

## Láminas plegadas de hormigón armado. Realizaciones en España

Rafael García García

Las estructuras formadas por plegaduras de hormigón armado constituyen un conjunto de formas estructurales cuya vigencia en cuanto que formas construidas tuvo una duración que apenas superó las dos décadas. En efecto, si consideramos el conjunto de sus realizaciones efectivas, éstas se aprietan mayoritariamente entre comienzo de los años 50 y el final de los 60 del siglo XX. Singularmente puede certificarse su final con el Congreso de la Internacional Association of Shell Structures (IASS) celebrado en Viena en 1970. En él se presentaron las últimas y más grandes realizaciones con este sistema (Sala de Conferencias de la UNESCO, en París de Nervi, Breuer y Zehrfuss y un hangar para la Alleghany Airlines en el aeropuerto Logan de Boston, salvando este último una luz récord de 75,86 m con una lámina plegada simple). No obstante las esperanzas puestas en la geometría de plegaduras, en buena parte alentadas por dicho Congreso, apenas se hicieron ya obras destacables a partir de la fecha del mismo. Es llamativo, por otra parte, que aunque pueden considerarse un ciclo prácticamente cerrado apenas se han estudiado en su conjunto, existiendo muy contados trabajos al respecto. (Kramer 2005; García 2006a; García 2006b).<sup>1</sup>

En España el periodo de auge de láminas plegadas de hormigón estuvo representado por un relativamente limitado número de realizaciones que no obstante presentan gran interés en cuanto a su variedad y calidad arquitectónica. El profesor Cassinello hizo de este sistema estructural una presentación clara y sintética: «las láminas plegadas, definidas por planos

que se cortan, ofrecen indudables posibilidades de aplicación al ser capaces de dar un gran canto, pese a su poco espesor, y una gran rigidez transversal, gracias a su forma» (1974, 542) (fig. 1). Está también entre sus ventajas el hecho de que: «la dificultad de encofrar superficies de simple o doble curvatura se elimina con la solución de láminas plegadas. Y así, como superficies poliédricas inscritas en bóvedas o cúpulas pueden resolver gran número de estructuras



Figura 1  
Laboratorios Alter (Cassinello 1961)

de este tipo» (Cassinello 1974, 542). Desde el punto de vista del comportamiento estructural, F. Candela clasifica las estructuras prismáticas y losas dobladas como aquellas que, a diferencia el resto de estructuras laminares, están «sometidas a régimen mixto de esfuerzos de membrana y flexión» (Faber 1970, 23).

Siguiendo nuevamente a Cassinello, salvo para los casos más simples «se produce una tremenda complicación de su cálculo por el efecto que ejerce cada elemento unitario en sus vecinos, como consecuencia de la solidaridad del conjunto, originándose empujes y momentos flectores transversales, deformaciones notablemente distintas respecto de cada elemento unitario, posible pandeo de sus caras etc» (1961). En realidad, su cálculo exacto era conocido desde los años 30 del siglo pasado gracias a los trabajos iniciados por Ehlers en Alemania y proseguidos por Gruber, Craemer, Frugge, Girkmann y otros. Sin embargo, dado que estos análisis requerían consideraciones matemáticas de cierta complejidad, basadas generalmente en el cálculo diferencial y de difícil aplicación práctica, no fueron accesibles para la mayoría de los calculistas hasta la publicación de métodos aproximados, sobre todo en Estados Unidos. Un referente de este tipo de trabajos aproximados es el de Winter y Pei (1947). En España un procedimiento de cálculo directo relativamente accesible desarrollado por Parme y Sbarounis fue publicado en la revista *Informes de la Construcción* (1961). No obstante, en opinión de Cassinello no fueron solo las complejidades de cálculo las que frenaron el uso de estas estructuras, «sino los prejuicios estéticos ante una nueva forma que iba a romper con las doctrinas y moldes en boga», dando como factores favorables para su aceptación «el triunfo espectacular de la arquitectura agresiva, personal y dinámica de Wright, y el ensayo, en gran escala, desarrollado en la estructuralista Exposición de Bruselas». A ello se sumaría, la agresividad de sus formas, la cual «ha venido a dar nueva expresión y movimiento a los limpios y puros volúmenes racionalistas, puristas y neoclásicos, en los que el ángulo recto y la línea inclinada no tenía lugar en su invariable credo de paralelismo y ortogonalidad» (1961).

#### APLICACIONES MENORES EN EL PANORAMA ESPAÑOL

Los principales ejemplos de que tenemos constancia realizados en suelo español se concentran temporal-

mente en un muy breve espacio de tiempo, prácticamente entre finales de los 50 y comienzos de los 60. Solo unas pocas láminas de este tipo, como veremos, traspasarán esa década adentrándose en las siguientes. Azpiazu Ordóñez señalaba al comienzo de la década de los 70 que en relación a las cubiertas laminares, «llevamos 37 años de experiencias y ahora empieza a decaer su desarrollo por el coste excesivo del encofrado y por no haber encontrado un sistema de prefabricación adecuado que permita que estas cubiertas laminares no pierdan su condición de cáscara al perder su monolitismo y dividirse en una serie de elementos prefabricados» (1971, 42).

