

Cubiertas laminares de hormigón tras la segunda guerra mundial. Soluciones en edificios industriales

Rafael García García
Roberto Osuna Redondo

El periodo que siguió a la finalización de la segunda guerra mundial se caracterizó por un importante desarrollo experimental en el campo de la edificación. Dentro de él destacaron especialmente las aplicaciones del hormigón armado, material sobre el que se había alcanzado un gran conocimiento en la etapa anterior, pero que no había encontrado, sin embargo, un uso suficientemente generalizado. A este respecto, van a ser precisamente las formas superficiales de tipo delgado o cáscaras las que van a suponer la principal innovación en las primeras décadas tras la finalización del conflicto. Estas formas laminares ya habían sido estudiadas en su aparato matemático desde los años 20, especialmente en el ámbito alemán, y sobre ellas quizás la más importante aportación fue la comprensión del comportamiento de membrana. Según éste, los esfuerzos en una cáscara delgada, pero suficientemente rígida, sólo serían de compresión, tracción y cortante, pero no existirían en ningún caso flexiones. Debido a esta ausencia de flexiones el espesor podría reducirse hasta unos pocos centímetros con tal de que la forma y sus apoyos cumplieran ciertas condiciones fundamentales. Naturalmente, pronto se vio que el hormigón armado, por su capacidad moldeable, sería el material más adecuado para realizar estas superficies resistentes con la inclusión en su interior de armaduras de acero para los esfuerzos de tracción y cortante.

Su estudio teórico planteó en un principio, sin embargo, serias dificultades de aplicación práctica ex-

cepto para una serie de casos de geometría sencilla y, como consecuencia, serán estas formas las adoptadas por las primeras soluciones. Aquí habría que hacer una mención especial a los constructores alemanes Zeiss-Dywidag¹ (Dyckerhoff & Widmann), que patentaron un sistema de construcción laminar de referencia, y al ingeniero alemán Franz Dischinger quien, aparte de sus elaboraciones teóricas, pudo llevar a cabo, ya antes de la guerra, muy importantes realizaciones. En primer lugar están sus soluciones derivadas de la cúpula esférica, pudiéndose citar el ya casi legendario planetario de Jena de 1926 cubriendo una planta circular de 25 m de radio con un espesor de cáscara de 6 cm, y sus notables desarrollos inmediatamente posteriores en el Großmarkthalle de Basilea sobre planta octogonal de diámetro de 60 m con 8 cm de espesor y terminado en 1929, y el gran mercado de Leipzig finalizado al año siguiente con dos cúpulas gemelas sobre plantas del mismo tipo y diámetro 65,80 m. De los dos últimos sería característico el empleo de nervaduras de refuerzo ascendiendo a partir de los vértices de la base, por lo que no serían superficies de cáscara totalmente lisa. Sorprendentes también son su serie de bóvedas cilíndricas horizontales para el imponente gran mercado de Frankfurt ya que, con los 50 × 17 m cubiertos por cada una de ellas, proporcionó a su vez un notabilísimo ejemplo para el otro tipo de superficies laminares realizadas antes de la guerra.

Otros ejemplos importantes a incluir aquí serían, el mercado de Algeciras en España de Eduardo To-

roja con 47,80 m de diámetro (1933), también una solución de cúpula sobre planta octogonal, o la más modesta pero muy anticipada cúpula de la Cenakelkerk para la Fundación Tierra Santa en Nijmegen, Holanda, de 14,5 m y 10 cm de espesor proyectada por el ingeniero Wiebenga en 1914. Asimismo, y en cuanto a láminas cilíndricas es preciso indicar que aunque soluciones como la descrita de Dischinger en Frankfurt, actuando a modo de grandes vigas de sección curva, fueron quizás más minoritarias tuvieron también excelentes ejemplos en las tribunas del hipódromo de Madrid y en el frontón Recoletos de la misma ciudad, ambas obras de Torroja y destacables por sus arriesgadas condiciones de sustentación. Probablemente más frecuentes fueron, sin embargo, las realizadas con la disposición alternativa en que eje de nave y de la superficie cilíndrica coinciden como, por ejemplo, en las construidas en 1912 también por Wiebenga para las naves de la Société C  ramique de Maastricht, con luces de algo más de 15 m y en las que, como en la mayoría de las de este tipo, y dada la ausencia de elementos de contrafuerte, se dispusieron delgados tirantes de atado. Sobre este breve panorama de antecedentes además de los autores y obras citados deberían sumarse otros destacados nombres que como Finsterwalden, Fauconnier, Jacobsen, Fl  gge, Lundgren o Girkmann en materia de cálculo contribuyeron de forma decisiva con su trabajo preparatorio para lo ocurrido a partir de finales de los cuarenta.

