

Capo IV

Informe de los Ingenieros
D. J. E. Ribera y D. J. M. Aguirre
y cumplimiento del mismo.

Ingenieros: J. E. Ribera
J. M. Aguirre

Una vez terminado el proyecto de Consejo de la Empresa estimo oportuno solicitar un informe de dos sobre el mismo a dos especialistas de reconocida competencia y autoridad, y aceptada gustosamente la idea por los autores del proyecto, la Empresa solicita de D. J. E. Ribera y D. J. M. Aguirre un informe, cuyo contenido copiamos a continuacion.

**Informe sobre el proyecto de cubierta
para el frontón denominado " RECOLETOS "**

por los Ingenieros D. J. E. Ribera y D. J. M. Aguirre.

Se trata del proyecto de cubrir una planta rectangular de 32 x 55 metros, con una bóveda cilíndrica de generatrices horizontales que se apoya en todo el perímetro y que pertenece al grupo de las llamadas bóvedas membranas, por su pequeño espesor.- La directriz es discontinua y está compuesta por dos arcos secantes dentro de la planta y además se establece otra discontinuidad con dos claraboyas inclinadas para dar paso a la luz Norte.

El material de que se proyecta es el hormigón armado.

Esta solución de cubierta difiere mucho de las soluciones que pudiéramos llamar clásicas, en las que las bóvedas, aunque fuesen de hormigón armado, se calculaban con las mismas normas, y tenían todo el aspecto de las bóvedas de fábrica de piedra, o de ladrillo.

Posteriormente, a fin de aligerar las construcciones, se proyectaron las bóvedas de hormigón armado, haciéndolas en forma de bóvedas nervadas en las que los nervios se calculaban, como la parte verdaderamente resistente, y las pantallas que unían unos nervios a otros para cerrar la bóveda, se calculaban resistiendo como forjados corrientes.

Se vió en esta clase de bóvedas que la forma de trabajo de las mismas no respondía a las hipótesis de cálculo, pues los forjados o 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 forjados entre dos nervios, era muy pequeña.

Generalizándose este concepto se llegó a las bóvedas membranas actuales de las que, aunque hay en España algunos ejemplos, todavía producen una sensación de asombro, al verlas proyectadas y construidas.

Sin embargo, la técnica de estas bóvedas membranas ya se encuentra muy avanzada, habiendo salido del campo teórico, y para no hablar más que de las bóvedas membranas de tipo cilíndrico, como la que nos ocupa, y que por su forma de cálculo se denominan Zeiss-bywidag, pueden citarse el mercado de Francfort, en el que se cubre una superficie de 220 x 36,70 m. por 15 bóvedas de esta clase, dispuestas transversalmente y teniendo cada una, unos 14 metros de luz.

Mayor es todavía la cubierta del mercado de Budapest, de solución parecida a la anterior, pero en la que la longitud de la bóveda entre tímpanos es de 41 metros con un espesor de membrana de 6 centímetros.

Hay otros ejemplos, como los hangares de Hamburgo y Turin, pero el de Budapest es el que tiene mayor longitud entre los ejes.

En España se han construido en este tipo las bóvedas de la Escuela Elemental y Superior de Trabajo en la calle de Alberto Aguilera de Madrid, con 22 metros de longitud, y la de la Iglesia de Villaverde Alto (Madrid) formada por tres lóbulos secantes entre sí, parecida a la de la cubierta que informamos, cubriendo una planta de 25 x 17 metros con espesor de 5 centímetros.

Saliendo de las bóvedas cilíndricas, se han cubierto con membranas de hormigón, salas octogonales hasta de 76 metros de luz como las de Leipzig y Basilea, con espesores de 7 centímetros, y en España, la del mercado de Algeciras con planta octogonal, de 48 metros de luz y 9 centímetros de espesor.

Todas estas cubiertas se han construido sin el menor contratiempo, aunque ninguna de ellas llegue a las dimensiones de la proyectada, que creemos será la mayor del mundo, entre las de su tipo.

