

# LOS HANGARES PARA DIRIGIBLES EN EL AEROPUERTO DE ORLY

## Antecedentes

**D**ESDE 1913 veníamos presentando a la Jefatura de Ingenieros de Orleans proyectos de hangares para aeroplanos, en hormigón armado.

Uno de estos proyectos requería el empleo de una serie de naves abovedadas, penetradas por otra idéntica, pero perpendicular a las precedentes, determinando bóvedas de arista. La nota descriptiva del proyecto se juzgó paradójica porque afirmaba que el hormigón armado permitiría realizar la construcción de los grandes hangares de aviación en condiciones de solidez, seguridad y resistencia contra el incendio desconocidas hasta el día, ventajas a las cuales debería añadirse la economía del precio de coste.

La guerra hizo abandonar estos proyectos; volvimos de nuevo a ellos en el invierno de 1915-1916; se acentuaban cada vez más los inconvenientes de los hangares ligeros, lo que condujo a los Servicios de Ingenieros a aceptar un tipo de hangares abovedados de grandes dimensiones, deducidos de los proyectos de 1913.

Primeramente ejecutamos en Avord (Cher), en 1916, una serie de ocho hangares de  $46 \times 60$  metros. Cada uno de ellos formado por una bóveda delgada de medio punto, cerrada en sus dos testeros por puertas, bóvedas que directamente apoyaban sobre el suelo y estaban atirantadas por nervios colocados en el extradós, acusados en la superficie exterior.

Este detalle, en apariencia poco importante, tuvo una influencia considerable en el desenvolvimiento de este género de construcción, porque simplificando considerablemente la ejecución, reducía mucho el precio de coste. En efecto, utilizando nervaturas acusadas en el extradós se reduce el encofrado a una superficie continua que puede ejecutarse en poco tiempo y se presta a un desencofrado rápido por grandes tramos sin demolición de los moldes. Los nervios se ejecutan después de la bóveda, con ayuda de pequeños encofrados auxiliares, que pueden desmontarse en veinticuatro horas y emplearse un gran número de veces.

Se terminaron los hangares de Avord rápidamente y con resultado satisfactorio. La Administración de Guerra nos confió la ejecución de una nueva serie de 31 del mismo tipo, que debía construirse en Istres (Bouches-du-Rhône) en tres grupos y en un solo edificio, formando taller. No difieren de los hangares de Avord más que en la profundidad, 42 metros en lugar de 60, y tienen una sola puerta; el piñón opuesto, ciego.

Entre tanto, en 1916 y 1917, sometimos a la autoridad militar una serie de proyectos de puertos aéreos para dirigibles trazados sobre programas extensos. Uno de aquéllos comprendía cinco hangares de 92 metros de capacidad y 42 metros

de altura interior, alrededor de un inmenso patio central. Estos hangares estaban formados por bóvedas de medio punto atirantadas por un doble sistema de nervaduras exteriores; el desarrollo del arco era de 132 metros.

Aun cuando en esta época el precio de elaboración de las construcciones en hormigón armado era inferior al precio actual, la cifra a que se elevaron los presupuestos, de una parte, y los plazos previstos, de otra, eran tales, que la Administración renunció a la ejecución de aquellos proyectos.

Debemos, por último, citar, además, una aplicación interesante de bóvedas hecha, en 1919, en Villacoublay: un hangar formado por tres paralelas de medio punto, de 40 metros de luz y 45 de longitud, penetradas por una tercera bóveda perpendicular a las precedentes, partiendo de la clave de la primera a la de la segunda. El conjunto cobija una superficie, sin ninguna columna intermedia, de  $120 \times 45$  metros. Esta construcción se caracteriza por la ausencia de toda nervadura interior de refuerzo, lo que permitió un encofrado extremadamente sencillo.

Todos los refuerzos, nervaduras de atirantados, refuerzo a lo largo de las aristas, son exteriores.

### Aspecto general del problema

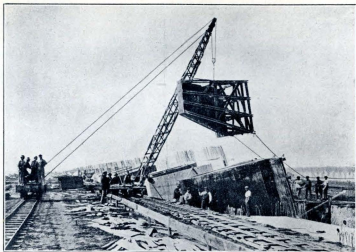
Toda la dificultad residía en la magnitud de las dimensiones absolutas.

