



1

estadio olímpico

2

**para
deportes
de hielo,
en
Grenoble
FRANCIA**

N. ESQUILLAN, ingeniero

886 - 23



sinopsis —————

En este artículo se describen, principalmente, las partes de la estructura del Estadio, atendiendo a los cimientos y, principalmente, al conjunto de la gran cubierta y a sus detalles de construcción y ejecución.

El Estadio para deportes de hielo (fig. 1), situado en el centro de Grenoble (fig. 2), se ha concebido para acoger, durante los X Juegos Olímpicos de Invierno de 1968, las pruebas de patinaje artístico y de hockey sobre hielo. Una inmensa cubierta de hormigón armado abriga la pista de hielo, las gradas y los corredores, permitiendo acoger a 12.000 espectadores, los cuales pueden acceder por cuatro entradas distintas.

Partiendo del plano definido en el proyecto base del concurso y del sistema de bóvedas, concebido y estudiado por las empresas Boussiron, que constituyen el elemento original del conjunto, los arquitectos han procedido al estudio de los trabajos de la obra secundaria (calefacción, ventilación, electricidad, producción de frío, sonorización, etc.) y de las disposiciones internas, en particular para preparar ulteriormente salas de deporte bajo las gradas. Desde el punto de vista estético, los detalles de la bóveda y los dibujos de la fachada en madera y aluminio anodizado, dan, por contraste, mucho carácter a esta obra excepcional.

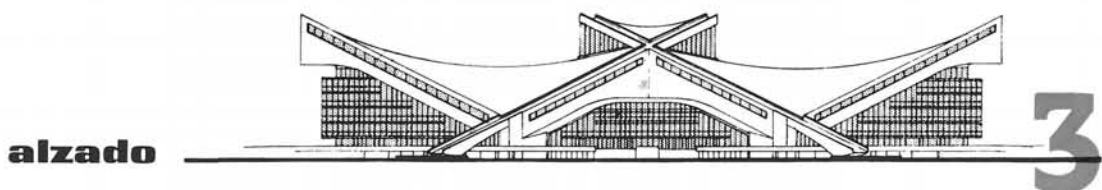
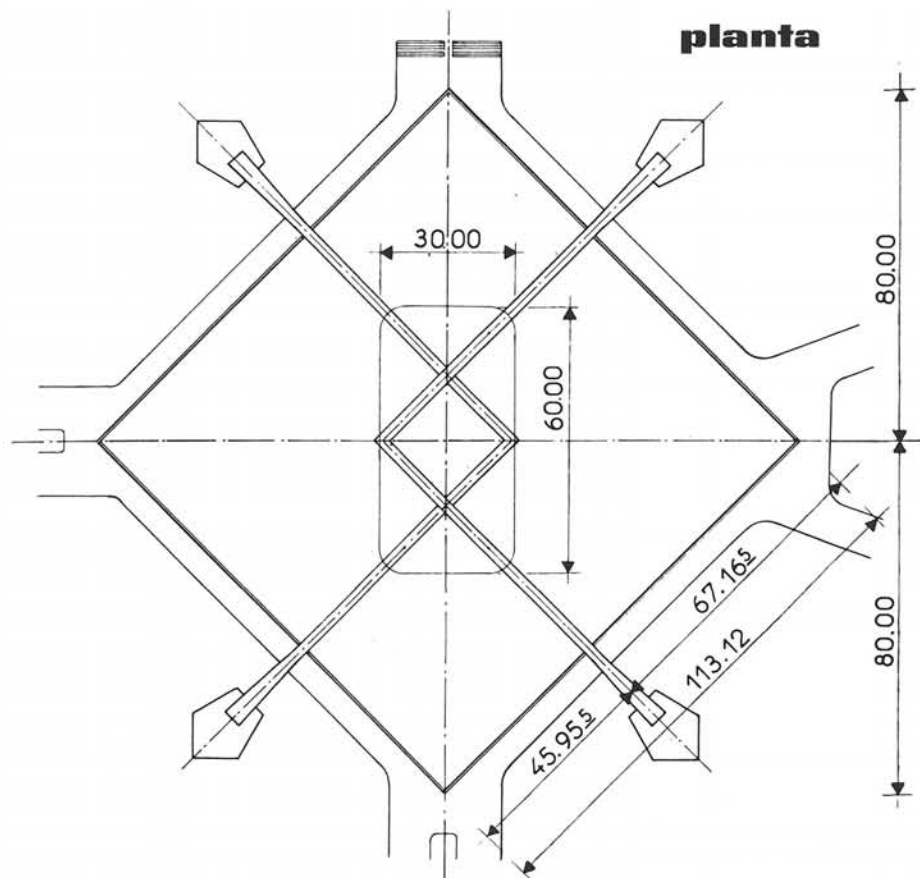
I Proyecto base del concurso

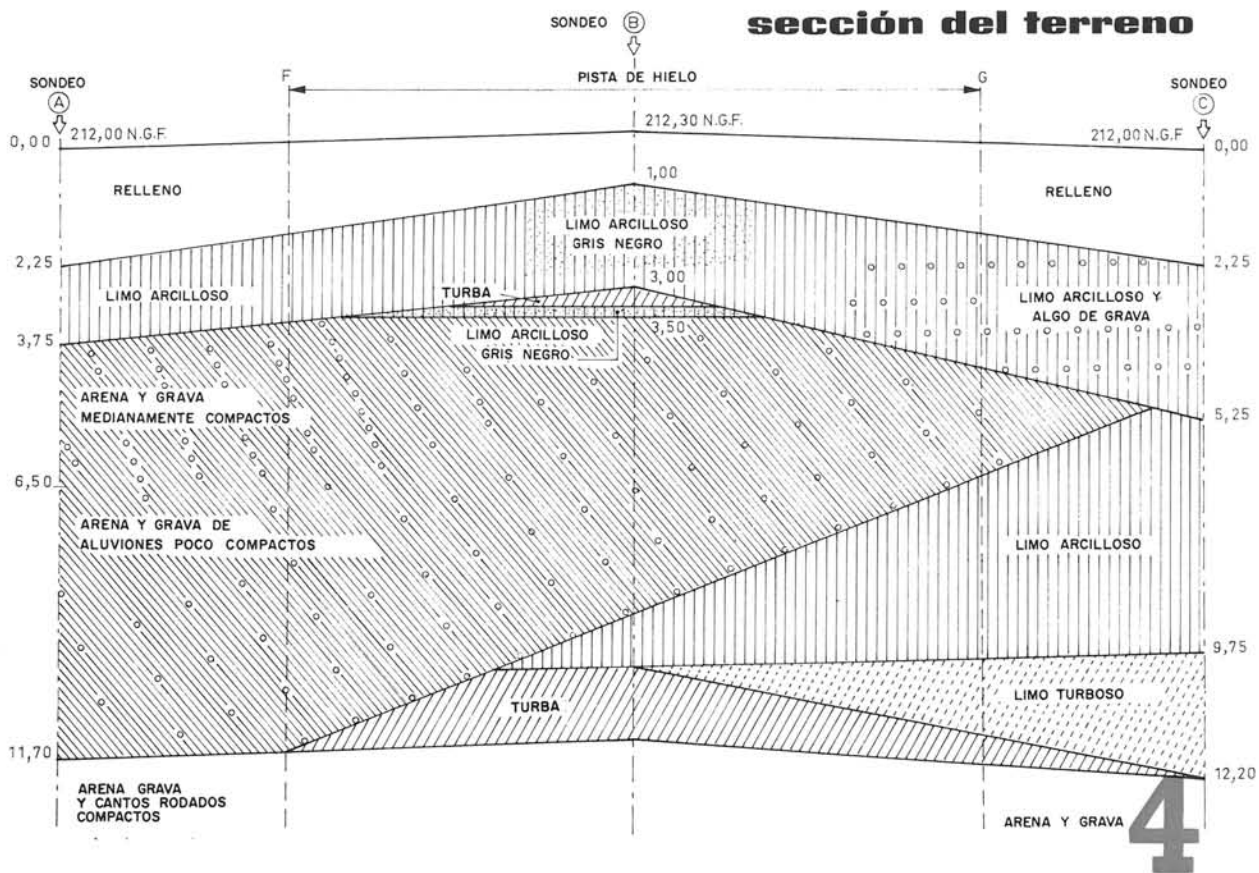
El programa del Estadio, objeto del concurso, comprendía esencialmente:

- la pista olímpica de 60 × 30 m;
- gradas para espectadores;
- hall de acceso a las gradas;
- locales necesarios para explotación;
- instalaciones técnicas.

La forma del Estadio es la de un cuadrado de 113 m de lado (fig. 3). La pista tiene como eje una diagonal del cuadrado base, que ofrece la ventaja de permitir concentrar el máximo de espectadores a una parte y otra de sus grandes flancos.

El cuadro del planning de los trabajos estaba basado sobre un plazo global de ejecución de 19 meses, y el cuaderno de prescripciones de los trabajos, que fijaba como probable comienzo de los trabajos el 11 de octubre de 1965, imponía la terminación para el 31 de mayo de 1967 a lo sumo.



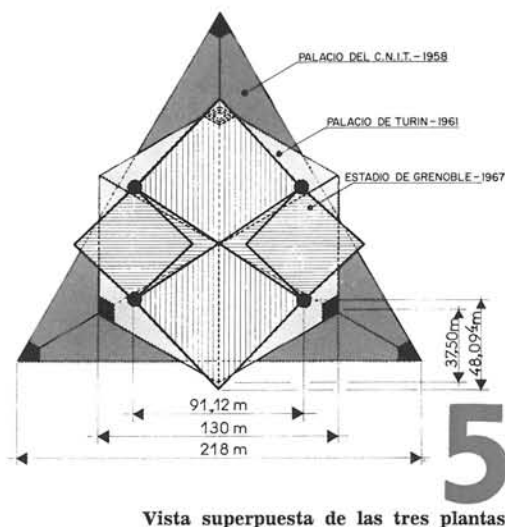


II Elección de la solución

Hemos conservado las disposiciones del conjunto en planta del proyecto de concurso concerniente al suelo, pista, gradas y los cuatro puntos de apoyo de la techumbre, a fin de conferirle un carácter grandioso que se impone para una obra de prestigio destinada a manifestaciones internacionales.

