

Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 27-29 enero 2005, ed. S. Huerta, Madrid: I. Juan de Herrera, SEDHC, Arquitectos de Cádiz, COAAT Cádiz, 2005.

Torroja y las láminas de hormigón en la posguerra española: el gimnasio-piscina de la Escuela Naval de Marín

Francisco Jaureguizar, Juan P. Valcárcel

El recinto militar de la Escuela Naval de Marín alberga numerosos edificios de tamaños, funciones y estilos diversos, que sirven a las distintas instalaciones militares. Gran parte de estos edificios se construyó en las décadas de 1930 y 1940. El edificio del gimnasio-piscina data del año 1942. Su estructura fue proyectada y calculada por Eduardo Torroja (1899–1961) y permanecía, hasta ahora, prácticamente inédita.¹ En este artículo se realiza un estudio de su diseño y cálculo, y se analiza su importancia en el marco de las circunstancias de la construcción de su época y en el de la obra de Torroja. Los méritos de esta estructura son varios: el gran prestigio de su autor, el hecho de emplear una solución poco habitual en España en la fecha de su construcción, y su excelente estado de conservación, transcurridos dos tercios de siglo desde su finalización. Todas ellas constituyen razones suficientes para su consideración y estudio.

Se trata de un raro ejemplar, pues es una de las pocas cubiertas de hormigón de gran porte realizadas en España durante los años cuarenta, y la primera de Torroja tras la guerra civil. Pero en esta ocasión la estructura de Torroja no alcanza la pureza formal de sus obras anteriores. Y al contrario de lo que venía siendo habitual en él, aquí las superficies de hormigón no forman parte de la imagen del edificio. Aunque el gimnasio-piscina de Marín consiste básicamente en dos bóvedas delgadas de hormigón armado, estas bóvedas no se dejaron a la intemperie, sino que se ocultaron tras una funda de formas más tradicio-

nales (fig. 1). Quizás las formas curvas de hormigón armado resultaran demasiado avanzadas técnica y estilísticamente para las circunstancias políticas del momento.



Figura 1
Escuela Naval de Marín: vista exterior del edificio del gimnasio-piscina. El volumen más bajo, a la izquierda, contiene la piscina, mientras que el cuerpo de la derecha alberga el gimnasio.

LAS CUBIERTAS DE HORMIGÓN EN ESPAÑA Y SU DESAPARICIÓN TRAS LA GUERRA CIVIL

Poco después de la invención del hormigón armado, ya se construían las primeras cubiertas continuas de este material, si bien en las primeras décadas reproducían simplemente las formas y principios estructurales de las bóvedas y cúpulas tradicionales de fábrica. Finalizado el primer cuarto del siglo XX, empezaron

a explotarse realmente las posibilidades del nuevo material en la construcción de cubiertas. En esa época, la construcción en hormigón comenzó a abandonar las bases exclusivamente empíricas para dejar paso a los modelos matemáticos. Al tiempo, algunos pioneros ensayaban formas nuevas, imposibles en otros materiales. Surgieron así las primeras estructuras laminares de hormigón. El fenómeno recibió un importante impulso en Alemania, donde ingenieros como Finsterwalder o Dischinger construyeron las primeras láminas de hormigón de fama mundial, al tiempo que proporcionaban las bases teóricas para su cálculo. El empleo de las nuevas formas pronto se extendió a otros países europeos: Francia, Suiza, Italia . . . Las cubiertas de hormigón iban salvando luces cada vez mayores, al tiempo que veían reducirse su espesor.

En España, pronto comenzaron a construirse cubiertas de hormigón armado, que competían en importancia con las realizadas en el resto de Europa. En este campo, el autor español más importante fue, sin duda, Eduardo Torroja. Las cubiertas laminares realizadas por Torroja en colaboración con distintos arquitectos antes de 1936 eran conocidas y admiradas mundialmente, sobre todo tres de ellas: el mercado de Algeciras (1933), el frontón Recoletos (1935) y la tribuna del Hipódromo de la Zarzuela (1936). Otros autores españoles también permanecían atentos a las posibilidades del hormigón armado en la cubrición de grandes luces. En Asturias, Sánchez del Río conseguía con el mercado de Pola de Siero (1929–1931) una obra de gran mérito estructural y estético. En Galicia, Rey Pedreira y Lama construían el mercado de San Agustín de A Coruña (1932–1937), para cuyo proyecto se habían *inspirado* en el mercado de Reims. Algunos años antes, en 1919, Peña Boeuf proyectaba, sin llegar a construirlo, un hangar para zepelines en el aeropuerto de Sevilla, consistente en una bóveda de hormigón armado cuya luz, 126 metros, aún hoy resulta asombrosa.

