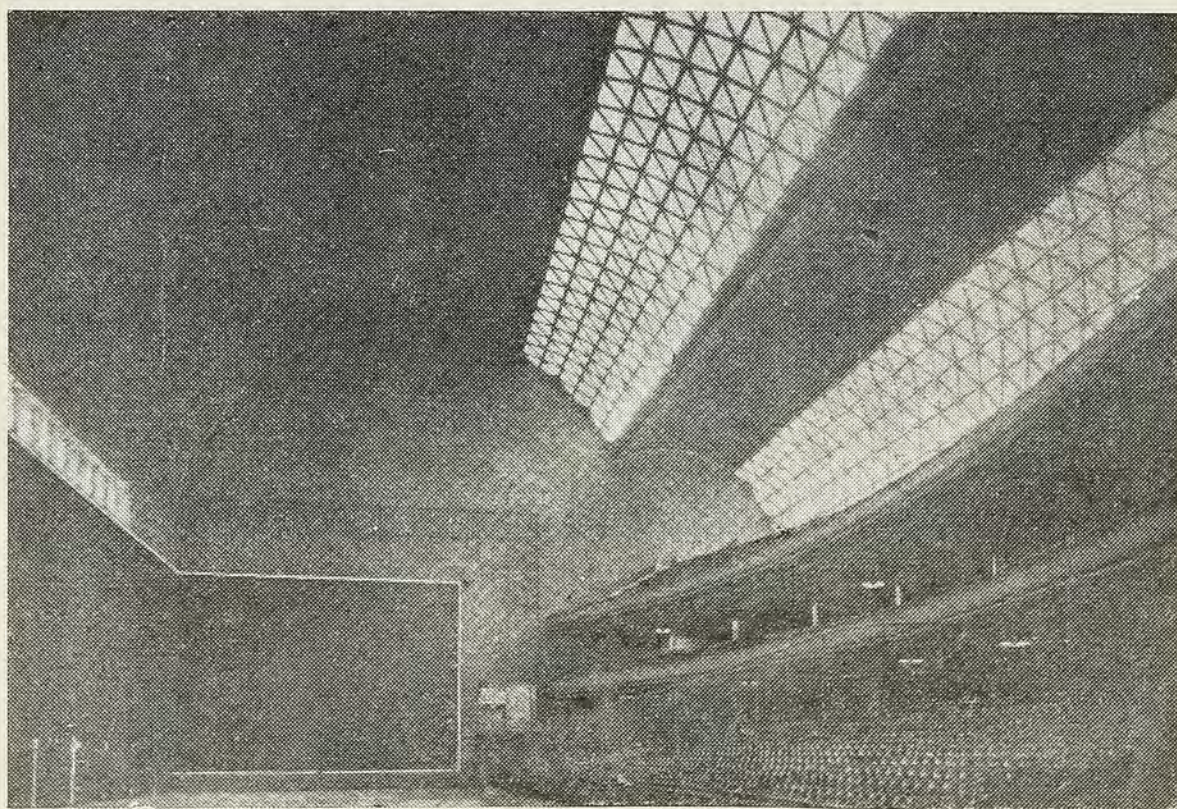


Fig. 4.—Vista desde el rebote.

puede llegarse cuando la ciencia y el arte del constructor suman sus buenas propiedades y eliminan sus defectos, cuando lo funcional y estructural no se oponen sino que se funden en armónica belleza.

Hipódromo de Madrid.—En los alrededores de la capital española y rodeada de un paisaje que parece salido de un cuadro de Velázquez, se levanta una extraña construcción, que desde la primera mirada conquista por la elegancia y valentía de su cubierta volada. Ella está formada por lóbulos que parecen se juntan entre sí para lanzarse con mayor decisión al espacio.