Aunque la primera realización de estructura plegada española con referencia fiable es ya una solución notable, correspondiente a la cubierta del comedor de la Universidad Laboral de Tarragona terminada en 1959 según proyecto de Torroja y De la Vega, vamos a considerar previamente otras láminas de menor envergadura ya que ésta será estudiada individualmente con cierto detalle al final del trabajo. Comenzaremos por tanto con algunos comentarios sobre diversas estructuras menores, las cuales, no obstante, marcan un panorama de incorporación de láminas plegadas como elementos complementarios dentro de edificios o estructuras de mayor entidad. Así por ejemplo, pueden incluirse aquí algunos trabajos de inicios de los 60 de Miguel Fisac con láminas plegadas de pequeñas dimensiones y empleadas más bien como elementos expresivos complementarios. Entre ellas sería notable, no por su tamaño sino por su cualidad formal, la «airosa y enérgica lámina plegada» que, realizada como marquesina de entrada de los laboratorios Alter en Madrid finalizados en 1961, «recibe al visitante y le sorprende con el cambiante y magnífico aspecto que proporciona la luz (natural o artificial) al crear sombras y penumbras vaporosas» (Fisac 1961) (fig. 1). Aunque no hemos encontrado especificaciones de sus dimensiones, por estimación basada en los planos publicados, sus ocho pliegues triangulares continuos cubren un pequeño vano de 5,20 m entre las dos vigas horizontales sobre las que apoyan, con vuelos por ambos extremos, rondando el delantero los 3 m. El canto podría acercarse a los 60 cm.

Para una segunda marquesina en la entrada del Centro de Información y Documentación del Patronato «Juan de la Cierva» del CSIC en Madrid terminado en el mismo año, Fisac empleó otra pequeña lámina plegada, en este caso dispuesta transversalmente y

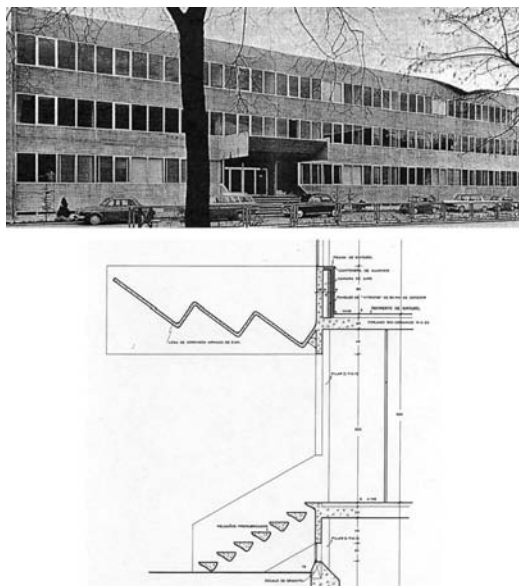


Figura 2  
Centro de Información y Documentación CSIC (Arqués 1996, 165; Cánovas 1997, 136)

empotrada en sendas ménsulas rectangulares de espesor, así mismo laminar, y con las que forma un conjunto de gran rigidez (fig. 2). El vuelo de la parte cubierta sobrepasa los 3,5 m con una anchura o luz de plegadura cercana a los 6 m. Su espesor es de 6 cm y su perfil, no formado por Vs de lados simétricos, asciendo quebradamente hacia el borde libre.

Siguiendo con las aplicaciones relativamente secundarias de formas plegadas se tendrían también que citar las de uso como elemento soporte o incluso de contención, aprovechando la rigidez y estabilidad de su configuración como ángulos diedros en posición vertical. En su colaboración para la iglesia de Guadalupe en Madrid comenzada en 1963 según proyecto inicial de Enrique de la Mora y Félix Candela, Aspiazu empleó series de diedros-nicho o semipirámides en el perímetro como apoyo del borde libre de los paraboloides hiperbólicos de la cubierta. Dichas formas plegadas fueron calculadas por José Antonio Torroja (Madrid 1983) (fig. 3). Un uso muy semejante se encuentra también en la iglesia parroquial de Nuestra Señora del Valle en Becerril de la Sierra en Madrid (1965–68), obra del dominico arquitecto

Fray Francisco Coello de Portugal. En este caso se emplean dos grandes diedros, también de lados triangulares, como soporte de los vértices más altos del único paraboloides hiperbólico de la cubierta (fig. 3). Como colaboradores intervinieron en este caso José Ruiz-Castillo y Ricardo Urgoiti que anteriormente habían trabajado con Félix Candela (Fernández 2001, 113). El mismo Coello de Portugal había empleado el principio de rigidez derivada del pliegue vertical, pero en este caso con planos no doblados sino intersecados, en la esbelta torre exenta del Santuario de la Virgen del Camino en León (1955–61). También Fissac hizo uso de láminas plegadas como diedros verticales en los remates de la torre de los laboratorios Jorba.

Es de advertir aquí que algunas construcciones de la época, estimuladas por el entonces atractivo visual de las formas plegadas y poliédricas, pueden ofrecer imágenes de estructuras de esta clase aunque tanto por construcción como por comportamiento no sean auténticos casos de construcción laminar. Un ejemplo quizás intrascendente pero significativo a este respecto son las cubiertas en paraguas de la estación de servicio en Gijón (1962) proyectada por Mariano Marín Rodríguez. En efecto, cada una de las pirámi-

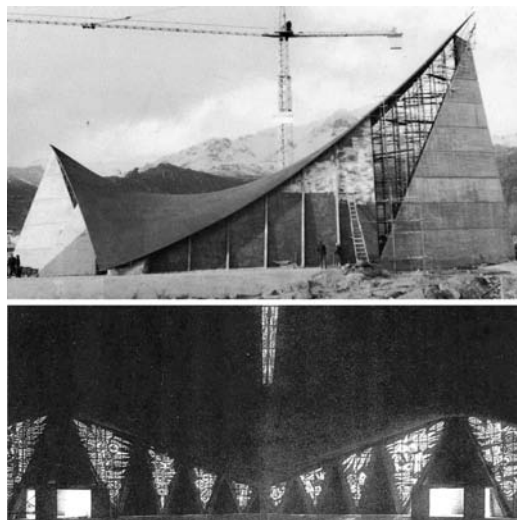


Figura 3  
Nuestra Señora del Valle (Fernández 2001, 112). Nuestra Señora de Guadalupe (Aspiazu 1971, 47)