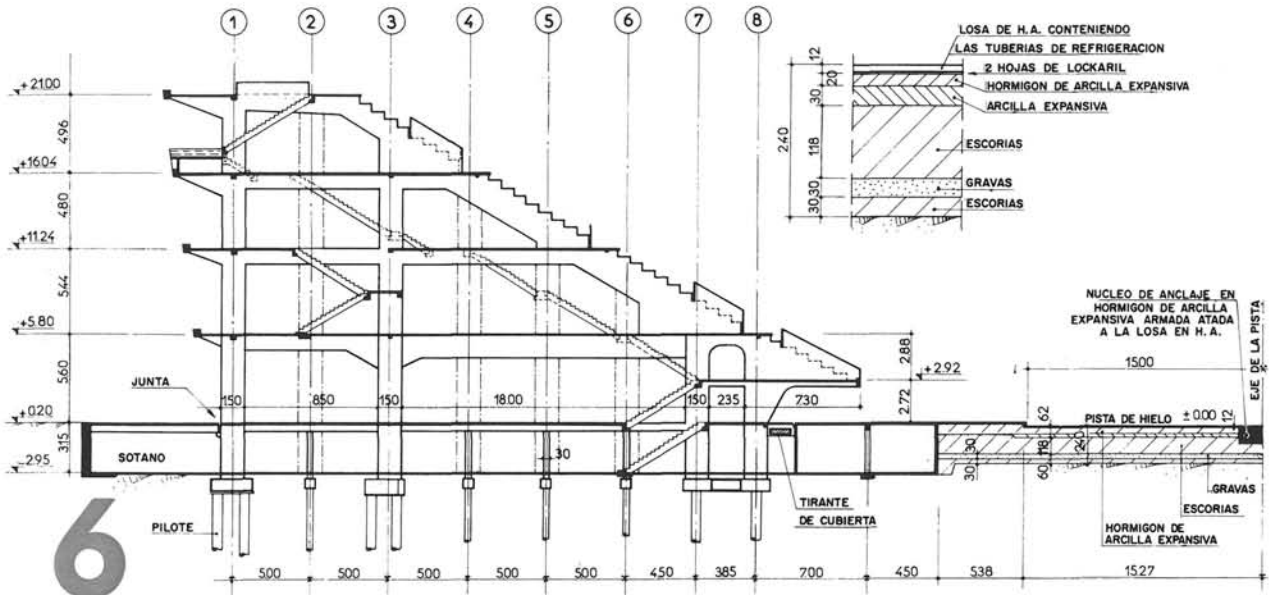
Nos hemos orientado hacia una solución segura, desde todos los puntos de vista —estabilidad, resistencia, ejecución y plazos—, recurriendo a una técnica ya comprobada. Nuestra certeza resultó de la gran experiencia adquirida en los ensayos, estudios y realización del Palacio de Exposiciones del Centro Nacional y de las Industrias y Técnicas (1958), cuya cubierta, de forma y dimensiones excepcionales, conquistó el doble récord mundial: de tener las mayores dimensiones (206 a 238 m) de una estructura abovedada de 6 cm de espesor, y de ser la mayor superficie soportada por puntos de apoyo (7.500 m²) desarrollados (1). Esta experiencia se enriqueció con la techumbre del Palacio de Exposiciones de Turín (1961), de la cual asumimos la concepción y los estudios. De planta hexagonal, se apoya sobre tres puntos, distanciados entre sí 130 m, y los otros tres vértices presentan partes salientes, de 37,5 m, con relación a las líneas que unen los apoyos (2) (fig. 5).

- (1) cf. Palacio del Centro Nacional de Industrias y Técnicas. «Travaux», junio 1959.
cf. CNIT. París. N. Esquillan: «Informes de la Construcción», 96 y 111 (832-6).
- (2) cf. El Palacio de Exposiciones de Turín (Italia), serie «Génie Civil», 1 noviembre 1961.



Vista superpuesta de las tres plantas

sección por el eje de la pista



La cubierta presentada para el Estadio de Deportes tenía esencialmente dos bóvedas cilíndricas cruzadas (figuras 8 y 9) con luces de 95 y 65 m —sólo la mitad de las que hemos citado—, lo cual nos daba tranquilidad absoluta en cuanto a su realización.

Completamente independiente de las fachadas, gradas y otras superestructuras —lo que dejaba libertad para la preparación del volumen cubierto en función de una utilización ulterior lo más racional posible— bien adaptada a su función, esta cubierta conjuntaba la posibilidad de una ejecución rápida y segura, que los hechos han demostrado, con las comodidades de explotación que se derivan de la doble lámina y a una gran seguridad desde todos los puntos de vista.

III

Características técnicas de la obra

Para dejar el máximo de flexibilidad en los estudios y en la ejecución, la gran obra se ha descompuesto en cuatro partes independientes:

- accesos y sótanos;
- superestructuras;
- pista de hielo y su base;
- cubierta y estribos.

El terreno se vio que era particularmente heterogéneo después de los sondeos (fig. 4). El estudio de las curvas de clavado de los pilotes entibados de ensayo demostró que la capa de arena y grava tenía dos zonas de resistencia: una comprendida entre 11 y 15 m, y la otra, más allá de 20 m. Teniendo en cuenta estas condiciones particulares, nos hemos decidido a concebir, para cada una de las partes antedichas de la obra, sistemas diferentes de cimentación.

Además, el nivel real de la capa freática apareció más alto y con posibilidad de crecimiento en ciertos períodos, lo cual decidió a elevar el sótano 2 m, y como consecuencia todas las superestructuras, a fin de evitar la construcción de una entibación estanca y, por tanto, onerosa.

1.º Sótano

Siendo débiles las cargas a transmitir al suelo, constituido por una capa de 15 cm de hormigón armado, está cimentado directamente sobre el terreno con el intermedio de un lecho, de 25 cm de espesor mínimo, de árido.

Sobre el contorno, las paredes verticales de hormigón armado forman muros de contención de tierras que descansan sobre zapatas y soportan el forjado alto del sótano en su periferia. Este forjado está constituido por una losa prefabricada de 4 cm de espesor, armada con un enrejado soldado y con 11 cm de hormigón vertido in situ. La superficie total de forjados, así realizada, alcanza 16.500 m². Las vigas prefabricadas, de 4,5 m de longitud, se apoyan sobre pilares dispuestos según una retícula de 5 × 5 m, que soportan los forjados y las gradas. Estos pilares atraviesan la solera de hormigón y están cimentados sobre 304 pilotes de diámetro variable (50 a 65 cm) según las cargas a transmitir. Compresión media del hormigón: 45 bars; longitudes que varían desde 12,50 hasta 22,50 m, en función del rechazo o rebote durante el clavado.

Habida cuenta de su forma de cimentación heterogénea y existiendo riesgo de provocar asientos diferenciales, el forjado alto del sótano que se apoya sobre los muros periféricos lleva una junta de rotura en el extremo de los pilares de borde cimentados sobre pilotes (fig. 6).

2.º Superestructuras

La estructura de hormigón armado (fig. 6) está constituida por pórticos, espaciados 5 m en el sentido transversal, y cuyo dintel inclinado forma cremallera y soporta las gradas, vigas y forjados. En el otro sentido, el espaciamiento de los pilares es variable a fin de reservar salas que alcancen 15 × 20 m sin apoyos intermedios. Este armazón, bastante complicado, lleva 13 tipos de pórticos diferentes, calculados en el ordenador IBM-7094 sobre programa PROPAC-P-100, con 10 casos de cargas para el primer pórtico y 4 para los siguientes.

Los 5.000 m de gradas han sido prefabricados. Con un peso unitario de 1,3 t y con una longitud de 4,8, su sección es en forma de canal con alas desiguales. Su altura está adaptada según la curva de visibilidad.

Las escaleras, que están constituidas por peldaños y zancas separadas, prefabricadas y ensambladas in situ, dan acceso a los diferentes niveles.

Las fachadas se apoyan sobre una estructura metálica suspendida de las gradas.

El conjunto es completamente independiente de la cubierta.

3.º Pista de hielo

En el anteproyecto inicial, la cimentación de la pista de hielo debía ser realizada con árido de cantera. La elevación de 2 m de todo el conjunto habría conducido a aplicar una sobrecarga suplementaria de 3,6 Mp/m² sobre el suelo. No podría soportar, sin deformación, este aumento de presión como consecuencia de la presencia de camas plásticas y de turba (fig. 4). Utilizando un terraplén de materiales ligeros (escoria-arcilla expandida), se tuvo presente no sobrepasar una carga total de 2,66 Mp/m². Además, se dejó asentar esta cimentación durante todo el tiempo compatible con la fecha de terminación fijada para la pista. Los asentamientos, constantemente vigilados mediante 13 medidas fijas en las camas subyacentes y libres de tuberías hasta el nivel superior del terraplén, han dado una media de 7 cm. Prácticamente, desaparecieron cuando se suprimieron las cargas de los apuntalamientos sobre el terraplén, de tal suerte que el hormigón de arcilla expandida y la losa de pista (fig. 6) se quedaron estables después de su ejecución.

Por otro lado, el gran espesor de esta cimentación y su coeficiente de aislamiento térmico elevado son favorables a una buena explotación; el aislamiento, en lo que concierne al nivel de la capa acuífera, es sobreabundante en relación a las normas corrientemente admitidas.

La losa de hormigón de 12 cm de espesor con doble retícula de armaduras y que constituye tubos de refrigeración, puede dilatarse y contraerse libremente sobre una capa de deslizamiento. Para evitar, sin embargo, su desplazamiento, lleva un punto fijo, en su centro, constituido por un anclaje armado.

esquema de equilibrios bajo el efecto de cargas permanentes

7

4.º Cubierta

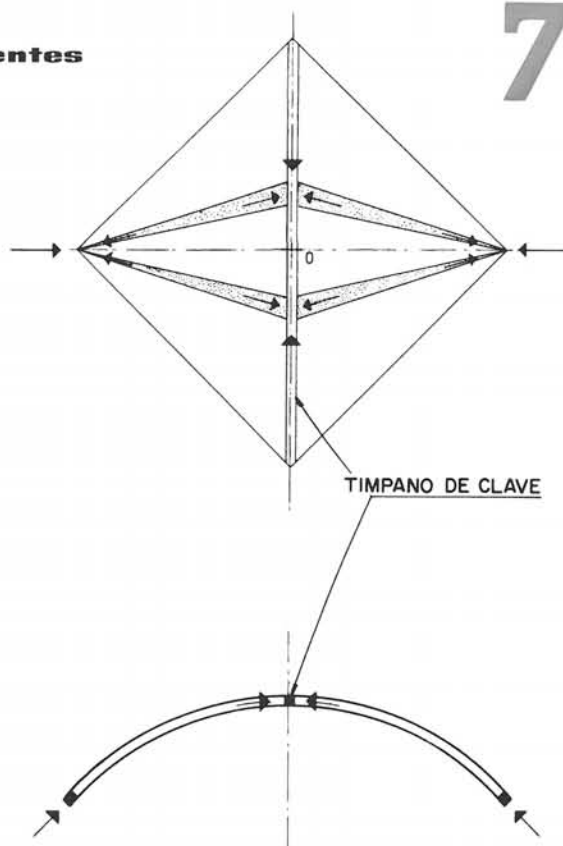
A) Principios y ventajas del tipo de cubierta

La concepción de la cobertura deriva de los principios que hemos expuesto ampliamente para la bóveda del Palacio de CNIT (1). Los resumiremos en estas líneas:

- no disociar la función de la estructura, de la función de cubierta propiamente dicha, es decir, realizar una cubierta autoportante para una utilización juiciosa de la distribución de la materia en el espacio;
- adoptar un momento de inercia elevado para asegurar una gran seguridad a flexión, torsión y pandeo;
- permitir una ejecución por rebanadas sucesivas para la investigación del equilibrio independiente de cada huso elemental.