Veamos con algún detalle como está sustentada esta estructura que causa tanta admiración al visitante: (figura 5) está formada por pórticos transversales distanciados

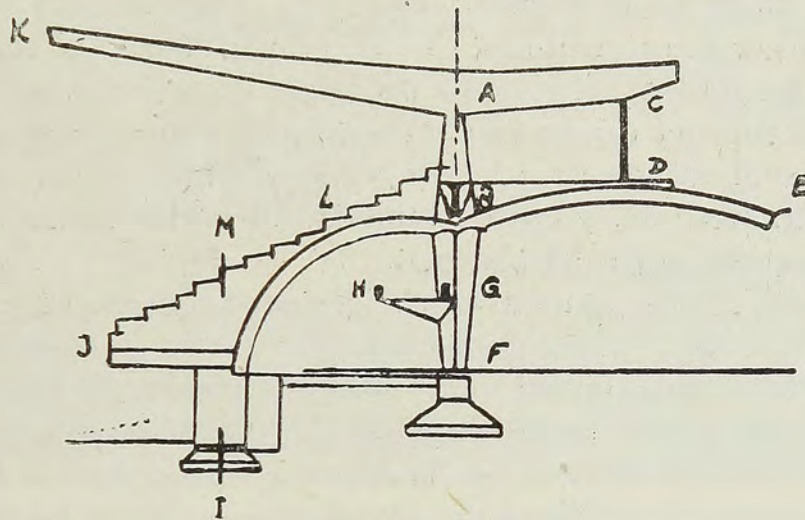
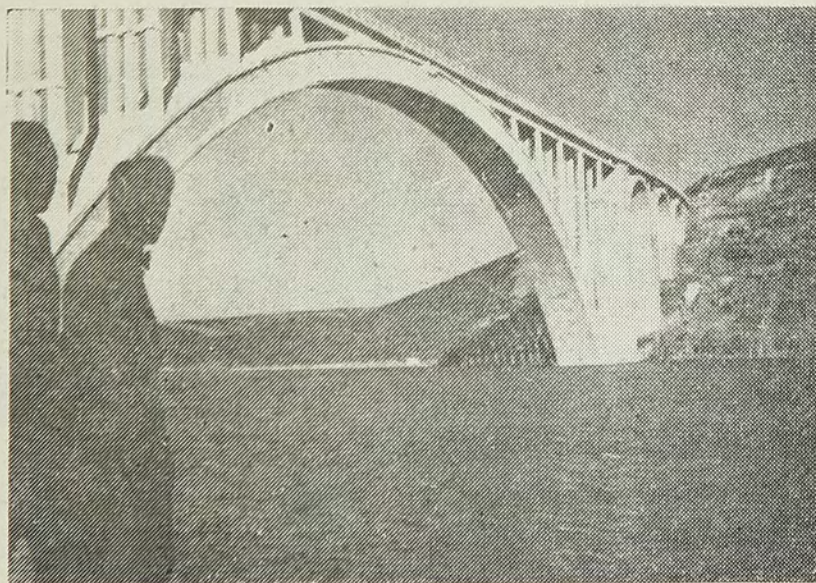


Fig. 5.

cinco metros entre sí. La forma de trabajo de estos pórticos merece la pena que nos detengamos unos momentos a examinarla: el elemento de cubierta C K, con su gran voladizo sobre el graderío de la tribuna, apoya en el soporte principal A B F; sobre el que está articulado, quedando impedido el vuelco por el tirante C D, compensando con ello en parte el peso de la galería D B y el resto de la cubierta D E de la sala de apuestas inferior, que queda en parte volada por fuera del tirante.



Viaducto del Esla.—210 metros de luz.

El graderío B J apoya en el mismo pilar principal A B F y en otro soporte intermedio I, cuya posición viene obligada por la necesidad de dejar una galería de circulación I J con salida a la pista y otra F I para las apuestas, sobre la cual cruza la pasarela H G necesaria para la comunicación interna independiente del público.

Para dejar el máximo de espacio en las galerías antes mencionadas y para dar valor estético a la estructura se adoptó el trazado curvo que indica la figura, dejando un punto L del pórtico al parecer muy débil. Sin embargo este punto se aprovechó como semi-articulación o junta de hormigonado y presenta la ventaja de disminuir al máximo los esfuerzos secundarios que pudieran presentarse en el pórtico, particularmente por retracción. Por esto y porque las exigencias funcionales lo permitían se dejó el soporte I con un gran ancho y gran rigidez y en cambio el soporte A B F se dejó articulado en su parte inferior.

La estabilidad por consiguiente está fiada principalmente al soporte I que lleva la carga principal del graderío, el resto de las cargas de cubierta, de la parte alta del graderío y cubierta superior cargan bastantes centradas sobre el soporte A F, dando al conjunto estructural un aspecto a la vez airoso y estable y casi exento de esfuerzos secundarios, térmicos, etc. y cuya estabilidad al vuelco queda asegurada por el anclaje en la semi-articulación del punto L.