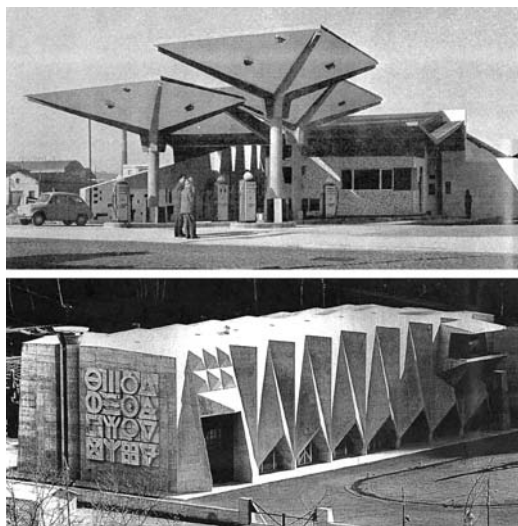


Figura 4  
Estación de servicio en Gijón (Marín 1962). Central eléctrica de Proaza (Pérez 1992, 218)

des invertidas que en apariencia serían láminas continuas, no son tales sino simples forjados inclinados apoyados sobre los nervios de las aristas que están calculadas y actúan como ménsulas a partir del vástago central (Marín 1962) (fig. 4).

Más interesante es el ejemplo del edificio de generadores de la Central Hidráulica de Proaza en Asturias (1964-5) realizado por Vaquero Palacios. Aquí la decisión de dar una apariencia de forma general facetada, plegada y por momentos cubo-expresionista se consigue no haciendo de las láminas elementos estructurales sino paneles de cerramiento (fig. 4). En este caso, «la estructura portante de hormigón armado se reviste totalmente, incluso en la cubierta, con piezas laminares prefabricadas in situ» (Pérez 1992, 216). Dicha estructura portante está en este caso constituida por sólidos pórticos rígidos longitudinales de hormigón adecuados además para las cargas derivadas del puente grúa interior. Las placas de recubrimiento siguen en las fachadas un patrón de pliegues contrapuestos sobre el que, sin embargo, las excepciones de los portones para acceso de maquinaria y de las balconadas para acometidas de conductores eléctricos conforman soluciones de extraordinario valor plástico. Formas plegadas a juego con el edifi-



Figura 5  
Depósito de carbón ITCET (Archivo Documental ITCET)

cio sirven también de muro de contención en la parte de la ladera de la montaña, también en este caso al parecer con auténtica función resistente.

Como elemento complementario tampoco puede dejar de citarse finalmente el depósito dodecaédrico de hormigón del Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento Eduardo Torroja (ITCCET) finalizado hacia 1959 y ejemplo singular como aplicación a un recipiente. Inscrito en una esfera de 10 m de diámetro alcanzó una altura de 7,95 m con un espesor de caras laterales de 22 cm (fig. 5).

#### ESTRUCTURAS PLEGADAS EN ARQUITECTURA ESCOLAR Y CONVENTUAL

Una serie de soluciones de escala intermedia pero con un papel estructural definido como láminas de cubierta se encuentran en varios de los edificios de carácter religioso del antes mencionado Coello de Portugal. Este arquitecto empleó con frecuencia este tipo de cubriciones en algunas partes de sus edificios siendo uno de los principales arquitectos españoles en el uso de plegaduras de hormigón. Se pueden ver por ejemplo en forma de láminas prismáticas con perfil en Z en la cubierta del salón de actos del Colegio Santo Domingo de Guzmán en Palencia (1962-5). Una utilización más sistemática de láminas plegadas para cu-



Figura 6  
Monasterio de Sta Catalina de Siena. Claustro e interior iglesia (Fernández 2001, 131–2)

biertas la realizó en el Monasterio de Santa Catalina de Siena (1966–68) en la localidad madrileña de Alcobendas a partir de la forma a cuatro aguas con limahoyas en las diagonales. Esta sencilla forma, que también puede verse como la intersección de dos cubiertas a dos aguas perpendiculares entre sí, tiene la ventaja, al construirse mediante una lámina continua, de que no es desarrollable sobre un plano y por tanto es rígida y estable en sí misma. Su imagen desde arriba es tradicional, ya que en nada se diferencia de las cubiertas de faldones convencionales, pero desde su intradós es muy diferente ya que se percibe como una contraforma en negativo, en la que la naturaleza de los plegamientos cobra un especial protagonismo.

Esta forma base se empleó en la cubierta del claustro mediante adición de unidades de planta cuadrada de pequeño tamaño, en torno a 4,5 m de lado, pero hormigonadas conjuntamente dando lugar a una lámina continua (fig. 6). Colaboraba a la sensación airy y delgada de dichas láminas el sistema de apoyos, reducido a esbeltos soportes metálicos situados en sus esquinas.<sup>2</sup> Con mayor dimensión la misma lámina de planta cuadrada tipo se utilizó como cubierta de la iglesia, jugando en este caso con variaciones en

las pendientes entre unas unidades y otras, y en el rectorio. (fig. 6). La misma solución fue empleada bastante más recientemente por el mismo arquitecto en el Monasterio de Jesús y María en Toledo (1980–83) en la que es, hasta tanto como hemos podido conocer, el ejemplo más tardío de utilización de láminas plegadas en España.

Del mismo arquitecto, merece citarse también la curiosa solución de láminas de la planta superior del claustro del Monasterio de la Encarnación de Lejona en Vizcaya también de terminación bastante tardía (1968–76). Corresponden a una cubierta a dos aguas pero con pendiente quebrada y mucho más pronunciada en el centro, coincidiendo con su eje longitudinal, produciendo un acusado alzamiento en esta zona. A ella se le superponen en perpendicular series de pliegues triangulares muy peraltados y cruzados transversalmente, los cuales se manifiestan en el borde libre como agudas elevaciones del alero semejantes a las producidas por ventanas abuhardilladas en cubiertas de montaña (fig. 7).

Lo notable de las cubiertas de claustro referidas es que nuevamente se construyen como láminas delgadas y continuas de hormigón, produciendo un efecto de gran complejidad desde el intradós. A ello se suma la solución de soporte de las mismas, mediante



Figura 7  
Monasterio de la Encarnación (Fernández 2001, 156)

haces de perfiles de acero inclinados que proporcionan apoyos en las cuatro esquinas de los paños de faldón con menor pendiente. Estas «unidades de esquemas arborescentes» son asimismo estables por su configuración geométrica y no producen empujes.