No obstante, nos parece que los resultados obtenidos en las antes citadas, sobre todo en las pruebas de las dos cubiertas existentes en España, que hemos presenciado personalmente, permite que se pueda construir, sin excesivo atrevimiento, la cubierta proyectada teniendo mucho cuidado en adoptar especiales precauciones de que después hablaremos.

En el proyecto que nos ocupa, el cálculo está hecho en la misma forma en que se encuentran hechos los cálculos de la cubierta que acabamos de citar.

Se basa este cálculo en los principios de la resistencia, de los materiales y de la mecánica elástica, que hoy viene siendo de general aplicación en el cálculo de problemas constructivos de alguna importancia.

En los cálculos que desarrollan los autores del proyecto, hay dos peticiones de principio, a saber:

- Nulidad de la flexión longitudinal en la membrana

- Nulidad del módulo de Poisson

A nuestro juicio, ambas peticiones de principio pueden admitirse, pues la flexión longitudinal ha de ser relativamente muy pequeña para poder admitirla como nula, y la nulidad del módulo de Poisson es clásica en todos estos cálculos, y no hay inconveniente en admitirla puesto que realmente el espesor puede considerarse infinitamente pequeño, con respecto a las otras dimensiones. No nos es posible, dada la premura de tiempo, rehacer todos los cálculos que han hecho los autores del proyecto para su debida comprobación, respecto de errores materiales de cálculo que pudieran contener, pero el aspecto perfectamente concordante de los diagramas de esfuerzos que se obtienen a sí como la vista de las isostáticas e isobaras de la cubierta, son completamente satisfactorias, por lo que no parece que en estos cálculos se hayan cometido graves errores materiales.

Se desarrolla por separado el cálculo para el peso propio, el viento y la nieve, cosa que no suele hacerse por la complicación que representa, pero que naturalmente constituye una mayor garantía sobre el cálculo.

Las sobrecargas se han calculado a razón de 250 Kgs. por metro cuadrado para las cargas propias, 100 Kgs. para el viento y 65 Kgs. para la nieve, siendo aceptables pues corresponden a las instrucciones normales para el clima de Madrid.

Los autores prescinden de los esfuerzos de temperatura, suponiéndolos anulados por medio de dispositivos que permiten la li

bre dilatación de la membrana sin perjuicio de la estabilidad de la misma.

En cuanto al cálculo de los esfuerzos en los bordes, que es una cosa sumamente delicada, se han calculado por un método similar al de Finster Walder, empleado para el cálculo del mercado de Budapest, que consiste en establecer, por el método de las funciones de Airy, una función, que se considera a priori, como integral segunda de los esfuerzos de flexión y dándole forma de exponencia, que transforma con arreglo al teorema de Euler en trascendente, se llega a obtener la expresión de un efecto cualquiera de borde, como la suma de cuatro ondas senoidales amortiguadas que nacen en el borde que se estudia, y sus cuatro reflejos en el borde opuesto. El gran ángulo con que se contacta en el centro las directrices de las bóvedas y su pequeño espesor, hacen que el amortiguamiento de las ondas sea tal, que al llegar al borde opuesto, su valor, al ser prácticamente despreciable, permite a su vez despreciar las ondas reflejas, pero a pesar de esta simplificación, debida a la forma geométrica de la directriz, la resolución de los sistemas de ecuaciones que dan las constantes de integración con arreglo a las condiciones de restricción de los bordes, resultan muy numerosas, representando por consiguiente un gran trabajo su resolución; dominada esta dificultad, y pudiendo comprobarse los resultados por la verificación de las ecuaciones correspondientes, parece que la determinación de todos los coeficientes que entran en estos efectos de borde están suficientemente asegurados y libres de error.

En cuanto a las cargas de trabajos se obtienen unos máximos de 50 Kgs. por cm². para el hormigón, 1.100 Kgs. por cm². para el hierro en general, que se reduce a 800 Kgs. para el armado del encuentro central. A nuestro juicio, estas cargas son corrientes y perfectamente admisibles.

