

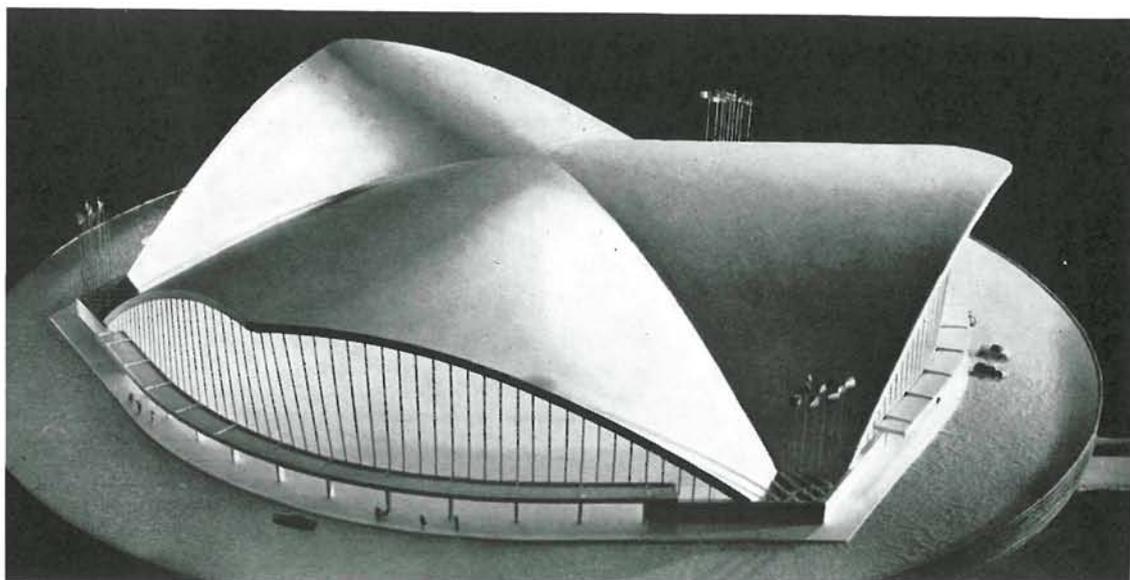
sala de exposiciones

FRANCO LEVI, ingeniero

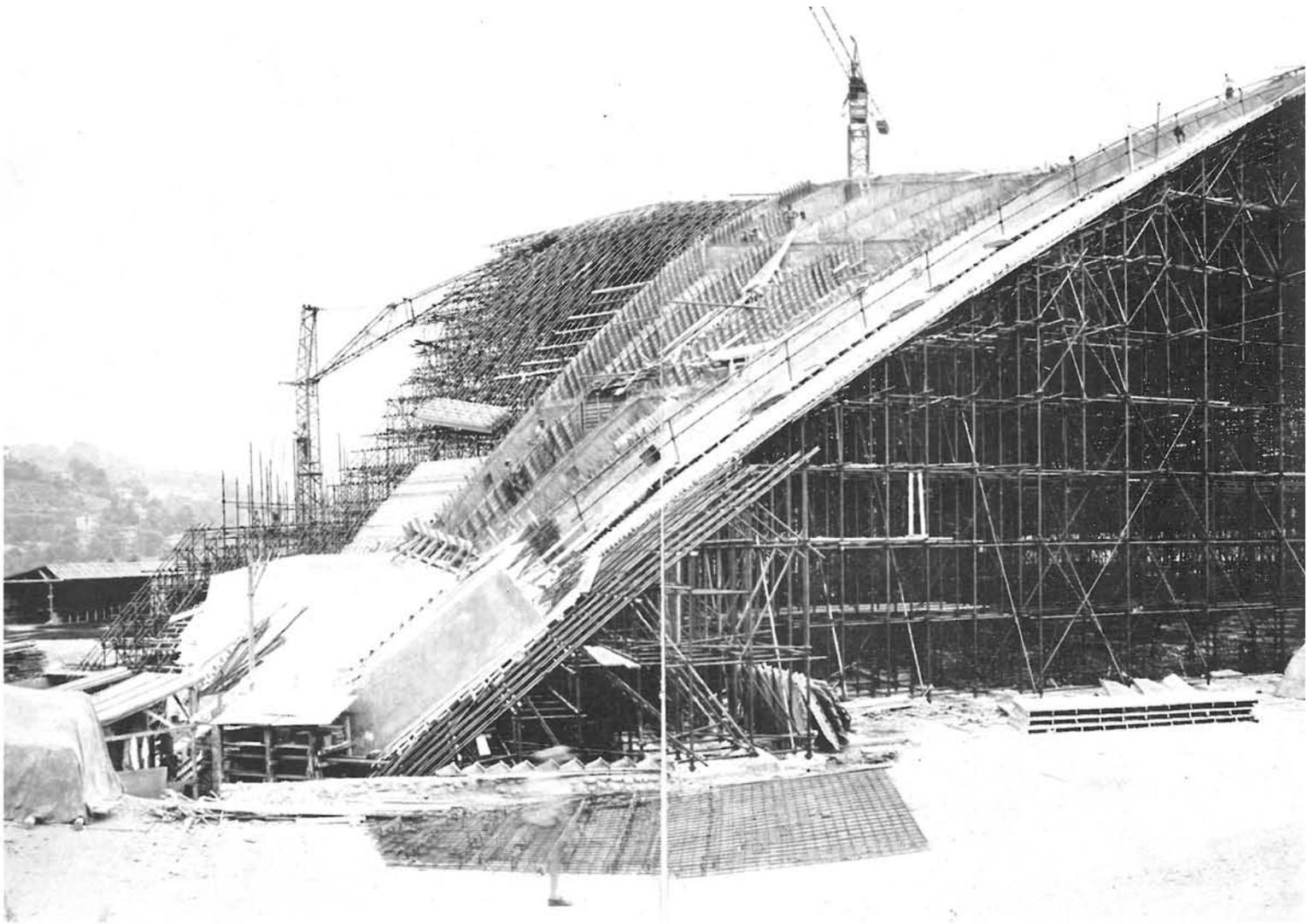
841-17

Con motivo de celebrar el primer centenario en la Unidad nacional italiana se proyectó un edificio dedicado a exposiciones, ubicado en Turín (Italia), cuya fecha de terminación se hallaba seriamente condicionada.