Acabada la guerra española, en 1939, la conexión de los arquitectos e ingenieros españoles con las tendencias de vanguardia europeas se interrumpió, tanto en lo referente a estilos arquitectónicos como por lo que concierne a avances estructurales y constructivos. En los años que siguieron, y al menos hasta 1950, las cubiertas laminares de hormigón prácticamente desaparecieron de la escena española.² Una de las causas fue, sin duda, la escasez de materiales, es-

pecialmente de hierro.³ Pero también se extendió una especie de censura o autocensura en el diseño: instaurado el nuevo régimen político, se evitaba dar a los proyectos una imagen demasiado avanzada, que pudiera recordar a los lenguajes empleados durante el régimen republicano.

Las últimas láminas de hormigón proyectadas por Torroja habían sido las de la tribuna del hipódromo de la Zarzuela, acabadas poco antes de la guerra. No hay constancia de que diseñase ninguna otra estructura de este tipo durante los catorce años siguientes, exceptuando este proyecto de gimnasio-piscina en Marín, realizado en 1942. A partir de 1950, volvió a construir algunas cubiertas de hormigón más, de pequeña dimensión, que ya no alcanzaron el nivel de originalidad de sus primeras obras.

BÓVEDAS DISFRAZADAS: LA DOBLE CUBIERTA DE MARÍN

Si bien lo más destacado de la obra de Marín es su estructura, la autoría del proyecto no pertenece en exclusiva a Torroja. Como sucediera a lo largo de su carrera en muchas ocasiones, un arquitecto fue el responsable oficial: en este caso se trató de Antonio de Cominges, quien se encargó sobre todo del aspecto externo del edificio. Torroja, como era habitual en este tipo de colaboraciones, se ocupó del diseño y cálculo de la estructura.

El edificio que alberga el gimnasio y la piscina de la Escuela Naval de Marín consta de dos cuerpos: el más bajo contiene la piscina, y el de mayor altura y volumen corresponde al gimnasio. La cubierta externa es un tejado a dos aguas, con acabado de teja. El exterior, similar al de otros edificios del recinto militar en el que se ubica, pertenece al estilo academicista practicado por los arquitectos españoles en los primeros años del franquismo, y *convenientemente* alejado de las estéticas de vanguardia que habían comenzado a desarrollarse durante la República.

Una vez en el interior del edificio, resulta sorprendente descubrir que los dos grandes espacios deportivos, gimnasio y piscina, se cubren con sendas bóvedas de hormigón (fig. 2). El edificio tiene, pues, una cubierta doble: la exterior, de teja —estaban previstos corcho y fibrocemento en el proyecto de Torroja—, y la interior, de hormigón armado. Es fácil de-

ducir que la cubierta exterior es la cubierta de Comings y la interior es la cubierta de Torroja. Da la sensación de que se hubieran ocultado las bóvedas deliberadamente, como si hubiese temor a ofrecer una imagen demasiado *moderna*. El edificio de Marín es una muestra de la presumible censura formal antes mencionada, materializada en el aspecto exterior de la obra, pues nada hace sospechar la estructura que alberga en su interior.



Figura 2
Escuela Naval de Marín: interior del gimnasio. Al fondo, la cristalería que separa el gimnasio de la piscina.



Figura 3
Escuela Naval de Marín: interior de la piscina.

que se cuelga una tribuna. Aunque el gimnasio es mayor que la piscina, sus programas se resolvieron de forma muy similar: cada uno de ellos ocupa una planta rectangular, cubierta por una bóveda rebajada de hormigón apoyada en arcos también de hormigón. En la piscina, la luz penetra lateralmente, por debajo de los bordes inferiores de la bóveda de hormigón, y por uno de los testeros (fig. 3). El gimnasio, además de iluminarse de forma lateral, cuenta con un lucernario en la clave de la cubierta.