De esto resulta que tratándose de una bóveda proyectada basándose en un sistema que tiene suficiente número de aplicaciones para confirmar la bondad del mismo, y estando hechos los cálculos con arreglo a la mejor técnica actual de la mecánica elástica y únicamente con unas peticiones de principio corrientemente admitidas en esta clase de obras, creemos que es perfectamente factible la construcción de esta bóveda, según se desprende de los resultados de cálculo, pero dado lo excepcional, de sus dimensiones, debe tomarse especiales precauciones, para que su realización concreta se aproxime cuanto sea posible, a las hipótesis de cálculo, evitando en cuanto se pueda las imperfecciones inherentes a la misma.

Esto tiene gran importancia porque lo que ocurre en realidad en las obras en que se originan esfuerzos secundarios, debidos a que las deformaciones reales, y por lo tanto las cargas de trabajo originadas no son las supuestas en el cálculo. Para hacer frente a estos esfuerzos secundarios y a los defectos de los materiales, se introduce en los cálculos el coeficiente de seguridad, que suele ser muy suficiente para absorber los trabajos suplementarios, porque en obras corrientes los esfuerzos secundarios no adquieren proporciones exageradas, pero en este -

caso hay que tener mucho más cuidado porque esas inadapta-
ciones de la obra al cálculo, si pasan de ciertos límites pueden
originar cargas de trabajo, que lleguen a la rotura.

En primer lugar, entendemos que sería preferible que las clara-
boyas se prolongaran hasta los tímpanos, haciéndolas continuas
de uno a otro en dirección de las generatrices o bien subdivi-
dir las formando varias claraboyas pequeñas separadas unas de o-
tras por la membrana continua que forma la bóveda. Con la pri-
mera solución, se establecería una mayor continuidad en la su-
perficie y se impedirían los esfuerzos secundarios que necesari-
amente tiene que haber, en la parte de membrana que en la di-
posición actual existe entre los tímpanos y el arranque de las
claraboyas, sirviendo de estribo a las mismas. En la segunda so-
lución de hacer varias claraboyas pequeñas separadas por tro-
zos de membranas, se disminuiría en valor de estos esfuerzos
secundarios, haciéndolos así menos peligrosos.

Creemos que sería conveniente, la ejecución de la obra con ce-
mento aluminoso porque tratándose de espesores muy pequeños es
preciso obtener en lo posible un mayor coeficiente de segurie-
dad, ya que en estas secciones pequeñas, el aumento de cargas,
por deficiencias en una sección, puede llegar a alcanzar pro-
porciones enormes; además, esto tendría la ventaja de disminuir
la contracción del fraguado, cosa muy importante, dadas las di-
mensiones de estas membranas, y permitir un desahucamiento más
rápido con lo que se consigue la disminución de plazo que tan-
to interesa a la Sociedad.

Es esencial la cimbra que se vaya a emplear. Esta cimbra debe ser perfectamente rígida y entera, en forma que permita el hág migonado de toda la bóveda de una sola vez. Habría de tenerse especialísimo cuidado en que no haya alabeo ninguno en las generatrices sino que estas sean perfectamente horizontales, y llamamos particularmente la atención sobre este punto, pues en este una falta de cuidado podría acarrear la ruina de la obra, debido a los esfuerzos secundarios que se producen y no tenidos en cuenta. El descimbramiento debe estar perfectamente estudiado, para que sea continuo, sin golpes ni sacudidas, y como se trata de una bóveda de dimensiones excepcionales, creemos que debe proyectarse esto en tal forma que la cimbra, después de separarse unos centímetros de la bóveda, conserve toda su rigidez y resistencia, a fin de que se pueda probar la cubierta, y se pueda volver a cimbrar con mucha rapidez, en caso de que se presentaran deformaciones anormales.

La sobrecarga de prueba debe ser por lo menos vez y media la su puesta en los cálculos.