El proyecto inicial contaba con seis puntos de apoyo, pero una nueva solución, estudiada por el autor, redujo este número a tres. La nueva solución consiste en una lámina de hormigón armado, similar en su género a la que cubre el C. N. I. T. de París (obra publicada en Informes de la Construcción, número 111).

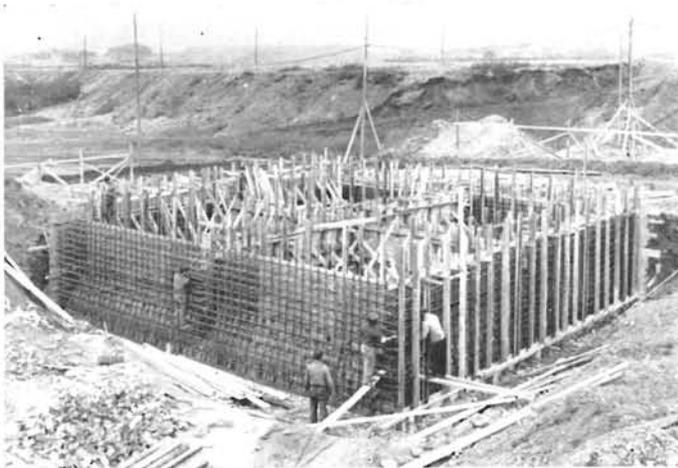


Turín

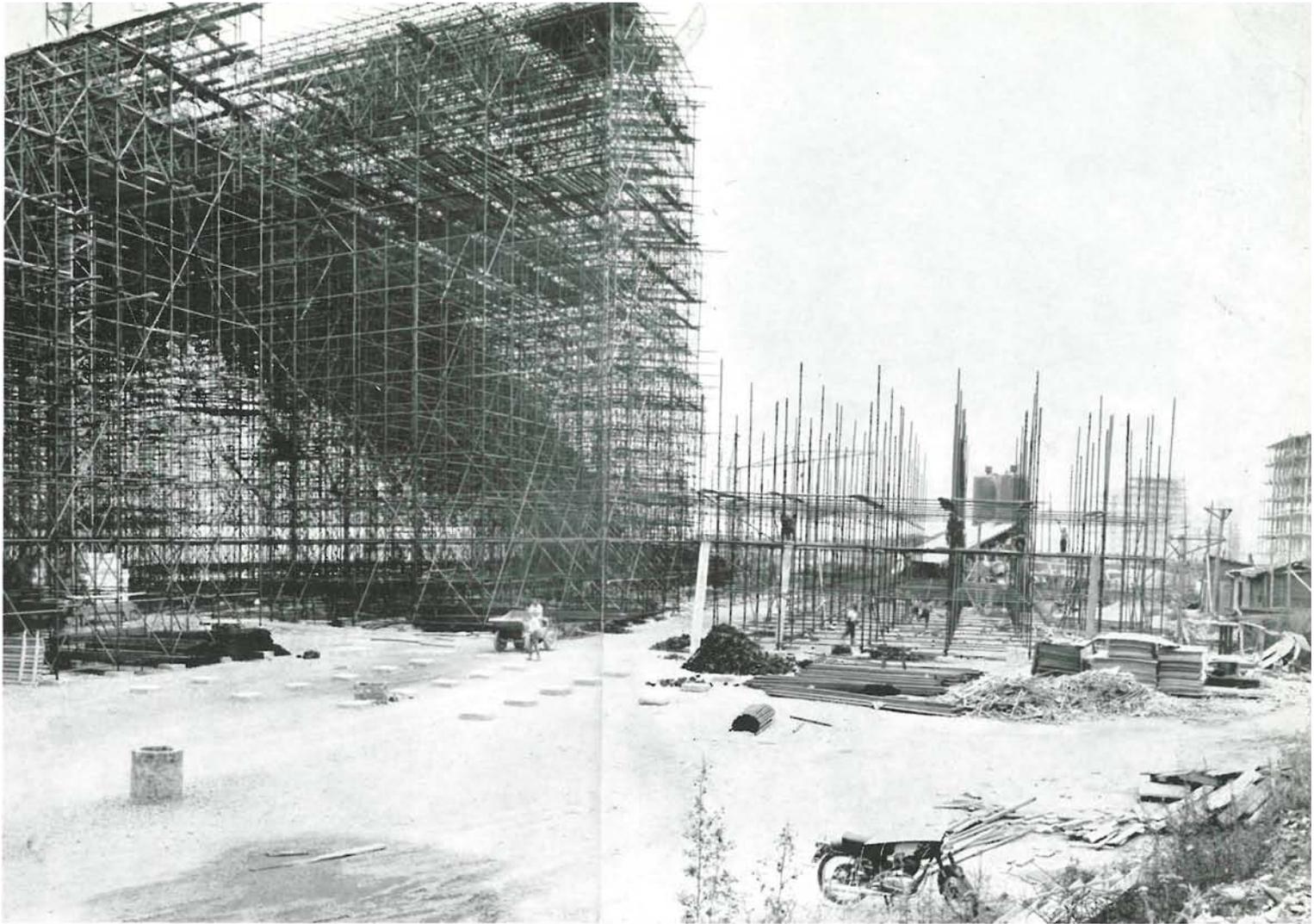


Dada la importancia de la estructura y el reducido tiempo disponible para su estudio en modelo reducido se suplicó la colaboración de Nicolás Esquillan, que calculó la cubierta del C. N. I. T. de París, a fin de redactar, con carácter urgente, el proyecto de ejecución y los métodos de construcción que debían emplearse.

La estructura que constituye la cubierta, lámina de hormigón armado, resultó, como consecuencia de la colaboración impuesta, componerse de tres grandes arcos de anchura variable de apoyos a la clave. El eje de cada uno de estos arcos forma con su adyacente un ángulo de 60° . La anchura varía de 4,6 en arranques a 75 m en la clave, saliendo 37,50 m al exterior en voladizo en cada uno de los arcos. Esta es la más notable originalidad de esta estructura. En planta, la estructura tiene forma hexagonal. La luz teórica de estos arcos es de 122 m, con una flecha de 29,65 m. La circunferencia circunscrita al hexágono de su proyección tiene un diámetro de 150 metros.