Las realizaciones de De Coello, tienen ciertas similitudes con lo realizado por el citado José Ramón Azpiazu Ordóñez para el Instituto de Enseñanza Secundaria Sorolla en Valencia finalizado hacia 1969, aunque en este caso hay un claro alejamiento de las formas tradicionales. Azpiazu, que debe considerarse como el principal practicante de estructuras plegadas en España o al menos el autor de varias de las más destacadas, empleó aquí para la cubrición de los porches y espacios principales del Instituto diferentes variantes de un tipo de plegamiento que podemos llamar con concidencia y que tiene por característica el ir disminuyendo la altura y forma de los pliegues desde un extremo hacia el otro, pudiendo tender incluso a un borde en el que teóricamente desaparecerían formando una línea recta sin quiebros. Esta forma puede extenderse sobre un plano, lo cual parece en principio contravenir las propias recomendaciones del autor: «conviene que no sean desarrollables y que tengan inercia variable, comportándose muy bien ante los efectos sísmicos y de viento» (Azpiazu y Cervera 1975, 42). Sin embargo, puede verse cómo se convierte en no desarrollable sobre un plano al disponerse de forma combinada junto a otras del mismo tipo pero orientadas en forma contrapuesta, tal y como se empleó en los porches del Instituto. La misma clase de lámina sirvió también para marquesinas en voladizo que forman los porches de entrada y garaje.<sup>3</sup>

Para el salón de actos y el gimnasio las láminas, ligeramente modificadas y con luz mayor (12 m), siguieron otra disposición, doblándose por un lado y formando en su prolongación el muro de cerramiento de uno de los laterales de dichos espacios (fig. 8). Este muro, también plegado, pero con espesor mayor que el de la cubierta, estaba a su vez inclinado hacia el interior. El resultado puede considerarse en este caso, por tanto, como una lámina continua que forma techo y pared y que es a su vez rigidizada por múltiples plegamientos menores. En cierto modo podemos decir que se trata de un pórtico laminar continuo. El apoyo de la lámina en el lado opuesto se realizó directamente sobre muros ciegos dotados de un babero de plomo o cobre como elemento de articulación. Para asegurar una total rigidez trans-

versal, todas las láminas se construyeron con nervios en el extradós, rompiendo con la percepción lisa del mismo (fig. 9). Asimismo, las líneas de unión de cada serie de láminas con las de orienta-

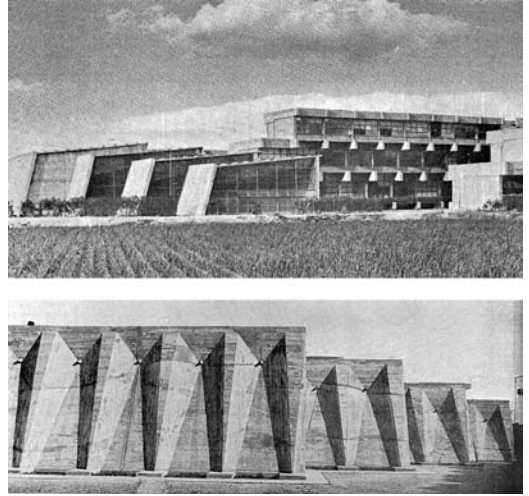


Figura 8  
Instituto Sorolla. Láminas salón de actos y gimnasio (Azpiazu 1969)

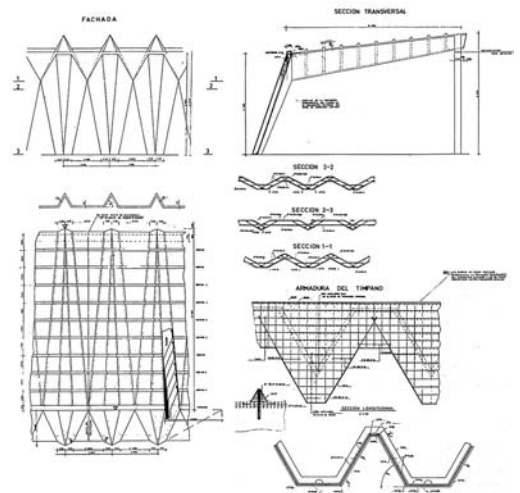


Figura 9  
Instituto Sorolla. Planos lámina porticada salón de actos y gimnasio (Azpiazu 1969)

ción opuesta (porches) o con las de muro de cerramiento (espacios comunes) se reforzaron con planos diafragma o «tímpanos» que aún rigidizan más el conjunto de las láminas en sentido transversal. Por el contrario, ninguno de estos refuerzos y nervaduras es visible desde el intradós.<sup>4</sup>

## GRANDES LÁMINAS DE CUBIERTA

Aunque pueda parecer paradójico, las estructuras más importantes construidas con láminas plegadas en nuestro país son bastante tempranas y desde luego anteriores a muchas de las hasta ahora comentadas; si las consideramos en último lugar y no seguimos un orden cronológico es debido a razones expositivas y a que separadas del resto pueden centrar mejor nuestra atención dada su singularidad. Así, la primera de las dos construidas, la estructura de tribunas del Cañódromo de Madrid finalizado en 1962 y erigida también bajo la dirección y proyecto de Azpiazu, es anterior en unos siete años a su Instituto y a la vez de un riesgo estructural claramente superior a lo realizado posteriormente en aquél.<sup>5</sup> Dicha estructura es probablemente la más espectacular de cuantas se han realizado en España con este sistema. Sus tribunas, con voladizos de 18 m sobre pórticos separados 8 m, constituyen también una de las estructuras de su clase más grandes realizadas internacionalmente (fig. 10). Sin embargo, la solución prevista en un principio no era de tipo plegado:

en el proyecto inicial se pensó en construir la cubierta a base de láminas de hormigón armado en forma de paraboloides hiperbólicos, con lo que se obtenía una notable economía de construcción al conseguir el comportamiento como membrana, trabajando el hormigón sólo a compresión y precisándose solamente una armadura de 15 kg/m<sup>2</sup>, pese al fuerte voladizo de la cubierta. La necesidad de adoptar un zuncho pretensado que permitiese corregir la deformación de las esquinas de los paraboloides para conseguir la deformación de las esquinas de los paraboloides para conseguir una línea de cornisa recta suponía un notable retraso de la obra, lo que obligó a huir de esta solución dada la imposibilidad de ampliar el plazo de ejecución de la misma (Aspiazu *et al.* 1962).<sup>6</sup>