La estructura en doble lámina de husos radiales a partir de los apoyos, puede así distribuirse en una serie de semiarcos abrazados cuya forma en planta es triangular. Encuentran su equilibrio, en su base sobre estribos y en su vértice en la clave,

(1) cf. «Travaux», junio 1959. Palacio CNIT. Cubierta, por N. Esquillan, págs. 359 a 371.



8



por una parte, sobre el semiarco directamente opuesto, y por otra parte, transversalmente sobre una pieza llamada tímpano de clave, pretensada y capaz de asegurar la transferencia en la mitad de la longitud de la generatriz de la clave de las bóvedas, donde estos esfuerzos engendrados por la carga permanente y la sobrecarga de nieve uniforme preponderantes se equilibran por razón de simetría (fig. 7).

Sin embargo, a diferencia de la bóveda del CNIT, que no lleva consigo apoyos, las bóvedas del Estadio, a imagen de la del Palacio de Turín, pero con un ángulo en planta en el vértice (87° en vez de 120°) y una envergadura más audaz, combinan las acciones de arco y voladizo (fig. 8).

Para una luz de 91,12 m, y por el estudio de esfuerzos críticos de pandeo, se ha considerado que sólo convenía una estructura con dos entramados paralelos, reunidos por almas radiales a partir de los apoyos y de los diafragmas transversales trazados según las generatrices. Por el contrario, para el pandeo local de los forjados no nos ha parecido necesario ondularlos como en el Palacio del CNIT.

Además, esta doble lámina, que lleva paneles aislantes, y sirve de encofrado perdido al entramado superior, asegura un aislamiento térmico notable, con un coeficiente K del orden de 0,86. Suprime también los riesgos de condensación en el intradós del entramado inferior, cualidad capital habida cuenta de las diferencias de temperatura e higrometría que reinarán entre el interior y exterior del edificio.

La compacidad de hormigones de granulometría estudiada, convenientemente vibrados, con gran riqueza de cemento y alisado en la superficie, realiza una buena estanquidad, y la superposición de los dos entramados duplica la seguridad a este respecto.

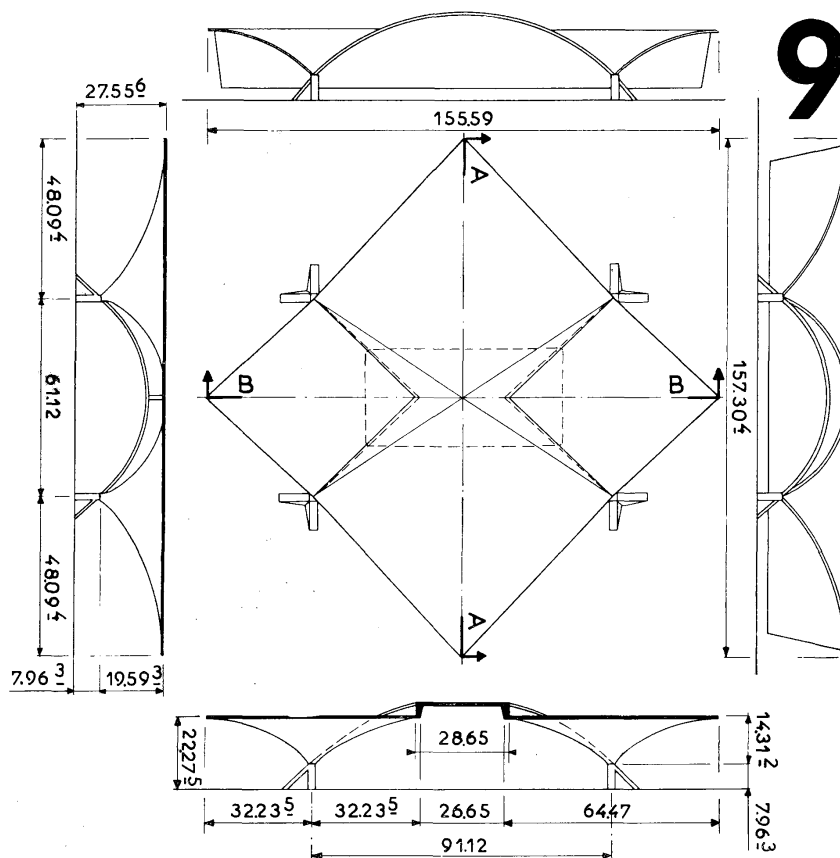
En fin, en lo que concierne a la resistencia al fuego, incluso suponiendo —cosa que parece inimaginable— que la lámina interior sea alcanzada y sufra una pérdida de resistencia, la sola lámina superior protegida por los paneles aislantes sería capaz de evitar el hundimiento de la estructura.

La doble membrana añade a estas ventajas primordiales de calidad y seguridad, facilidades de explotación, por las posibilidades que permite de circulación, instalaciones diversas y enganche fácil de cargas.

B) Descripción y función de los elementos de la estructura

a) Disposiciones de conjunto:

La cubierta se compone de bóvedas cilíndricas constituidas cada una por una doble lámina delgada autoportante con simple curvatura, cruzadas ortogonalmente, con generatrices paralelas a las diagonales del cuadrado de base (figs. 8 y 9). Estas bóvedas descansan sobre 4 estribos



cubierta



10

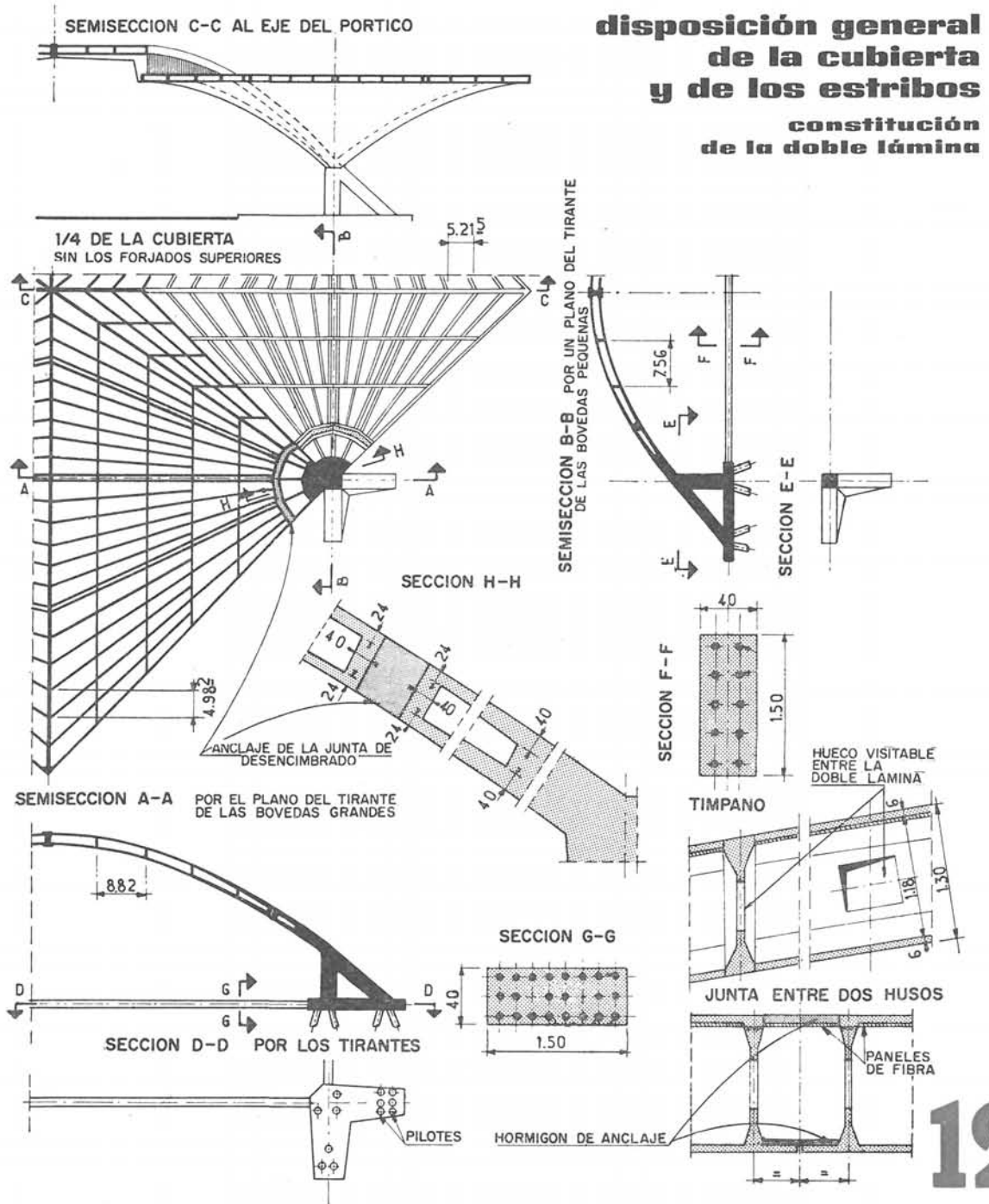
11

dispuestos en los vértices de un rectángulo de $91,12 \times 61,12$, cimentados cada uno sobre un grupo de pilotes. Los esfuerzos de las bóvedas están equilibrados por tirantes que unen dos a dos los puntos de apoyo.

Cada bóveda tiene una anchura que crece linealmente desde el comienzo hasta la clave. Las dos pequeñas bóvedas de 13,662 de flecha teórica, constituidas por partes salientes de 32,235, se equilibran rigurosamente bajo cargas permanentes que se apoyan sólo sobre dos puntos de apoyo. La gran bóveda de 18,943 de flecha teórica, es estable sobre 4 puntos de apoyo, pero lleva partes salientes abovedadas de 48,094 m, vano jamás alcanzado en una estructura de este tipo y de esas dimensiones. La diferencia de flecha entre bóvedas lleva consigo linternas en forma de media luna (figs. 9 y 10) para iluminación y ventilación del interior.