Los dos espacios deportivos están separados mediante una cristalería situada bajo un arco calado, del

Las bóvedas de hormigón están sustentadas por enormes arcos, también de hormigón armado. En el gimnasio se dispone un arco cada siete metros, hasta

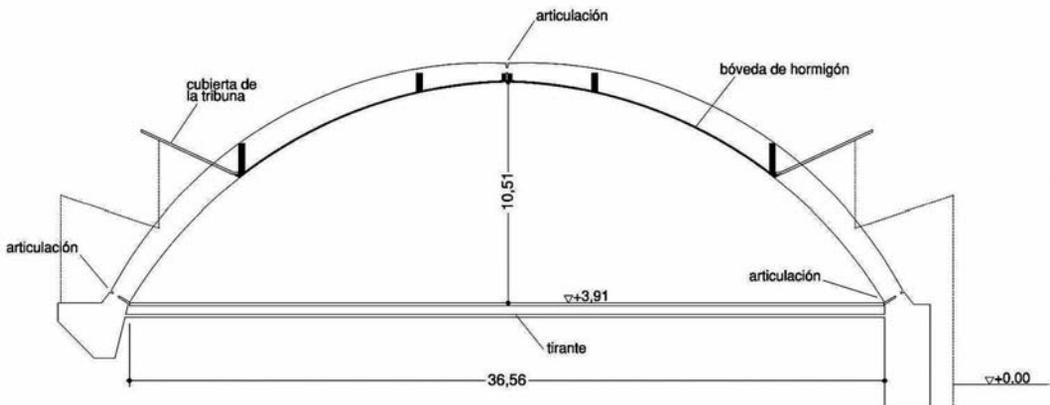


Figura 4
Sección transversal del gimnasio, mostrando uno de los arcos y la bóveda (elaboración propia).

un total de ocho, salvando cada arco una luz de 36,56 metros. Su sección tiene forma de T invertida, y están articulados en los arranques y en la clave, mediante articulaciones tipo Freyssinet (fig. 4). Un tirante dispuesto bajo el pavimento ata los dos cimientos de cada arco, contrarrestando el empuje horizontal. Los arcos de la piscina son algo más pequeños, de 25,50 metros de luz y ocho metros de flecha.

El espesor de las bóvedas es de siete centímetros. Tanto en la piscina como en el gimnasio presentan liso el intradós. Pero curiosamente, y este es uno de los aspectos más significativos de esta obra, las bóvedas no son lisas por el extradós, como podría pensarse, sino que cuentan con una serie de nervios y vigas resaltados hacia el exterior, paralelos y perpendiculares a los arcos principales (fig. 5). Este hecho sólo se advierte tras analizar los planos de estructura, pues el entramado queda oculto bajo la cubierta de teja.

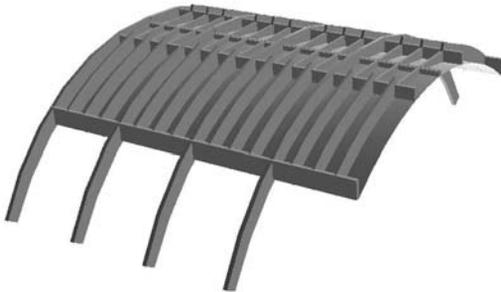


Figura 5
Modelo tridimensional de la estructura de hormigón armado de la cubierta del gimnasio.

