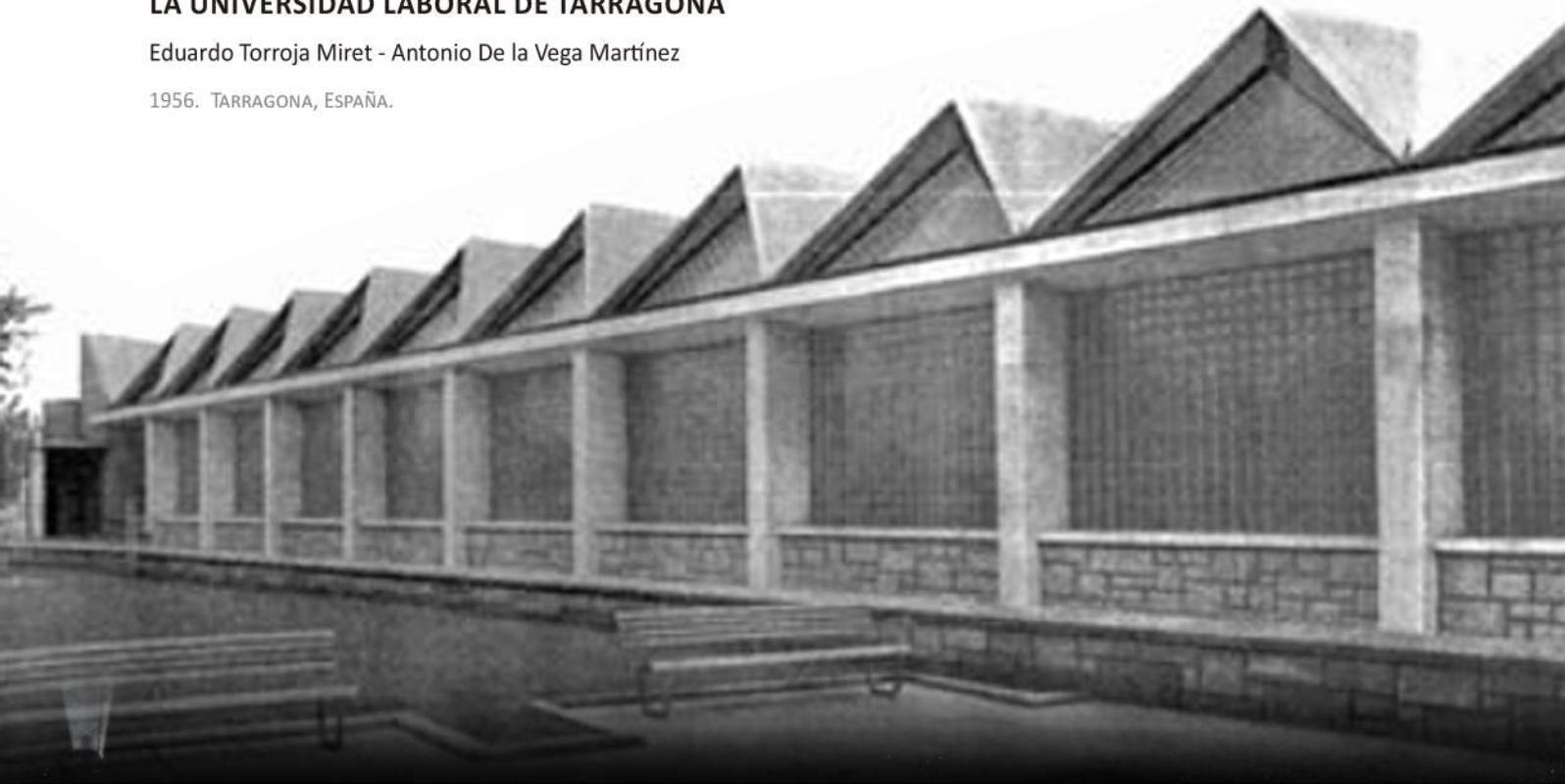


# ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CUBIERTA DEL PABELLÓN DE COCINAS DE LA UNIVERSIDAD LABORAL DE TARRAGONA

Eduardo Torroja Miret - Antonio De la Vega Martínez

1956. TARRAGONA, ESPAÑA.



**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Grado en Fundamentos de la Arquitectura  
Escuela Superior Técnica de Arquitectura de Valencia  
Curso 2014/2015

**Alumna:** Cristina Baldanta Callejo

**Tutor:** Ernesto Jesús Fenollosa Forner

**Departamento:** Mecánica de los medios continuos y teoría de estructuras



## **1. Introducción**

- 1.1. Resumen
- 1.2. Objetivos y metodología

## **2. Eduardo Torroja Miret**

- 2.1. Breve biografía
- 2.2. Pensamiento
- 2.3. Trayectoria profesional
  - 2.3.1. Obras de Ingeniería civil
  - 2.3.2. Geometría y comportamiento
  - 2.3.3. Ejemplos

## **3. Láminas plegadas de hormigón**

- 3.1. Comportamiento estructural
- 3.2. Geometría y expresividad
- 3.3. Uso de las láminas
  - 3.3.1. Ejemplos de láminas en España
- 3.4. Contexto actual

## **4. Cubierta de la cocina de la Universidad Laboral de Tarragona**

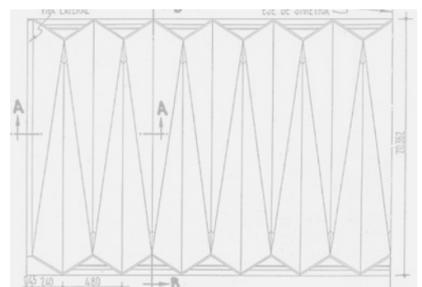
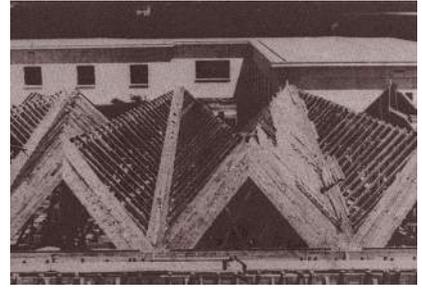
- 4.1. La Universidad Laboral
  - 4.1.1. Contexto y entorno
  - 4.1.2. El proyecto arquitectónico
- 4.2. Estructura y construcción
  - 4.2.1. Estructura del proyecto
  - 4.2.2. Armado y Técnica constructiva
- 4.3. Modelo estructural
  - 4.3.1. Discretización de la estructura real
  - 4.3.2. Evaluación y asignación de cargas
  - 4.3.3. Combinación de cargas
  - 4.3.4. Características de los materiales
- 4.3. Comportamiento global de la estructura
  - 4.3.1. Hipótesis de carga
  - 4.3.2. Combinaciones

## **5. Conclusiones**

## **6. Bibliografía y referencias a imágenes**

- 6.1. Bibliografía y referencias bibliográficas
- 6.2. Comportamiento global de la estructura

## 1. Introducción



## 1.1. RESUMEN

El Pabellón de cocinas de la Universidad Laboral de Tarragona, fue construido en 1956, década en la que surgieron estos instrumentos educativos. El interés de esta obra reside en el empleo de la lámina plegada de hormigón armado utilizada como cubierta, diseñada y calculada por Eduardo Torroja Miret, uno de los ingenieros más relevantes del siglo XX. La estructura busca el diseño de un espacio arquitectónico al mismo tiempo que desea aportar una sensación de ligereza en la cubrición. El ingeniero trata de encontrar dicha sensación, eliminando cualquier soporte o partición en el interior del pabellón, dando lugar a un gran espacio diáfano. También buscando el espesor mínimo en las láminas que cubren el espacio. Para ello, se sirve de la técnica del postesado, que introduce tensiones de compresión en la estructura, previas a su puesta en servicio, que le permiten corregir las posteriores tensiones y deformaciones originadas por las cargas gravitatorias de peso propio y sobrecarga de manteniendo. Con esta obra, se pone de manifiesto no sólo el interés espacial y arquitectónico de la propuesta, sino que también arroja a la luz las ventajas que aporta la forma en el comportamiento estructural así como los beneficios de la técnica del postesado en la durabilidad del hormigón, pues consigue que la estructura trabaje a compresión, evitando la fisuración producida por las sollicitaciones de tracción que pueden dar lugar a la corrosión de las armaduras, y en definitiva, al deterioro de la estructura.

**Palabras clave:** *Cocinas Universidad Laboral de Tarragona, Eduardo Torroja, Lámina plegada de hormigón armado, Postesado, Durabilidad.*

El Pavelló de cuines de la Universitat Laboral de Tarragona, va ser construït en 1956, dècada en què van sorgir aquests instruments educatius. L'interés d'aquesta obra resideix en la utilització de la làmina plegada de formigó armat emprada com a coberta, dissenyada i calculada per Eduardo Torroja Miret, un dels enginyers més rellevants del segle XX. L'estructura busca el disseny d'un espai arquitectònic al mateix temps que desitja aportar una sensació de lleugeresa en el cobriment. L'enginyer tracta de trobar aquesta sensació, eliminant qualsevol suport o partició en l'interior del pavelló, donant lloc a un gran espai diàfan. També buscant la secció mínima en les làmines que cobreixen l'espai. Per a això, se serveix de la tècnica del posttesat, que introdueix tensions de compressió en l'estructura, prèvies a la seua posada en servici, que li permeten corregir les posteriors tensions i deformacions originades per les càrregues gravitatòries de pes propi i sobrecàrrega de manteniment. Amb aquesta obra, es posa de manifest no sols l'interés espacial i arquitectònic de la proposta, sinó que també posa de manifest els avantatges que aporta la forma en el comportament estructural així com els beneficis de la tècnica del posttesat en la durabilitat del formigó, perquè aconsegueix que l'estructura treballi a compressió, evitant la fisuració produïda per les sollicitacions de tracció que poden donar lloc a la corrosió de les armadures, i en definitiva, al deteriorament de l'estructura.

**Paraules clau:** *Cuines de la Universitat Laboral de Tarragona, Eduardo Torroja, Làmina plegada de formigó armat, Posttesat, Durabilitat.*

Kitchen Pavilion of the Labour University of Tarragona, built in 1956, decade in which these educational tools emerged. The interest of this work lies in the use of reinforced concrete folded plate used as roof, designed and calculated by Eduardo Torroja, one of the most important engineers of the twentieth century. The structure seeks to design an architectural space at the same time it wants to bring a sense of lightness in the covering. The engineer tries to find this sensation, eliminating any column or partition inside the hall, leading to a large open space. He also wants to get the minimum thickness in plates that cover the space. To do this, he uses the technique of prestressing steel, which introduces compressive stresses in the structure before it is used, which allows it to correct subsequent stresses and strains caused by the gravitational dead loads and use loads. With this technique, it becomes clear not only the spatial and architectural interest of the project, but also sheds light on the advantages of the form in the structural behavior and the benefits of the technique of prestressing on concrete durability, as it makes the structure work in compression, preventing cracking caused by tensile stresses that can lead to corrosion of the steel reinforcements, and ultimately the deterioration of the structure.

**Key words:** *Labour University of Tarragona's Kitchen, Eduardo Torroja, Reinforce concrete folded plate, Prestressing steel, Durability.*

## 1.2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El Pabellón de cocinas de la Universidad Laboral de Tarragona es una de las numerosas obras que diseñó y calculó el prestigioso ingeniero Eduardo Torroja Miret. Por otra parte, se trata de una obra escasamente conocida y publicada en el mundo de la arquitectura e ingeniería, siendo interesante no sólo por el espacio que crea sino también por la tipología estructural utilizada, una lámina plegada de hormigón, y por la técnica constructiva empleada, el postesado.

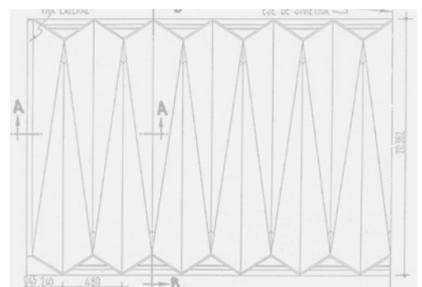
El objetivo de este trabajo será doble. Por un lado, se tratará de poner en valor la influencia de la forma de la estructura en el comportamiento de la misma así como los espacios arquitectónicos que resultan de dicha forma.

Para ello, se realizará un breve estudio de la evolución de las tipologías estructurales, a raíz de la introducción del hormigón armado en el mundo de la construcción, para a continuación analizar brevemente el comportamiento dichas tipologías por medio de conocidas obras de Eduardo Torroja. Indagando primero en la metodología y pensamiento de este ingeniero acerca de las estructuras. Posteriormente, se realizará un mayor estudio de las láminas plegadas de hormigón, atendiendo a su geometría y uso en el proyecto estructural y arquitectónico, así como a la historia de utilización de las mismas.

Por otro lado, se analizará en exhaustivamente la estructura del Pabellón de cocinas de la Universidad Laboral, con la intención de poner en valor tanto esta obra desconocida, como la tipología estructural y técnica constructivas adoptadas; de modo que se estudiará en detalle la solución empleada y el proceso constructivo seguido para la ejecución de la estructura.

Para ello se propone la siguiente metodología. A partir de la información recogida en los planos depositados en el Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo del edificio real, se efectuará un modelo estructural del mismo, con la ayuda del programa informático y de cálculo Architrave. A este modelo, se le aplicarán unas cargas obtenidas de una interpretación de las supuestas cargas a las que puede estar sometida la estructura real, incluyendo el efecto del postesado en dicha modelización. Por último, se extraerán una serie de conclusiones, a partir de los resultados obtenidos en el programa de cálculo, tratando de hallar alguna conclusión que pueda extrapolarse a otros edificios de similares características, con la misma tipología estructural y la misma técnica constructiva.