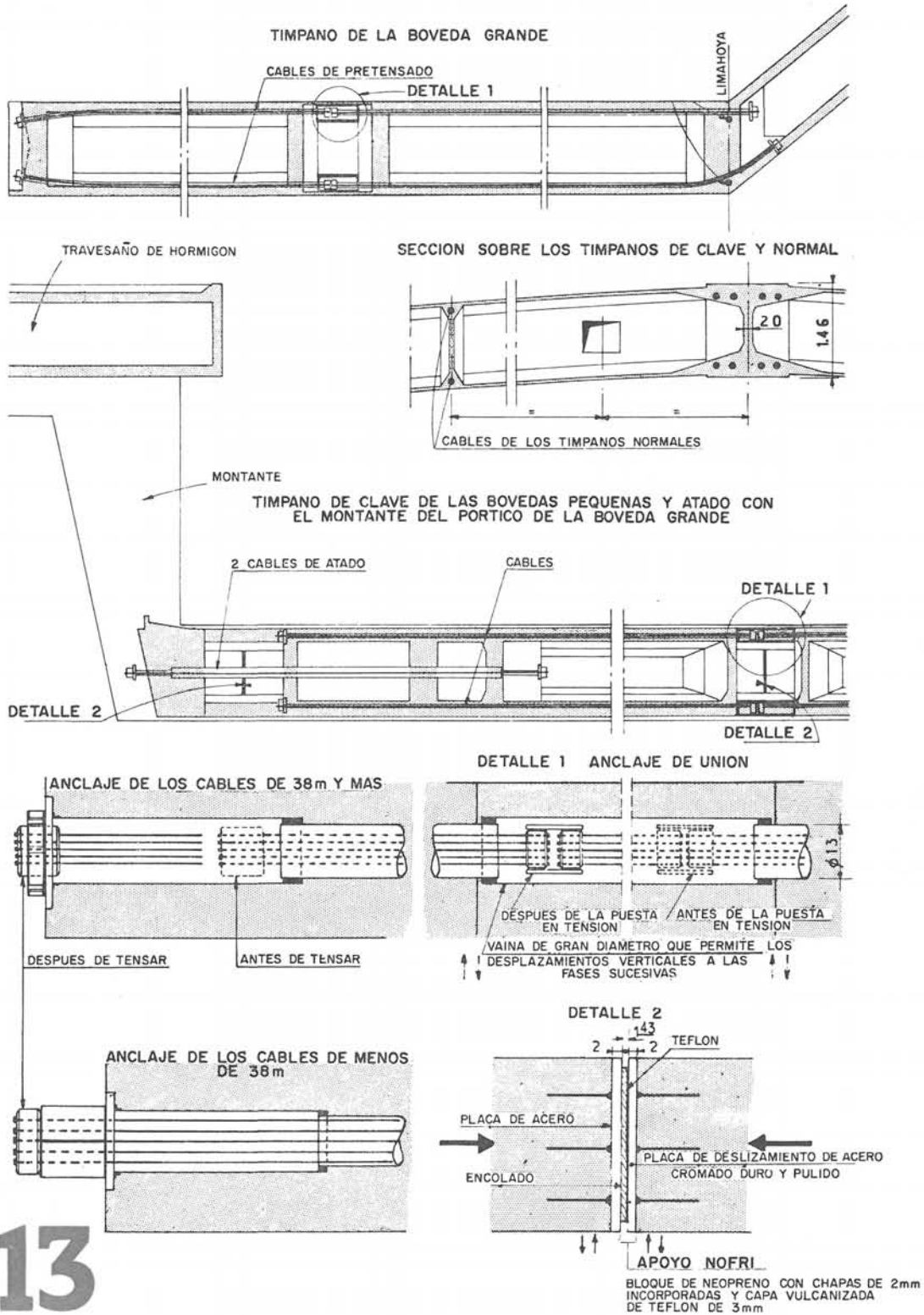


Sobre la mayor parte de su superficie, la gran bóveda tiene sus generatrices paralelas a la línea de apoyos de las bóvedas menores; sin embargo, sobre cuatro triángulos, en el lado de 61,12, estas generatrices son paralelas a las de las bóvedas menores (fig. 9). Este cambio de dirección en ángulo recto forma una hondonada que anima a esta considerable superficie. Las bóvedas sobrepasan las fachadas en una anchura variable, mínima en los estribos, máxima en los ángulos del Estadio (fig. 11). La proyección de la cubierta sobre un plano horizontal da una superficie de 11.922 m².



timpanos tipo y de clave

detalles de juntas provisionales entre tramos, de cables de pretensado y de apoyos deslizantes



13



14

b) Entramados, almas y tímpanos:

La fibra media de las bóvedas, funicular de las cargas permanentes, es una curva algebraica de segundo orden. La sección tiene una altura total de 1,3 m y el espesor de los entramados es de 6 cm sobre la mayor parte de la superficie. El esfuerzo normal creciente y la anchura de la sección decreciente de la clave hacia los arranques obligan a engrosar los entramados, que alcanzan 15 cm en las bóvedas pequeñas y 24 cm para la grande. Las dos láminas o cascarrones están unidas por almas de 7 cm de espesor provistas de huecos (fig. 12). Por razones de ejecución por rebanadas, estas almas están forradas cada 6 husos en la gran bóveda y cada 4 en las pequeñas. Su espaciamiento en la clave es de 4,982 m, entre ejes, en la gran bóveda, y de 5,215, entre ejes, en las bóvedas pequeñas.

La doble lámina lleva tímpanos verticales pretensados de 7 cm de espesor (fig. 13), los cuales reducen la dimensión de las losas en el sentido de las directrices y juegan el papel de tirantes para repartir los esfuerzos concentrados o asimétricos entre las almas. Distan 8,82 m en la gran bóveda y 7,56 m en las pequeñas. Esta estructura así tabicada, a pesar de la finura de las paredes, presenta una resistencia considerable a flexión, a torsión y a las sollicitaciones estáticas y dinámicas en todas direcciones.

Todas las almas y tímpanos llevan aberturas cuadrangulares que aseguran la ventilación y la igualación de temperatura entre las dos láminas y permiten la circulación interior en todos los puntos.

La membrana superior está recubierta, en su intradós, con paneles de fibra de madera comprimida, conglomerada con cemento, de 3,5 cm de espesor, que han servido de encofrado perdido para su hormigonado. La membrana inferior está taladrada con orificios circulares de 8 cm de diámetro cada 1,5 m aproximadamente, dispositivo preconizado y estudiado por el profesor Didier del Conservatorio Nacional de Artes y Oficios para mejorar la acústica de este gran volumen. Para evitar ciertos ecos, este dispositivo se ha completado, encima de la pista, con conos aplastados, en el intradós de la bóveda y recubiertos de fibra de vidrio (fig. 10).

c) Tímpano de clave:

En la clave de las bóvedas y sobre toda la longitud de la generatriz, de 157,304 en la gran bóveda, hay un tímpano muy potente pretensado de 1,46 m de altura y 20 cm de alma (fig. 13). Esta pieza maestra, esencial para la estabilidad, juega un papel primordial. Recibe (fig. 7) las componentes de las fuerzas que provienen de las diferentes fibras de los entramados o de las almas que se apoyan con una oblicuidad creciente sobre este tímpano. El equilibrio de las tracciones debidas a las partes salientes de 48,094 requiere un pretensado de 1.400 toneladas.

La tensión de pretensado correspondiente a los tímpanos de clave de las pequeñas bóvedas es sólo de 780 t. Estos dos tímpanos están unidos entre sí por un pórtico constituido por un montante vertical en cada linterna y por un travesaño en el espesor de la gran bóveda (fig. 9, sección B-B; fig. 12, sección C-C; fig. 13). Este conjunto de 155,59 m de longitud está destinado a asegurar la estabilidad bajo el efecto de las solicitaciones asimétricas que provienen del viento, de la nieve o de otras acciones, que las pequeñas bóvedas solas, en equilibrio, sobre dos puntos, no podrían soportar.

d) Estribos, tirantes y cimientos:

Un elemento fundamental de tal cubierta consiste en sus puntos de apoyo (fig. 14). En lo concerniente a la cota de nivel del anteproyecto inicial, los arranques de las bóvedas están situados 2 m más altos y, al contrario, la cota de los tirantes está bajada 2,7 m. Se hallan así dispuestos bajo el entramado de techo del sótano, de lo que resultan ventajas considerables para la utilización del Estadio en otros fines que de los espectáculos de patinaje artístico o de hockey.

Los cuatro estribos de 8 m de altura aproximadamente, mucho más cortos que los del anteproyecto (figuras 3 y 9), no restan terreno al vecindario del Estadio. Están constituidos por un pilar vertical y dos horquillas situadas en el plano vertical del alma central de las bóvedas e inclinados sensiblemente según la tangente al arranque de la fibra media de dicha alma (fig. 12). Por razones de estética, una lámina reúne cada horquilla al pilar. Un cubeta de recepción de aguas pluviales está preparada en el extremo superior del estribo.

La zapata de cimientos de 1,2 m de espesor, en forma de escuadra, en planta, asegura el encaje de las cabezas de los pilotes y la transmisión de las reacciones a los diferentes elementos del estribo. Los doce pilotes en pozos de 98 cm de diámetro, de 26 m de longitud y 400 t, se reparten bajo el montante y las horquillas o patas del trípode en función de los esfuerzos. Todos estos pilotes están inclinados un 20 % respecto de la vertical, en diversas direcciones, a fin de soportar una parte de las componentes horizontales, durante las fases de construcción, y el efecto de las sobrecargas, una vez terminada la obra.

Bajo cargas permanentes, los empujes de las bóvedas son equilibrados por tirantes, uniendo, dos a dos, los puntos de apoyo según los lados del rectángulo de 91×61 m. Cada uno de los tirantes de la gran bóveda está constituido por 620 alambres de 7 mm repartidos en 22 cordones BBR-Boussiron, contenidos en tubos rectilíneos de acero con una sección de hormigón de 150×40 (fig. 12) y soporta una tracción de 2.009 t. Los de las bóvedas menores equilibran, cada uno, 748 t mediante 10 cordones BBR-B de 30 alambres de 7 milímetros.

Bajo las sobrecargas los empujes son equilibrados, en parte por los tirantes y en parte por los pilotes de cimentación, según las rigideces relativas de estos dos elementos estructurales.

IV

Indicaciones concernientes a cálculos de resistencia y estabilidad

1.º Bases de cálculo

A) Cargas y sobrecargas

La cubierta está calculada para:

- Una sobrecarga de explotación de 15,30 kp/m² dispuesta de la manera más desfavorable.
- Una sobrecarga de 25,51 kp/m² no acumulable con la precedente y aplicada sobre un rectángulo de 25 × 40 m centrado sobre los puntos de encuentro de los ejes generales.

- c) Una sobrecarga de nieve normal de 57,55 kilopondios/m². Una sobrecarga de nieve extrema de 94,18 kp/m².
- d) Presiones de viento correspondiendo a una presión dinámica de base normal de 71,42 kilopondios/m² y extrema de 125 kp/m².

El punto más alto de la gran bóveda está a 29 m sobre el suelo con presiones de:

- normal: 94,28 kp/m²;
- extrema: 165 kp/m².