La solución realizada es una lámina plegada no desarrollable, de inercia variable y en realidad del

mismo tipo que las comentadas para los porches del Instituto. En efecto, su rigidez e indeformabilidad geométrica se deben también a la unión contrapuesta de dos láminas con concidencias opuestas, lo que favorece por otra parte la disminución del canto hacia los bordes y por consiguiente la adecuación a la variación de los momentos (fig. 11). Se soporta en una única alineación de soportes y su asimetría es compensada con otra serie de tirantes en V que la anclan en su parte posterior al borde del graderío. Fueron necesarios también nervios transversales de rigidización en el extradós y un plano vertical de tímpano en la unión entre las láminas de concidencias opuestas, justo sobre la línea de soportes centrales. Ninguno de estos elementos marca resalte alguno desde el intradós. Esta solución de lámina trabaja en régimen de flexiones, exigiendo una armadura media de 33 kg/m<sup>2</sup>.

En cuanto al proceso de su construcción:

la necesidad de construir toda la tribuna en una sola fase, debido a la premura de tiempo, obligó a emplear gran número de encofrados y una complicada estructura tubular metálica como cimbra de apoyo de los mismos (Aspiazu *et al.* 1962).

También las operaciones de descimbrado requirieron especiales cuidados:

Se desencofró, primeramente, la zona comprendida entre la línea de apoyos y tirantes, tensándose éstos a continuación, operación que se hizo simultáneamente en todos ellos. El desencofrado de la parte elevada se realizó el mismo tiempo en toda su longitud, con objeto de evitar tensiones producidas por el descenso parcial de las partes desencofradas. La flecha apropiada en el borde fue de 5 cm (Aspiazu *et al.* 1962).

Otro proyecto de lámina interesante del mismo Azpiazu es la del finalmente no construido «Palacio del Tenis» para el Club de Tenis Chamartín en Madrid, la cual hubiera cubierto una superficie de 59 m por 58,40 m albergando tres pistas de tenis y gradas de hasta 6000 espectadores. La solución laminar, tal como se deduce de los planos, hubiera sido francamente espectacular con plegaduras porticadas salvando 58,40 m entre apoyos y prolongación de las mismas en los extremos formando los cerramientos (fig. 12). Dichos apoyos estaban constituidos por soportes aislados situados en la parte superior de los graderíos. Entre las partes plegadas de cerramiento

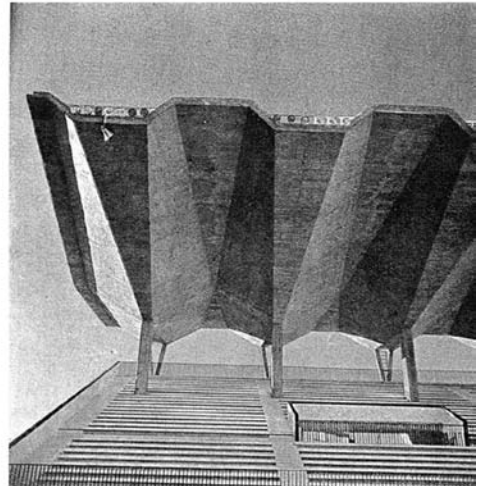
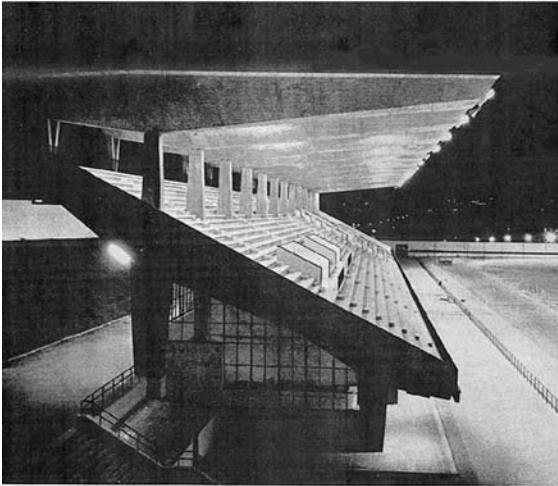
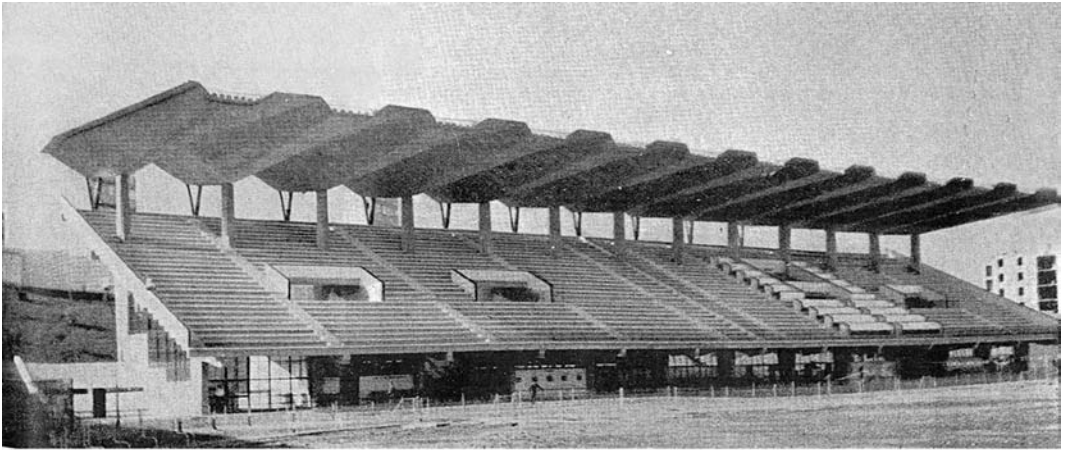