Longitudinalmente estos pórticos van unidos por pequeñas bóvedas de hormigón armado de doble curvatura y gran elasticidad. No siendo éstas suficientes para asegurar el arriostamiento longitudinal, se dispuso una rriostria B.

Pero no debemos olvidar que el elemento que mayor novedad presenta en esta estructura de suyo tan original, es el de la cubierta volada de tipo laminar formada por lóbulos sensiblemente hiperbólicos dispuestos como se ve en las figuras o fotografías adjuntas.

Cada uno de estos elementos sigue sensiblemente como dijimos la forma de un trozo de hiperboloide de garganta, que como tal, sale de los soportes A con gran curvatura que va perdiendo a medida que avanza el voladizo. Los lóbulos que insistimos apoyan sólo en los soportes A, se interceptan según generatrices y quedan equilibrados en los tirantes C.

La estructura está formada exclusivamente por la lámina, sin nervio ni viguetas, su espesor es variable desde 5 cm. en la sección correspondiente a los extremos hasta 15 cm. en los apoyos, con el obligado sobreespesor en la arista de unión de un lóbulo con otro. El largo del voladizo es de 12.80 m.

Para el estudio de este proyecto se recurrió a un extenso y complicado cálculo laminar y por medio de la analogía de la membrana, se llegó a conocer el reparto de los esfuerzos de corte en las distintas secciones de la membrana. Pero todo este cálculo como tal, era ideal, ficción, irrealidad, máximo en este caso tan novedoso, en que el proyectista necesitaba la seguridad de la estabilidad de su construcción. Se recurrió entonces a la experiencia que proporciona datos reales y pone a prueba definitiva las predicciones teóricas.

Se construyó un modelo de tamaño natural con la exacta forma del lóbulo, que como indica la figura 7, está formada por dos medios hiperboloides, de modo de dejar las puntas de dilatación en la generatriz media de cada uno de ellos, y se cargó hasta la rotura. El peso propio medio era de 280 kg por m. La sobrecarga de cálculo 70 kg/m² dando en conjunto un momento flector en el arranque de 130 Tm.; la sobrecarga con que se alcanzó la rotura fué de 605 kg/m² con un momento flector en arranque de 340 Tm., o sea, que el coeficiente de seguridad fué de 2,6 con relación a la