En esquema, la estructura consiste en una serie de bóvedas cilíndricas de hormigón apoyadas en arcos paralelos. Las bóvedas se apoyan en sus testeros curvos, quedando al aire sus bordes inferiores, algo imposible en las bóvedas tradicionales de fábrica y aún en las primeras bóvedas de hormigón armado, que apoyaban los bordes rectos en toda su longitud. El sistema de *vigas-bóveda*, bóvedas que no apoyan sus bordes rectos sino que son soportadas por tímpanos transversales o arcos, empezó a probarse con éxito desde 1925. Torroja era perfecto conocedor de este tipo estructural, y lo había llevado al límite en el

frontón Recoletos. Sin embargo, en Marín añade a la cubierta otros elementos que la alejan, en cierta medida, de la viga-bóveda, y sitúan a estas bóvedas a medio camino entre la cubierta laminar y el emparrillado. Así, coloca a lo largo del borde inferior un gran nervio, de 1,60 metros de canto, que sirve de apoyo a los arcos secundarios, y en el que se apoya también la cubierta de la tribuna, una cubierta lateral consistente en una losa inclinada de hormigón (fig. 4). Este último detalle es otro de los aspectos que llaman la atención en esta obra, pues, teóricamente, el borde de una lámina nunca debe cargarse.

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA

A pesar de que la solución elegida para Marín puede resultar heterodoxa desde un punto de vista estructural, esta obra no deja de tener gran interés, aún más si se tiene en cuenta que en los primeros años de la posguerra no se construían en España edificios con cubierta de hormigón de dimensiones semejantes.

Para el proyecto de la estructura del gimnasio-piscina, Torroja recurrió a elementos de hormigón suficientemente ensayados en aquellos años, como eran los arcos triarticulados y las cubiertas abovedadas. Pero, como ya se ha dicho, lejos de ser ortodoxa, esta obra resulta peculiar: Torroja, que tanto había experimentado con el hormigón armado, y que había creado alguna de las cubiertas de hormigón más emblemáticas, evitó aquí la solución más *pura* y previsible. Recurrió, por el contrario, a sumarle a las bóvedas un entramado de vigas y arcos secundarios.

Con el fin de comprender mejor el comportamiento de la estructura, se realiza a continuación un análisis de la bóveda del gimnasio. Se compara también este análisis con otros dos modelos de la bóveda, en los que se han eliminado las vigas y arcos secundarios, esto es, se han conservado únicamente los arcos principales y las bóvedas, con el objetivo de descubrir si el resto de elementos era necesario por motivos estructurales o su función era otra.

Los cálculos de Torroja

Resumiremos en primer lugar los cálculos incluidos en el proyecto de 1942. A pesar de la relativa complejidad de esta estructura, Torroja la calculó simpli-

ficándola al máximo. Sobre los métodos de cálculo, él mismo afirmaba que, a la hora de elegir uno, éste «debe ser, siempre, el más sencillo entre los que den suficientes garantías de seguridad y de economía». (Torroja [1991] 1957, 379)

Fiel a esa filosofía, Torroja subdividió la estructura en elementos simples, de análisis fácil, que va calculando uno a uno. Su decisión de hacer los arcos triarticulados, o la de resolver algunos encuentros entre piezas de hormigón como simples apoyos, en lugar de empotramientos, también simplificó los cálculos. Para calcular la cubierta, no intentó abordar un análisis global de la bóveda, sino que optó por ir calculando cada uno de los nervios de hormigón por separado, con la porción de carga correspondiente. Calculado un nervio, su efecto sobre los apoyos —que pueden ser otros nervios o un arco— se transforma en cargas puntuales en el elemento sustentante. Siguiendo este método, que hoy puede parecer simple, se van recorriendo una a una las distintas partes de la estructura. Las partes de la estructura a cuyo cálculo se dedicó más esfuerzo fueron los arcos, resueltos por métodos gráficos, y unos pequeños pórticos laterales, en los que se recurrió al método de Cross. Y ni siquiera se incluyen en el proyecto cálculos de la propia bóveda: Torroja indica directamente su armado, sin justificarlo. Esto parece sugerir que, para Torroja, la lámina de hormigón desempeñaba en esta estructura una función secundaria.

Análisis de la combinación de nervios y lámina

En nuestro estudio se analizó en primer lugar la estructura construida, y luego se comparó con una solución más sencilla, de la que se estudiaron dos alternativas.