## 2. Eduardo Torroja Miret



En primer lugar, antes de realizar cualquier análisis estructural sobre obra alguna, conviene conocer la vida y pensamiento de este prestigioso ingeniero, que le llevaron a hacer grandes aportaciones al mundo de la Ingeniería y la Arquitectura. A lo largo de toda su trayectoria profesional y personal trabajó de manera tenaz y ambiciosa, motivado por la curiosidad y tratando de llevar a España a la vanguardia de la construcción europea. Hoy día, se podría decir que es uno de los ingenieros más relevantes del siglo XX, cuyo nombre y publicaciones llegaron a traspasar las fronteras nacionales.

## 2.1. BREVE BIOGRAFÍA



FIG. 2.1. EDUARDO TORROJA MIRET (1899 - 1961)

Eduardo Torroja Miret nace en 1899 en el seno de una familia catalana que residía en Madrid. Su padre, Eduardo Torroja Caballé, fue profesor de la Facultad de Matemáticas de la Universidad de Madrid; era matemático y arquitecto lo que sin duda influyó en que su hijo se decantara por el mundo de la construcción y los números.

En 1917, ingresó en la Escuela de Caminos de Madrid, graduándose 6 años después. Su habilidad para las estructuras hizo que ese mismo año, en 1923, comenzase a trabajar en Hidrocivil para Eugenio Ribera, el que había sido su profesor de puentes de fábrica.

En 1927, con 28 años, deja Hidrocivil para abrir su propia oficina de proyectos donde desarrolla una gran intensidad de trabajo relacionada con el proyecto de estructuras de edificación, colaborando con diversos arquitectos. En 1934, funda con otros ingenieros el Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento, resultado de su deseo de investigación, experimentación y búsqueda de desarrollo científico y técnico de los materiales de construcción, en especial, del hormigón. A su muerte, este centro pasa a llamarse Instituto Eduardo Torroja.

Las obras de edificación centraron su actividad hasta el comienzo de la Guerra Civil española en 1936, cuando se marcha con su familia a Fuenterrabía (Guipúzcoa, País Vasco), donde vivió dos años. A partir de 1939, se dedicó al proyecto de obras pública, desempeñando una tarea relevante en la reconstrucción del país desde la jefatura de Puentes del Ministerio.

Además de su contribución mediante obras públicas, contribuyó de manera notable y simbólica en la Escuela de Caminos de Madrid, donde ejerció una labor docente desde 1939. Impartía clases de diversas materias: Elasticidad, Resistencia de Materiales, Estructuras, Fundamentos del cálculo, Ejecución de obras de hormigón armado y pretensado y Tipología estructural. Esta última asignatura fue creada por el mismo.

A partir de 1945, al finalizar la Segunda Guerra Mundial, redujo su dedicación al proyecto de estructuras para dedicarse fundamentalmente a la labor técnica y de investigación. Al mismo tiempo, trató de unificar la normativa europea del hormigón, incorporando ideas propias sobre el comportamiento y la seguridad de las estructuras.

En 1961, a los 61 años, la muerte le sorprende inesperadamente mientras trabajaba en su despacho en Madrid.

## 2.2. PENSAMIENTO

La forma de pensar de Eduardo Torroja es probablemente lo que más le caracterizó y lo que le llevó a ser uno de los más prestigiosos ingenieros del siglo XX, cuyos méritos siguen vivos hoy día.

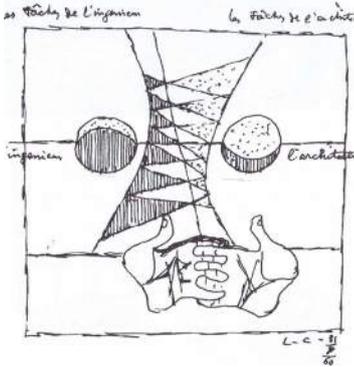


FIG. 2.2. ALEGORIA DE LA COLABORACION ENTRE ARQUITECTOS E INGENIEROS EN LA CREACION ARQUITECTÓNICA (LE CORBUSIER)

A pesar de tratarse de un ingeniero, siempre estuvo muy ligado a la Arquitectura, y defendía la necesidad de la cooperación de las dos disciplinas en el mundo de la construcción. Autores como Mario G. Salvadori, respondiendo a la pregunta “¿De dónde proviene la fama de Torroja?” sostiene: “Su fama es debida al papel que desempeñó durante los últimos 30 años de su vida, tendiendo un puente sobre la brecha que siempre ha existido entre la ingeniería civil y la arquitectura”. No obstante, esta forma de concebir las dos disciplinas puede verse reflejado de forma clara en las propias palabras de Torroja: “Si la columna es Arquitectura pura, el arco es Ingeniería; o mejor dicho, si la columna es arte, el arco es técnica, sin que esto quiera decir, ni que a la columna le falte técnica, ni que el arco sea incapaz de vivísima expresión estética”. (FIG.2.2.)

Es, por ello, necesario ahondar en cómo pensaba hacia el diseño, las estructuras y los materiales para entender en profundidad la hazaña de sus obras. Eco de su pensamiento hacia las estructuras, es su publicación *Razón y Ser de los tipos estructurales*, en 1957, traducida en multitud de idiomas y difundida por todo el mundo.

En primer lugar, puede decirse que en Eduardo Torroja se distinguen dos intenciones. Por un lado, se encuentra la exigencia técnica, la función estructural del proyecto que maneja, a la que asocia una forma, un material y dimensiones y que, en definitiva, tiene una forma de trabajo, desde el punto de vista técnico y económico, concreta. Por otro lado, se encuentra la exigencia artística, la que a través del material con su personalidad y forma concretas, origina efectos expresivos y estéticos en los espectadores.

El aspecto novedoso en Torroja es precisamente este, que a pesar de ser un ingeniero con enorme prestigio científico y técnico, defendiese que valores tan subjetivos, y a veces enfrentados a la razón y a la técnica, como la inspiración, la sensibilidad o la imaginación, fueran esenciales en el proceso de creación de las formas estructurales. De esta actitud, puede verse reflejada la importancia que le daba a las formas, así como el efecto que producían en las personas que las observaban o vivían.

A la hora de abordar los proyectos, para Torroja existían una serie de *ecuaciones* y de *incógnitas*. Estas se pueden considerar los principios que utiliza Torroja para proyectar y tomar la mejor de las decisiones. Según él, es posible organizar las variables que influyen en el desarrollo de un proyecto: (FIG.2.3.)

### ECUACIONES

- Funcionalidad utilitaria
- Estatismo
- Cualidades estéticas
- Condiciones económicas

### INCÓGNITAS

- Material
- Tipo estructural
- Forma y dimensiones resistentes
- Proceso de ejecución

Para alcanzar el efecto estético en un diseño, según él, era preciso disponer primero de conocimientos técnicos y principios básicos de construcción y tipos estructurales, para comprender la finalidad y el mecanismo de la función resistente.

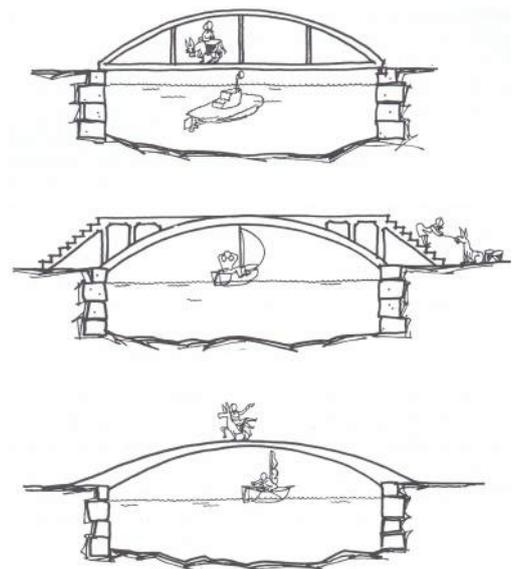


FIG. 2.3. VARIABLES DE UNA ESTRUCTURA

No obstante, junto a la técnica, sostenía que también era de suma importancia *una serena y aguda sensibilidad artística*, para lograr un diseño bello. También, consideraba que los cálculos no eran más que una herramienta para comprobar que la forma resistente proyectada era adecuada y que coincidía con lo que la intuición le decía. Sin embargo, consciente de cometer errores, solía completar su trabajo técnico con ensayos experimentales sobre modelos a escala reducida.

Torroja consideraba que era necesario *“fundir el fenómeno tensional con el efecto estético”*, pues la belleza de una obra se alcanzaba con la *“veracidad estructural”*, es decir el menor número de elementos, de forma que todos son esenciales y no existe nada de más, puede apreciarse como funciona la estructura.

Al mismo tiempo que determinaba las formas de los elementos que participaban en la función resistente del proyecto, elige el material y las dimensiones. Este segundo aspecto del ingeniero, el funcionamiento y la respuesta de las formas proyectadas, es otra de sus grandes características. Y es que él consideraba que cada material debía crear sus propias formas resistentes y constructivas y desarrollar técnicas que permiten aprovechar sus ventajas y salvar sus limitaciones.

A pesar de que realizó algunas estructuras mixtas y otras en acero, fue el hormigón, tanto armado como pretensado, en el que centró su interés y su labor de investigación, docente y profesional. Del hormigón armado decía que era el material más técnico de todos y el único que verdaderamente puede definirse como *adecuado-resistente*, pues el hormigón se dosifica y las barras de acero en su interior, se orientan y refuerzan en función de las exigencias de cada punto. Por otra parte, del hormigón pretensado comentaba *“es a la vez, el más fino y más complicado invento de nuestros días”*.

Esta forma de pensar sobre el material, junto con las posibilidades de resistencia que ofrece tanto armado como pretensado, hacían de sus obras, estructuras vivas. Según, Miguel Sosa *“No las diseña para que soporten de manera pasiva, inerte, las acciones gravitatorias, sino que maneja su geometría y provoca, de forma activa, fuerzas o deformaciones para que los materiales soporten las tensiones adecuadas a su comportamiento resistente”*. (FIG.2.4.)

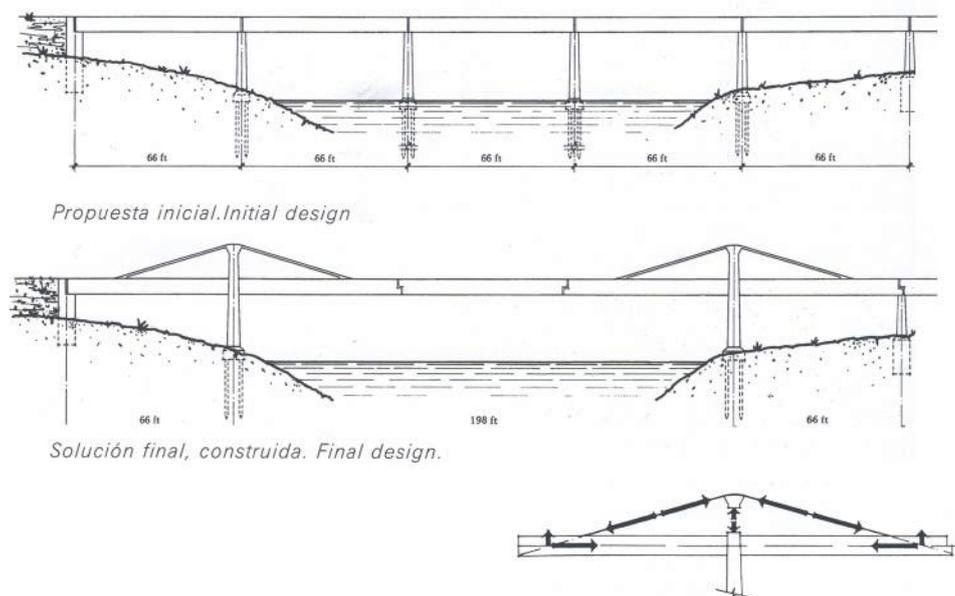


FIG. 2.4. EVOLUCIÓN DE LA ESTRUCTURA EN EL ACUEDUCTO DE TEMPUL, 1927.

La manipulación que efectúa Torroja en multitud de sus obras sobre el comportamiento estructural, y que se explica de forma detallada en el apartado 4 del presente trabajo (*Armado y técnica constructiva*), consistía en superponer a las acciones exteriores, esfuerzos adicionales logrados mediante cables, tensores o armaduras activas que introducían dichos esfuerzos en las piezas antes de que la estructura entrara en servicio. Esto le permitía obtener un material que trabaja de la forma adecuada, a la vez de podría lograr estructuras más esbeltas, reduciendo el canto y aumentando la sensación de ligereza e ingravidez de las mismas.

## 2.3. TRAYECTORIA PROFESIONAL

Torreja llevó a cabo multitud de obras de todo tipo: cimentaciones, puentes, depósitos, espacios deportivos y de culto religioso. Si bien es cierto que todas ellas tienen su interés, el presente trabajo tiene por intención destacar la Cubierta de Cocinas de la Universidad Laboral de Tarragona, una obra prácticamente desconocida y poco publicada cuyo interés consiste en que presenta una lámina plegada de hormigón en su cubierta.

### 2.3.1 OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL

No obstante, aquí se realiza un pequeño recorrido visual de la obra del ingeniero en el campo de la obra civil. (FIG.2.5.)



A. VIADUCTO QUINCE OJOS, 1933



B. VIADUCTO DE ALLOZ, 1939



C. PUENTE DE TORDERA, 1939



D. PUENTE DEL PEDRIDO, 1940



E. TRIBUNA DE LES CORTS, 1943



F. VIADUCTO DE MARTÍN GIL, 1942



G. PRESA DE CANELLES

FIG 2.5. OBRA CIVIL DE EDUARDO TORREJA

### 2.3.2. GEOMETRÍA Y COMPORTAMIENTO

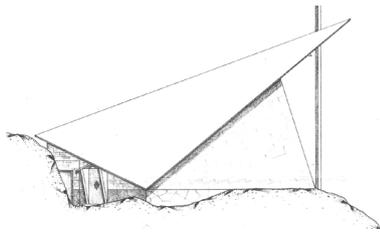
Como ya se ha comentado previamente, forma, material y comportamiento estructural están íntimamente relacionados en la obra de Eduardo Torreja. En este apartado se pretende explicar la innovación que supuso el hormigón armado en edificación y en el comportamiento estructural, aplicando este material a las formas clásicas. Este análisis se realizará primero desde un punto de vista general del tipo estructural, para en el siguiente apartado analizar obras de este ingeniero en las que se refleja la relación forma, material y comportamiento estructural.