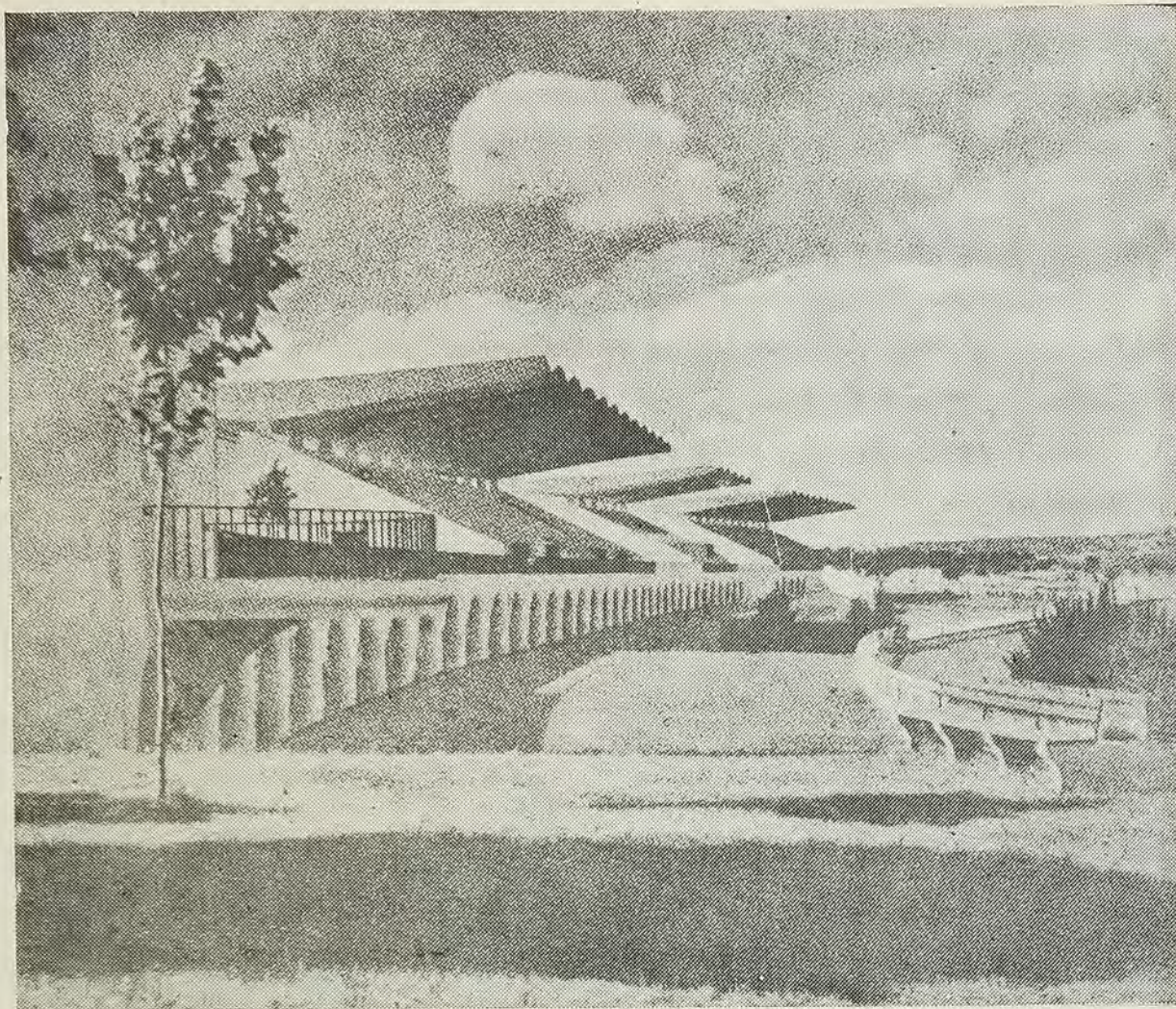


Fig. 6.—Vista general de las tres tribunas: la primera de preferencia; en el centro, la de honor, y al final, la general