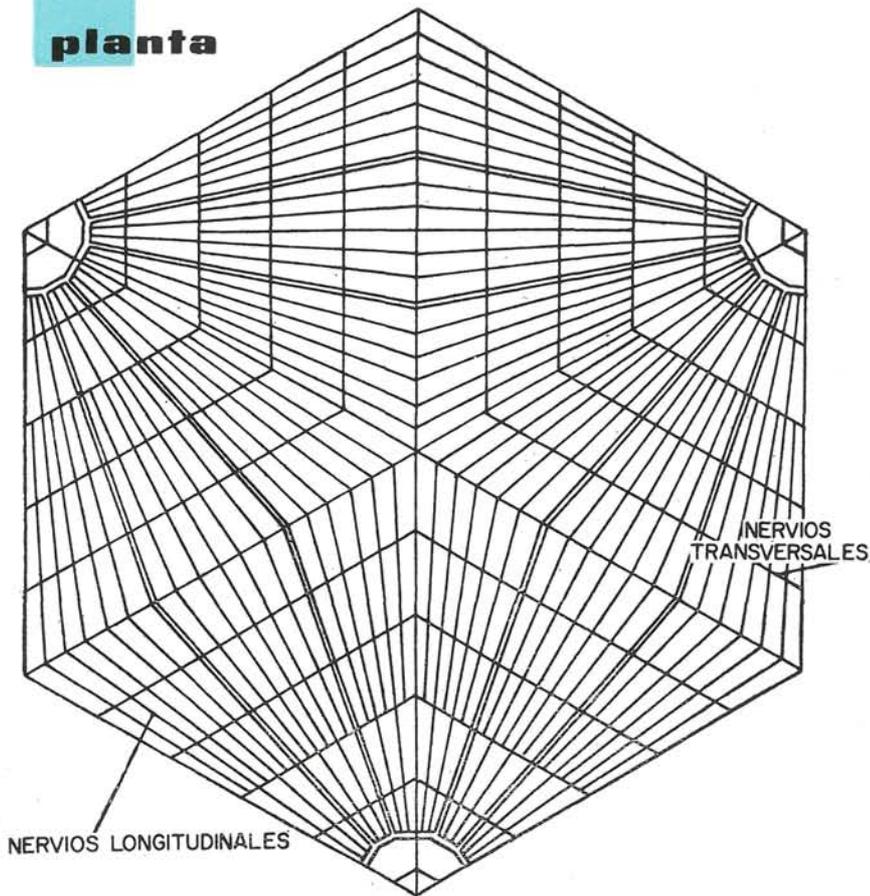
La sección transversal de un arco presenta forma hueca, de dos cabezas y tabiques verticales. El espesor total es de 1,30 m entre intradós y trasdós según la normal a la línea media. El espacio hueco se utiliza para las canalizaciones de la calefacción y alumbrado y, además, como cámara aislante. El espesor de las cabezas es de 6 cm en la zona central, que va aumentando hasta los arranques, donde tiene 40 centímetros.



La disposición de nervios entre las dos cabezas tiene un sentido transversal con nervios espaciados regularmente a 12,20 metros en proyección horizontal; y en el sentido longitudinal, van espaciados los nervios en forma tal que entre dos consecutivos la separación es siempre inferior a 4 m. A los primeros se les ha llamado tímpanos y a los segundos almas. Por razones estáticas, los tímpanos de clave se han reforzado particularmente y se han dispuesto en ella seis cables de pretensado de 24 torones de 7 milímetros.

Entre apoyos se han colocados tres tirantes, uno para cada arco, que son los encargados de absorber el empuje horizontal. En riñones se ha formado una junta donde va el gato para el descimbre.

planta



Los apoyos tienen por cimiento un cajón de hormigón armado, reforzado con un tabique central y un fondo de 3 m de espesor. La forma de este cajón es cuadrada en planta, de 13 m de lado y de 9 a 12 m de altura. En la parte superior de este cajón se ha preparado una solera fuertemente armada sobre la que descansa el apoyo de la cubierta.

La característica estática esencial del arco, compuesto de elementos o gajos, la constituye el hecho de que cada uno de éstos se comporta como sustentador del propio peso. La componente transversal del empuje se absorbe por medio de un tímpano.

Ejecución

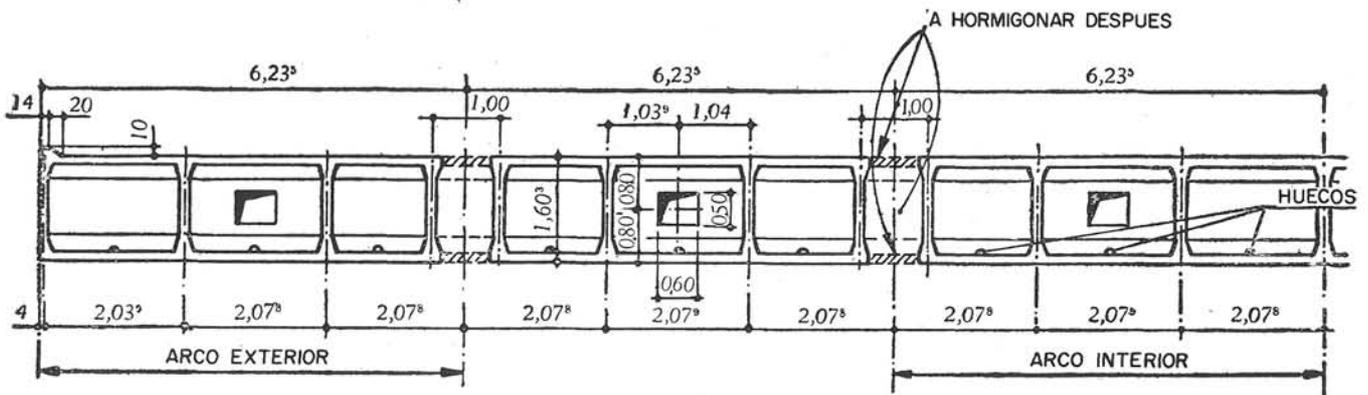
La modalidad ejecutiva se basa en la propiedad anteriormente expuesta, pues permite el reemplazo múltiple de encofrados y entramados.