En el primer análisis efectuado, se realizó un modelo de elementos finitos para reproducir el comportamiento estructural de la bóveda del gimnasio tal como se construyó. Se diseñó un modelo, usando el programa ANSYS, de dos arcos completos y del sector de bóveda que carga sobre ellos (fig. 6). Se emplearon los datos de materiales y cargas citados en la memoria del proyecto. Para el hormigón se adoptó una resistencia característica de 160 kg/cm^2 , y como cargas, además del peso propio de la estructura, se incluyeron el peso de los materiales de cobertura y la acción del viento.

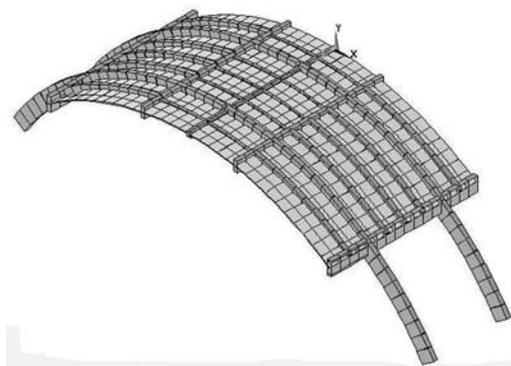


Figura 6
Modelo de elementos finitos de un sector de la cubierta del gimnasio, de acuerdo con el proyecto de Torroja.

Análisis de la lámina sin nervios

¿Hubiera podido simplificarse el diseño de estas cubiertas, sin tantos nervios intermedios? Para entender el comportamiento de esta estructura simplificada, se realizaron dos nuevos modelos de elementos finitos, eliminando todos los nervios superiores y conservando sólo los arcos principales y los nervios de borde horizontales. Se estudiaron dos opciones: el modelo 2A, con apertura de la lámina en la clave, y el modelo 2B, manteniendo la continuidad de la lámina también en la clave (fig. 7). En este último caso se supuso que los arcos estaban articulados únicamente en los arranques.

Resumen de los cálculos efectuados

El cálculo del primer modelo, que reproducía la estructura real, mostró que los valores que alcanzan las tensiones son bajos. La compresión máxima en la bóveda de hormigón no llega a un tercio de la tensión admisible del material. Los valores máximos de las tensiones, tanto de tracción como de compresión, aparecen en las inmediaciones de los arcos principales, adoptando valores mucho más bajos en el resto de la bóveda (fig. 8). Las deformaciones también son pequeñas comparadas con la envergadura del conjunto, del orden de una milésima parte de la luz. El análisis de los resultados confirma que Torroja diseñó la estructura con un amplio margen de seguridad.

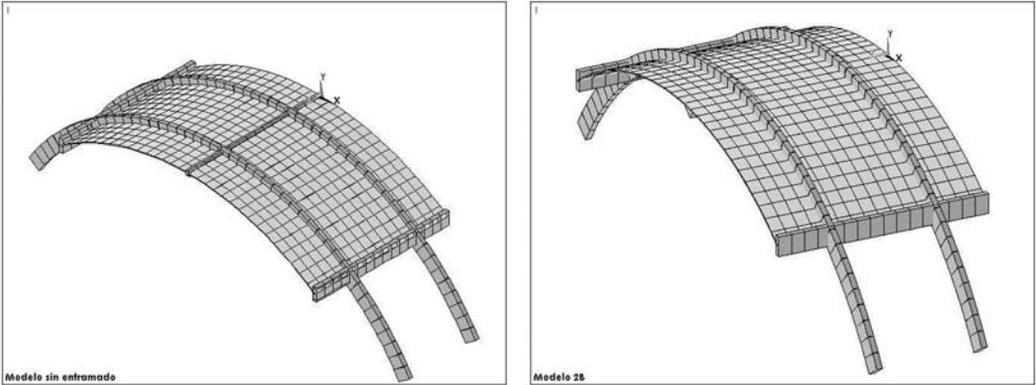


Figura 7
Dos modelos alternativos de la estructura. El modelo 2A, a la izquierda, mantiene la discontinuidad en la clave de la cubierta original, mientras que en el 2B se ha eliminado dicha discontinuidad.