Podría creerse que, una vez obtenidos los tipos de armaduras y sus medios de ejecución en uso, por sus numerosas aplicaciones satisfactorias, para alturas de 30 metros, por ejemplo, bastaría adaptarlas a alturas dobles por medio de un simple cambio de escala y algunos retoques de las cotas. Esta idea es completamente equivocada.

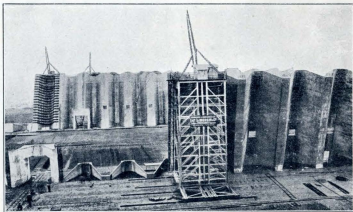
En efecto: imaginemos un proyecto de hangar para dirigible de 30 metros de altura, compuesto de bóvedas nervadas, y doblemos todas las cotas; he aquí los resultados: habremos doblado el volumen de hormigón por metro cuadrado de pared del proyecto primitivo. El volumen de los materiales, por unidad de volumen de la construcción, no cambiará en nada; pero las leyes de la semejanza mecánica indican que los coeficientes de trabajo se encontrarán multiplicados por dos, y, sin embargo, todos los factores son los mismos, y particularmente la fuerza del viento. Ahora bien: será prudente adoptar para una nave de 60 metros, un viento más fuerte que para una nave de 30; tendremos, en definitiva, un proyecto insuficientemente estable, a pesar de sus espesores mayores.

Si deseamos mejorar este proyecto sin modificar el concepto general, nos será preciso aumentar mucho la altura de las nervaduras en relación con su espesor y al de las bóvedas, lo que requiere órganos nuevos para impedir a los nervios quebrarse y poder ligarlos mejor a las bóvedas.

Por otra parte, y como consecuencia de las grandes dimensiones absolutas de estos órganos de sostenimiento, es necesario eludirlos; entonces resulta una estructura muy complicada que debe agregarse a la bóveda para darle la rigidez

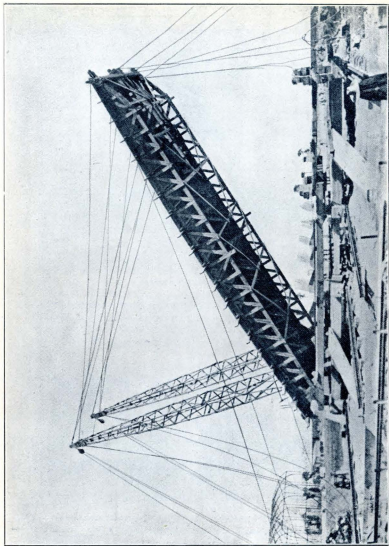


PIEZAS DE LA BÓVEDA DEL PRIMER HANGAR.

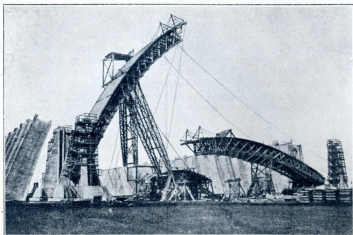


CONSTRUCCIÓN EN SERIE DE LOS ELEMENTOS DE BÓVEDA DE 17 METROS DE ALTURA.





ELEVACIÓN DE ENCOPRADO PARCIAL DE UN ELEMENTO DE LA BÓVEDA.

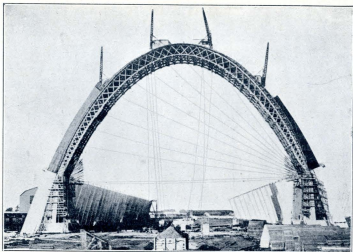


ELEVACIÓN DE LOS ELEMENTOS LATERALES DE LA CIMBRA.

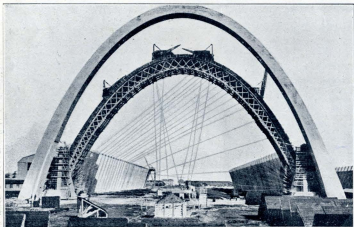


ELEVACIÓN DEL ELEMENTO CENTRAL DE LA CIMBRA.