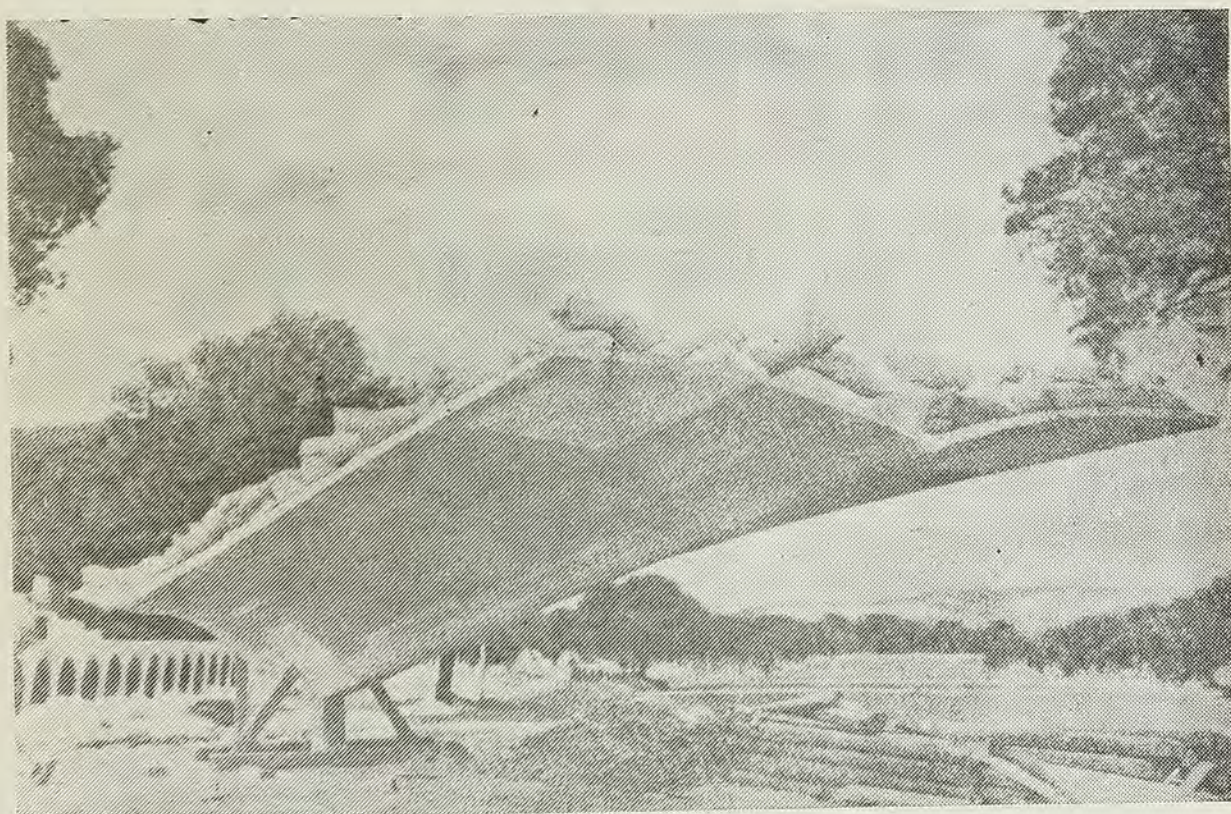


Fig. 7.—Lóbulo de ensayo de la cubierta de las tribunas.

carga total y de 8,6 con relación a la sobrecarga. La rotura se produjo con muy poca deformación.

Así pues con la máxima seguridad que da un ensayo a la rotura sobre la estructura misma se decidió la construcción de la cubierta que hoy recorta su alada figura en las orillas del Manzanares.

El Mercado de Algeciras.—Recuerdo que la primera vez que oí mencionar esta curiosa construcción, fué en una conferencia que el ingeniero César Barros dió en la Universidad Católica, requerido por el Seminario de Estabilidad de la Facultad de Ingeniería. Me impresionó la forma de este Mercado y sobre todo la sujeción de la bóveda sobre pilares.

Meses después tuve la suerte de conocer en Madrid al autor del proyecto don Eduardo Torroja Miret, cuyo nombre está unido a muchas de las grandes realizaciones de la ingeniería española. El dirigía el Seminario de Estructuras en la Escuela de Caminos, Canales y Puertos y allí me matriculé con verdadero entusiasmo de tener profesor tan ilustre. Sus sabias enseñanzas pude comprobarlas en sus proyectos hechos ya realidad y así por ejemplo de paso al Protectorado de Marruecos, me detuve en Algeciras a conocer el mercado que don César Barros nos había hecho conocer un año antes en la Universidad. La cubierta está formada por un casquete esférico, con lunetos apoyados en 8 pilares con 47,6 m. de luz y 9 cm. de espesor. En la clave existe un lucernario circular que da el interior luz cenital. Los empujes horizontales que la cubierta da a los pilares, son absorbidos por un aro octogonal exterior al casquete. Fig. 8.

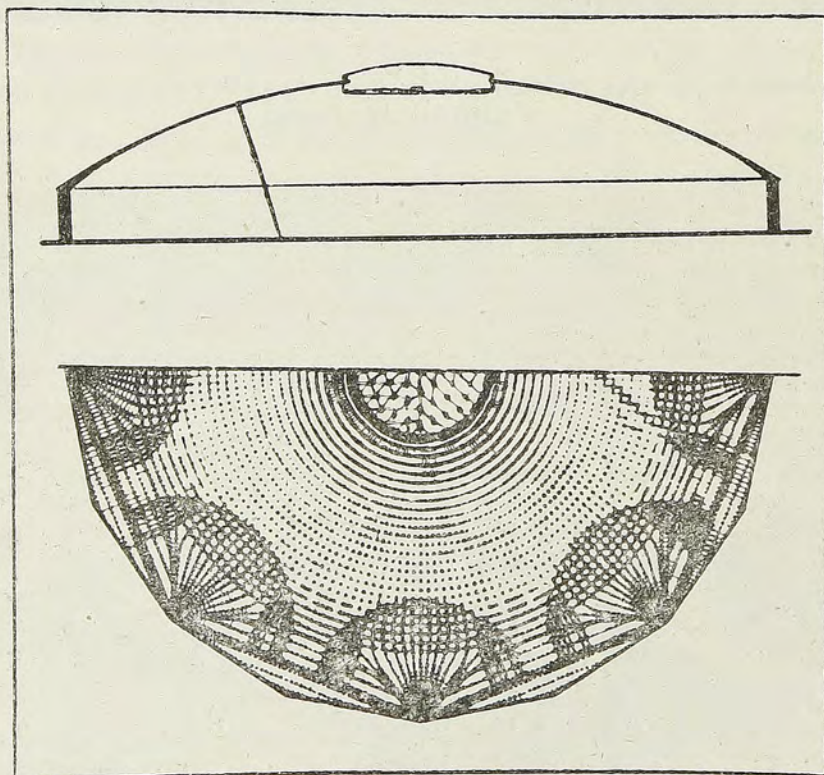


Fig. 8.—Corte y armadura de la bóveda.