En este campo de las aplicaciones para la edificación industrial es significativo que, tras la guerra, dichas formas laminares se van a ver como una solución eficiente y competitiva frente a otras alternativas de cubrición como el acero, el cual había hasta entonces dominado en este sector. Por ello una característica de estas soluciones en el ámbito industrial va a ser la de la tipificación a efectos de optimizar y generalizar sus resultados. En las soluciones laminares, por otra parte, no sólo interesa su definición geométrica en abstracto (por el tipo de superficie) sino también los aspectos de detalle, como la particular forma de sustentación o su ejecución material en casos concretos, de donde se derivan sus múltiples matices y variantes. Para el caso de las construcciones industriales o utilitarias, su empleo, generalmente por repetic  n, dio lugar a una gran riqueza de formas y delimitaciones que prácticamente son exclusivas de dicho ámbito.

LÁMINAS CILÍNDRICAS SIMÉTRICAS

A efectos de este estudio emplearemos una categorización básica que permita proceder a un encuadramiento sencillo y útil de dichas soluciones. Su carácter general permitirá que, por ejemplo, pueda incluirse en ella el resumen esquemático de soluciones laminares más o menos t  picas publicadas en el libro de Henn sobre construcciones industriales (1961, 136-7). Dentro de este esquema básico, el tipo que consideraremos en primer lugar es el de las bóvedas laminares formadas por superficies cilíndricas de apoyos horizontales a igual altura o simétricas. Aunque ya vimos que se habían desarrollado con cierta plenitud antes de la guerra, no será sin embargo hasta después de ella que comience su empleo sistemático. También se justifica el tratarlas en primer lugar por el hecho de ser el tipo que más difusión tuvo y que primeramente se generaliza en los años de posguerra.

La forma de directriz más frecuente para bóvedas cilíndricas fue la de arco de circunferencia de diferente amplitud oscilando entre el medio círculo y arcos más tendidos o rebajados, siendo éstos los más frecuentes. Dentro de ellas ya se coment  , al hablar de los antecedentes, de su subdivisión entre dos subtipos principales, según que su eje fuera paralelo o perpendicular al espacio a cubrir. En la literatura de la época son denominadas como bóvedas cilíndricas cortas o largas respectivamente. Son pertinentes algunas indicaciones sobre sus condiciones de apoyo y el rango de dimensiones que llegaron a cubrir. Las largas apoyaron generalmente en dos vigas de borde longitudinales y en muros ciegos o en vigas arqueadas de cierta rigidez en sus extremos, facilitando ésta última solución la apertura de huecos bajo ellas. Con frecuencia se usaron formando series paralelas y rara vez en forma individual, y como aplicación t  pica estuvieron almacenes y depósitos abiertos en su perímetro, aunque también edificios cerrados como garajes o naves. Sus dimensiones recomendables según datos extraídos de Bloem (1954, 78) y Rühle (1958, 227) fueron: anchos entre 6 y 12,5 m y luces entre 13 y 30 m, con radios de curvatura entre 6 y 12 m y alturas de lámina entre 1,30 y 3,20. Conllevaron vigas de borde con cantos entre 40 y 130 cm y espesores de lámina entre 6 y 7 cm. Estas dimensiones aumentaron con la introducción del pretensado en las láminas,² pudiendo alcanzarse una longitud teórica de más de 60 m (Hajnal-K  ny  , 1950, 771) e incluso