Una vez hundidos los cajones de cimientos y colocación de tirantes se procedió a levantar los tres primeros arcos formando una especie de estrella de tres puntas, pero formando entrantes en sus lados ex-

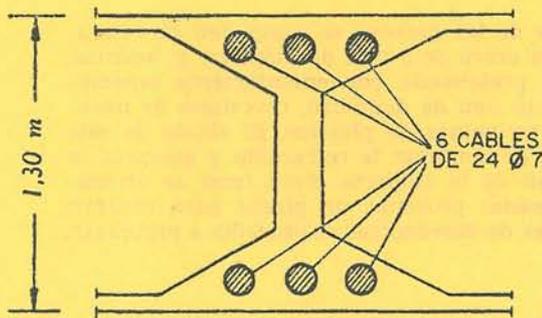
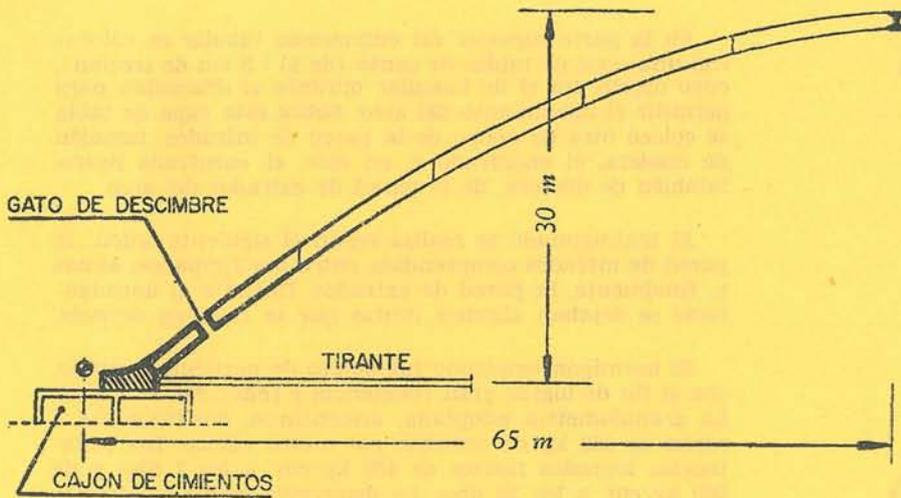
teriores. A esta estrella se le añadió otros tres arcos con lados exteriores rectos y, finalmente, se añadió a la forma de lados rectos otros tres arcos que se proyectan hacia el exterior en su parte central, dando como resultado un hexágono en proyección horizontal. Estos tres últimos arcos constituyen la parte en voladizo de la cubierta.

Tiene particular importancia, en cada una de estas tres fases, la presencia del tímpano transversal, cuya función es la de absorber la componente del empuje transversal.

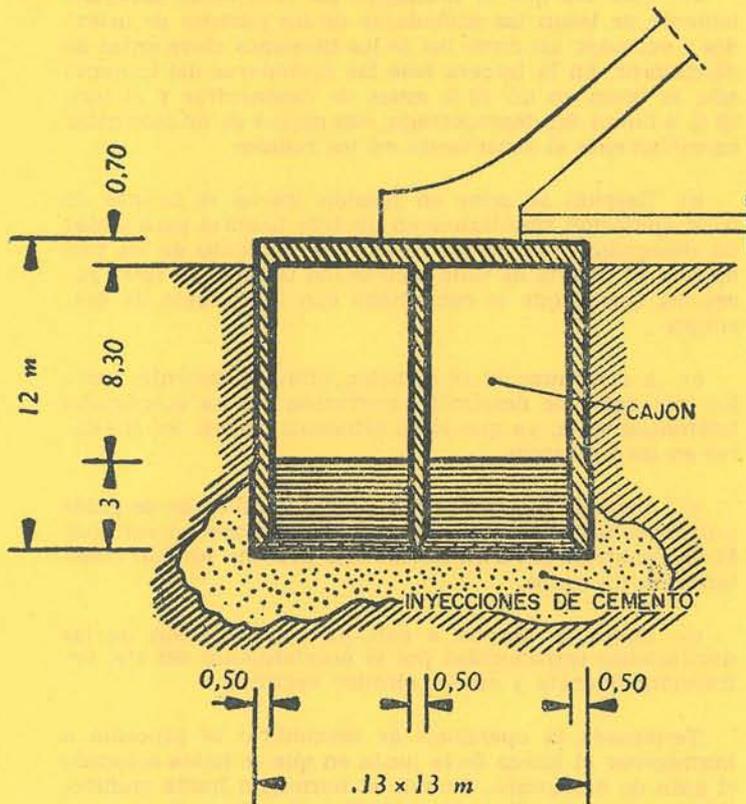
sección



perfil del arco



disposición de cables



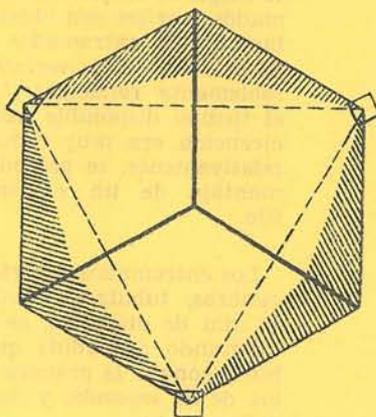
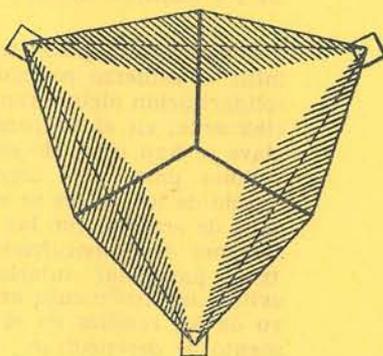
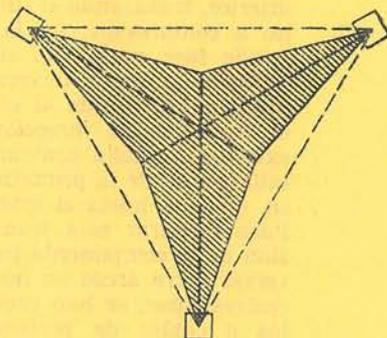
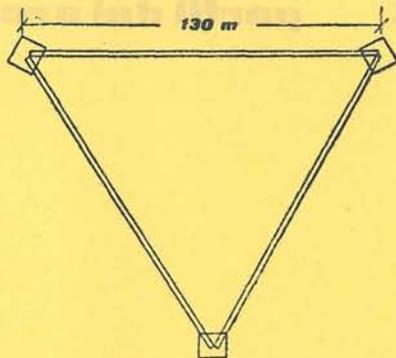
cajón de cimientos