#### Láminas plegadas – Superficies planas, sin curvatura \*

Las láminas planas, como si de una losa plana y delgada se tratase, no tienen resistencia a flexión. No obstante, si se doblan, la arista adquiere una rigidez enorme a compresión, siendo las caras que intersecan dando lugar a esa arista los que impiden que esta pandee. El comportamiento longitudinal de estas, es como el de una viga apoyada en los extremos, mientras que transversalmente, con menor rigidez, funciona como una viga continua apoyada en los pliegues. Por otra parte, con el plegado se consiguen multitud de formas prismáticas. (FIG.2.6.)

\*Este tipo estructural se desarrolla en profundidad en el capítulo 3 (Láminas plegadas de hormigón).

\*\*Este ejemplo se desarrolla en profundidad en el capítulo 4 (Cubierta de cocinas de la Universidad Laboral de Tarragona).



A. CAPILLA DE LA ASCENSIÓN, 1952



B. IGLESIA SAN NICCOLÁS, 1961



C. UNIVERSIDAD LABORAL, 1956\*\*

FIG 2.6. OBRAS CON LÁMINAS PLEGADAS

### Láminas cilíndricas – Superficies de curvatura simple

Si las láminas de hormigón armado son suficientemente largas, no necesitan de disponer de apoyos continuos en las directrices de arranque, sino que pueden transmitir los empujes de la lámina a los apoyos extremos, los lados de menor dimensión, esto supone un importante cambio en el comportamiento de este tipo de formas respecto de las clásicas bóvedas de cañón construidas con otros materiales, pues estas láminas de hormigón utilizan su resistencia a tracción para alcanzar soluciones más ligeras y de fenómeno tensional más complejo. La ventaja queda determinada en el siguiente esquema: en el primer dibujo, el elemento se dobla debido a la falta de resistencia, mientras que en el segundo, mantiene su forma debido a los puntos de apoyo y a la forma curvada que ha tomado. (FIG.2.7.)

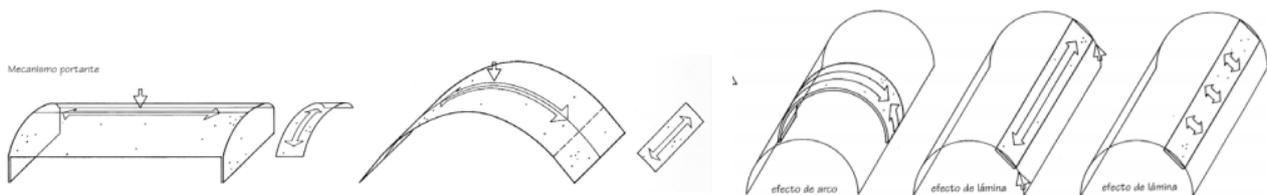


FIG 2.7. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS LÁMINAS CILINDRICAS

En definitiva, equivalen al funcionamiento longitudinal de una viga sometida a flexión simple, con tracciones en las fibras próximas al arranque y compresiones en las fibras superiores. Sin embargo, al tratarse de secciones abiertas y delgadas y no macizas, son deformables.



A. CUBIERTA DEL PATIO DE LA ESCUELA ELEMENTAL DEL TRABAJO



B. CUBIERTA DE LA IGLESIA DE VILLAVERDE, 1935



C. CUBIERTA NAVE DE ENSAYOS, 1948



D. CUBIERTA DEL FRONTÓN DE AÑORGA, 1950

FIG 2.8. OBRAS CON LÁMINAS CILINDRICAS

### Láminas sinclásticas – Superficies de curvatura doble del mismo signo

Se trata de la evolución de las cúpulas clásicas, que eran una sucesión de arcos alrededor de un eje que pasa por la clave de todos ellos. Esta es una de las soluciones más sencillas y naturales para lograr la cubrición de un área sin soportes intermedios, con el mínimo material. (FIG.2.9.)



FIG 2.9. COMPORTAMIENTO DE LAS CÚPULAS

Tradicionalmente, se construían con materiales no resistentes a tracción, que precisaban de muros en su perímetro de apoyo con los paramentos verticales o bien un anillo o zuncho fuertemente resistentes a tracción pues los empujes tienden a abrir las mismas en la base. Por esta razón, las cúpulas de hormigón armado consiguen muchas estructuras indeformables y autoportantes, presentan solo esfuerzos de membranas, pues pueden resistir tracciones.



FIG 2.10. OBRAS CON LÁMINAS SINCLÁSTICAS

**Láminas anticlásticas – Superficies de curvatura doble de distinto signo**

Esta forma no tiene su correspondencia o no evoluciona de una forma clásica, pues es el hormigón armado el que permite estas nuevas formas. Su particularidad es que las láminas son cóncavas y convexas al mismo tiempo, cuya indeformabilidad se basa en que cada punto pertenece a la vez a dos arcos transversales, de diferente curvatura, asumiendo uno compresiones y otro tracciones. El resultado es una superficie indeformable. (FIG.2.11.- FIG.2.12.)

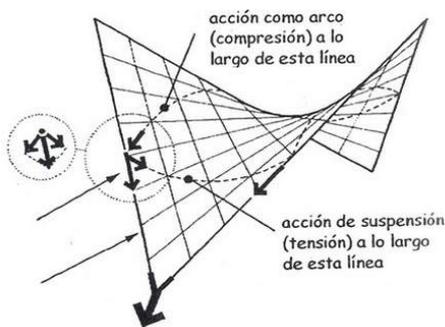


FIG 2.11. COMPORTAMIENTO ANTICLÁSTICAS

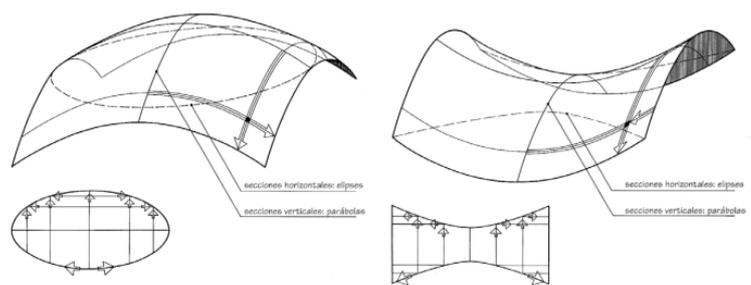


FIG 2.12. GEOMETRIA LÁMINAS ANTICLÁSTICAS

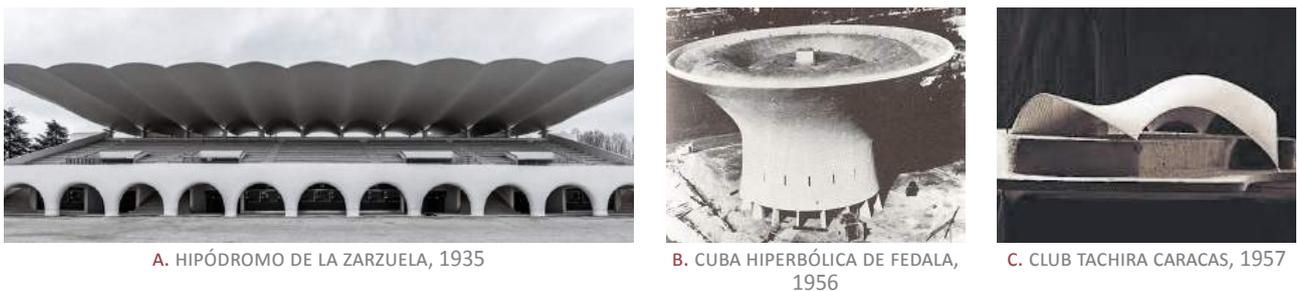


FIG 2.13. OBRAS CON LÁMINAS ANTICLÁSTICAS

### Mercado de Algeciras

**Arquitecto:** Manuel Sánchez Arcas

**Ingeniero:** Eduardo Torroja

**Emplazamiento:** Algeciras (Cádiz)

**Año:** 1933

**Función:** Edificio comercial

**Tipo estructural:** Cúpula de revolución – 9 ~ 50 cm de espesor



FIG. 2.14. EMPLAZAMIENTO DEL MERCADO

La cubierta del Mercado de Algeciras fue récord de dimensiones en su época, como puede apreciarse en el siguiente esquema comparativo. (FIG.2.15.)

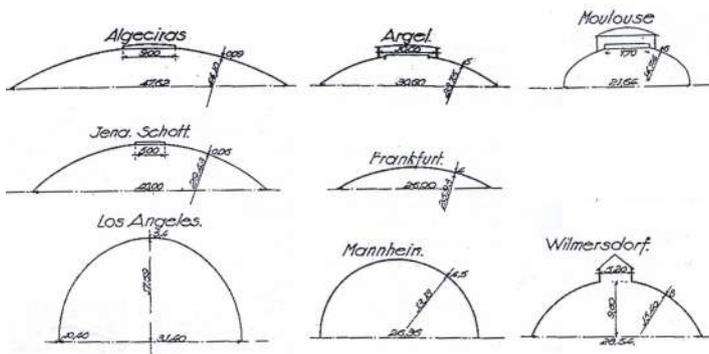


FIG. 2.15. CÚPULAS CONTEMPORÁNEAS

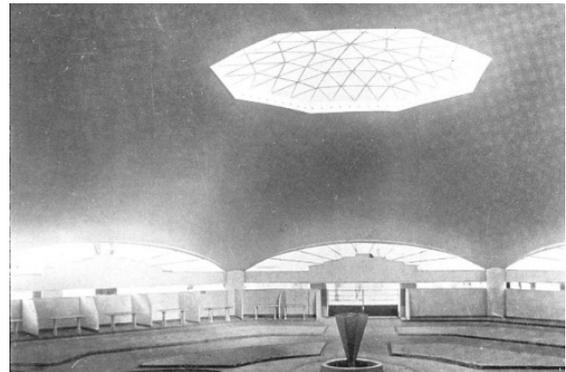


FIG. 2.16. INTERIOR. ILUMINACIÓN DEL MERCADO

### Proyecto

El proyecto consistía en la cubrición de un mercado, de unos 47 metros de diámetro, tratando de lograr un gran espacio diáfano, ausente de soportes interiores, que permitiesen la libre colocación de las casetas de venta.

### Estructura

El Mercado, con diseño de planta octagonal, se cubre mediante un casquete esférico de 47,62 metros de luz, resueltos con espesor de 9 cm, creciendo hasta los 50 cm sobre los 8 soportes que lo sostienen. Dicho casquete o cubierta laminar está rematado en su perímetro, entre los soportes aislados, por láminas cilíndricas de eje horizontal, que avanzan en voladizo dando lugar a marquesinas en los accesos al mercado. Estas proporcionan rigidez a los bordes del casquete esférico (FIG.2.17.)

Finalmente la cubierta se completa con una claraboya octogonal de 10 metros de dimensión diagonal, formando un lucernario de vidrio que permite la entrada de luz natural cenitalmente. (FIG.2.16.)

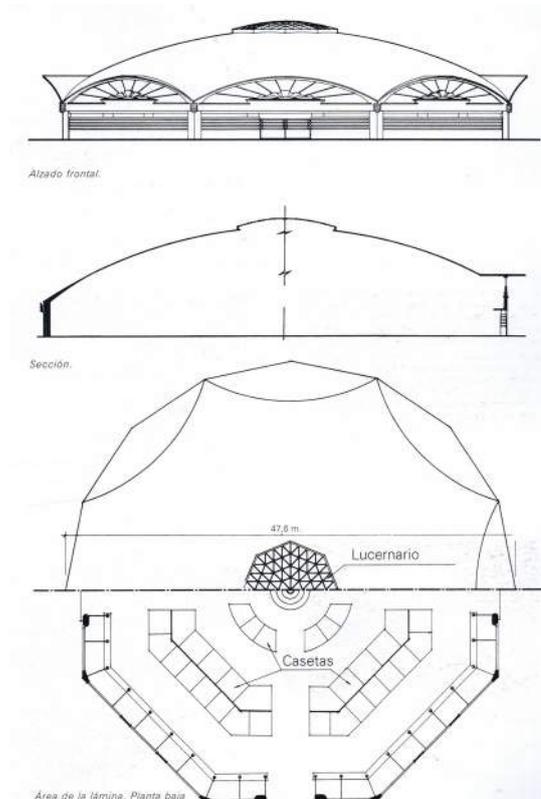


FIG. 2.17. PLANTA, ALZADO Y SECCIÓN

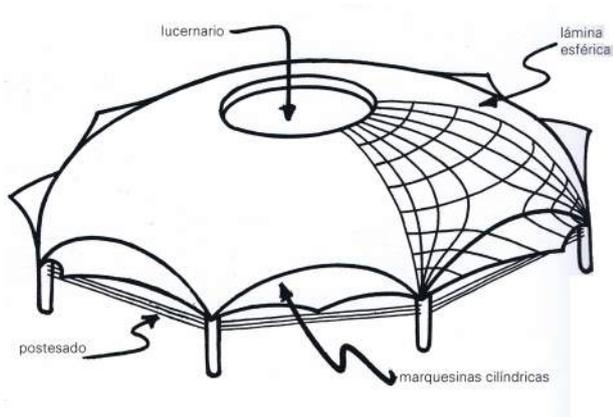


FIG. 2.18. ESQUEMA ESTRUCTURAL

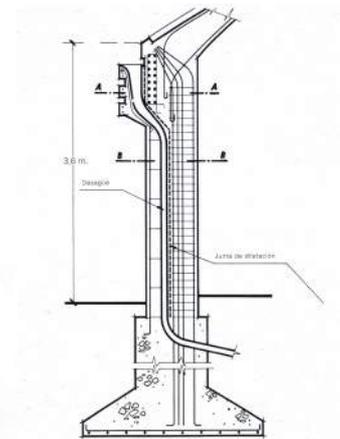
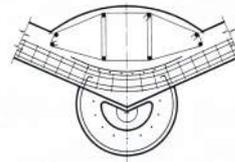


FIG. 2.19. SOPORTE

### Comportamiento estructural: problemas y soluciones

El casquete esférico que cubre el espacio está sometido a compresión, funciona como una membrana, por lo que no hay peligro de que esta se fisure. La clave para que esto no suceda, consiste en coartar los desplazamientos horizontales en los apoyos de la lámina. El impedimento de desplazamiento horizontal en estos puntos, genera unos esfuerzos de flexión inasumibles en la coronación de los pilares. Además, en los apoyos y proximidades, donde el espesor de la lámina alcanza los 50 cm, se concentran los mayores esfuerzos.