Como hoy día existen procedimientos para medir las deformaciones que se producen en una estructura, con una precisión enorme, creemos que sería muy conveniente poner algunos testigos, para comparar las deformaciones reales con las de cálculo, por medio de auscultadores, con el procedimiento de vibraciones sin tonizadas, y que los que suscriben han tenido ocasión de aplicar con éxito en otras obras.

Los cambios de sección que necesariamente origina la existencia

de las claraboyas son zonas muy peligrosas; por consiguiente, al hormigonar deberá tenerse esto muy presente, para que de ninguna manera resulten debilitadas estas secciones durante el hormigonado.

Se supone en los cálculos, como ya hemos dicho, que la bóveda trabaja a libre dilatación. Esta libre dilatación debe estar perfectamente asegurada para que se produzca libremente el movimiento sin originar reacciones, adoptando disposiciones que la garanticen. Se disminuiría, naturalmente las dilataciones por temperatura y además es conveniente, desde el punto de vista de comodidad, el aislar térmicamente esta bóveda con una capa de corcho, una cámara de aire u otro aislante.

Por otra parte, se supone que la membrana se apoya toda, en unos apoyos indeformables. Como esto no ocurre en uno de los lados en que se apoya ^{en} una estructura, es preciso darle a la viga de apoyo superior de esta estructura, toda la rigidez que precisa para que prácticamente pueda cumplir aquellas condiciones de cálculo.

Por último, como la membrana puede quedar bastante suelta, sería necesario comprobar en su caso, y tomar las precauciones necesarias para que no pueda ser elevada por efecto de succión del viento.

Resumiendo todo lo dicho, nos parece que el proyecto es perfectamente viable, en suficientes condiciones de seguridad siempre que se tenga un escrupulosísimo cuidado en su construcción siendo a nuestro juicio conveniente:

-
- 19.- Modificar las claraboyas , o bien prolongarlas hasta los tímpanos, de modo que sea entera de tímpano a tímpano, o bien subdividirla en varias claraboyas pequeñas y dejando entre ellas trozos de membrana, que aislen una de otra.
 - 20.- que se emplee cemento aluminoso.
 - 30.- que la cimbra sea bien rígida y que se compruebe escrupulosísimamente la horizontalidad perfecta en todas las generatrices, dando, antes del hornigonado, las contraflechas necesarias para que se cumpla esta condición.
 - 40.- que se asegure un descimbramiento fácil sin sacudidas ni esfuerzos secundarios, que pudieran ser por ejemplo el empleo de gatos hidráulicos o de tornillo.
 - 50.- que se pruebe, después de separar unos centímetros la cimbra, con una sobrecarga que sea por lo menos, vez y media la del cálculo. Esta prueba debe hacerse con las gradierias interiores del frontón cargadas y sin cargar. También aconsejamos como muy conveniente que se pongan unos testigos para poder medir las deformaciones reales producidas en los diversos estados de carga.
 - 60.- que se tenga especial cuidado en el hornigonado de las zonas contiguas a las claraboyas, y en el borde interior que resulta del encuentro de las dos bóvedas.
-

-
- 7º.- que se emplee una disposición que asegure la libre dilatación.
- 8º.- que se aisle térmicamente.
- 9º.- que la carrera sobre la que apoya uno de los bordes de la membrana sea muy rígida.
- 10º.- que se compruebe, a los posibles efectos del levante por succión por la acción del viento:

Adoptando estas cuidados, creemos que la ejecución de la obra proyectada no solamente es viable, sino que el éxito de la misma será un nuevo prestigio de nuestra técnica arquitectónica, siendo digna de todo elogio la decisión de los autores del proyecto de cubrir este espacio con una bóveda como la proyectada que al ser la mayor del mundo colocará a España en lugar preeminente en los avances de la técnica, y que además supone en sus autores un espíritu esforzado y moderno, de buscar nuevas soluciones y nuevas orientaciones, que reflejan un avance progresivo, en lugar de seguir por los moldes rutinarios y manidos, más cómodos para proyectar y de menor responsabilidad.

LOS INGENIEROS:

J. Eng. Ribera

J. M. Aguirre