La componente transversal en la primera fase constructiva tenía dirección hacia el interior, trabajando el timpano a compresión; en la segunda fase existía un cierto equilibrio y, en la tercera, la componente debida al efecto de ménsula, de dirección al exterior, se halla contrarrestada por la de la primera fase, dirigida hacia el interior. Para asegurar esta transmisión de la componente transversal entre arcos en las sucesivas fases, se han previsto los 6 cables de pretensado alojados en el timpano de temente la unión entre cables clave, asegurando convenientemente los distintos arcos.

Con objeto de poder transmitir el esfuerzo normal sin solidarización alguna tangencialmente, en el timpano de clave se han colocado cuatro rodillos para cada arco. El tesado de los cables se realizaba de acuerdo con las operaciones de desencofrado. Se tuvo particular interés en evitar un rozamiento excesivo de los rodillos en el momento de desencofrar.

En el concurso de ejecución se exigió se empleasen entramados móviles con objeto de limitar los entramados que, de esta forma, se verían notablemente reducidos. Como el tiempo disponible para la ejecución era muy reducido, relativamente, se procedió al montaje de un entramado fijo.

Los entramados soportes de cimbras, tubulares, de 60 y 48 mm de diámetro, se iban montando a medida que se hormigonaba la primera fase, los de la segunda, y así sucesivamente.



En la parte superior del entramado tubular se colocaron una serie de tablas de canto (de 11×3 cm de sección), cuyo objeto era el de bascular durante el descimbre para permitir el movimiento del arco. Sobre esta capa de tabla se colocó otra de apoyo de la pared de intradós, también de madera, el encofrado y, en éste, el encofrado ligero, también de madera, de la pared de extradós del arco.

El hormigonado se realizó según el siguiente orden: la pared de intradós comprendida entre dos tímpanos, almas y, finalmente, la pared de extradós. Durante el hormigonado se dejaban algunas juntas que se tapaban después.

El hormigón empleado fue objeto de particular estudio, con el fin de lograr gran resistencia y reducida retracción. La granulometría adoptada, discontinua, dosificándose a razón de 350 kg de cemento por metro cúbico. Las resistencias logradas fueron de 480 kg/cm^2 a los 7 días y de 560 kg/cm^2 a los 28 días. La dispersión media cuadrática resultó ser del orden del 12 %.

Las armaduras de las paredes se componen de reticulados de barras de acero de 5 mm de diámetro y, además, de armaduras de pretensado, convenientemente espaciadas, de cables de 10 mm de diámetro, revestidos de parafina y envueltos en vainas de plástico. El objeto de este pretensado era el de contener la retracción y asegurar la impermeabilización de la cubierta. Para tesar se utilizaron varillas fileteadas provistas de placas para repartir los esfuerzos. Antes de desencofrar se procedía a pretensar.

Descimbre

a) Una vez que el hormigón ha envejecido suficientemente, se tesan las armaduras de las paredes de intradós y extradós, así como las de los tímpanos clave antes de descimbrar. En la tercera fase las armaduras del tímpano sólo se tesan en un 50 % antes de desencofrar y el otro 50 % a mitad del desencofrado, con objeto de no aumentar excesivamente el rozamiento en los rodillos.

b) Después se pone en tensión inicial el tirante de base, operación simultánea en los tres tirantes para evitar un desequilibrio entre los cajones de cimiento de los tres apoyos. El tirante de cada arco se iba teso en fases sucesivas, acción que se combinaba con la del gato de descimbre.

c) A continuación se actuaba, simultáneamente, sobre los tres gatos de descimbre, operación que se coordinaba telefónicamente, ya que estos esfuerzos debían ser similares en los tres arcos.

d) Después se efectuaba la acción combinada de gatos y tirantes hasta lograr la separación entre arcos y cimbras. El descimbre se advertía claramente por una presión constante en los gatos.

e) Luego se llevaba a cabo la compensación de las desviaciones introducidas por el acortamiento del eje, retracción, fluencia y efecto térmico eventual.

Terminada la operación de descimbrar se procedió a hormigonar el hueco de la junta en que se había colocado el gato de descimbre. Cuando el hormigón había endurecido convenientemente, se aflojaba el gato y el arco soportaba directa y libremente su propia carga.

Las operaciones de descimbre se controlaron por medio de elongómetros embebidos en el hormigón, que daban las tensiones y temperatura local en los puntos característicos del arco. Una serie de alambres de metal invar fueron colocados para medir los movimientos verticales del arco. Para controlar el movimiento de los cajones de cimientos se prepararon bases topográficas de referencia. Para determinar flechas locales se colocaron flexímetros horizontales y, finalmente, se preparó una base para determinar los movimientos relativos entre arcos.