La solución que aporta Torroja, consiste en el atado de las cabezas de los soportes mediante un tirante que compense la componente horizontal del empuje de la lámina, es decir un anillo que evite que el perímetro se “abra”. Con esta solución, el ingeniero generó un sistema de fuerzas horizontales en los apoyos de la lámina consiguiendo que las cabezas de los soportes no se desplazaran. (FIG.2.18.)

El proceso de ejecución que permitió dicha solución fue un Postesado de dicho anillo. Una vez hubo endurecido el hormigón de la lámina, se fue dando tensión a los tensores (anillo) ubicados entre las cabezas de los soportes; posteriormente, fue hormigonado para garantizar su durabilidad y comportamiento. (FIG.2.20.)

Lo que sucedía era que, al ir dando tensión a los tensores, debido al sistema de fuerzas que se introducía, la lámina se fue despegando de la cimbra, al mismo tiempo que, poco a poco, iba entrando en carga bajo la acción de su peso propio.

De esta forma se consigue que en cada apoyo se equilibre la componente horizontal del empuje de la lámina, manteniendo el desplazamiento de la cabeza del pilar, cuya sección era mayor en el sentido perimetral que en el radial. (FIG.2.19)

Por último, cabe indicar que las bóvedas cilíndricas también incluyen una serie de radios, dispuestos desde el centro, que rigidizan cada tramo o marquesina. (FIG.2.20)

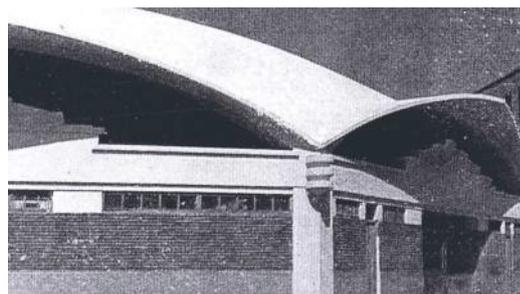


FIG. 2.20. ANILLO DE ATADO, ANTES Y DESPUÉS DE HORMIGONAR

### Frontón de Recoletos

**Arquitecto:** Secundino Zuazo

**Ingeniero:** Eduardo Torroja

**Emplazamiento:** Madrid

**Año:** 1935

**Función:** Edificio deportivo

**Tipo estructural:** Lámina cilíndrica de hormigón – 8 ~ 14 cm de espesor

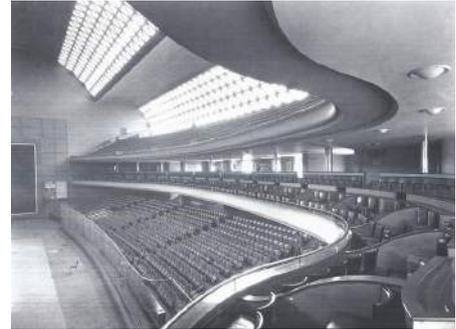


FIG. 2.21. INTERIOR FRONTÓN DE RECOLETOS

En concreto ésta, se trata de la construcción de mayor de láminas cilíndricas de su época, como puede verse en la comparativa siguiente. (FIG.2.22)

Por otra parte, cabe destacar que Torroja realizó un modelo a escala del proyecto, simulando las cargas sobre el mismo y las condiciones de apoyo del proyecto real. Este proceso se realizó a través de gatos hidráulicos, bielas y otros instrumentos; los resultados fueron medidos por medio de agujas y plomadas. (FIG.2.23.)

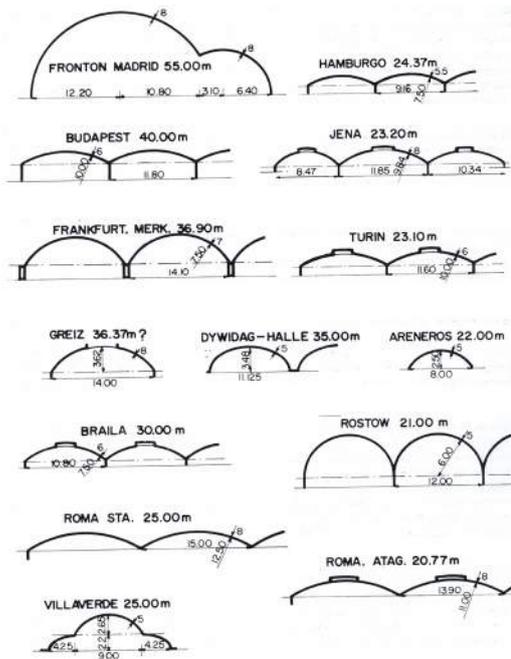


FIG. 2.22. LÁMINAS CONTEMPORÁNEAS

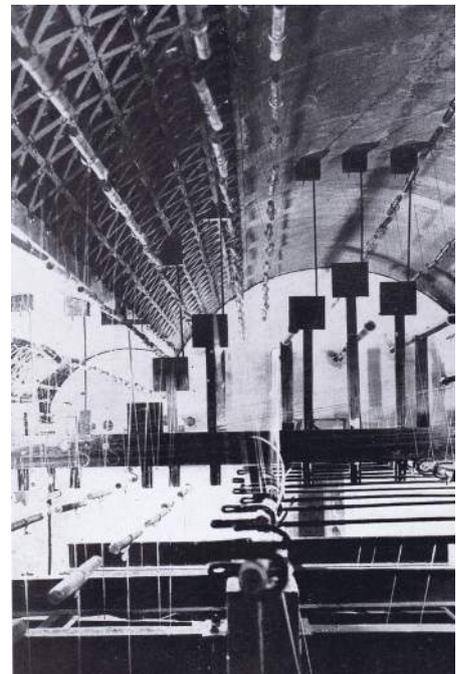


FIG. 2.23. MODELO DE ENSAYO

El proyecto, sufrió grandes deterioros durante la Guerra Civil. Torroja, elaboró un proyecto para repararlo, mediante unos nervios que actuaban como refuerzos en las láminas. No obstante, cuando se estaban colocando las cimbras, la cubierta se desplomó de forma irreversible. (FIG.2.24. - FIG.2.25.)

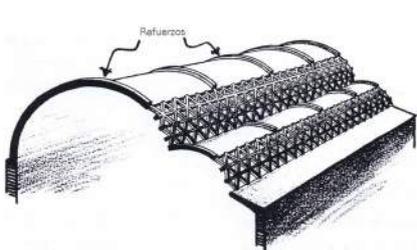


FIG. 2.24. REFUERZOS PROYECTADOS

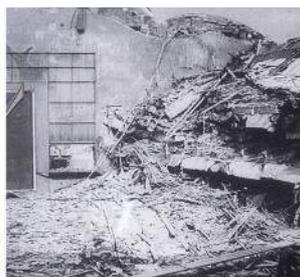


FIG. 2.25. DESPLOME DE LA CÚPULA



### Comportamiento estructural: problemas y soluciones

En cuanto a la respuesta estructural, la cubierta se comporta como una viga recta, con la sección que define la directriz de la lámina. Estas tienen una luz de 55 metros y apoyan en los muros paralelos al cierre del frontón, apenas transmitiendo esfuerzos a los muros laterales, paralelos a la directriz de las láminas cilíndricas de hormigón.

Las generatrices de borde están sujetas al muro en su punto medio; para permitir los desplazamientos horizontales de la cubierta por efectos térmicos, en el resto de la longitud de apoyo de las generatrices de borde, las láminas se encuentran articuladas sobre pequeñas bielas que permiten los desplazamientos horizontales de las mismas. (FIG.2.30.)

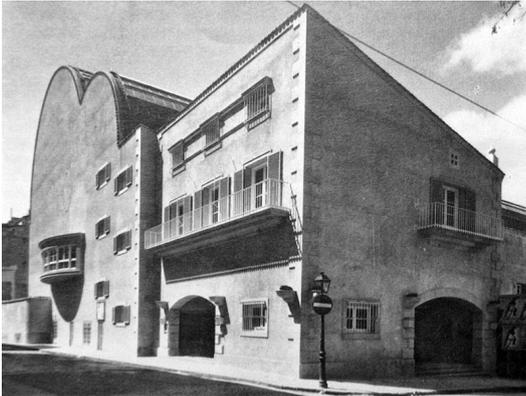


FIG. 2.30. MUROS DE APOYO

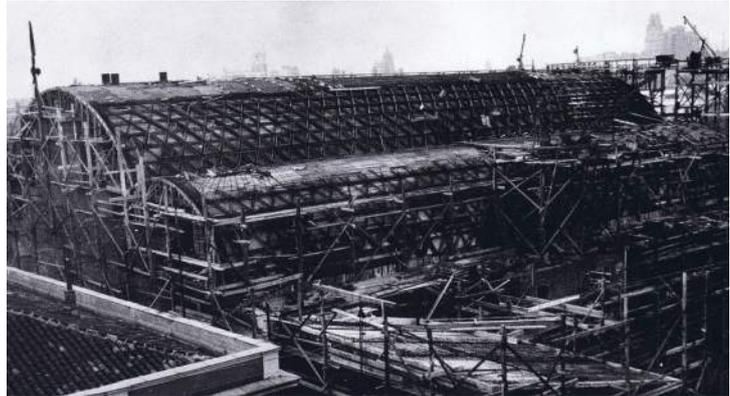


FIG. 31. CONSTRUCCIÓN DE LOS LUCERNARIOS

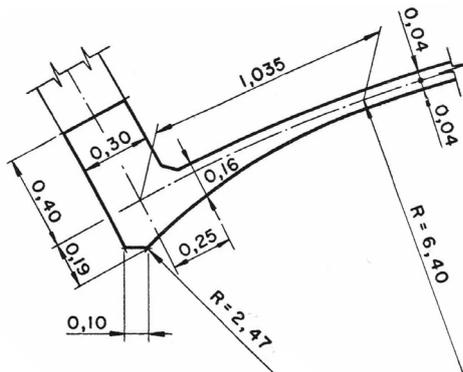


FIG. 2.32. PERFIL EN GAVIOTA

La innovación estructural reside, además del uso de las láminas cilíndricas, en la ausencia de la viga de descarga en la intersección de los dos lóbulos cilíndricos. El perfil en gaviota exigió introducir un cordón o tirante longitudinal embebido en el hormigón, formado por 16 cuadrados de 50 mm, calculados para no superar una tensión de trabajo de  $9 \text{ kg} / \text{mm}^2$ . (FIG.2.32.)

### Hipódromo de la Zarzuela

**Arquitectos:** Carlos Arniches y Martín Domínguez

**Ingeniero:** Eduardo Torroja

**Emplazamiento:** Madrid

**Año:** 1935 – Inauguración en 1941

**Función:** Edificio deportivo

**Tipo estructural:** hiperboloide de una hoja – 5 ~ 14 cm de espesor.

El proyecto llegó a la oficina técnica de Torroja tras el fallo a su favor en el concurso de anteproyectos organizado para construir el nuevo hipódromo, pues el anterior fue suprimido en una intervención urbanística para la ampliación de Madrid.

De este proyecto, Torroja también realizó un modelo a escala real, con la intención de estudiar el comportamiento del voladizo, aplicándole la carga a la que estaría sometida la estructura real, y hasta multiplicándola por 10. El modelo no llegó a colapsarse, aunque finalmente se desmontó para recuperar la armadura utilizada. (FIG.2.34.)

### Proyecto

El proyecto del hipódromo debía de disponer de una serie de espacios concretos: sala de apuestas, taquillas, graderío, acceso a la pista y galerías, entre otros. Al tratarse de un edificio singular, se buscó que la estructura fuera lo más estética posible. (FIG.2.35. - FIG.2.36.)

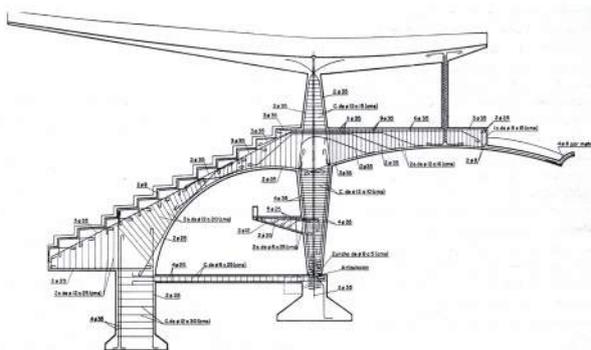
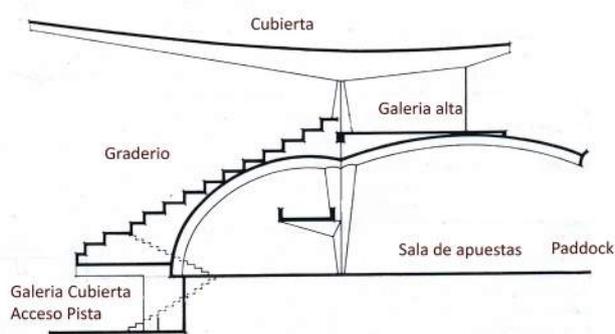


FIG. 2.35. SECCIÓN Y ARMADO



FIG. 2.33 HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA



FIG. 2.34. MODELO A ESCALA REAL DE UNA LÁMINA

### Estructura

Estructuralmente, las tribunas del Hipódromo forman un sistema de pórticos separados entre sí 5 metros, y vinculados longitudinalmente por bóvedas de hormigón armado de doble curvatura que albergan los espacios inferiores como la sala de apuestas. Esta solución curva, permitía lograr amplios espacios en la galería inferior y a la vez contribuía a una imagen de ligereza.