Para determinar los esfuerzos del viento sobre la cubierta, se han considerado tres estados:

- todas las fachadas realizadas y el edificio «cerrado»;
- una o dos fachadas no están aún ejecutadas o son destruidas;
- ninguna fachada existe y la bóveda está «aislada».

En el caso de que la nieve y el viento estén combinados, los salientes de las grandes y pequeñas bóvedas se proyectan según triángulos isósceles que se han sobrecargado aisladamente a

$$\frac{56,4}{2} = 28,77 \text{ kp/m}^2$$

en sobrecarga normal y

$$\frac{92,3}{2} = 47,14 \text{ kp/m}^2$$

en sobrecarga extrema. También hemos considerado que el desenganche de la linterna crearía acumulaciones sobre los salientes de las bóvedas menores. Se ha supuesto que la sobrecarga de nieve de uno de los triángulos isósceles se encuentra concentrada contra la pared vertical de la linterna, formando dos pirámides cuyos triángulos rectángulos de base abrazados sobre el eje tienen una altura de 2,45 m. El momento flector que resulta aquí vale 2,2 veces el momento correspondiente al del caso de semicarga uniforme.

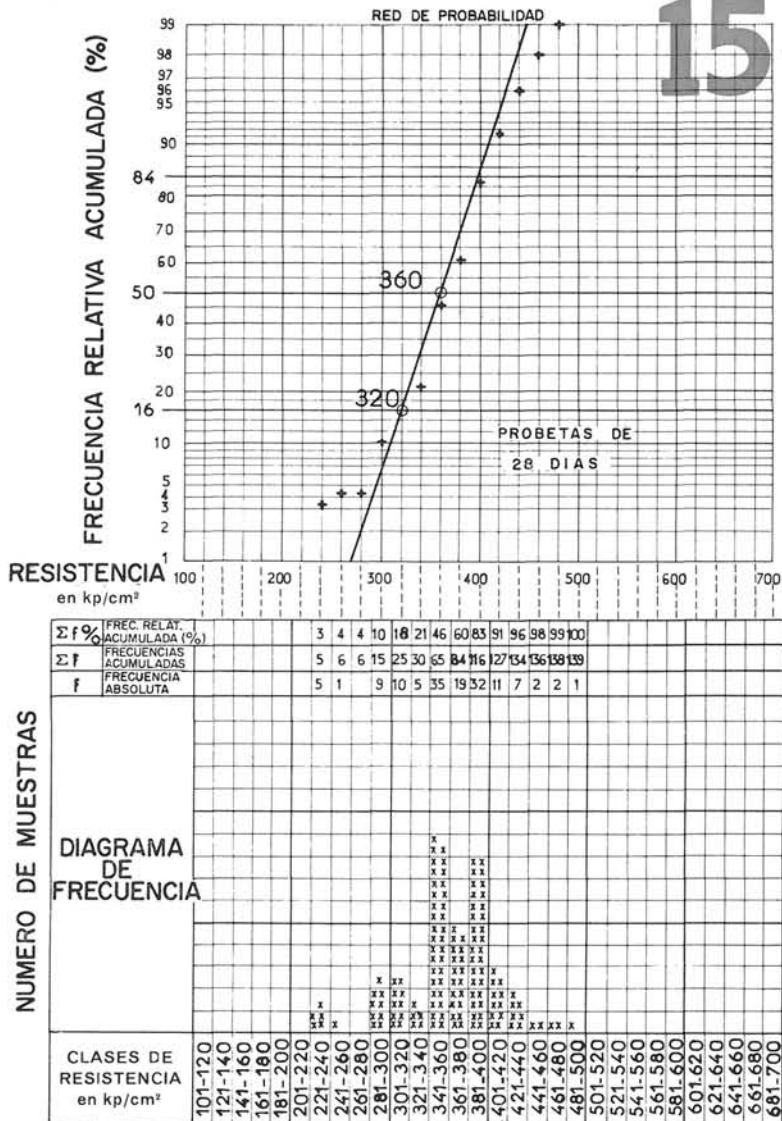
- e) Variaciones lineales

Temperatura: $\pm 2 \times 10^{-4}$.

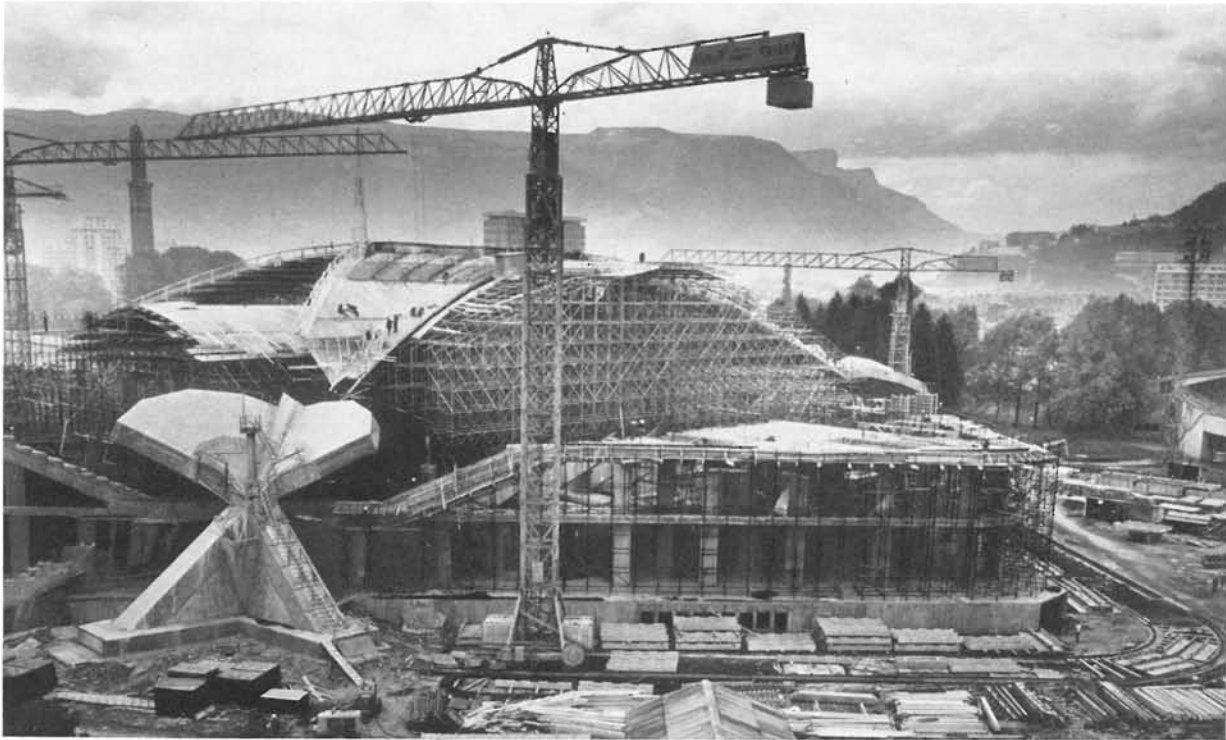
Contracción: -2×10^{-4} .

Fluencia: -2×10^{-4} .

recuento estadístico de probetas



15



16

f) Efecto de las impresiones eventuales de trazado o de espesor.

Los cálculos tienen en cuenta:

- desviaciones de 5 cm de la fibra media teórica considerada de la forma más favorable, tal que, por ejemplo, la clave quede en su cota y los dos riñones bajan de esta cantidad;
- error de 5 mm en el espesor de cada lámina de 6 cm, equivalente a 25 kp/m², repartidos de la forma más desfavorable.



17

B) Características mecánicas de los materiales. Esfuerzos.

a) Aceros

El esfuerzo máximo final de los aceros de los tirantes bajo el efecto de las cargas permanentes, sobrecargas y otras acciones, es de 85,8 bars para los grandes tirantes y de 64,8 bars para los pequeños.

b) Hormigón

Composición del hormigón de la cubierta:

- 375 kg de cemento Portland artificial 325 Vicat;
- 1.320 kg de grava del Drac 6/20;
- 575 kg de arena del Drac 0/6;
- 139 litros de agua;
- 0,5 % del peso del cemento de Plastocrete.

	CARACTERÍSTICAS CUANTITATIVAS			ESFUERZOS ADMISIBLES	
	Límite de elasticidad	Resistencia a tracción	Alargamiento de rotura	2/3 de límite elástico	
Barras de alta adherencia	$\varnothing > 20$	40	46	14 %	26,6 hbar
	$\varnothing \leq 20$	42	48,5	14 %	28 hbar
Alambres redondos lisos de los grandes tirantes (laminado-templado-estirado)	$\varnothing 7$	148	131	4,5 %	87,3 hbar
Alambres redondos lisos para tímpanos y pequeños tirantes (revenido-trefilado-patentado)	$\varnothing 7$	170	149	4 %	140 hbar a la puesta en tensión para los tímpanos

El gráfico (fig. 15) muestra el recuento de 139 probetas cilíndricas 16 x 32 ensayadas a compresión a los 28 días. La desviación cuadrática es de 40 bars; la resistencia que ha servido de base para la determinación de esfuerzos admisibles es de:

$$360 - 0,8 \times 40 = 328 \text{ bars,}$$

lo que autorizaba en compresión simple 98,4 bars y en flexión simple 196,8 bars.

Los esfuerzos de compresión de cálculo en obra son:

		en fibra media	en fibras extremas
Gran bóveda	{ arranque	65 bars	160 bars
	{ clave	15 bars	20 bars
Pequeñas bóvedas	{ arranque	40 bars	155 bars
	{ clave	10 bars	15 bars

V

Ejecución

Siendo corto el plazo de ejecución, hemos procedido a una programación minuciosa encaminada a encontrar la combinación óptima de las fases de construcción, que ha resultado ser la siguiente:

- 1) Accesos y sótano.
- 2) Pista de hielo.
- 3) Forjados y graderío.
- 4) Bóvedas de cubierta.
(Con algunas imbricaciones parciales.)

Describiremos solamente la ejecución de la bóveda.

1.º Apuntalamientos. Encofrado y hormigonado

La bóveda ha sido ejecutada, por sectores triangulares, sobre andamios tubulares fijos (fig. 16). En cada sector se vertía sucesivamente el entramado inferior, después las almas y tímpanos y, finalmente, el entramado superior. Los tubos verticales del andamiaje soportaban tablones por medio de ganchos regulables. Listones cimbrados según la curvatura de la bóveda y clavados sobre estos tablones servían de apoyo al encofrado, de contrachapado de 10 mm, sobre el que se vertía el entramado inferior.

En las almas verticales se habían previsto muescas en las que se insertaban viguetas metálicas regulables que soportaban planchas sobre las que iban los paneles de fibra de madera, aglomerada con cemento de 35 mm de espesor. Estos paneles servían de encofrado al entramado superior y de aislamiento térmico.