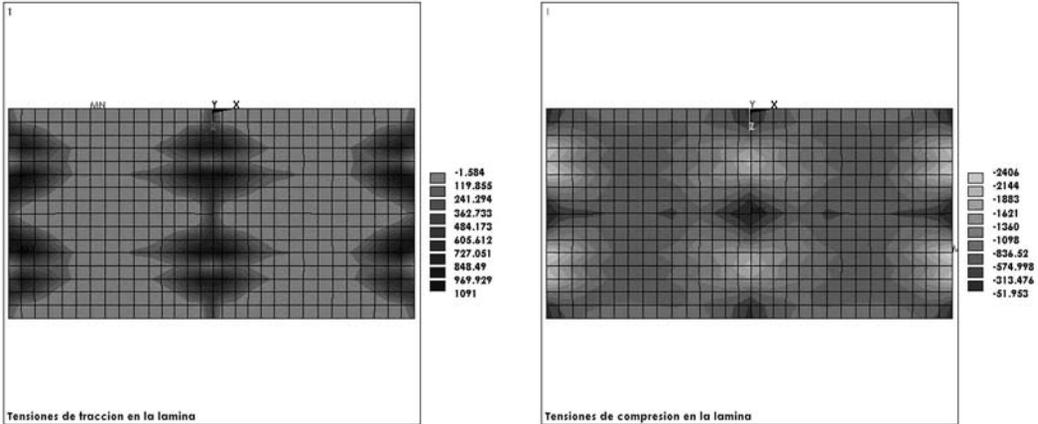


Figura 8
Tensiones de tracción (izquierda) y de compresión en el primer modelo.

Los modelos 2A y 2B, en los que se habían considerado sólo los arcos principales y la lámina, demostraron un mejor comportamiento estructural que la solución construida. El peso de estas dos soluciones habría sido de un 72% y un 69,6%, respectivamente, en relación con el peso de la estructura original. El descenso de las claves de los arcos es menor, sobre todo en la solución 2B, en este caso gracias a la eliminación de las rótulas superiores de los arcos. No obstante, esta desaparición de las rótulas origina mayores flexiones en los arcos. Las tensiones en la lámina se reducen significativamente, casi a la mitad

en el caso del modelo 2B. En la tabla 1 se recopilan algunos de los valores más significativos de los tres estudios.

Un aspecto destacable tras observar el comportamiento de los modelos, más evidente en los modelos 2A y 2B, es la forma en la que se transmiten las cargas de las bóvedas a los arcos. Las orientaciones de las tensiones principales (fig. 9) muestran que, en la parte superior de la cubierta de hormigón, las cargas no se dirigen directamente hacia los arcos principales siguiendo recorridos horizontales, como haría un conjunto de vigas apoyadas en sus extremos o una

Tabla 1

Valores obtenidos en los modelos estudiados de la cubierta del gimnasio.

Gimnasio	Peso (kN)	Descenso clave arco (cm)	σ_c máx (kN/m ²)	σ_t máx (kN/m ²)
Estructura real	3688	3,64 (L/1004)	-3143	+1361
Sin entramado (2A)	2652	2,92 (L/1252)	-1721	+938
Sin entramado (2B)	2567	0,90 (L/4062)	-1648	+638

placa apoyada en dos vigas paralelas. Por el contrario, las cargas *descienden* por la cubierta, con orientación vertical, formándose unos arcos virtuales paralelos a los reales. Hacia la zona inferior de la bóveda se produce una concentración de las trayectorias, que ahora se juntan para dirigirse, finalmente, hacia los arcos principales. Estos resultados son similares a los obtenidos por Billington en su análisis del pabellón de Hershey (Billington y Saliklis 2003).

Interpretación de los resultados

El estudio realizado confirma que el entramado de jácenas y nervios entre arcos no era necesario por motivos estructurales: las bóvedas podrían haberse

construido completamente lisas, tanto por el extradós como por el intradós. En ese caso, tampoco hubiesen requerido mayor espesor, siendo suficientes los siete centímetros con que se diseñaron originalmente. Las ventajas de esta disposición son evidentes: se reduciría significativamente el peso propio de la cubierta de hormigón, y se simplificaría en gran medida la ejecución.