FIG. 2.36. PROCESO CONSTRUCTIVO

El graderío se sostiene, en su parte posterior, en el soporte principal o central, y en su parte inferior, en el soporte de mayor rigidez. La estabilidad del conjunto está garantizada por este soporte, que recibe la carga principal del graderío y que presenta una sección mayor que la primera propuesta de la estructura. El resto de cargas están bastante centradas sobre el pilar central, dando como resultado una estructura estable y airosa. (FIG.2.37.- FIG. 2.38)

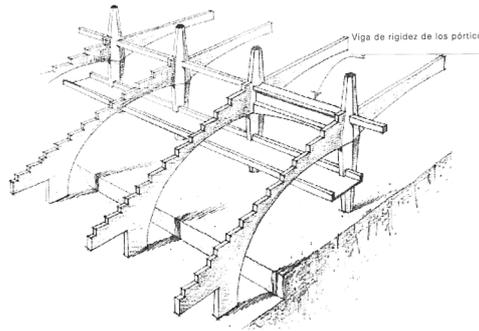


FIG. 2.37. VIGAS RIOSTRAS



FIG. 2.38 SOPORTE



FIG. 2.39. VOLADIZO SOBRE EL GRADERÍO



FIG. 2.40. PADOCK

Sin embargo, lo que realmente produce efecto de ingravidez en la estructura es la marquesina laminar sobre las gradas, con un imponente vuelo de 12,80 metros y 5 cm de espesor, llegando a alcanzar los 14 cm en otros puntos. Ésta, está formada por hiperboloides de una hoja de eje horizontal. En la parte posterior se halla anclada a un tirante, dispuesto en cada pórtico, cada 5 metros, sobre la cubierta de la sala de apuestas. Este elemento, junto con el peso de la propia galería superior, permite evitar el vuelco del voladizo. (FIG.2.39.- FIG. 2.40)

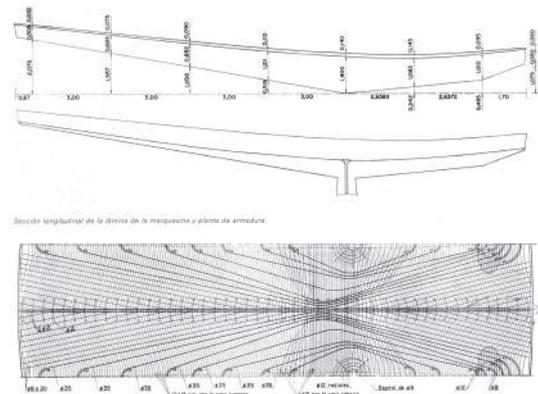


FIG. 2.42. GEOMETRIA Y ARMADO

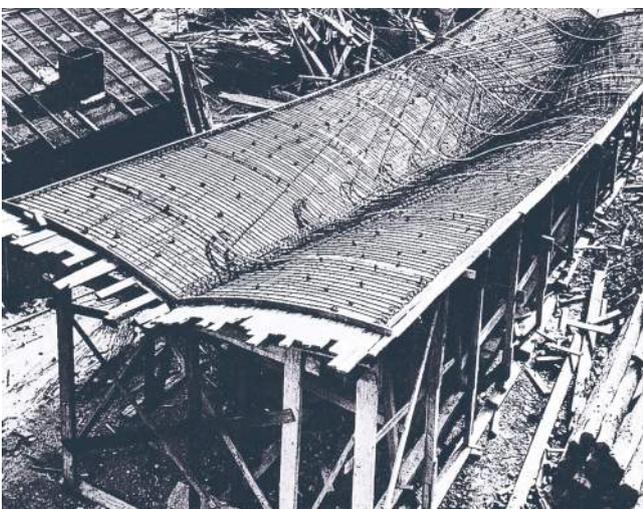


FIG. 2.41. ARMADO DE LA LÁMINA

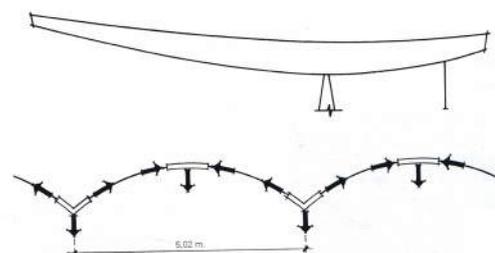


FIG. 2.43. COMPORTAMIENTO LÁMINAS

### Comportamiento estructural: problemas y soluciones

La estructura adoptada fue el resultado del estudio de un esquema estructural previamente propuesto. Este esquema estructural mostrado a continuación tenía una serie de limitaciones tras analizarse el comportamiento del mismo. (FIG.2.44.)

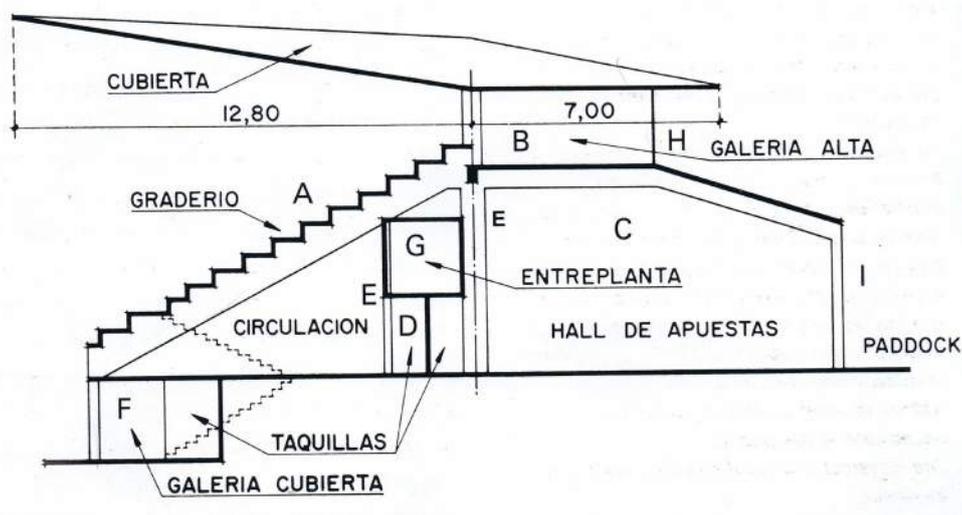


FIG. 2.44. PRIMERA PROPUESTA DE ESTRUCTURA

- El soporte H trabajaba a tracción, lo que permitía compensar parte de los esfuerzos que suponía la cubierta, con el peso del forjado inferior, sobre el hall.
- El soporte I trabajaba muy poco, por lo que podría llegar a suprimirse, incrementando la rigidez del nudo E, en el soporte central.
- El soporte F, por su ubicación, asumía sin problemas funcionales un incremento de su anchura.
- El soporte central, exigía cierta flexibilidad para resistir, sin grandes esfuerzos, las dilataciones térmicas y las contracciones por retracción. La solución pasaría por articular la base.
- La galería de servicio G, obligaba a reducir el cuelgue de la viga de la grada A, de modo que era necesaria cierta estabilidad lateral.

Además se incorpora entre los pórticos, una viga riostra que permitía reducir la altura del soporte central, de forma que respondía mejor a la libre dilatación y contracción del conjunto, así como al empuje de las bóvedas extremas.

### Iglesia de San Nicolás

**Arquitecto:** Gonzalo Echegaray

**Ingenieros:** Jaime Nadal y Eduardo Torroja

**Emplazamiento:** Gandía (Valencia)

**Año:** 1961

**Función:** Edificio religioso

**Tipo estructural:** Láminas plegadas – 9 cm de espesor

Es la última construcción de Torroja antes de su muerte ese mismo año. Se trata de un espacio de gran calidad arquitectónica, ya que, desde el interior, parece que tanto la estructura del cerramiento como la de la cubierta, están suspendidas en el aire, ninguno de los laterales llega hasta el suelo. Esta sensación de ingravidez se ve acentuada por el ventanal horizontal corrido entre los extremos superiores de las láminas plegadas, iluminando de forma natural la nave. (FIG.2.46.)



FIG. 2.45. IGLESIA SAN NICOLÁS

### Proyecto

El proyecto consistía en la Iglesia de San Nicolás, tras haber sido destruida la anterior en la Guerra Civil, siendo su ubicación el extremo del puerto del Grau de Gandía. Como todas las tipologías religiosas, debía de disponer de una serie de espacios, con unas determinadas características funcionales. Principalmente estas consistían en un espacio central, donde se realiza el culto y que dispone de una altura libre considerable, el altar, las capillas, de menor altura que la nave central...



FIG. 2.46. INTERIOR Y EXTERIOR DE LA IGLESIA SAN NICOLÁS

### Estructura

La iglesia presenta una planta ligeramente trapezoidal de 30 x 15 metros y unos 13,5 metros de altura en la nave central. La estructura de la cubierta y los cerramientos de la misma, están constituidos por dos grandes láminas plegadas, que apoyan en los muros hastiales de la fachada principal y el altar, es decir, en los testeros. (FIG.2.47. - FIG.2.48.)

La resolución de la rigidización de esas vigas muro que son los cerramientos, se resuelven de forma distinta en cada una de las fachadas norte y sur. Mientras que la lámina plegada de la fachada norte es de sección Z, para generar la cubierta de los claustros; la lámina de la fachada sur es de sección en L invertida, quedando interrumpida a la altura de 3 metros para albergar unas capillas laterales. Ambas láminas trabajan independientemente, pues no existe ninguna conexión en cubierta.

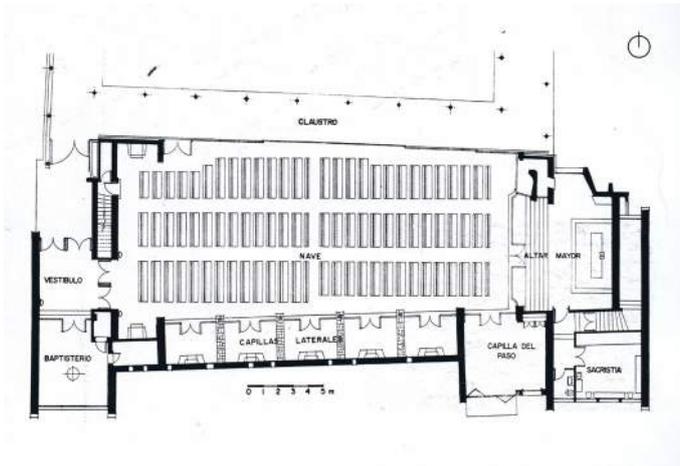


FIG. 2.47. PLANTA DE DISTRIBUCIÓN

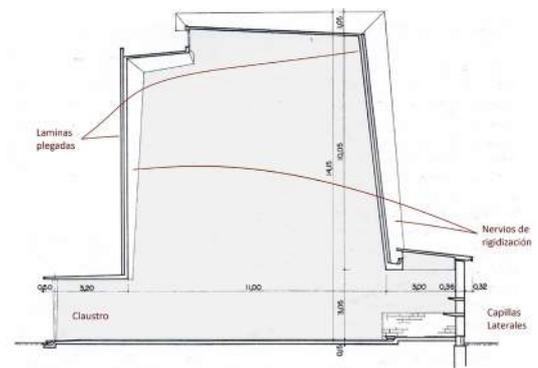


FIG. 2.48. SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA IGLESIA

### Comportamiento estructural: problemas y soluciones

Sin embargo, analizando el comportamiento de la lámina sur en forma de L invertida (la fachada norte es similar en comportamiento y solución estructural propuesta) se puede apreciar que la resultante de su peso propio, no pasa por el centro de los esfuerzos cortantes, dando lugar a esfuerzos de torsión que la sección abierta y delgada de la lámina no puede resistir.

Para eliminar las torsiones en las láminas plegadas, se introducen unas fuerzas de compresión  $F$  mediante un pretensado alojado en las cubiertas de las capillas laterales, originando unos momentos torsores que anulaban los producidos por su peso propio ( $S_3$ ). (FIG.2.49.)

La viga – Pared de la fachada sur, sometida entonces a dos sistemas de fuerzas,  $F$  y  $P$ , experimentaba flexiones en los planos vertical y horizontal. Para absorber y resistir dichas flexiones, se disponen de dos sistemas de pretensado ( $S_1$  y  $S_2$ ) y se colocan unos nervios o costillas exteriores, quedando la pared y la cubierta libres de tracciones. (FIG.2.49.)

En definitiva, las fuerzas de desviación introducidas a través del pretensado consiguen comprimir longitudinalmente las láminas, compensando los esfuerzos de flexión y cortante generados por sus pesos propios.

Por último, para evitar fisuras por efectos térmicos, Torroja permitió el desplazamiento longitudinal de las vigas pared sobre uno de los hastiales.

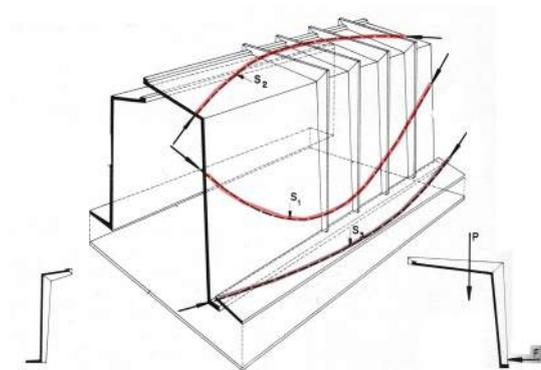
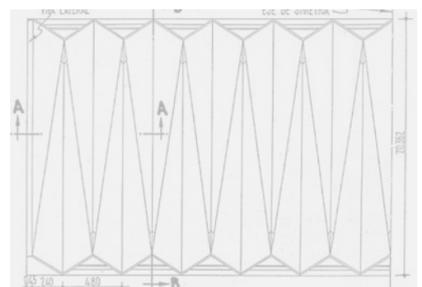


FIG. 2.49. AXONOMETRÍA - ESFUERZOS

Como puede apreciarse a través del análisis de estas conocidas obras de Torroja, en ocasiones, es difícil saber si se trata de un arquitecto apasionado por las estructuras o un ingeniero ilusionado por la creatividad espacial. También, es marcado el carácter vivo de sus estructuras, así como es posible distinguir la adecuación del material y su proceso de ejecución al fenómeno tensional. Al mismo tiempo es observable el manejo de la geometría y las formas que, no sólo genera espacios de elevada calidad arquitectónica, sino responde a comportamientos estructurales determinados.