CONFECCIÓN DEL PRIMER ANILLO DE LA BÓVEDA SOBRE CIMBRA ELEVADA.



ANILLO TERMINADO Y CIMBRA ANTES DE SU ELEVACIÓN.

necesaria, y la construcción pierde las cualidades de simplicidad y fácil ejecución que daban valor al sistema primitivo.

Ahora bien: en los casos de construcciones de altura excepcional, estas cualidades, siempre deseables, adquieren una importancia capital, como consecuencia de la relación entre los gastos de colocar en obra los materiales, y el precio de éstos al pie de ella aumenta rápidamente con la altura a que son empleados. Este hecho, bien conocido de todos los constructores, obedece a causas múltiples; en primer lugar, la sujeción del personal: tiempo y acceso fatigoso a los andamios para los obreros, peligro de caídas, dificultad de vigilancia, acción más intensa de la intemperie, reclutamiento más difícil de la mano de obra y salarios más elevados; en segundo lugar, el sostenimiento del material: andamiajes más elevados y expuestos, necesidad de potentes medios de elevación para los materiales. Por consiguiente, una construcción de gran altura no puede ser económica más que en el caso de que su ejecución sea simple. Los más seductores proyectos, desde el punto de vista teórico, no ofrecen ningún valor práctico si no satisfacen esta condición esencial.

Concluimos: Los grandes hangares para dirigibles quedan fuera de los límites de aplicación económica del sistema de bóvedas de medio punto entrelazadas, y es necesario hallar una solución basada en un principio nuevo.

### **Sistemas basados sobre el empleo de elementos moldeados previamente**

En un principio estudiamos el empleo de elementos moldeados previamente y acoplados después. Pero este *procedimiento seductor* para ciertos sitios y susceptible de aplicaciones particulares muy interesantes, presenta, desde su principio, inconvenientes esenciales e inevitables, que, dentro de la aplicación de que hablamos, tienen suma importancia y quitan a este sistema todo interés.

Estas construcciones implican una cubierta formada de elementos separados, tales como tejas o pizarras; ahora bien: estos procedimientos clásicos de cubrir pierden valor cuando se les emplea a grandes alturas, en condiciones de exposición al viento muy diferentes de aquellas en donde se las emplea de ordinario. A 50 metros sobre el nivel de la meseta de Orly, el viento tiene una potencia que no es amortiguada por ningún obstáculo, y su acción sobre una cubierta es muy diferente de aquella que ejerce sobre la de los techos corrientes.

Por entre las ranuras, la lluvia y el viento llegan a meterse entre las tejas, y las depresiones hacia abajo de la construcción provocan efectos de succión capaces de arrancar las tejas mejor sujetas.

De aquí reparaciones costosas, puesto que es indispensable hacerlas cuidadosamente sobre superficies considerables y de acceso difícil. Para comparar justamente tales proyectos con una construcción monolítica, es menester, pues, aumentar el precio inicial del capital con el correspondiente a la anualidad de entretenimiento.

¿Puede compensarse tal inferioridad con una economía sobre los materiales o mano de obra?

La necesidad de reducir el peso y la acumulación de piezas y de simplificar las ensambladuras, nos acerca más al carácter y a las formas de las estructuras metálicas que al de las construcciones monolíticas en hormigón armado. Es necesario emplear elementos cuya función está especializada, como en una estructura de metal. Se tienen arcos, y diversos elementos de la cubierta cumpliendo cada uno su función particular y sin ayudarse mutuamente. El hormigón armado de un lienzo o de un elemento de la cubierta, no agrega nada a la estabilidad general, que depende únicamente de los arcos, e inversamente.

En una construcción monolítica, por el contrario, un mismo elemento de cemento correspondiente a una bóveda, es decir, a la cubierta, puede contribuir eficazmente a la estabilidad general en contra de esfuerzos de todas las naturalezas y direcciones.

La primera consecuencia de la especialización de los elementos que integran una estructura es su gran número, y ello es una razón para economizar la materia todo lo posible. Además, se hace notoria la conveniencia de reducir el peso de las piezas que han de ser manipuladas, eliminando toda la materia que no sea estrictamente indispensable, usando coeficientes de trabajos límites a costa de investigaciones acerca de materiales y formas, facilitadas, de otra parte, por la ejecución de las piezas sobre áreas de moldeo organizadas para obtener el mayor rendimiento de la mano de obra.