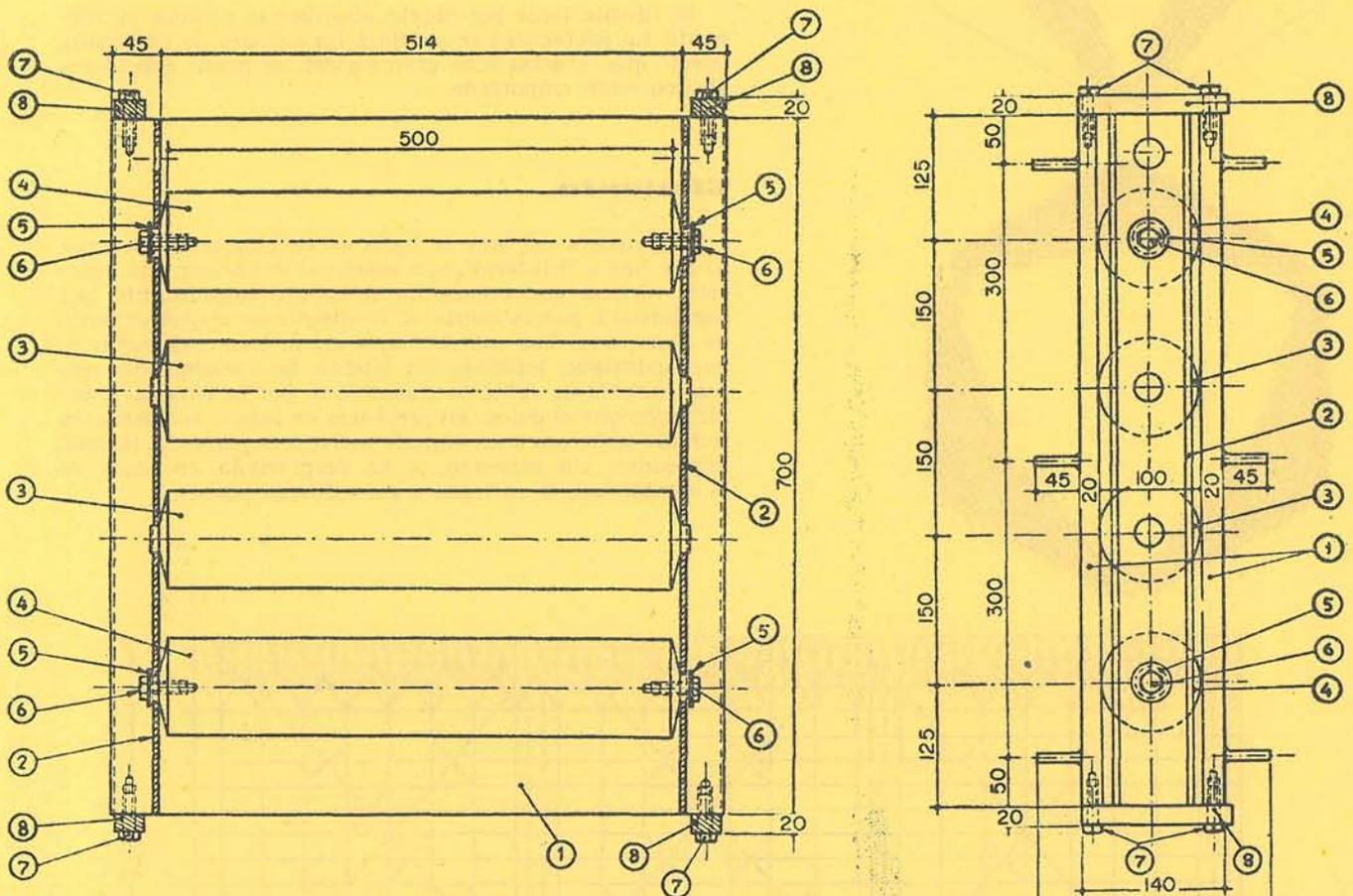
Con objeto de obtener datos prácticos para introducir compensaciones en los arcos hormigonados después, se hicieron repetidas observaciones en los alambres de invar, elongómetros y referencias topográficas durante varios meses.

Forma de la cubierta

La sección obtenida por un plano vertical pasando por dos apoyos es una curva de cuarto grado que se asemeja mucho a la funicular del peso propio. Para su proyecto se han seguido dos criterios fundamentales:

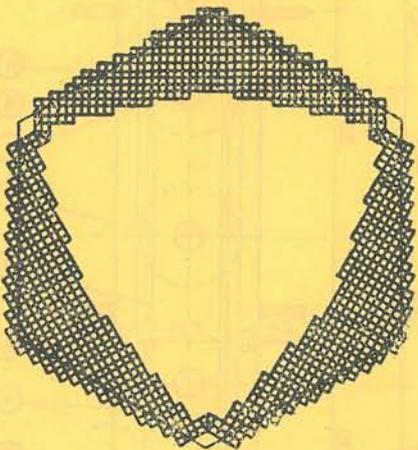
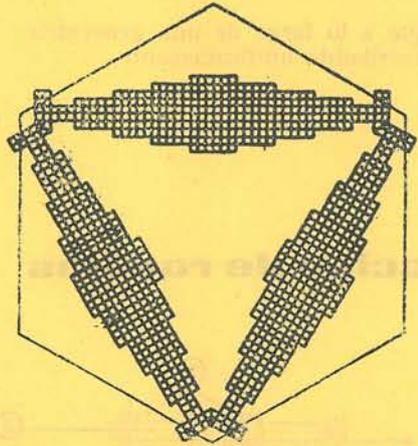
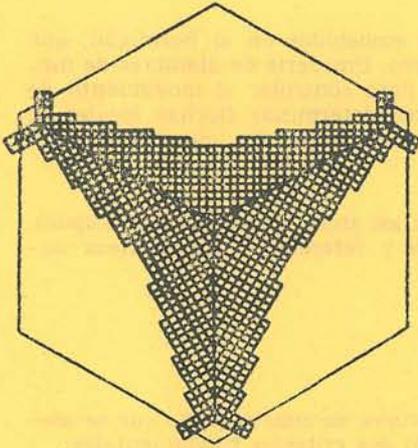
1) La Ley de repartición del hormigón se ha estudiado de tal forma que a lo largo de una generatriz horizontal, normal al plano antes referido, la carga permanente se halla distribuida uniformemente.

alzado y sección de rodillos



1. Marco.—2. Montante en U.—3. Rodillo.—4. Rodillo.—5. Arandela.—6. Tuerca.—7. Tuerca de fijación del montante.—8. Pietina de fijación del montante.