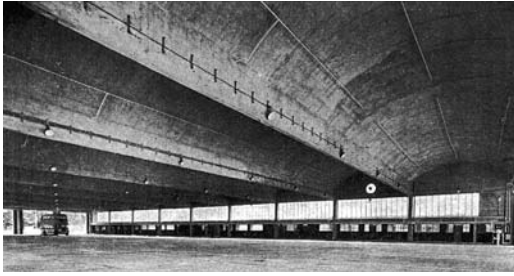


Figura 1
Garaje autobuses, Bournemouth, (Van der Vlugt 1954, 247)

cercana a los 70 m (Van der Weiden 1942, 142), aunque el ejemplo conocido más grande por nosotros encontrado, un garaje de autobuses en Bournemouth realizado según el sistema Blaton-Magnel por los arquitectos Jackson & Greenen y la consultoría de ingenieros R. Travers Morgan & Partners, alcanzó sólo los 45,75 m (figura 1).

Dado que el tipo de lámina larga tenía su iluminación más natural solo por sus extremos no fue empleado en procesos de fabricación o en actividades con exigencias importantes de luz natural. No obstante, para compensar esta deficiencia se emplearon a veces sistemas de lucernarios consistentes en perforaciones o aberturas sobre la lámina. Pequeñas perforaciones en forma de claraboyas rectangulares o redondas pueden verse en distintos ejemplos ingleses (Haajnal-Kónyi, 1950, 772) aunque el sistema más eficaz de iluminación fue en general el de un lucernario rasgado a lo largo de la parte alta de la lámina. Rühle (1958, 227) y Bloem (1954, 210) indican para éste un máximo del 15% de la superficie en planta y una longitud inferior a los 3/5 de la luz. Como excepción, sin embargo, una instalación lechera en Hilversum con láminas de $12,60 \times 16,31$ m fue construida con lucernarios en toda su longitud, dividiendo así la lámina en dos partes separadas y asimétricas unidas por delgadas barras intermedias (Kidron y Sprangers, 1955).

Esta interesante aplicación fue además singular por prescindir de las vigas de borde, lo que fue posible gracias al uso intensivo del pretensado y a un regreusado de 23 cm en el valle inferior de unión de láminas contiguas. Surgió así una configuración en «ala de gaviota» obtenida por esta arista inferior sin viga de refuerzo, la cual se repitió también en algunas otras cubiertas excepcionales como una variante de la solu-

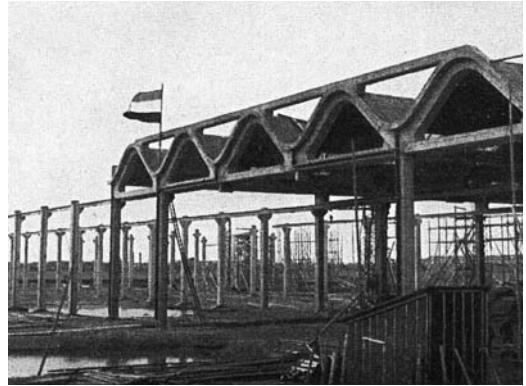


Figura 2
Láminas onduladas cilíndricas. Rijswijk. 1953 (Gravessen 1953, 90)

ción estándar. El redondeado inferior del valle y su unión continua con las láminas contiguas dio lugar también a soluciones con formas onduladas, interesantes estéticamente pero más limitadas en cuanto a las dimensiones de espacios a cubrir. Un ejemplo destacable de esta solución fueron las naves, hoy destruidas, de la empresa Nehim en Rijswijk, cerca de la Haya, con láminas de $8 \times 16,5$ m realizadas según la teoría de Stringer y finalizadas en 1953 (figura 2).