La organización estructurada de estos numerosos elementos, da construcciones complicadas y de aspecto ligero, semejante al de una estructura metálica, y que justamente por este aspecto parece que debieran ser económicas, cuando menos considerando las cantidades de material empleado.

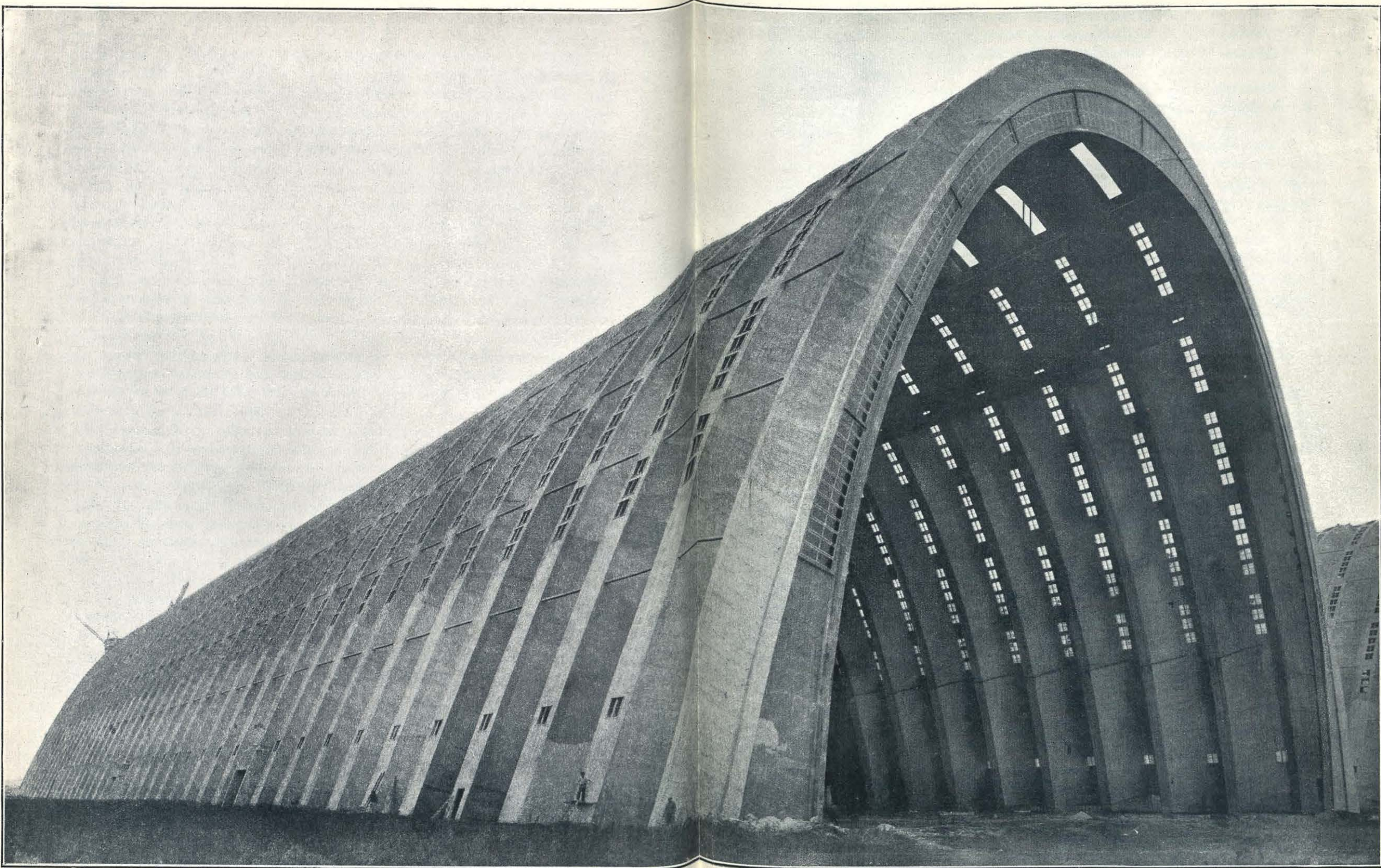
En esta apreciación interviene una ilusión óptica: un volumen dado, dividido en pequeños elementos separados, parece más pequeño que el mismo volumen presentado en una forma compacta. Invariablemente, una viga calada parece más ligera que la misma llena, aun cuando el volumen total sea el mismo.