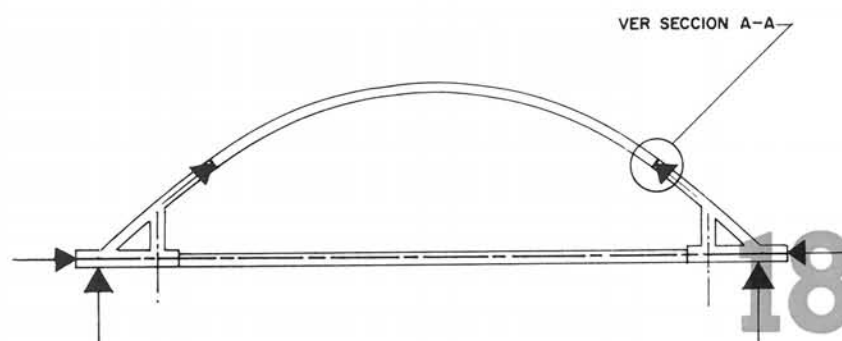
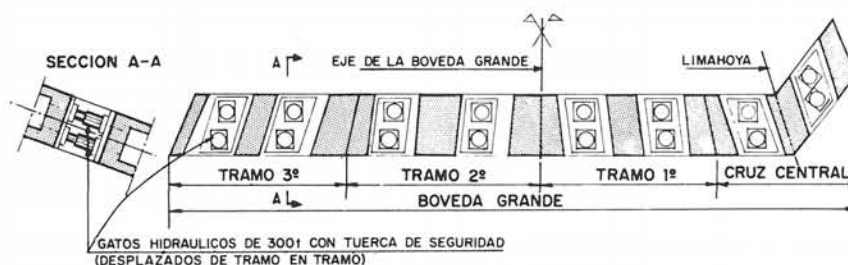
El problema más delicado a resolver fue el hormigonado de las paredes delgadas de 6 a 7 cm de espesor en pleno invierno. Recurrimos a los medios clásicos: limpieza de encofrados y armaduras por raspadura y caldeo, a fin de quitar la escarcha, la nieve o el hielo; protección de las partes así limpiadas con lonas de plástico; calentamiento del agua y de los áridos para que el hormigón tenga 25°C en su puesta en obra; creación de recintos a base de lonas de plástico en los cuales se inyectaba vapor durante 3 ó 5 días (figura 17).

principios del pretensado y disposición de gatos

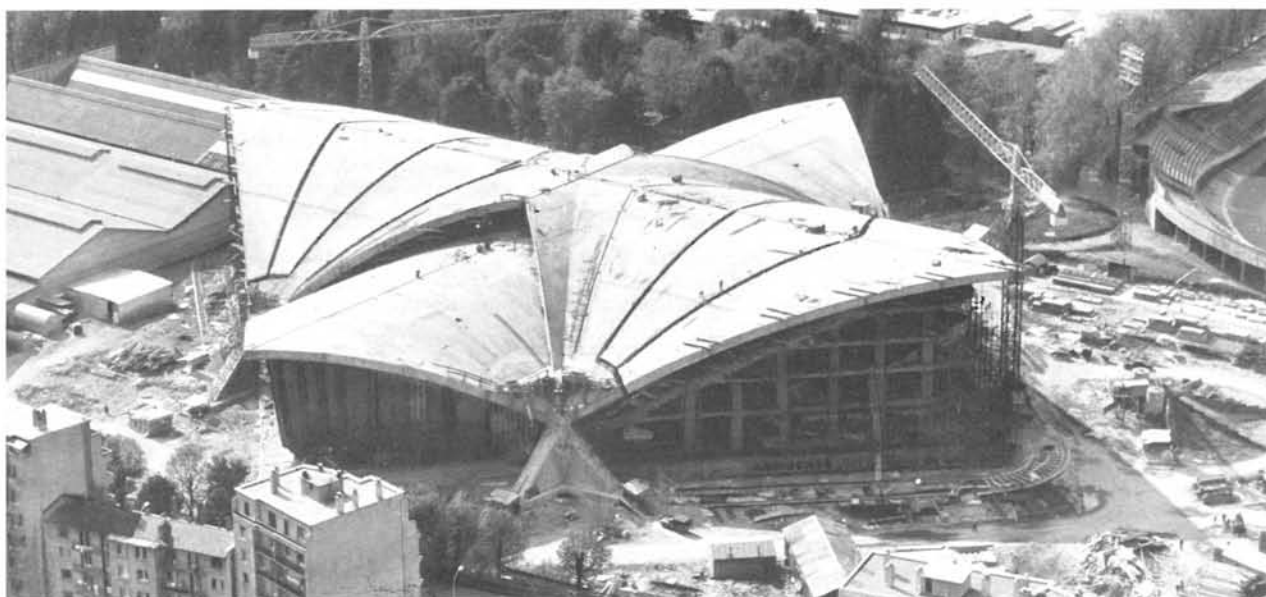
2.º Técnicas de ejecución a partir de las hipótesis de cálculo

Los cálculos suponían un reglaje de las bóvedas en función de las deformaciones diferidas. La técnica del descimbramiento por gatos hidráulicos introducidos en las muescas permite alcanzar ese fin. A veces, por la presencia del tímpano de clave —que habría creado nuevas dificultades si se hubiera desdoblado— y la longitud considerable de la generatriz en la clave, no es fácil operar como en un descimbramiento clásico de arco con una sola junta en la clave. Se ha operado como en las bóvedas del Palacio del CNIT, en París, y del Palacio de Exposiciones de Turín previendo, cada 5 m de vertido, juntas de descimbramiento (figs. 12 y 18). Para tener la seguridad de que las fuerzas se repartieran bien, según los husos triangulares y de acuerdo con la estructura proyectada (fig. 7), y de que los acortamientos de fibras de diferente longitud no introdujeran perturbaciones, era necesario realizar la bóveda por sectores triangulares separados por juntas (fig. 19). Por otro lado, estas juntas delimitan sectores y permiten así una ejecución por fases sucesivas, lo que conduce a una notable economía de andamiaje y encofrado. Desgraciadamente, el comienzo de los trabajos se retrasó cuatro meses y, por tanto, el programa de avance fue modificado y no nos pudimos beneficiar de aquella posibilidad.

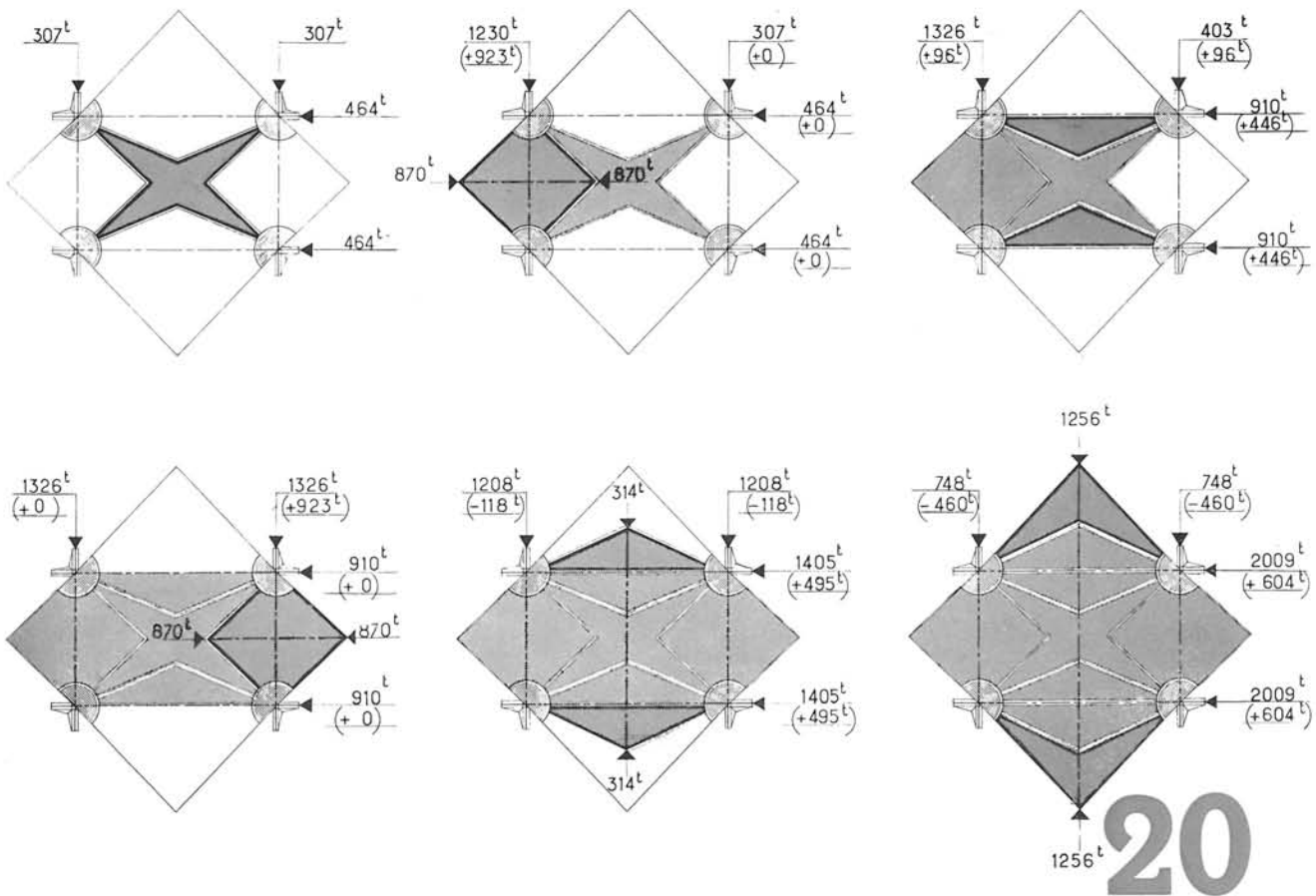
Para realizar la pista de hielo, cuya terminación estaba imperativamente fijada para el 9 de abril de 1967, a fin de permitir la ejecución simultánea de los pórticos y gradas, y por razones de estabilidad, convenía comenzar por la parte central. Las juntas más cercanas al centro de la gran bóveda forman una cruz de San Andrés, que se equilibra sobre los cuatro estribos. Los tramos siguientes (fig. 20) están apoyados sobre los estribos y han de encontrar una reacción, tracción o compresión, según los casos, en los tímpanos de clave; de ahí, la importancia de la «cruz central».



19



fases de ejecución



El descimbrado se efectúa por pares de rebanadas, simétricas con respecto al centro de la pista. Para ganar tiempo, cada una de las pequeñas bóvedas se ejecutó en toda su superficie y las cuatro rebanadas se han descimbrado simultáneamente.