Figura 10  
Canódromo de Madrid (Azpiazu 1962)

sobre las gradas se dejarían amplios ventanales cerrados con plástico traslúcido sobre estructura metálica adaptándose a los espacios trapezoidales dejados libres. Este mismo cerramiento traslúcido se aplicaría a los alzados de los fondos. En éstos, dicha parte traslúcida estaría por encima de las paredes ciegas, también de estructura plegada.

Con todo, de este proyecto quizás lo más singular hubiera sido su gran abertura en el centro de la cu-

bierta para competiciones a cielo abierto sobre la pista central. Ello hubiera sido posible gracias a la interrupción de las plegaduras centrales, que quedarían como voladizos bastante semejantes a las del Canódromo, y a una prevista cubierta corrediza superpuesta, formada por un entramado metálico y placas de cloruro de polivinilo. El conjunto de esta solución daría respuesta a «las exigencias de la Copa Davis de no poderse jugar en recintos cubier-



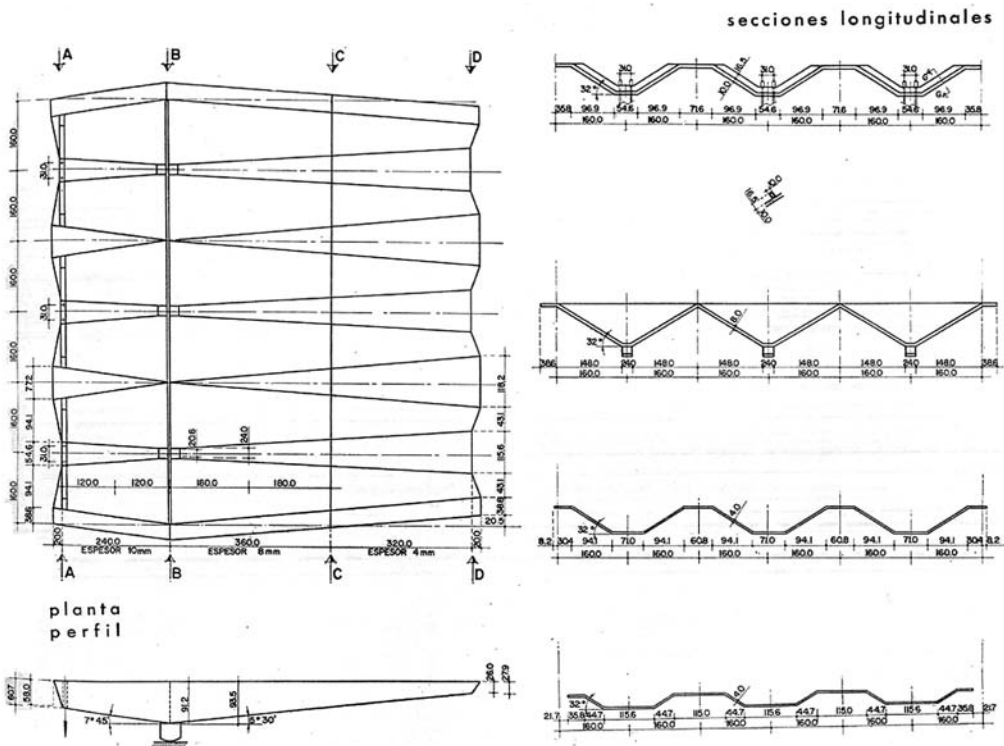


Figura 11  
Canódomo. Planos del modelo reducido para ensayo (Azpiazu 1962)

tos» por lo que «la pista central se tenía que poder descubrir a capricho. Este requisito nos hizo eliminar el sistema de láminas colgadas, que para estas dimensiones y luces libres son las más indicadas, y optamos por la solución de lamina plegada, de hormigón armado pretensado, dejando libre la pista central» (Azpiazu 1971, 46).

Como último ejemplo a considerar trataremos brevemente sobre la ya citada cubierta del pabellón de comedores de la Universidad Laboral de Tarragona. Realizada según proyecto de A. de la Vega y Eduardo Torroja, como se mencionó, y contando con la colaboración de los ingenieros Del Pozo y Páez, debe su singularidad no solo a su forma y dimensiones, sino también a ser la primera de las láminas plegadas realizadas en España de que tenemos constancia. En ella, además, se utilizó la técnica del postensado, la cual no parece haberse empleado

en casi ninguna de las anteriormente estudiadas. Solamente sería una excepción el tensado de los soportes en V de la tribuna del Canódomo, siendo el resto simplemente armado.<sup>7</sup>

En el caso de Tarragona el espacio a cubrir es de 57,6 m × 20 m de luz libre tratándose de:

una cubierta plana, plegada, constituida por una serie de placas triangulares, de 12 cm de espesor, alternativamente inclinadas en uno u otro sentido, y cuyas líneas de intersección forman las correspondientes limatesas y limahoyas. Las limatesas son horizontales, pero no normales a los planos de fachada. Las limahoyas, contenidas en planos perpendiculares a las fachadas, tienen una determinada pendiente que facilita la evacuación de las aguas pluviales . . . Todas estas superficies triangulares son iguales entre sí . . . Dada la igualdad de todos estos triángulos y su desarrollo plano, el encofrado de la lámina resulta muy sencillo (Torroja 1959).