Es interesante que analicemos la forma de construcción de esta bóveda. En primer lugar como es lógico, se levantaron los pilares y después el delicado montaje de las andamios para la bóveda, vino a dejar listo el conjunto para colocar las armaduras y posteriormente hormigonar. Las armaduras del arco octogonal se tensaron

previamente, siguiendo la técnica tan divulgada por Freyssinet en Francia. El tensado previo del aro produjo la puesta en carga del casquete y al levantar la clave hizo fácil el descimbramiento. También disminuyó las flecciones en la lámina de hormigón. Posteriormente se hormigonó el tirante y se terminaron las fachadas. Figuras 9 y 10.

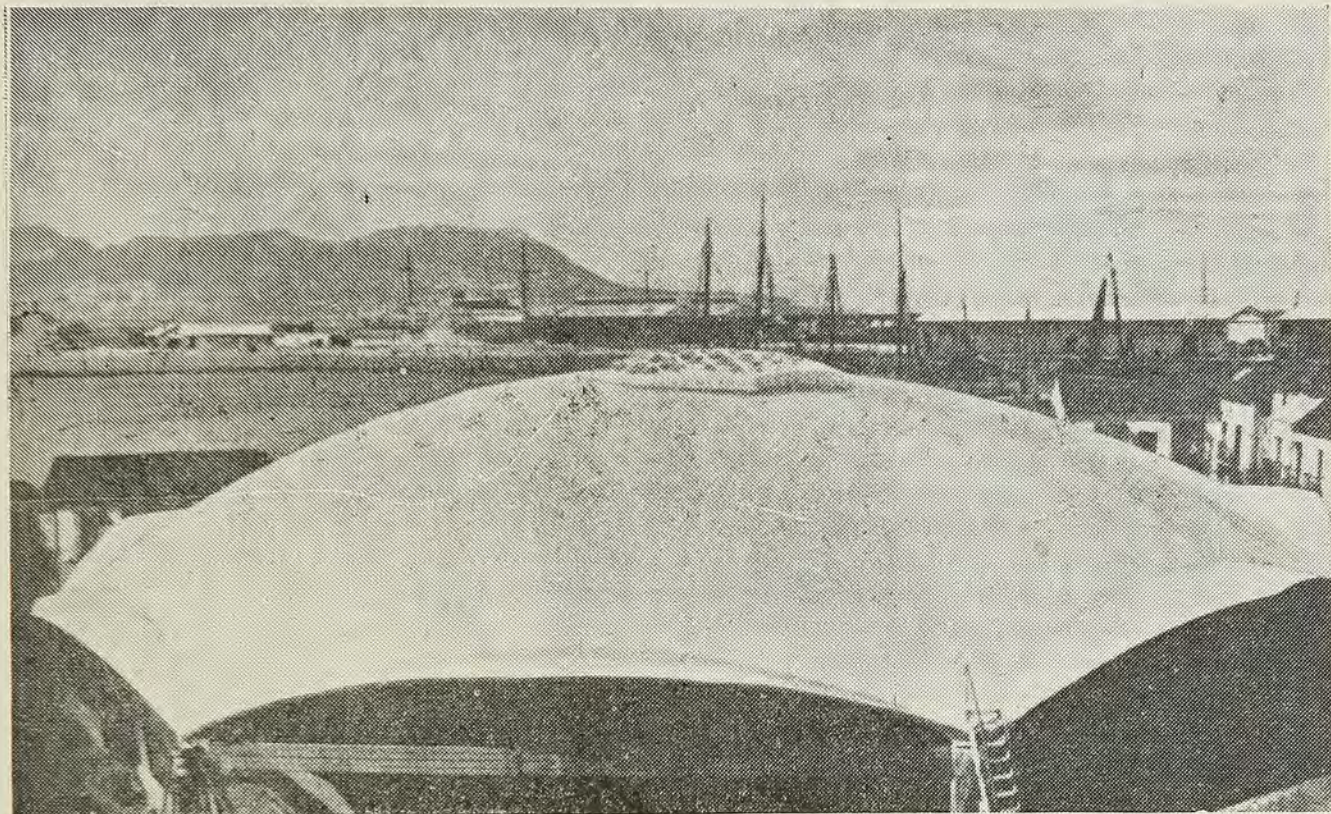