La figura 21 representa un diagrama de descimbrado con compensación, correspondiente a la tercera fase de descimbrado. Al principio, las reacciones elásticas de las cimbras comienzan a hacer subir la bóveda, que sin esto quedaría al mismo nivel, exceptuando la corrección debida a una subida duramente geométrica correspondiente a la abertura de dos juntas de descimbrado, en tanto que el acortamiento elástico total bajo el efecto de las cargas permanentes en obra no se haya alcanzado. La compensación se efectúa después de esta primera fase de las operaciones de descimbrado.

A fin de asegurar, a través de las secciones, la transmisión de las reacciones horizontales calculadas en los tímpanos de clave, permitiendo movimientos verticales entre dos rebanadas sucesivas, se adoptaron dispositivos especiales. Las juntas se dotaron de apoyos NOFRI (fig. 13, detalle 2). Los cables de pretensado se colocaron en las fundas de 13 cm de diámetro para dejar libertad de desplazamiento en un plano vertical. Los cables eran unidos a medida que se realizaban las sucesivas rebanadas (fig. 13, detalle 1).

Todas las fuerzas y deformaciones se medían en un delicado aparato. Los desplazamientos de los estribos en dos direcciones perpendiculares, según los ejes de los tirantes y sus rotaciones, han obligado a observar una cuidadosa vigilancia.

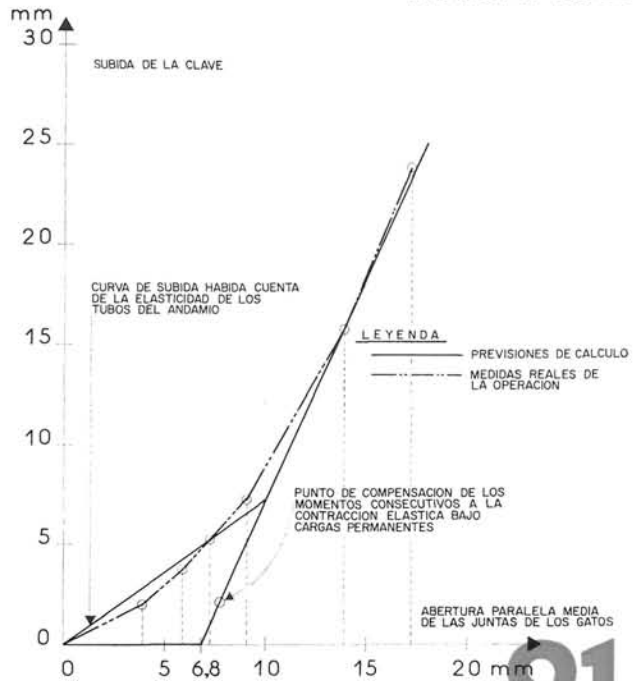
Los movimientos relativos de dos rebanadas sucesivas se observaban durante el tiempo necesario para la obtención de un descalce en altura entre los dos bordes de la junta, que podía entonces fijarse según un proceso definido. La correspondencia de las fuerzas introducidas en las juntas de descimbrado con las

que se aplican a los tirantes, a fin de conservar siempre la estabilidad de los estribos y pilotes (figura 22) en el curso de una operación de descimbrado y a lo largo de las fases sucesivas de ejecución de la bóveda, ha requerido un estudio profundo y observaciones muy precisas durante la ejecución. Cada descimbrado se efectuaba en varias etapas y cada una de éstas comportaba dos operaciones sucesivas: primeramente, una puesta en tensión de los cables de tirante (en general, uno por tirante); a continuación, la abertura de los descimbrados.

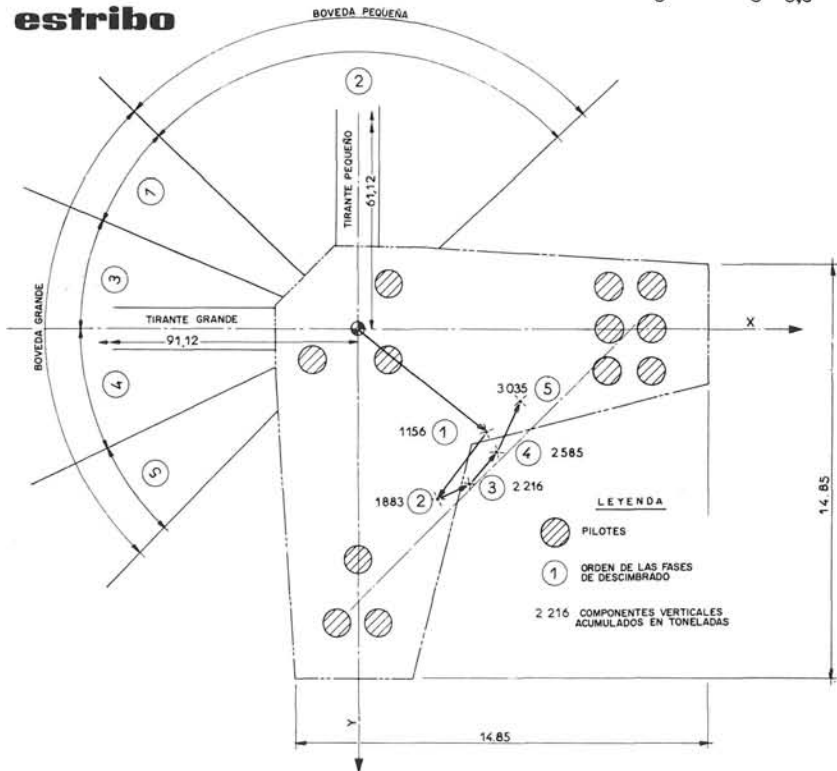
Para los husos, en relación al plano vertical que pasa por los apoyos, los cables de pretensado del tímpano de clave se pusieron en tensión antes del comienzo del descimbrado correspondiente. La figura 20 da las fases sucesivas de los descimbrados:

- A) Gran bóveda: Cruz central, 23 diciembre 1966
- B) Pequeña bóveda: Sur, 2 febrero 1967
- C) Gran bóveda: 2.º sector, 14 febrero 1967
- D) Pequeña bóveda: Norte, 22 febrero 1967
- E) Gran bóveda: 3.º sector, 31 mayo 1967
- F) Gran bóveda: 4.º sector, 28 abril 1967

diagrama de descimbrado tercera fase



estribo



COMPONENTES HORIZONTALES

FASES DE DESCIMBRAMIENTO	TIRANTE GRANDE		TIRANTE PEQUEÑO	
	PARCIAL	ACUMULADO	PARCIAL	ACUMULADO
①	464	464	307	307
②	0	464	923	1230
③	446	910	96	1326
④	495	1405	-118	1208
⑤	604	2009	-460	748

22

y para cada fase de descimbrado, las fuerzas aplicadas en los cables de los tirantes, así como las fuerzas previas introducidas en los cables de los tímpanos de clave.

A lo largo de la segunda fase de descimbrado, la mayor parte de la componente horizontal (fig. 22) de la reacción del apoyo era equilibrada por pequeños tirantes, y el esfuerzo de los aceros alcanzaba 115 hbar. Por eso ha sido preciso prever [ver pág. 78, B), a)] acero 170/149; dicho esfuerzo era aflojado en las siguientes fases.

Después de los descimbrados se han seguido observando las deformaciones (figura 23) para asegurarse de que el comportamiento de las bóvedas era normal y conforme a las previsiones de cálculo. A lo largo de los primeros meses, la marcha de la curva de descenso de la clave fue semejante a la comprobada en el Palacio de Exposiciones del CNIT (fig. 24). Como

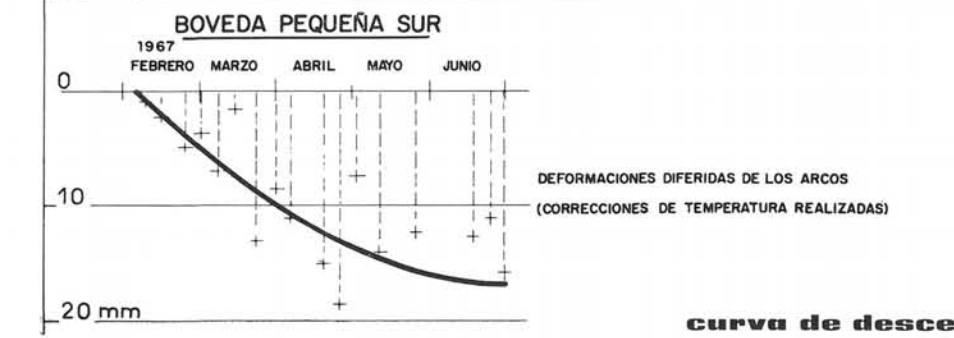
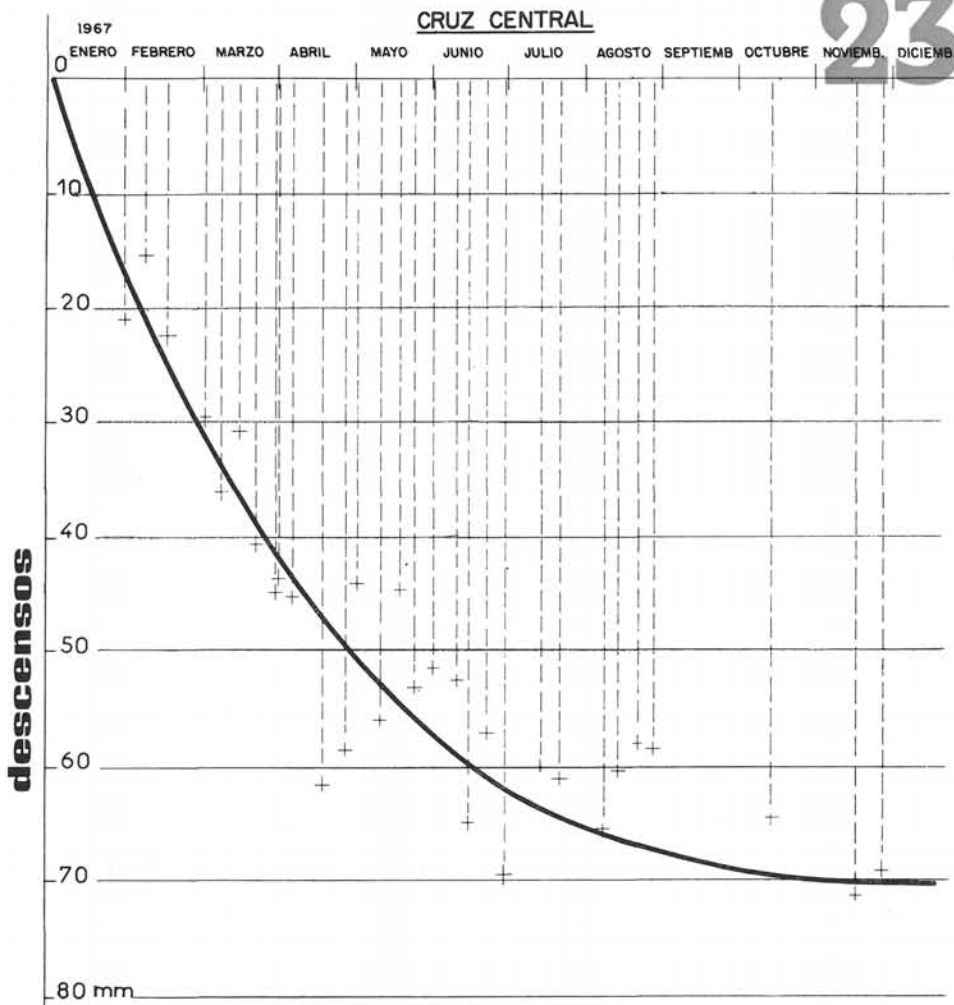
21