tres fases constructivas y sección por la clave



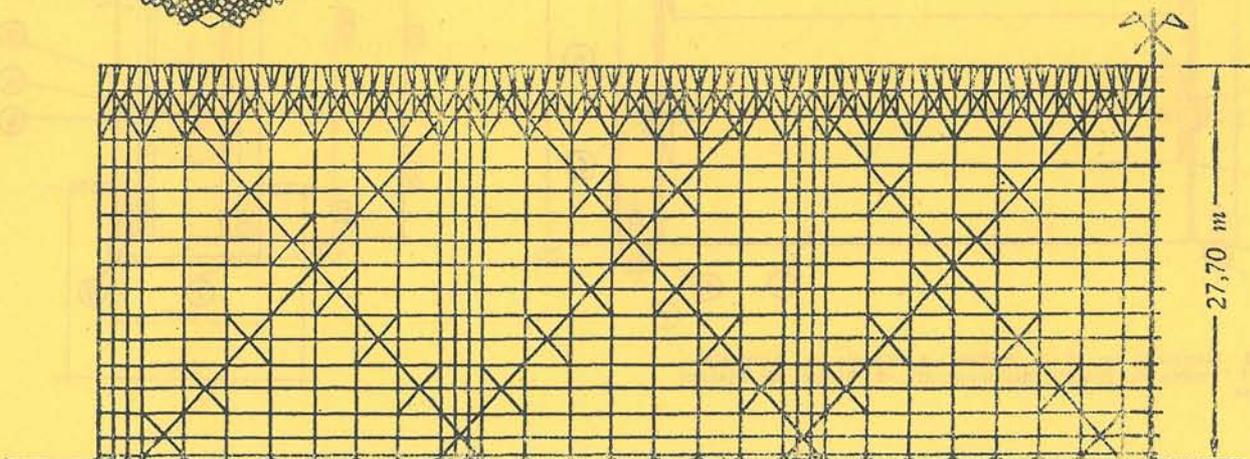
2) La fibra media del plano que contiene a los puntos de apoyo es la curva funicular de la carga aplicada en la tercera parte del arco adyacente al plano. Se puede demostrar que, en tales condiciones, un gajo cualquiera de la bóveda, comprendido entre dos curvas radiales con vértice en el apoyo, constituye un funicular del peso propio. El equilibrio general de los distintos elementos daban lugar a una reacción transversal en la clave que aparece en el tímpano de la misma. La comprobación de este comportamiento estático de un arco trabajando en estas condiciones se realizó en el C.N.I.T. de Paris, por medio de un estudio fotoelástico sobre modelo.

Tirantes

El tirante tiene por objeto absorber el empuje permanente. La sobrecarga se confía a los cajones de cimientos, puesto que, gracias a su gran rigidez, se puede considerar al arco como empotrado.

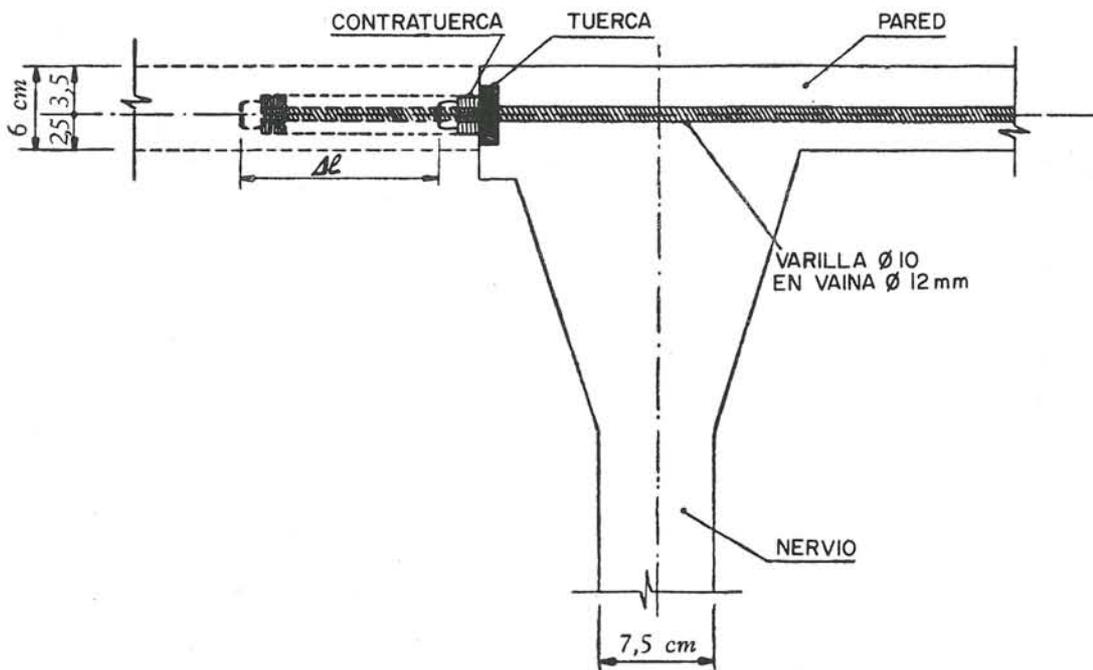
Cimiento

La imposta del arco se halla excéntrica, de unos 87 cm, hacia el interior, con objeto de conseguir una reacción vertical que creará un momento estabilizante que compensará parcialmente el momento de empotramiento de la bóveda. Las solicitaciones en la base del cajón se han calculado teniendo en cuenta la combinación más desfavorable de esfuerzo transmitido por la bóveda, y admitiendo que el cajón, en presencia de cargas accidentales, se halla sometido a un empuje activo por parte del terreno adyacente; sin embargo, se ha despreciado, en favor de la estabilidad, la influencia del esfuerzo pasivo.