Fig. 9.—Vista exterior del casquete y lucernario.—Obsérvese el aro octogonal con sus barras de hierro tensadas antes de hormigonarse.

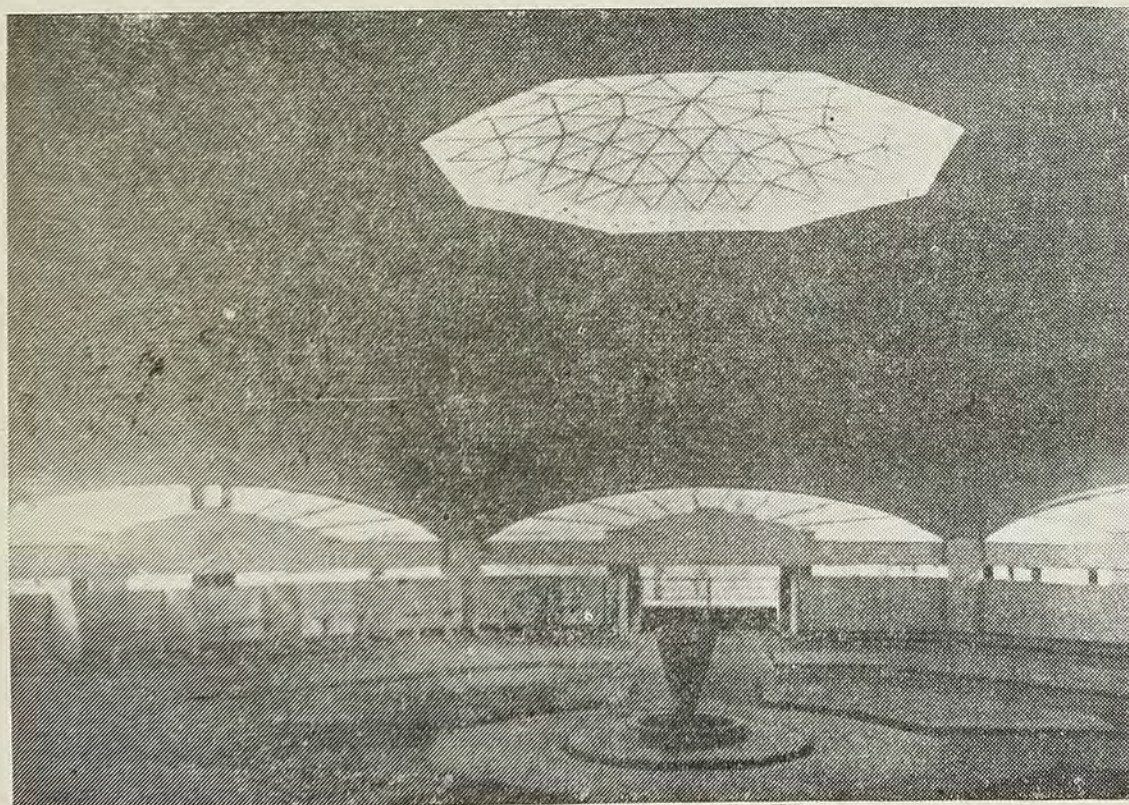


Fig. 10.—Vista interior de la estructura ya terminada.

Muchos detalles técnicos podrían darse sobre esta ejemplar construcción, pero no sería cosa fácil de terminar, pues en ella se reunieron una infinidad de aspectos interesantísimos para el ingeniero, tanto en el proyecto mismo como en su realización. Digamos solamente que es un triunfo más de la ingeniería española. que en el ajetreado ambiente de Algeciras, frente al misterio del Africa ya cercana, quiso dejar la cúpula blanca del mercado, como verdadero alarde de técnica y belleza.

S. M. C.