### 3. Láminas plegadas de hormigón



### 3.1. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El arquitecto español Félix Candela, define las láminas plegadas como *“el grupo de estructuras laminares que están sometidas a un régimen mixto de esfuerzos de membrana y flexión”*. Por otra parte, otro arquitecto español, José Ramón Azpiazu, dice de ellas *“conviene que sean desarrollables y que tengan inercia variable, comportándose muy bien ante los efectos sísmicos y del viento”*. Se trata, por tanto, de un tipo estructural que permite salvar grandes luces pese a su escaso espesor. Su forma, gracias a las plegaduras, le proporciona una gran rigidez transversal.

La arista que se crea en el pliegue adquiere una rigidez enorme a compresión, siendo los planos que la forman los que impiden que esta pandee. El comportamiento longitudinal de estas, es como el de una viga apoyada en los extremos, mientras que transversalmente, con menor rigidez, funciona como una viga continua apoyada en los pliegues. El mecanismo resistente que gobierna estas estructuras radica en la forma como solución estructural, como se ha comentado previamente en apartados anteriores, reflejando la virtud de estas estructuras para salvar unas luces de dimensiones considerables con delgados espesores, en ausencia de apoyos intermedios. Puede explicarse mediante el siguiente esquema. (FIG.3.1)

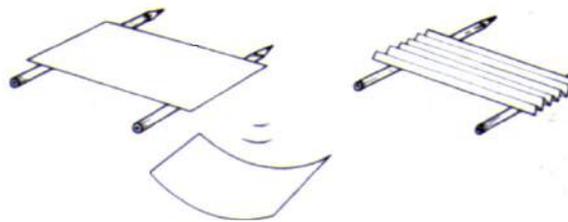


FIG. 3.1. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Cabe la diferenciación de las láminas plegadas de hormigón de las cáscaras realizadas a partir del mismo material, las primeras tienen carácter plano, por lo que no gozan de las ventajas que puede aportar la curvatura en el comportamiento estructural de la forma, así pues ¡ las cáscaras funcionan como una membrana, trabajando únicamente a compresión, mientras que las láminas plegadas están sometidas a un régimen mixto de esfuerzos de compresión y flexión, tal y como se ha indicado al principio del capítulo. Por lo tanto, las secciones se han de dimensionar para resistir este tipo de esfuerzos. (FIG.3.2. - FIG.3.3)



FIG. 3.2. RESTAURANTE LOS MANANTIALES, FELIX CANDELA, 1957 - CÁSCARAS



FIG. 3.3. MIAMI MARINE STADIUM, HILARIO CANDELA, 1963 - LÁMINAS PLEGADAS

### 3.2. GEOMETRÍAS Y EXPRESIVIDAD

Dentro de las plegaduras podemos realizar diversas clasificaciones atendiendo a características como la geometría, labor estructural o espacialidad. Una primera clasificación podrían ser: las plegaduras prismáticas, con pliegues paralelos entre sí o bien las plegaduras piramidales, en las que los pliegues convergen en un punto. (FIG.3.4)

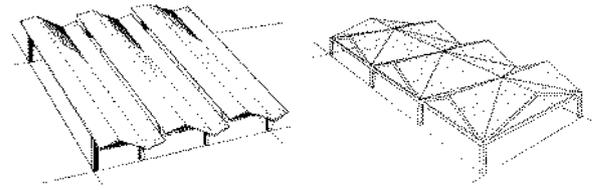
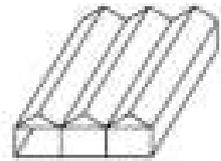


FIG. 3.4. PLEGADURAS PRISMÁTICAS Y PIRAMIDALES

Otras clasificaciones, atendiendo a la relación entre la forma y la geometría y el comportamiento estructural podría ser la siguiente:

**Láminas plegadas de superficie:** Dentro de este grupo de láminas utilizadas en una única superficie, por lo general de cubrición, encontramos:

*Formas afiladas o con conicidad:* se trata de la forma más simple de plegadura, destacan por la variación del canto, lo que las hace idóneas para elementos en voladizo. Los pliegues suelen ser paralelos entre sí. (FIG.3.5)



*Formas de pliegues contrapuestos:* Surge como evolución del tipo anterior, en gran medida, a partir del problema del desagüe de la cubierta. En este caso, los pliegues no son paralelos entre sí. (FIG.3.6)



FIG. 3.5 CANODROMO DE MADRID. ESPAÑA

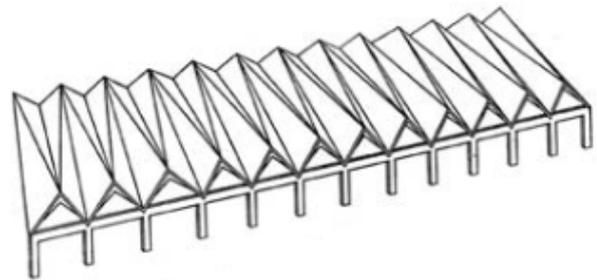


FIG. 3.6. UNIVERSIDAD LABORAL DE TARRAGONA, 1956

**Láminas formando un sistema aporticado:** las láminas ya no configuran una superficie de cubrición o soporte, sino que esta se extiende en otra dirección diferente a la primera, es decir, formando un pórtico. Este sistema que también se conoce como sistema de plegaduras aporticadas y se caracteriza por la continuidad de las plegaduras entre la cubrición y el cerramiento, proporciona al conjunto estructural gran rigidez. El sistema de pliegues puede ser de variada complejidad. (FIG.3.7 - FIG.3.8.)



FIG. 3.7. HAMPTON COLISEO, 1968



FIG. 3.8. HAMPTON COLISEO, 1968

**Láminas formando un sistema abovedado:** este sistema está configurado a partir de pliegues cóncavo-convexos, de base poliédrica, de superficie desarrollable.

**Láminas formando un sistema espacial:** en este sistema, los pliegues están distribuidos espacialmente.

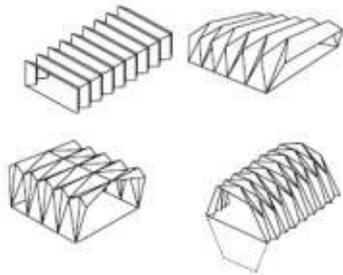


FIG. 3.9. SISTEMA ABOVEDADO

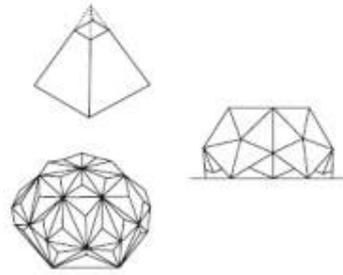


FIG. 3.10. SISTEMA ESPACIAL

Todas estas variadas geometrías, desde el punto de estético y artístico, se utilizaron internacionalmente, como signos de modernidad y distinción permitidos por el desarrollo del hormigón armado, resaltando la parte estructural en la propuesta proyectual. La lámina plegada se impone y marca la transición del estatismo al dinamismo propio de una estética estructuralista y sincera.



FIG. 3.11. SILO DE CARBON, TORROJA



FIG. 3.12. SEDE AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, DETROIT

Sin embargo, en muchos casos, se trataba de las propias empresas que se dedicaban a comercializar materiales destinados a obras de ingeniería y arquitectura las que emplearon diseños de este tipo en sus sedes más representativas, como publicidad.

### 3.3. EL USO DE LAS LÁMINAS PLEGADAS

#### Aparición

La utilización de este tipo de elementos se inicia en Europa en los años 20; no obstante, su uso no se centra en el de elementos de cubrición sino de depósitos, en los que se utilizaban placas plegadas en V. Posteriormente, su utilización se extendió a Rusia, empleándose en cubiertas, depósitos y otras estructuras. (FIG.3.13)

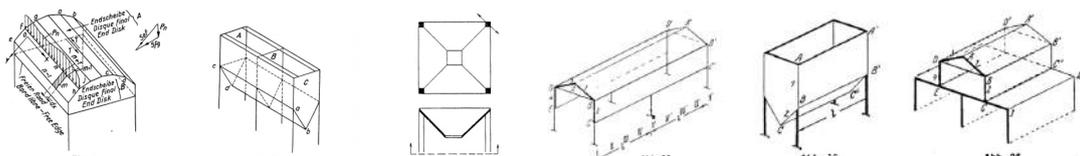


FIG. 3.13. IGLESIA DE GUADALUPE

En los años 50, comenzó a ser frecuente su uso en Estados Unidos, aunque se introdujeran décadas antes en dicho país. Se trataba de obras de pequeña envergadura y escasa dimensión de cubrición. Sin duda, no se puede dejar de citar a uno de los máximos representantes del tipo en ese país, el ingeniero Milo S. Ketchum, quien además de proyectar estructuras de láminas plegadas, se dedicó a investigar sobre el cálculo de las mismas. (FIG.3.14 - FIG. 3.15.)



FIG. 3.14. LOSA PLEGADA H.W.MOORE EQUIPMENT CO, EEUU



FIG. 3.15. CAFETERIA CON LÁMINAS PLEGADAS

Las primeras soluciones de láminas plegadas tienen un comportamiento similar al de las láminas curvadas, en las que la intención pasa por aumentar el brazo mecánico de la estructura, es decir, salvar una mayor luz sin aumentar mucho el peso. Pero poco a poco, comenzaron a utilizarse con mayor frecuencia, salvando luces mayores y constituyendo un recurso expresivo, más allá de la solución constructiva que representaba. Por otra parte, eran evidentes las ventajas que presentaba respecto a otros materiales de cubierta en cuanto a protección contra incendios se refería.

A partir de la década de los 50, las láminas comenzaron a beneficiarse de las técnicas del pretensado y postensado. Estas técnicas que reducían las deformaciones de las piezas, dieron lugar a un aumento de las luces que podían cubrirse con la misma sección y geometría.

Los usos más frecuentes de este tipo de estructuras fueron siempre aquellos caracterizados por la necesidad de espacios diáfanos, de altura considerable y grandes dimensiones a cubrir, tales como naves industriales, polideportivos, hangares... No obstante, en algunas ocasiones, las láminas plegadas se utilizaron también como soportes.

### **Prefabricación**

La prefabricación de este tipo de estructuras reside en la técnica del pretensado, que se estudiará más adelante, que hizo posible el montaje de las distintas placas que configuran las estructuras, cosidas posteriormente mediante cables, pues las juntas de hormigonado funcionaban correctamente.

Dicha prefabricación provocó cierta influencia en el diseño de las láminas, dando lugar a múltiples variantes geométricas. La utilización de un “módulo” favorecía dicha prefabricación, así como reducía costes de encofrados. Sin embargo, el montaje de piezas prefabricadas hacía que se perdiese la idea del monolitismo de una lámina.

### **Caída en desuso**

A pesar de tratarse de un recurso para la solución de cubiertas de gran durabilidad, pudiendo conseguirse también grandes luces con hormigón armado, líneas nítidas y estéticas de relevante expresividad para muchos arquitectos, las láminas plegadas de hormigón cayeron en desuso a partir de 1970.

El ocaso de este tipo de estructuras, tras dos décadas de trabajo y experimentación, tanto sobre su cálculo como sobre su diseño, se debe a una pérdida de competitividad por el encarecimiento de los costos de la construcción. Por otra parte, estaba relacionado con el sentimiento, por una parte de la comunidad de arquitectos e ingenieros, del cierto agotamiento de las posibilidades creativas y expresivas de este tipo de estructuras.

### 3.3.1. EJEMPLOS LÁMINAS PLEGADAS EN ESPAÑA

A continuación se aportan algunos ejemplos que tuvieron cierta repercusión en el panorama de la construcción de láminas plegadas de hormigón armado en España, pues su diseño estaba ligado al comportamiento estructural de los proyectos. Sin embargo, de entre todos los profesionales que incorporaron este tipo estructural, cabe destacar a José Ramón Azpiazu. José Ramón Azpiazu es uno de los arquitectos españoles más reconocidos en la utilización de estructuras plegadas, tanto elemento de cubrición como de soporte.

Otro representante, aunque en menor medida es Miguel Fisac, que se sirvió del comportamiento estructural de las láminas plegadas para usarlas como marquesina u otros elementos secundarios. Una de las preocupaciones de este arquitecto era la expresión estética de sus proyectos y de las soluciones estructurales.

#### Las láminas como elemento secundario

Miguel Fisac. Laboratorios Alter, Madrid. 1961



FIG. 3.16 LABORATORIOS ALTER, 1961

Se trata de un edificio en el que Miguel Fisac emplea las láminas como un recurso complementario, como si de un elemento expresivo se tratara. La lámina se concibe como un elemento de pequeña dimensión que recibe al visitante y cuya concepción cambia en función de la iluminación que recibe. (FIG.3.16)

En dicho elemento, participan 8 pliegues triangulares continuos cubriendo un vano de unos 5,20 metros, apoyando en dos vigas y con un vuelo por ambos extremos, delantero y trasero, de 3 metros. El canto se resuelve en 60 centímetros.

Miguel Fisac. Centro de información y documentación CSIC, Madrid. 1962

Al contrario que en el edificio anterior, Fisac coloca en este caso la pequeña lámina plegada transversalmente, apoyada en dos ménsulas de hormigón rectangulares, de nuevo para resolver el acceso al edificio.