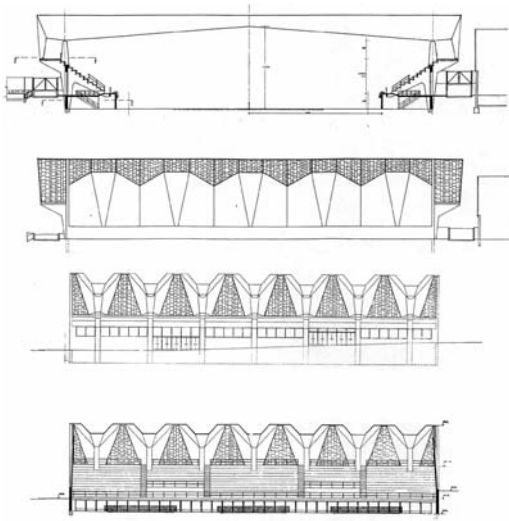


Figura 12  
Palacio del Tenis (Azpiazu 1971, 44-5)

De ello se deduce que se trata de una lámina con pliegues contrapuestos y, por tanto, desarrollable, cuya disposición facilita naturalmente la evacuación del agua de lluvia (fig. 13). Como apoyos se construyeron sendos pórticos longitudinales de perfil triangular, desplomados hacia el interior y de sección variable, aumentando ésta hacia el vértice. Se consideró que estos elementos eran suficientes para la rigidización de la lámina. Su cálculo se complica fundamentalmente por la forma de su sección transversal, que es variable. Transversalmente se trató de la forma habitual, considerada como viga continua (Antuña 2002, 204-5). Los cables de pretensado seguían un trazado curvo sobre las placas triangulares con anclajes sobre el canto libre y las limatesas. El resto de la armadura era bastante sencilla con un mallazo uniforme que se plegaba fácilmente al ser la superficie desarrollable.

Es de interés el encofrado, que se hizo:

independiente de los muros de fachada, colocado sobre unas bielas o aparatos provisionales de apoyo. De esta forma, al no existir coacción exterior alguna, la cubierta puede acortarse libremente bajo la acción el esfuerzo de pretensado . . . Una vez fraguado y suficientemente endurecido el hormigón, se efectuó el tesado de esta armadura principal, durante el cual la estructura se despegó, automáticamente, de su encofrado (Torroja 1959)

También es digno de mención que, tras lo anterior, toda la cubierta, pórticos de borde incluidos, se eleva temporalmente con unos gatos para colocar bajo ella unos rodillos metálicos como apoyos definitivos (fig. 14).

Tanto esta lámina como la del Canódromo fueron objeto de análisis complementario mediante modelos a escala realizados con mortero en el Laboratorio de Central de Materiales de Construcción de Madrid dirigido por Carlos de Benito. En ambos casos se llegó a la rotura de los mismos, corroborándose las hipótesis de comportamiento previamente establecidas. Para el Canódromo se hizo también un modelo de plexiglás.

#### NOTAS

1. Sobre la cuestión general de las estructuras plegadas realizadas en el ámbito internacional hemos tenido ocasión de exponer recientemente el estado de la cuestión en la conferencia «Dos décadas de estructuras plegadas de hormigón armado: inicio y ocaso de un movimiento», dictada en la Fundación del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid dentro del segundo ciclo del Aula de Historia de la Construcción (21 de febrero de 2007).

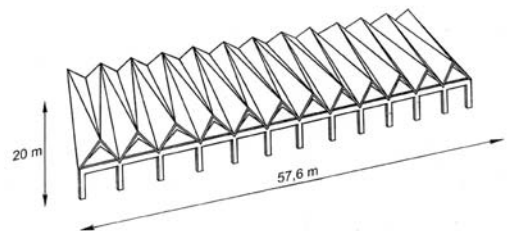
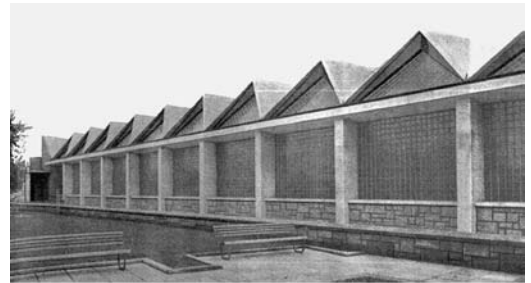


Figura 13  
Universidad Laboral de Tarragona (Torroja 1959)

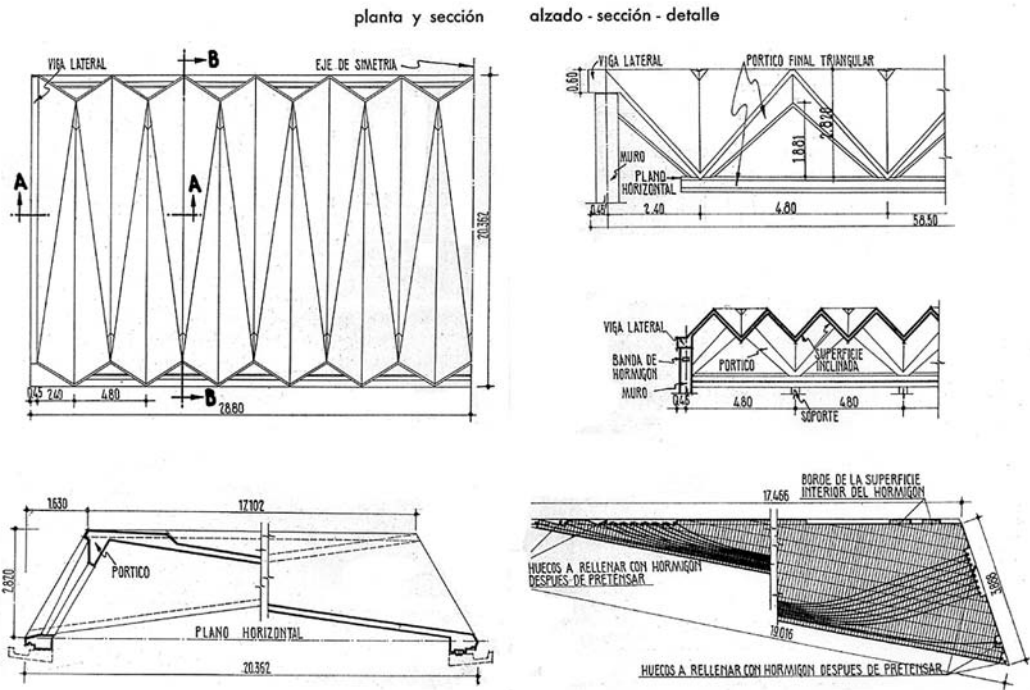


Figura 14  
Universidad Laboral de Tarragona. Planos de la lámina (Torroja 1959)