Algunos calados bien dispuestos dejan pasar la luz suficiente para procurar a la vista una impresión de ligereza muy notable, siendo así que, una vez suprimidos, el cubo es insignificante, hasta poder compensarse por un pequeño aumento, inapreciable para la vista, de una dimensión exterior de la pieza.

La ventaja corresponde, de acuerdo con la lógica, a la construcción monolítica, en la cual, un mismo elemento de materia puede acumular funciones constructivas diferentes.

Se obtienen cubos de hormigón, generalmente del mismo orden; la ventaja puede corresponder a la mayor o menor fortuna en uno o en otro estudio. Desde este punto de vista, el empleo constante de coeficientes límites y de las formas deseadas, compensa las ventajas del principio de la construcción moldeada en obra, que conserva, sin embargo, la superioridad de coeficientes medios de fatigas menos elevadas, lo que corresponde a una posibilidad de economía en el peso del cemento y en la fabricación.





ORLY. — VISTA GENERAL DE UN HANGAR PARA DIRIGIBLES.





Para la estructura, la ventaja de la construcción monolítica es siempre muy importante. Y lo es del mismo modo para las superficies de encofrado necesarias, que son siempre mucho más considerables en una construcción de elementos moldeados previamente.

La inferioridad de este último sistema de construcción tiende, por otra parte, a crecer con las dimensiones absolutas de las construcciones que hubiesen de realizarse.

La comparación no es más favorable desde el punto de vista de la mano de obra y del material de construcción. La exageración del desenvolvimiento de las superficies de encofrado, llega a compensar las facilidades de ejecución dadas por el molde sobre un área organizada: esta organización es costosa y exige mucho sitio y aparatos de entretenimiento especiales.

Pero el principal escollo estriba en colocar en su lugar las piezas del molde. No siendo posible reducir su dimensión por bajo de ciertos límites, es preciso afrontar el levantamiento y acoplamiento de piezas embarazosas, cuyo peso alcanza hasta 50 toneladas y aun más, sobre andamiajes de 50 metros de altura. Estas maniobras exigen medios auxiliares más potentes, mayores gastos y más tiempo que si se hubiera tratado de encofrados y armaduras, y la elevación a la obra de una cantidad de cemento equivalente. No se puede, pues, ni aun descontar la ventaja de un plazo de ejecución más reducido.

En resumen, el sistema por montaje de elementos preparados previamente, nos pareció *a priori* inferior al sistema monolítico; los hechos posteriores nos dieron la razón. Se propusieron, efectivamente, construcciones de elementos moldeados, pero a precios superiores, por término medio, a los obtenidos con nuestra construcción monolítica.

## **Empleo de las bóvedas de doble curvatura**

Tuvimos entonces la idea de desarrollar un sistema que ya habíamos empleado, en 1915, para un *hall* destinado a cubrir un gran horno de cristales en Montluçon (Allier). Esta construcción (30 metros de altura) está constituida por una serie de arcos dobles cuyo extradós está formado por elementos rectilíneos, entre los cuales se colocaron bóvedas ligeras, contrarrestadas por unos tirantes y cuyas generatrices siguen la pendiente del extradós de los arcos. Esta construcción dió un buen resultado, a pesar de las condiciones tan duras de contracción y dilatación a las cuales la sometió el horno.

Abandonamos, sin embargo, el extradós formado de elementos rectilíneos, y dimos a las nervaduras principales la forma de un funicular del peso propio de la construcción, con una altura que crece regularmente desde la clave hasta los apoyos.

Las bóvedas secundarias que las reúnen, presentan, en consecuencia, una doble curvatura: la una, en el sentido de la bóveda principal; la otra, en sentido perpendicular, pareciendo así un elemento de toro.