La disposición alternativa de láminas cortas fue, en general, adecuada para naves con grandes aberturas o accesos por uno de sus frentes como por ejemplo hangares. Su manera de adosarse fue normalmente creciendo en el mismo eje, con lo que se obtenía una nave más larga formada por los tramos constituidos por las láminas individuales apoyadas en vigas arqueadas interiores separando los tramos. Naturalmente también se podían unir en paralelo, pero si se constituían por naves alargadas como las recién descritas, la serie de pilares en la línea de unión diferenciaba claramente la existencia de naves yuxtapuestas. Las dimensiones para las más usuales oscilan entre anchos de 15 a 25 m y largos de 7,5 a 20 m (Rühle, 1958, 227) evidenciándose en ellas que «por la mayor longitud del ancho se origina una mayor altura que desde el punto de vista arquitectónico da lugar a muy bellos abovedados» (Bloem, 1954, 211). Por otra parte, y como particularidad, en ellas no era precisa la disposición de grandes vigas de borde como en las anteriores, siendo éstas apenas un refuerzo del borde recto, siempre y

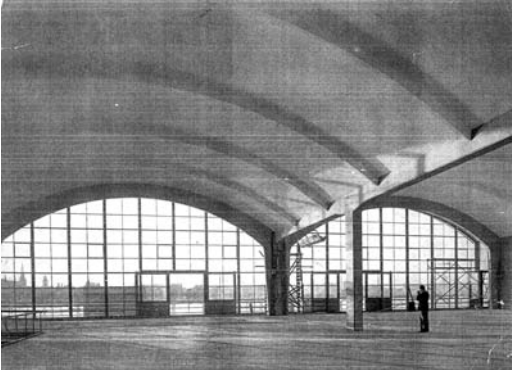


Figura 3
Terminal de pasajeros, Holland-Amerika-Lijn, Rotterdam
c.1953 (Havenwerken, s.f.)

cuando no superasen las dimensiones máximas teóricas de 40×40 m. Como importante diferencia respecto a las realizadas en el periodo prebélico, en ellas no se hizo uso de tirantes. Sin embargo, dado su mayor riesgo de pandeo local, la práctica habitual fue introducir refuerzos paralelos a los arcos de sustentación, siendo típicamente tres el número de dichos refuerzos. De esta forma, dichas soluciones perdieron en general el aspecto liso que caracterizó a las láminas largas. Un bello ejemplo de este tipo se encuentra en la terminal marítima de la compañía Holland-Amerika Lijn en Rotterdam construida por los arquitectos Van den Broek y Bakema hacia 1953 (figura 3). Como evolución de este tipo de abovedados, para grandes luces se emplearon en algunos casos superficies onduladas creando soluciones de doble curvatura, siendo paradigmáticos los hangares de A. Perret en Marsella de 1952 con vanos de cien metros. No obstante se entra aquí en el ámbito de soluciones singulares saliendo de las referencias característicamente industriales.

SHEDS CILÍNDRICAS

Elevando uno de los bordes rectos de una lámina del tipo anterior se obtiene una cáscara mediante cuya repetición se reproduce la forma en diente de sierra o shed típica de las construcciones industriales. Estas cubriciones tenían la ventaja, además de la economía de material y rapidez de ejecución inherentes a la construcción laminar, de una buena y homogénea di-

fusión de la luz, captada normalmente desde el norte y resbalando por el intradós, gracias a la ausencia de barras u otros obstáculos propios de las sheds con armaduras metálicas. En este caso el número de parámetros geométricos de su diseño son mayores y se tenía que proceder a un afinado ajuste además de con el módulo cubierto por cada lámina, con la inclinación, radio de curvatura y ángulo de ventanales. Se consideraba además, que para una correcta iluminación la altura sobre el suelo de la viga de borde o canalón no debía ser inferior a 5 m. Dado, no obstante, que en otra ponencia de congreso (García 2009) hemos realizado un estudio particular para las shed de hormigón, aquí solo las trataremos en sus rasgos esenciales.