Las ménsulas, con el mismo espesor que la lámina, de 6 centímetros, forman un conjunto de extraordinaria rigidez. En este proyecto, los distintos pliegues en V no tienen la misma dimensión, no son simétricos, sino que la lámina plegada asciende hacia su borde libre, en el inicio del acceso. (FIG.3.17)

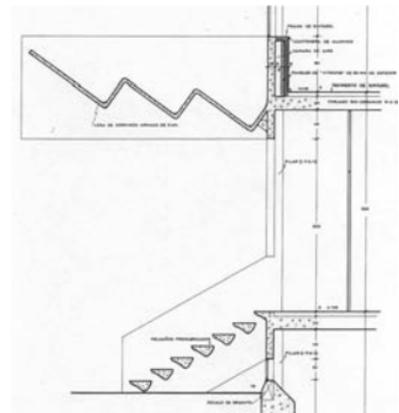


FIG. 3.17. MARQUESINA DE ACCESO AL CSIC, 1962

#### Las láminas como elemento soporte

José Ramón Azpiazu. Iglesia de Guadalupe, Madrid. 1962-63

En este proyecto religioso, el arquitecto decide apoyar la cubierta, resuelta por medio de unos paraboloides hiperbólicos, en una serie de diedros, unas formas plegadas que forman nichos en el interior. El resultado es un conjunto de gran rigidez estructural e interesante espacialmente. (FIG.3.18)

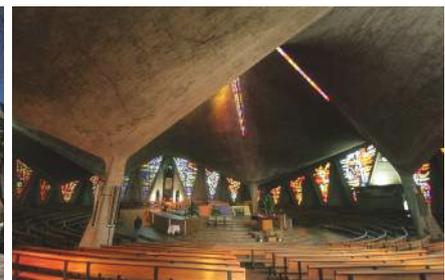


FIG. 3.18. IGLESIA DE GUADALUPE, 1962

Joaquín Vaquero Palacios. Central hidráulica de Proaza, Asturias. 1964-65

FIG. 3.19. FACHADA DE CENTRAL HIDRÁULICA, 1964

Con la intención de dar una apariencia formal facetada y plegada a la fachada, Valero Palacios se sirve, en principio, de láminas no estructurales, que funcionan como paneles de cerramiento. La función resistente queda a cargo de una estructura de pórticos rígidos de hormigón armado. (FIG.3.19.)

No obstante, en una parte de la fachada, las placas de recubrimiento que siguen un patrón de pliegues contrapuestos, sirven también de muro de contención de parte en la parte de la ladera de la montaña, desarrollando en este caso, una función estructural.

José Ramón Azpiazu. Instituto de enseñanza Secundaria Sorolla, Valencia. 1969

En este proyecto se aprecia un alejamiento de las formas tradicionales a través del uso de láminas plegadas como elemento estructural en fachada y como elemento de cubrición en el acceso y otros espacios principales del centro de enseñanza.

En concreto, la particularidad de las láminas empleadas en el edificio, es la disminución de la altura y forma de los pliegues desde un extremo hasta otro, pudiendo tener un borde resuelto por medio de una línea recta, sin quiebras. Sin embargo, en el proyecto encontramos dos tipos de soluciones.

En primer lugar, resuelve los porches del instituto así como los porches de entrada y garaje a través de una forma combinada con otra del mismo tipo pero de forma contrapuesta.

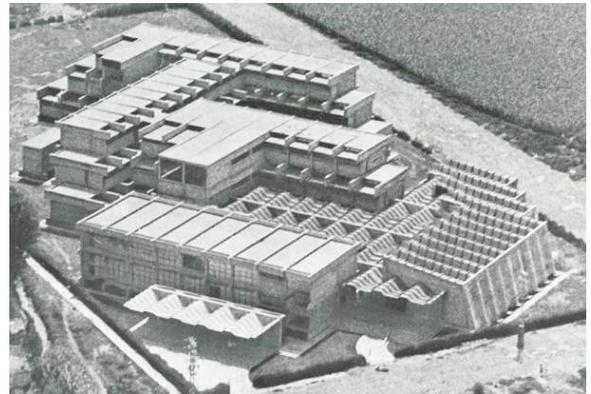


FIG. 3.20. VISTA DEL INSTITUTO SOROLLA, 1969

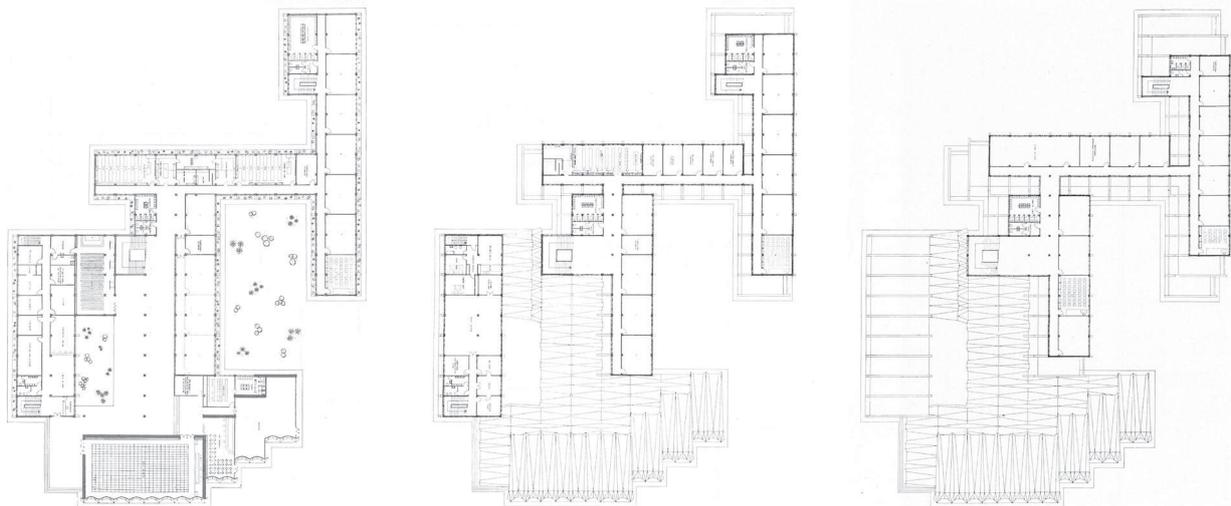


FIG. 3.21. PLANTAS DE DISTRIBUCIÓN DEL INSTITUTO SOROLLA. LÁMINAS COMO SOPORTE Y CUBIERTA

En cambio para el salón de actos y el gimnasio, las láminas son ligeramente modificadas para cubrir una luz de 12 metros. En este caso, el sistema se podría describir como un pórtico laminar continuo, pues emplea una lámina continua que resuelve techo y pared, rigidizada por medio de múltiples plegamientos menores. El apoyo se realiza sobre un muro ciego dotado de un elemento de cobre que le sirve como articulación. Para asegurar la rigidez en el sentido transversal, utiliza unos nervios, dispuestos en el exterior. (FIG.3.22 - FIG. 3.23.)

Como se puede apreciar en esta obra y en algunas anteriores, Azpiazu es uno de los principales ejemplos de arquitectos que utilizan las estructuras plegadas en España, realizando obras de cierta notoriedad empleando dicho recurso.



FIG. 3.22. INTERIOR DEL INSTITUTO SOROLLA

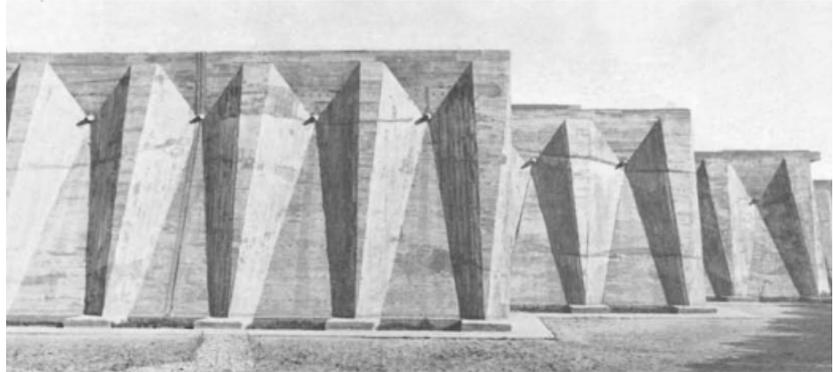


FIG. 3.23. EXTERIOR DEL INSTITUTO SOROLLA

### Las láminas como elemento de cubrición

José Ramón Azpiazu. Canódromo de Madrid, 1962

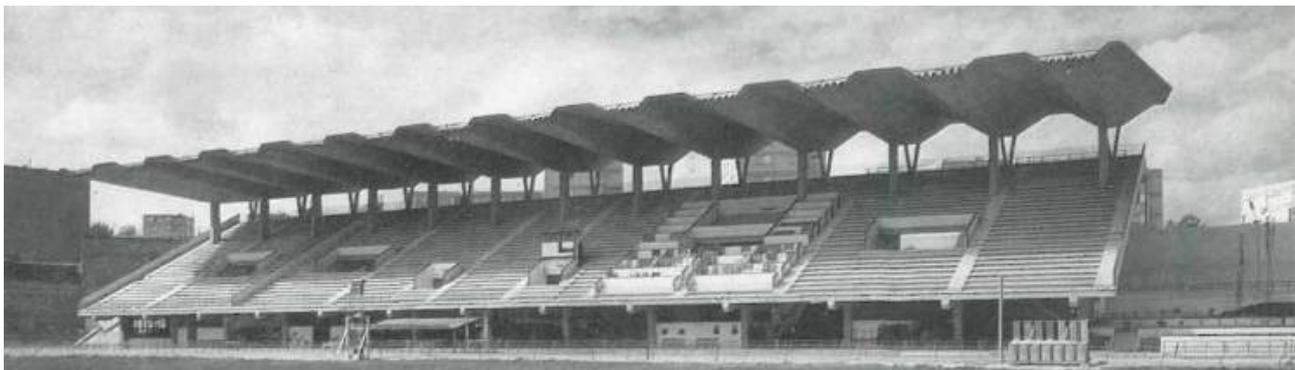


FIG. 3.24. CANÓDROMO DE MADRID, 1962

La estructura de tribunas del Canódromo de Madrid es probablemente de las obras más espectaculares realizadas en España con este sistema, pues salva 18 metros por medio de un voladizo, utilizando pórticos colocados cada 8 metros, por medio de una lámina de formas contrapuestas de 6 centímetros de espesor.

En un principio, no se pretendió realizar la cubrición a base de una lámina plegada sino a través de una cubierta en forma de paraboloides hiperbólicos. Este tipo de estructura permitía cierta economía de construcción pues se conseguía el comportamiento como membrana, es decir, el hormigón solo trabajaba a compresión.

No obstante, a pesar de las ventajas de comportamiento de dicha solución, se precisaba de un zuncho que permitiese corregir la deformación de las esquinas de los paraboloides y conseguir una cornisa recta. Esto ampliaba el plazo de ejecución de la estructura de forma que el arquitecto la desechó.



FIG. 3.25. SOPORTES Y ESTRUCTURA DE LAS GRADAS

Azpiazu opta entonces por una lámina plegada no desarrollable cuya rigidez e indeformabilidad se deben a la combinación contrapuesta de dos formas, que a su vez permite disminuir el canto conforme hacia el borde libre. En esta solución, la estructura trabaja a flexión.

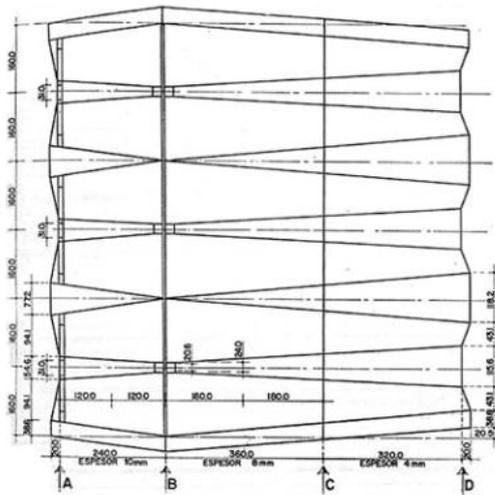


FIG. 3.26. CUBIERTA DEL CANÓDROMO

La estructura se apoya en una línea de soportes. Por otra parte, evitar el vuelco de la estructura en voladizo, utiliza una serie de tirantes anclados en la parte posterior del borde del graderío.

De la misma forma que ocurría en la estructura del Instituto, fueron necesarios nervios transversales de rigidización en el extradós, así como un plano vertical en la unión entre láminas de conicidad opuesta ubicado en la línea de soportes.

### 3.4 Contexto actual

*“Algún día en el futuro, el costo del acero estructural subirá por encima de lo previsible y alguien descubrirá la utilidad y belleza de las estructuras laminares”*

De esta cita de Milo S. Ketchum se refleja que todo recurso arquitectónico puede volver proyectarse por diversas razones. Y es que desde principios de siglo puede apreciarse un repunte en el uso de este tipo estructural; no obstante, el interés parece haber declinado hacia un ámbito meramente formal. En los ejemplos más recientes, se ha perdido la relación existente entre la forma y el comportamiento estructural que tanto caracterizó el uso de este tipo de estructuras entre 1950 y 1970.

Algunos ejemplos recientes que incorporan láminas plegadas de hormigón armado dándoles un uso estructural son los que se mencionan a continuación. Por ejemplo, la Terminal Internacional de pasajeros de Yokohama, de FOA Architects, en las que se utilizan vigas de hormigón armado que posteriormente se recubren con unas chapas de acero para darle un carácter tecnológico. (FIG.3.27. - FIG 3.28.)