2. Nótese que aunque en la fase de construcción podrían producirse algunos empujes al hormigonar si el encofrado no está suficientemente rigidizado mediante un atirantado u otro sistema de análogo efecto, una vez endurecido el hormigón desaparecen los empujes y la lámina solo proporciona acciones verticales sobre los soportes.
3. A este respecto, y según la opinión de los autores las láminas plegadas «son las más indicadas para emplear en voladizos, ya que se las calcula para soportar esfuerzos de flexión y, por tanto, no suelen fisurarse» (Azpiazu y Cervera 1975, 81).
4. También según los autores, la misma disposición interna de pliegues hace que estas láminas sean «las de mejores condiciones acústicas, siempre que se proyecten racionalmente» (Azpiazu y Cervera 1975, 81)
5. Realizado en colaboración con el arquitecto Pedro Pinto y los ingenieros José Antonio Torroja, Florencio del Pozo y Rafael López Palanco.
6. Existe a veces gran similitud entre determinadas disposiciones de paraboloides hiperbólicos y láminas plegadas, lo que las convierte casi en versiones planas o ala-

beadas de ideas formales muy semejantes. Esta coincidencia se da especialmente en láminas plegadas con conicidad como es el caso del Canódro.

7. Esto en efecto coincide con las preferencias del mismo Aspiazu respecto a las cubiertas laminares: «como hormigón pretensado se pueden aumentar mucho las luces; sin embargo el hormigón pretensado lo considero más adecuado para elementos prefabricados que se disponen yuxtapuestos y actúan por separado» (Aspiazu y Cervera 1975, 80). El tensado del Canódro se realizó directamente sobre las armaduras sin hormigonar mediante casquillos roscados.

#### LISTA DE REFERENCIAS

- Antuña, Joaquín. 2002. *Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja*. Tesis doctoral ETSAM.
- Arqués, Francisco. 1996. *Miguel Fisac*. Madrid: Pronaos.
- Azpiazu, José Ramón. 1969. Instituto Sorolla. Valencia (España). *Informes de la Construcción*, 211 (sin paginación).

- Azpiazu, José Ramón. 1971. Experiencias adquiridas a través del proyecto arquitectónico, dirección de obra y construcción de cubiertas laminares. *Informes de la Construcción*, 233 (sin paginación).
- Azpiazu, José Ramón; Cervera, L. 1975. Trabajos recientes de los arquitectos J. R. Azpiazu y L. Cervera Miralles. *Arquitectura COAM*, 194–95:78–88.
- Azpiazu, José Ramón et al. 1962. Canódromo madrileño. *Informes de la Construcción*, 138 (sin paginación).
- Cánovas, Andrés ed. 1997. *Fisac, medalla de oro de arquitectura*. Madrid: Ministerio de Fomento; Consejo Superior de Colegios de Arquitectos de España.
- Cassinello, Fernando. 1961. Estructuras plegadas. *Informes de la Construcción*, 135 (sin paginación).
- Cassinello, Fernando. 1974. Láminas plegadas. En *Construcción. Hormigonería*, 537–542. Madrid: Rueda.
- Fernández Cobián, Esteban ed. 2001. *Fray Coello de Portugal, dominico y arquitecto*. Madrid: Fundación Antonio Camuñas; Salamanca: Editorial San Esteban.
- Faber, Colin. 1970. *Las estructuras de Félix Candela*. México, España, Argentina, Chile: Compañía editorial continental. (*Candela, Sheel Builder*).
- Fisac. 1961. Dos obras de M. Fisac. Laboratorios Alter y Farmabián. *Informes de la Construcción*, 132 (sin paginación).
- García, Rafael. 2006a. Concrete folded plates in The Netherlands. *Proceedings of The Second International Congress on Construction History*. Vol. 2: 1189–208.
- García, Rafael. 2006b. Estructuras laminares de hormigón en Holanda. *Arquitectura COAM*, 345: 66–75.
- Kramer, K. W. 2005. Survey of Prestressed/Post-Tensioned Folded Plate Shells for Roof Structures in the United States: 1950–1970. En *Ned H. Burns Symposium on Historic Innovations in Prestressed Concrete*, editado por Russell, Bruce W. y Gross, Shawn P., Michigan: ACI. Madrid. 1983. Santuario de Nuestra Señora de Guadalupe. *Guía de Madrid*, Vol 2: 260. Madrid: COAM.
- Marín Rodríguez, Mariano. 1962. Estación de servicio en Gijón. *Informes de la Construcción*, 140 (sin paginación).
- Pérez Lastra, José Antonio. 1992. *Vaquero Palacios, arquitecto*. Colegio Oficial de Arquitectos de Asturias.
- Parne, A. L. L.; Sbarounis, John A. 1961. Una solución directa par alas cubiertas de hormigón en placa delgada. *Informes de la Construcción*, 135 (sin paginación).
- Torroja. 1959. Lámina plegada. Universidad Laboral de Tarragona. *Informes de la Construcción*, 107 (sin paginación).
- Winter, George y Pei, Minglung. 1947. Hipped Plate Construction. *Journal of American Concrete Institute*, Vol. 18: 505–531.