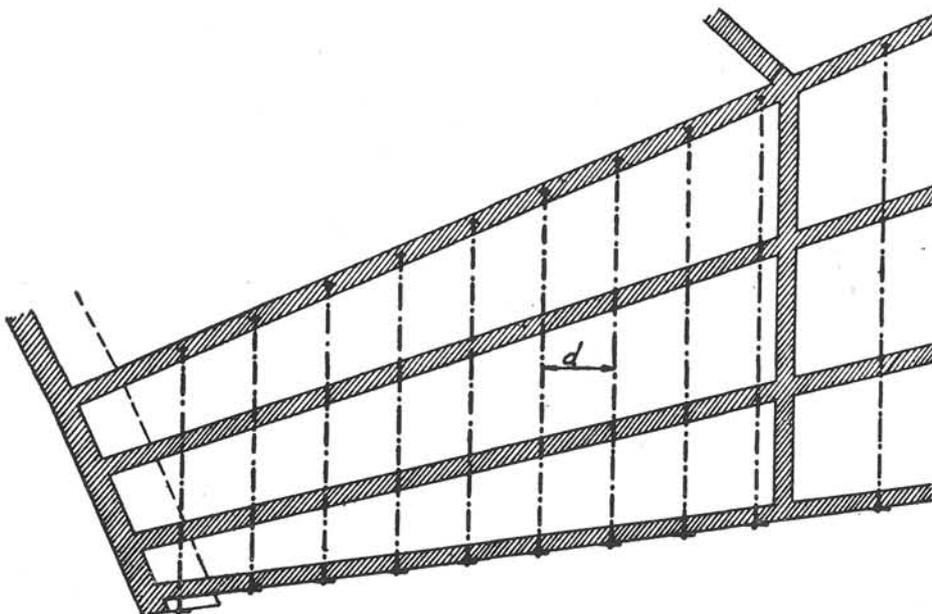
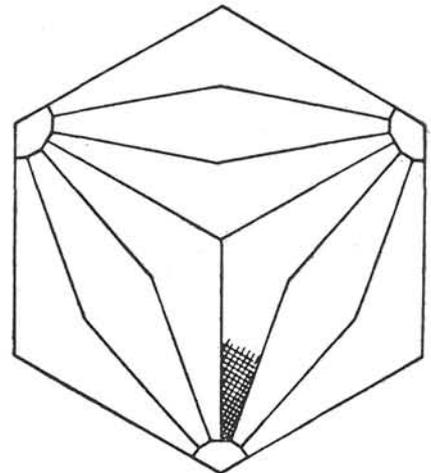
La sollicitación media en la zona del terreno inyectado de la parte inferior del cajón es de $3,5 \text{ kg/cm}^2$, que llega a $4,2 \text{ kg/cm}^2$ en las extremidades, pero de presencia dudosa debido a la rigidez del conjunto.



tesado
del
tirante

Cálculo del efecto de cargas permanentes y accidentales

En primer lugar se estudió el efecto de las desviaciones entre la línea media y la funicular de la carga permanente. Se calculó la influencia de un error en el trazado que provocase una separación entre la línea media teórica y la fibra media real. Se admitió una desviación máxima de ± 3 cm, reduciéndose después, linealmente, hasta anularse en la clave y en la imposta. Así se ha estudiado el efecto de un aumento o disminución del espesor de las paredes de intradós o extradós en ± 5 mm. La distribución más desfavorable debida a este efecto se ha estudiado utilizando las líneas de influencia.



planta
y sección
de la bóveda



Se ha admitido una sobrecarga de 115 kg/m^2 , de los que 100 corresponden a nieve y los otros 15 a las cargas ejercidas por los carteles o similares. También se ha considerado el efecto más desfavorable de una sobrecarga de 65 kg/m^2 colocada en cualquier forma.

Estudio de la compensación

El efecto de la retracción y fluencia debido a la distorsión introducida al descimbrar se ha calculado siguiendo la teoría de la coacción. Se ha realizado una comprobación aproximada de los efectos mutuos que los distintos arcos podrían ejercer el uno sobre el otro después de la solidarización.

Efecto del viento

Para el cálculo de los efectos del viento se han utilizado los datos obtenidos en el túnel aerodinámico con motivo del estudio de la cubierta del C.N.I.T. de París.

La presión tipo adoptada es el resultado de un estudio de las condiciones climáticas de la zona, que dio un valor de 74 kg/m^2 , correspondiente a una velocidad de 35 m/s . La acción del viento se ha acumulado con la de la carga asimétrica de 65 kg/m^2 . Se han considerado cuatro condiciones de depresión y presiones correspondientes a un viento obrando según una arista hacia tierra y en elevación, es decir, con viento en las dos direcciones.

Efecto térmico

Los límites extremos considerados para la temperatura son de $\pm 30^{\circ}\text{C}$, con una acción diferencial entre $\pm 15^{\circ}\text{C}$.

Se han evaluado los esfuerzos normales acumulados de los componentes del esfuerzo del pretensado y del empuje, y se ha comprobado el efecto provocado por la excentricidad de la curva de presiones en la clave. Por medio de un cálculo aproximado se ha podido apreciar el efecto de flexión que se absorbe gracias a la rigidez flexo-torsional de la bóveda. Un estudio particular, pone de manifiesto las condiciones de trabajo de los arcos parciales en las distintas fases del descimbre.

Se ha tenido en cuenta la acción directa de la carga y de los esfuerzos secundarios inducidos del hecho de que la influencia del esfuerzo axial y de la curvatura local no se hallan exactamente equilibrados con la carga local. En el análisis estático de las secciones se ha tenido en cuenta el efecto de la precompresión parcial inducida por los cables de 10 mm que se han colocado en la pared del intradós.

La estabilidad de la bóveda se ha estudiado evaluando el efecto recurrente de la deformación derivada de una carga de 65 kg/m^2 , asimétricamente distribuida, admitiendo una desviación de 3 cm entre fibra media y teórica. En este último estudio se ha considerado, en primer lugar, la deformación inicial; después, la acumulada con la que se deriva de la primera, y así, sucesivamente. Prácticamente, dada la gran convergencia, han bastado tres fases para evaluar la flecha total. El coeficiente de seguridad que, como resultado se ha obtenido, ha sido:

$$\frac{\text{flecha total}}{\text{flecha primaria}} = \frac{K}{K-1}$$

El margen de seguridad obtenido según distintos procedimientos se halla comprendido entre 6 y 7.

Para conseguir esta bóveda, tipo cajón, de paredes delgadas, se han empleado, entre otras, las particularidades siguientes: tirantes tesados; cables discontinuos entre elementos tangencialmente independientes y unidos entre sí; el empleo del pretensado en las paredes delgadas; empleo de mallas soldadas de grandes luces; etc.