FIG. 3.27. INTERIOR TERMINAL DE YOKOHAMA



FIG. 3.28. LÁMINA PLEGADA DE LA TERMINAL DE YOKOHAMA

Un ejemplo de lámina plegada como sistema aporticado es el Centro de entrenamiento deportivo Mülimatt de Livio Vacchini en las que se sirve de las láminas plegadas para resolver los soportes del pabellón y la cubierta del mismo. En este puede destacarse la ventaja que supone la prefabricación para la ejecución de la estructura. (FIG.3.29. - FIG 3.32.)



FIG. 3.29. PREFABRICADO



FIG. 3.30. FACHADA CON LÁMINAS COMO SOPORTE



FIG. 3.31. VISTA INTERIOR DEL CENTRO

Un último ejemplo es la Iglesia de St Josef en Neub-Weckhoven del arquitecto Schaller y los ingenieros S. Polony y R. Kalmer. Esta se puede describir como “una evolución de la bóveda de plegadura”. (FIG.3.32 - FIG 3.34.)



FIG. 3.32 INTERIOR



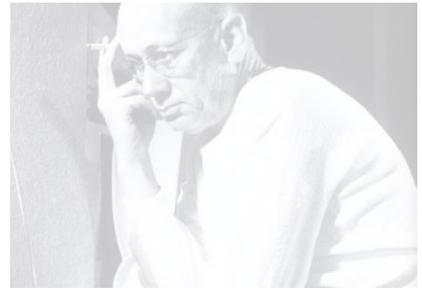
FIG. 3.33. INTERIOR DE LA IGLESIA



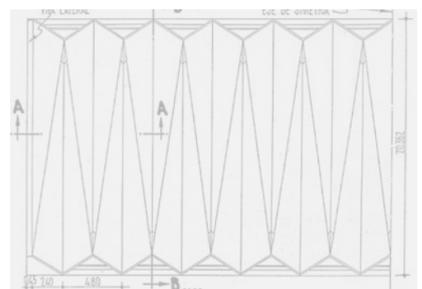
FIG. 3.34. VISTA EXTERIOR DEL CENTRO

Tal y como se ha visto en los dos últimos capítulos, es estrecha la relación entre el material, la forma y el comportamiento estructural, suponiendo una revolución la invención del hormigón armado y su utilización en las formas clásicas. Entre 1950 y 1970, el tipo estructural de las láminas plegadas de hormigón armado vivieron su mayor esplendor, que a principios de siglo XX parece recuperarse.

En el siguiente capítulo se analiza una obra de Eduardo Torroja, uno de los ingenieros que, junto al arquitecto Azpiazu utilizaron este tipo estructural.



#### 4. Cubierta de la cocina de la Universidad Laboral de Tarragona



## 4.1. LA UNIVERSIDAD LABORAL DE TARRAGONA

### 4.1.1. CONTEXTO Y ENTORNO

Las Universidades Laborales surgen a principios de 1950 en España donde, tras la Guerra Civil, se decidió crear centros con la intención de elevar el nivel cultural, a través de una cuidada formación profesional, técnica y humana, de las clases más desfavorecidas. Por lo tanto, se trataba de entidades educativas complejas formadas por un conjunto importante de instalaciones. Se diferencian así pues de las Escuelas de Artes y oficios o Escuelas profesionales, porque en esta nueva institución se pretendía impartir una formación universal, destacada por una universalidad de conocimientos y en la que se crearían los mejores técnicos.

Transcurridos unos 28 años, el servicio de las Universidades Laborales, sus bienes, derechos y acciones quedaban integrados en el Instituto Nacional de Enseñanzas Integradas, para unos 5 años después ser entregadas a las Administraciones Autonómicas al tiempo que se transfirieron las competencias educativas, diluyéndose así un sistema de cobertura educativa para las capas sociales menos favorecidas. Pero, además de su aportación a la educación, las Universidades Laborales han dejado una huella arquitectónica en la geografía española.

La Universidad Laboral de Tarragona fue una de las primeras en crearse (1956), junto con la de Sevilla y Córdoba, y un año después de la creación de la de Gijón. Ésta se encuentra a 7 kilómetros de Tarragona, situada a lo largo y ancho de unos amplios terrenos ubicados muy próximos al puerto y a la costa mediterránea. (FIG.4.1 - 4.2)



FIG. 4.1. SITUACIÓN DE LA UNIVERSIDAD LABORAL



FIG. 4.2. ENTORNO UNIVERSIDAD LABORAL. AÑO 1956

#### 4.1.2. EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

La Universidad Laboral de Tarragona fue encargada a distintos profesionales del mundo del diseño y la construcción, de forma que cada uno de ellos desarrollo una parte del proyecto. El complejo educativo se dividía en cuatro zonas: una zona de dormitorios y comedor, otra de aulas, otra de talleres y por último se encontraba la zona de artes escénicas y capilla. El proyecto es obra de los arquitectos: Luis Peral Buesa, (Aulas y Urbanización), Manuel Sierra Nava (Talleres), Antonio Pujol Sevill (Teatro y Capilla) y Antonio de la Vega Martínez, (Comedores y residencias). (FIG.4.3. - 4.4.)

En particular, es la cubrición del pabellón destinado a las cocinas lo que resulta de interés desde el punto de vista estructural pero también del diseño. Fue uno de los primeros edificios de la Universidad que se llevaron a cabo, en 1956 hasta finalizar en 1959. En el diseño y cálculo de la cubierta, participó el grandioso ingeniero Eduardo Torroja Miret acompañándole también en el cálculo los ingenieros Florencio Del Pozo y Alfredo Páez.



FIG. 4.3. EMPLAZAMIENTO UNIVERSIDAD LABORAL



FIG. 4.4. EMPLAZAMIENTO CERCANO UNIVERSIDAD LABORAL

Entre todas las instalaciones, existe una amplia plaza, que formaba parte de las instalaciones deportivas. Distintas dependencias se concentran en torno a dicha plaza: colegios a este y oeste, a ambos lados de la plaza mencionada; aulas especiales en el sur y la zona de cocinas y comedor en la parte norte, formado por un conjunto de edificios caracterizados por su simetría. (FIG.4.5.)

El pabellón de cocinas, de planta rectangular, se erige sobre una plataforma elevada. Los flancos del mismo, se resuelven por medio de dos muros de piedra dorada tarraconense, extraída de las canteras Mèdol, del mismo tipo que emplearon los fundadores romanos de la ciudad de Tarragona. Por otra parte, el patio inglés, detrás de la cocina, en la zona de almacén, proporcionaba luz y ventilación a la lavandería de tipo industrial y a los talleres de costura que había debajo. Este patio se conocía como patio de servicio, y se hallaba cerrado por el antiguo edificio de residencia del servicio; la zona delantera se conocía como patio de oficio. (FIG.4.6.)



FIG. 4.5. PABELLÓN DE COCINAS



FIG. 4.6. MATERIALIDAD - MURO TESTERO DEL PABELLÓN



FIG. 4.7. VISTA DEL PATIO DE SERVICIO

La cubrición del espacio se resuelve por medio de una cubierta plana, plegada, constituida por una serie de placas triangulares, cuya inclinación en cada sentido se va alternando. La cubierta está formada por varios módulos, cada uno de ellos formado por 4 faldones, que resultan de la distancia entre pilares. En la fachada perteneciente al patio de oficio se pueden apreciar 12 elementos, mientras que en la fachada trasera, la del patio de servicio, solo se muestran 11 elementos completos, y dos semimódulos que finalizan en su encuentro con el muro. (FIG.4.7.)

Los módulos, cuyos pliegues están formados por 4 faldones, dan lugar a las limatesas y limahoyas, que permiten resolver la necesidad indispensable de recogida y evacuación de aguas. En este aspecto, es donde puede apreciarse el diseño tanto estructural como espacial del proyecto: las limatesas son horizontales, pero no ortogonales a la fachada; por el contrario, las limahoyas tienen una determinada pendiente, lo que facilita la evacuación de aguas pluviales a un canalón de hormigón. Por otra parte, en el interior, como resultado de dichos pliegues, se obtiene un espacio de cubrición no plana, donde reside su riqueza espacial. (FIG.4.8. - 4.9.)



FIG. 4.8. INTERIOR DEL PABELLÓN DE COCINAS



FIG. 4.9. INTERIOR DEL PABELLÓN DE COCINAS (2)



FIG. 4.10. SISTEMA DE EVACUACIÓN DE HUMOS

En la Universidad Laboral de Tarragona, también puede destacarse la innovación tecnológica empleada, en este caso concreto, es posible citar la innovación que suponían los hornos y fogones presentados como islas bajo cubierta, dotados de su propia marquesina que aspiraba los humos, conduciéndolos a una cámara bajo el suelo, que los aspiraba hasta una chimenea exterior que se alojaba en el patio de servicio. De esta manera, se evita que ningún elemento de extracción de humos interfiera con las formas de la lámina plegada de cubierta, protagonista del espacio. (FIG.4.10.)

En cuanto a los materiales no estructurales empleados, podemos destacar los azulejos interiores, dispuestos con gran maestría y las piezas moldeadas de vidrio que, convenientemente armadas, cierran de una forma limpia y luminosa las fachadas del pabellón de las cocinas.

En el siguiente conjunto de fotografías que presentan un claro contraste, y en especial en la fotografía nocturna, puede apreciarse el efecto buscado por Torroja, lograr una imagen de ligereza en los paramentos de fachada bajo las formas delgadas y puntiadas que configuran la cubierta.(FIG.4.11. - 4.12.)



FIG. 4.11. FACHADA PATIO DE OFICIO - VISTA DIURNA



FIG. 4.12. FACHADA PATIO DE OFICIO - VISTA NOCTURNA

A continuación, se muestran fotografías en las que quedan reflejados los usos y materiales del pabellón. En las plantas, puede apreciarse el acceso al mismo desde el patio de servicio y el patio de oficina, así como la distribución interior del lavadero mecánico en planta inferior y la cocina en planta superior. Por su parte, en las secciones se puede apreciar el patio inglés excavado frente a las fachadas del edificio con la intención de proporcionar iluminación natural y ventilación a la planta que servía de lavadero. En los alzados puede verse reflejado el uso de la piedra, también empleada en los testeros del pabellón.

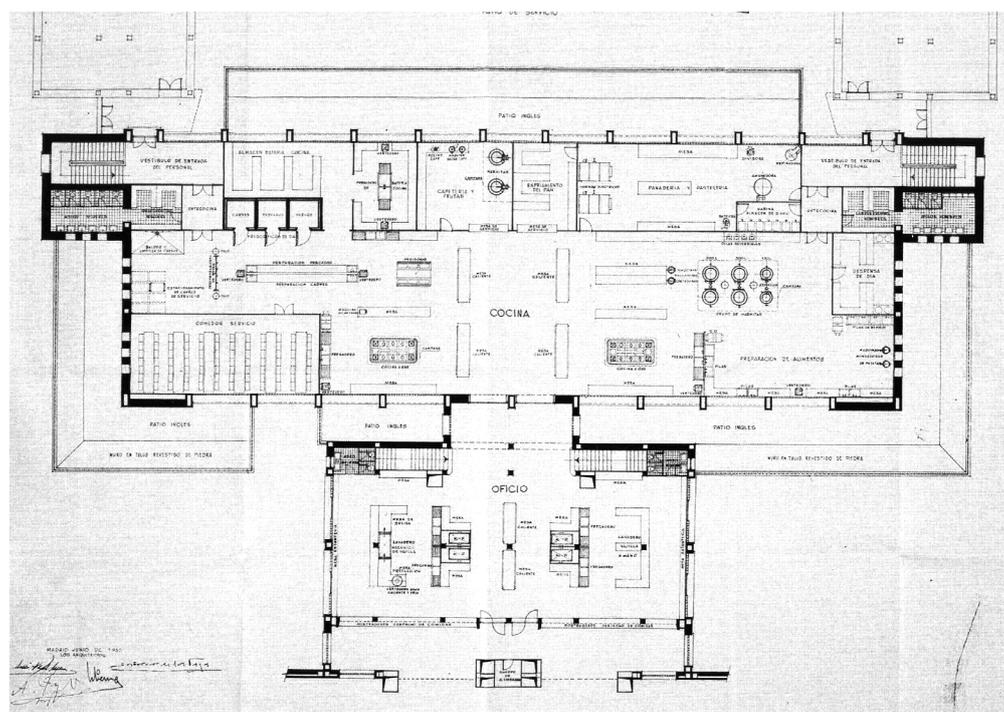
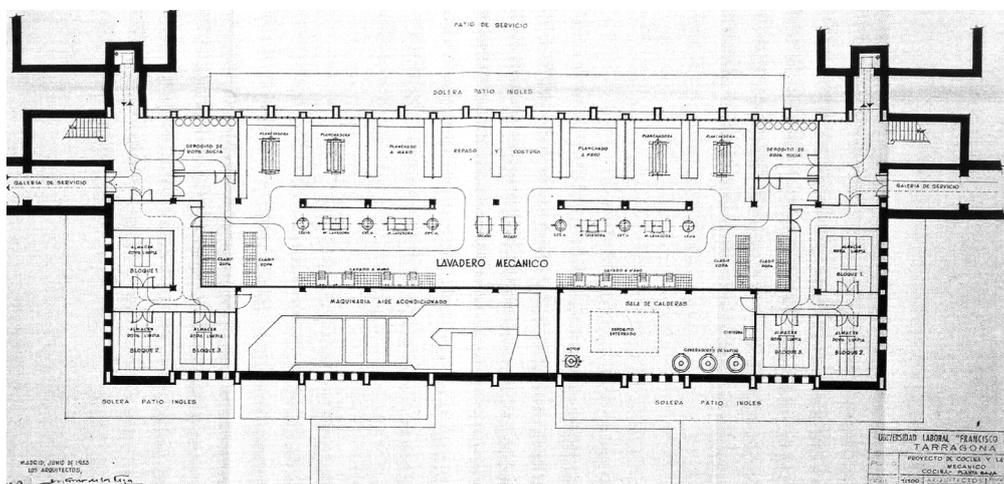


FIG. 4.13. PLANTAS DE DISTRIBUCIÓN