Como elementos de sustentación típicos estuvieron los pórticos de vigas curvadas en los extremos y la viga canalón sobre la que apoyaba el borde recto inferior. El borde superior solía descansar puntualmente sobre barras montantes colocadas entre la viga canalón y dicho borde. Sólo en algún caso muy singular el borde superior fue construido sin apoyos intermedios. Las condiciones de cálculo para estas láminas derivaron de las de tipo simétrico aunque aspectos como la menor flecha obligada por la inclinación y la asimetría introdujeron notables complicaciones. Sin embargo, por su ventajosa utilización fueron objeto, al igual que las simétricas, de intensivo estudio, el cual condujo a tabulaciones bastante detalladas de sus parámetros principales. Fueron precursoras las tablas de Dyckerhoff y Widmann ya en la década de los cuarenta, siguiéndoles estudios en Inglaterra, antigua Europa del Este y Holanda.

Estas láminas eran siempre más costosas que las simétricas y el rango de dimensiones adecuado para mantenerlas en valores económicos era según Rühle (1958, 227) entre 7,5 y 10 m de ancho y entre 10 y 20 m de largo dando lugar a alturas de bóveda entre 3,5 y 4 m con altura de ventanales de 2,5 m y canto de viga canalón de 1 m. Efectivamente, éste fue el orden de tamaños en que se realizaron gran número de las primeras construidas tras la guerra, las cuales tuvieron como particularidad la disposición vertical de los ventanales. No obstante, este tipo de bóvedas ya habían sido ensayadas en Alemania en años anteriores siendo un notable ejemplo la realizada en Schaffhausen y construida no después de 1942 para una fábrica de cuerdas (figura 4).

Muy rápidamente, y dada la extensa utilización que de esta disposición se hizo, se iniciaron mejoras y

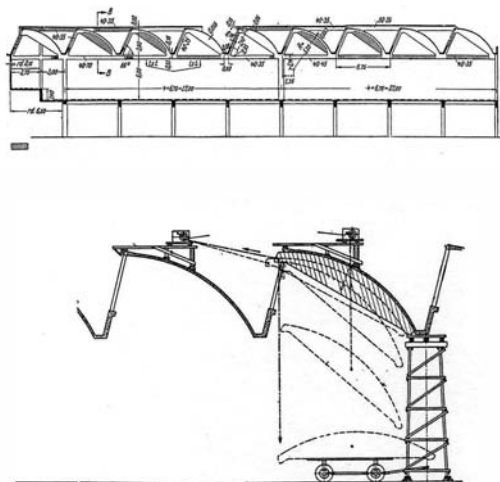


Figura 4
Sheds cilíndricos en fábrica en Schaffhausen (Van der Weiden 1942, 142). Proceso de encofrado-desencofrado recuperable en sheds cilíndricos (Havenwerken, s.f.)

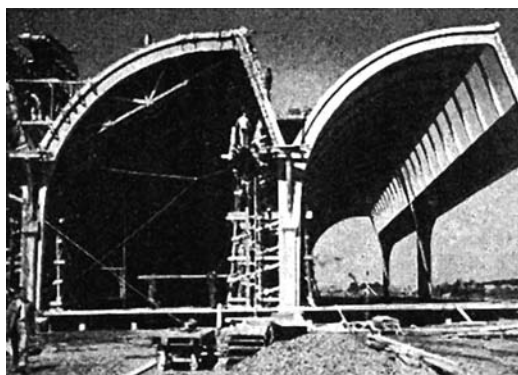


Figura 5
Fábrica Jamin, Oosterhout, 1955 (Haas 1955, 145)

perfeccionamientos, como por ejemplo el cambio hacia ventanales inclinados en lo que pasaría a ser una constante en todas ellas. Otros fueron más bien orientados a facilitar y economizar la ejecución con sistemas que fueron desde el máximo aprovechamiento de encofrados recuperables hasta la prefabricación (figura 4). De esta última merece mencionarse el sistema de la firma alemana Ed. Züblin AG que construía la lámina mediante elementos prefabricados curvos de