¿Por qué no adoptó Torroja esta solución, más evidente y sencilla? Una explicación es que el entramado superior sirve para apoyar la cubierta a dos aguas, en vez de impermeabilizar directamente la bóveda. Es posible que otra razón, aunque resulte extraño tratándose de Torroja, fuera la de simplificar los cálculos. Es como si la estructura se hubiera diseñado pensando en reducir el tiempo de cálculo. Torroja dispone articulaciones o apoyos simples en la mayoría de los encuentros entre piezas, para forzar su isostatismo, y ello le permite calcular muchas vigas como simplemente apoyadas.

A favor de la solución estructural que se construyó, menos *limpia*, está el hecho de que el entramado, finalmente, se ocultó entre la bóveda de hormigón y la cubierta a dos aguas. Sólo queda visto el intradós de la bóveda, y eso fue lo que se dejó liso.

CONCLUSIONES

Las bóvedas del gimnasio-piscina de Marín son un ejemplo de cómo una solución estructural de gran interés resulta, en parte, frustrada por los condicionantes estéticos y económicos de su época. El aspecto de este edificio hubiera sido, desde luego, muy distinto de haber quedado vistas sus cubiertas curvas de hormigón. Pero esto resultaba en 1942, por lo que intuimos, demasiado atrevido, y se prefirió ocultarlas bajo un tejado convencional.

Por otra parte, el análisis mediante elementos finitos demuestra que pudo haberse prescindido del pesado entramado superior de vigas y nervios de estas cubiertas, dejando sólo la lámina.

El edificio sigue siendo utilizado, conservando su uso original, y se encuentra en buen estado.⁴ Su estructura tiene suficiente interés como para entrar a formar parte, no sólo del catálogo de obras de Torroja, sino del catálogo de obras singulares realizadas en España durante el franquismo.

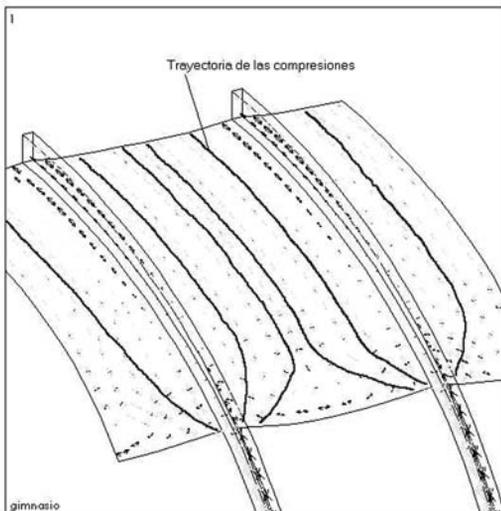


Figura 9

Orientación de las tensiones principales.

NOTAS

1. No se ha encontrado referencia alguna a esta obra en la bibliografía consultada sobre Eduardo Torroja, excepto en el catálogo de una exposición realizada en 1979, donde aparece su nombre en un listado de obras y proyectos (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos 1979). El proyecto de la estructura del gimnasio-piscina de la Escuela Naval de Marín se conserva en el Archivo de la Oficina de Torroja, con el número 478. Este Archivo actualmente se encuentra en el CE-HOPU (Madrid).
2. Uno de los pocos ejemplos de los que tenemos noticia es la Fábrica de Hielo del Muelle del Este, construida en 1943 en el puerto de A Coruña por Rey Pedreira y Rodolfo Lama.
3. Para tratar de paliar el problema de la escasez de materiales de construcción, el gobierno de Franco dictó una

Orden en 1943 «sobre preferencia de suministro a construcciones con ahorro de hierro» (Ministerio de Presidencia, 30 de noviembre de 1943).

4. Llama especialmente la atención el buen estado en que se encuentra la bóveda de hormigón que cubre la piscina, a pesar de su reducido espesor y de la alta humedad del ambiente.

LISTA DE REFERENCIAS

- Billington, David y Saliklis, Edmond. 2003. Hershey Arena: Anton Tedesko's Pioneering Form. *Journal of Structural Engineering*, 129 (3): 278–85.
- Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1979. *La modernidad en la obra de Eduardo Torroja*. Madrid: Turner.
- Torroja, Eduardo [1991] 1957. *Razón y ser de los tipos estructurales*. 7.ª ed. Madrid: CSIC.