curvas de descensos de la clave

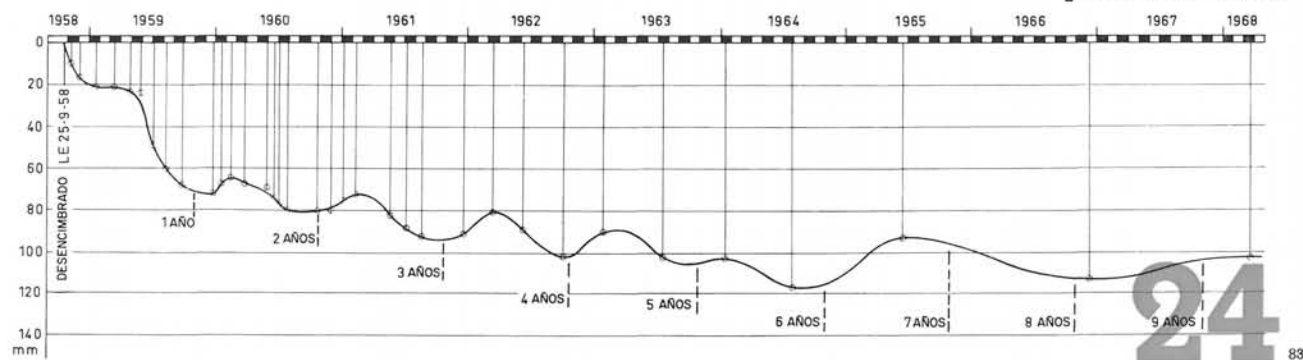
en esta obra, las observaciones y medidas se siguieron tomando hasta la estabilización total de la fluencia y la retracción.

Por el hecho de que la estructura fuera de bóvedas cruzadas y superpuestas y de que tuviera esa forma de equilibrio, el estudio de las citadas deformaciones resultaba todavía más necesario que en el Palacio de CNIT. Era la base misma de una decisión capital concerniente al tipo de unión de los dos montantes que unen la gran bóveda con las pequeñas, unión indispensable para la estabilidad de estas últimas (figura 25).

La variación de altura del hueco de la linterna resultante de las diferencias de deformación entre la gran bóveda y la pequeña, podía, si estas bóvedas estaban unidas de manera rígida, introducir esfuerzos molestos en la estructura. Ante la incertidumbre de su comportamiento real in situ se previó un dispositivo de cables pretensados (figura 13), los cuales estaban bañados en una grasa especial neutra para protegerlos, y quedaban libres en una longitud de 5 m. Así podían soportar, sin esfuerzos apreciables de flexión, los desplazamientos relati-



curva de descenso de la clave del palacio CNIT

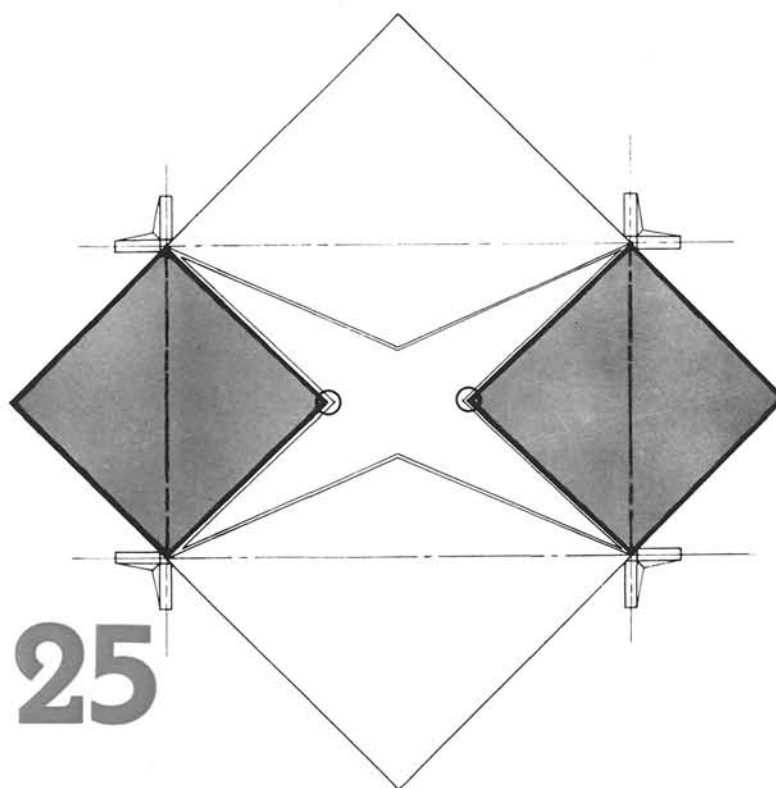
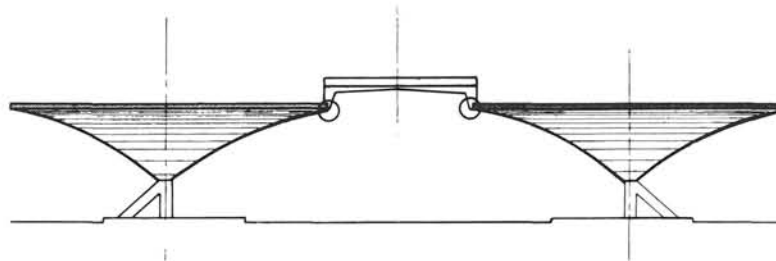


vos de 3 ó 4 cm de sus extremidades.

Apoyos NOFRI aseguraban la transmisión de la fuerza de pretensado de los cables, según su eje, sin oponerse a los movimientos relativos verticales de las dos bóvedas. A pesar de ello, se dispusieron elementos de hormigón armado, a una parte y otra de los cables, a fin de conseguir una perfecta unión de hormigón armado en el caso de que se observara que las precauciones precedentes no fueran del todo indispensables.

Después de un período bastante largo de observación, pareció que incluso las variaciones de temperatura importantes no conducirían a desplazamientos diferenciales admisibles. Se realizaron un casquillo provisional de un montante y de una pequeña bóveda. Después de un nuevo período de observación sin que apareciera ningún desorden, se hormigonaron las zonas con armaduras de adherencia mejorada, realizándose así la continuidad: tímpano de clave de las pequeñas bóvedas—montantes—travesero de la gran bóveda. Tanto este conjunto como las láminas vecinas parecen comportarse bien, con lo que la seguridad de las pequeñas bóvedas al basculamiento se halla acrecentada.

principios de estabilidad de las bóvedas pequeñas



3.º Fases de ejecución

El respetar los plazos de ejecución era particularmente difícil por la complejidad e importancia de la obra. El programa detallado de ejecución, establecido con gran rigor, fue constantemente analizado por el método del camino crítico y adaptado cada vez que era necesario. Las principales etapas fueron:

Fin de enero	1966	Principios de trabajos.
Febrero-marzo	1966	Pilotes de cimentación.
Abril-julio	1966	Suelo y cimientos de la pista.
Agosto	1966	Principio del montaje de andamios de la cubierta.
Noviembre	1966	Principio de construcción de bóvedas.
Abril	1967	Fin de las bóvedas.
Julio	1967	Fin de los trabajos grandes.
Principios de octubre	1967	Primera manifestación pública.



26

VI Comparaciones

La figura 5 indica la superposición del Palacio del CNIT, del Palacio de Turín y del Estadio con sus dimensiones esenciales. Las superficies cubiertas en planta y las cantidades de hormigón por metro cuadrado son:

Palacio CNIT	20.400 m ²	0,277 m ³
Palacio Turín	14.600 m ²	0,225 m ³
Estadio Grenoble	11.920 m ²	0,282 m ³

27



Las láminas de doble curvatura, sobre planta rectangular de 101,5 m de luz, del hangar de Marignane (*), exigieron sólo 0,187 m³/m². En las tres construcciones de doble lámina con generatriz larga de clave, las razones del aumento de hormigón son: concentración de fuerzas en un

(*) El hangar de dos naves de 101,5 m de luz del Aeropuerto de Marignane. N. Esquillan. Annales ITBTP, número 57.

ángulo de 60° a 90° a los estribos, presencia de dos entramados y almas radiales hacia los arranques.

Cuando una doble lámina no es útil para explotación y la construcción se hace sobre planta rectangular resulta interesante, desde el punto de vista de cantidad de materiales y de simplicidad de ejecución, recurrir, para grandes dimensiones, a cubiertas onduladas o plegadas y al hormigonado in situ, o, a elementos prefabricados. La altura de la onda y, por tanto, el momento de inercia, deben ser determinados a fin de que la resistencia a los momentos flectores y la estabilidad a pandeo estén asegurados.

Desde el punto de vista de la rapidez de construcción, la inmensa cubierta no desmerece en nada de sus precedentes del CNIT y de Turín: no está de más el subrayar que se ejecutó en 6 meses, de noviembre a abril de 1967, a pesar de la intemperie y del frío. Por sus dimensiones y por su osadía, perdurará como la obra más interesante e impresionante realizada con ocasión de los X Juegos Olímpicos de Invierno de 1968 (figs. 26 y 27).

résumé ● summary ● zusammenfassung

Le stade olympique de glace de Grenoble

N. Esquillan, ingénieur

Cet article décrit principalement les parties de la structure du stade, en ce qui concerne les fondations et, en particulier, la conception et l'exécution de l'immense couverture en béton armé qui abrite la piste de glace.

Olympic Stadium for Ice Sports, at Grenoble, France

N. Esquillan, engineer

This article describes mainly the structural aspects of the stadium, including the foundations, and the large roof. Construction and finishing details are also given.

Olympisches Eisstadion in Grenoble

N. Esquillan, ingenieur

In diesem Aufsatz werden hauptsächlich die Tragkonstruktionsteile —ihrer Beziehung zum Fundament, zur grossen Überdachung und zu den sonstigen Einzelheiten Rechnung tragend— beschrieben.