Conviene observar que en esta construcción, así como en una bóveda de forma de cañón, no hay elementos de hormigón inactivos desde el punto de vista de la estabilidad general, primera superioridad sobre el sistema usado en Montluçon. Dos planos verticales paralelos a las nervaduras principales, cualquiera que sea su situación, seccionan tanto a bóvedas secundarias como a las nervaduras, según arcos estables bajo las cargas permanentes.

Por consiguiente, la unión de las nervaduras principales por medio de tirantes, no es indispensable, si tan sólo se consideran las cargas permanentes. Su conveniencia se concreta cuando se tiene en cuenta el viento. El análisis de los esfuerzos demuestra, por otra parte, que los tirantes pueden ser numerosos y de débil sección.

Esta concepción, que suponía un enorme progreso sobre nuestros estudios anteriores de 1916 a 1917, sirvió de base a nuestra proposición inicial para Orly. Habíamos proyectado las nervaduras principales con una sección rectangular hueca para economizar material. La figura 8.<sup>a</sup> detalla con bastante claridad las formas de este proyecto.

Aun era susceptible de importantes mejoras. Obsérvese que una gran parte

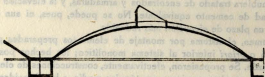


Fig. 8.<sup>a</sup>

de la materia se empleaba en las inmediaciones de la fibra media y no interviene en la resistencia a la flexión; además, la distancia entre el intradós y el vértice de las bóvedas secundarias es importante, y aumenta inútilmente las superficies expuestas al viento.

Desde el punto de vista de la ejecución, la presencia de los tirantes debajo de las bóvedas, de nervaduras sobre las bóvedas secundarias y de partes huecas difíciles de desencofrar, constituían otras tantas dificultades. El estudio detenido de la ejecución hizo desaparecer estos inconvenientes, por una serie de mejoras sucesivas, consecuencia de las soluciones que íbamos encontrando.

### Ideas directrices del proyecto definitivo

He aquí las ideas directrices que nos hicieron preferir, a todas las demás, las formas definitivas:

Un hangar para dirigibles no debe resistir más que a dos categorías de esfuerzos principales: las cargas resultantes de su peso y las debidas al viento.

Cualesquiera que sean las secciones transversales de una construcción monolítica en arco continuo, se obtendrá, bajo la acción de las cargas propias única-

mente, una fatiga constante y mínima, que da para la fibra media del arco la forma de una curva funicular de pesos propios, sin otra condición que las áreas de las secciones normales del arco aumenten desde la clave hasta los apoyos siguiendo una ley de variación convenientemente establecida.

En cuanto a la acción de los esfuerzos del viento, depende únicamente del galbo exterior de la estructura, por lo que conviene reducirle todo lo posible.

La forma que se piensa primeramente para lograr momentos de inercia importantes con la menor molestia posible y mínimo de material, es la de una bóveda hueca formada por dos forjados reunidos por nervaduras situadas en planos normales a las generatrices (fig. 9.\*).

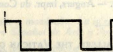


Fig. 9.\*

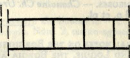


Fig. 10.

gran superficie de encofrados que se necesitan, y porque una parte importante de éstos quedan, después de la ejecución, apresados en los espacios cerrados de la construcción; de aquí grandes dificultades para el montado y recambio. Se suprime este inconveniente por la modificación representada esquemáticamente en la figura 10. Se suprime, asimismo, reduciendo aún más el galbo exterior expuesto al viento transversal, que es lo más molesto.

Una segunda modificación (fig. 11) de esta sección recta va a permitir obtener, conservando los mismos momentos de inercia, y mediante un pequeño gasto

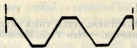


Fig. 11.

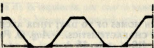


Fig. 12.

suplementario de material, una importante disminución de la superficie encofrable con grandes facilidades para el desmontado del molde. Resulta así una forma perfecta; desde el punto de vista de la ejecución, muy fácil.

Una ligera transformación para determinar el lugar conveniente de los bastidores de las ventanas, da el perfil-tipo de los edificios (fig. 12).

E. FREYSSINET,  
Ingeniero de Caminos.