85 cm de ancho. No obstante, al igual que con las anteriores láminas el principal avance provino de la introducción del pretensado en los primeros años cincuenta. Con ello se dio un importante salto en las dimensiones alcanzándose una longitud de 40 m en el mayor de los casos por nosotros conocidos, la cubierta de la fábrica Jamín en Oosterhoff, Holanda, construida por los arquitectos Masselink, Bruins y van der Zoo y el ingeniero A. M. Haas en 1955 (figura 5).³ Dado su tamaño, para estas grandes cáscaras fue necesaria la introducción de nervios de refuerzo transversales para prevenir pandeos. Como referencia, la mayor de las estructuras realizada con hormigón armado normal sin pretensar, la fábrica de papel Bowater levantada entre Chester y Manchester alcanzó en sus láminas los 30 m de longitud. Por otra parte, la unión de prefabricados y pretensado estuvo presente de forma singular con el sistema ideado por el ingeniero suizo Hossdorff mediante el cual, el difícil problema de albergar las vainas de los cables en el reducido espesor de la lámina se solucionaba disponiendo aquellas exteriormente sobre su extradós. Su almacén en Wangen, Suiza con módulos de 25,20 × 8 m construido a comienzos de los sesenta ha permanecido como su demostración más emblemática (figura 6).

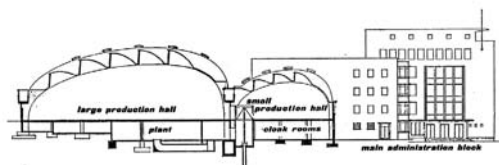
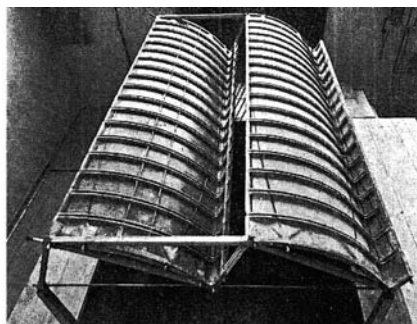


Figura 6
Almacén, Wangen, sistema Hossdorff (Hossdorff 1963, 555). Imprenta del Banco de Inglaterra. Essex. Sección transversal por naves (Easton 1957, 120)

Los ejemplos dados de esta lámina muestran un panorama relativamente variado de soluciones aunque existieron aplicaciones que se extendieron más allá de sus formas estándar hasta ahora contempladas. Como ejemplo ilustramos las instalaciones de la imprenta del Banco de Inglaterra en Essex de los arquitectos Easton y Robertson, en donde una larguísima nave de 240 m por 37,5 m de ancho se cubría con series de seis láminas paralelas empotradas en los grandes arcos transversales que configuraban el perfil de la misma (figura 6).

SHEDS NO CONTINUAS

Por contraste con las soluciones anteriores de sheds en que una lámina o su continuación en varios tramos a todo lo ancho de la nave permitía la apertura de un ventanal horizontal continuo, otro amplio grupo de soluciones se buscó en láminas que por su disposición o forma configuraron unidades de marcada individualidad cuya características fundamentales fueron la formación de lucernarios independientes y el crecimiento por yuxtaposición. Sobre ellas es preciso citar los adelantados ejemplos con superficies de conoides realizados por Freyssinet en Francia hacia 1930 y que pueden considerarse como la referencia de gran parte de las que se construirían después. Dos construcciones muy notables fueron la compañía nacional de radiadores en Dammarie-les-lys (Seine et Marne), al parecer repetida en otra factoría en Aulnay sur Bois y con unidades que, aunque solo tenían un fondo o longitud de 6 m, llegaron a los 50 m en sentido transversal (figura 7), y los talleres de reparación para el ferrocarril en Bagneux. Aunque de estos últimos no disponemos de referencias dimensionales, se puede apreciar que sus conoides se asentaron sobre unidades en planta más estrechas y largas y, por tanto, mucho menos alargadas. En ambos, como ocurre en general en todas las láminas de este tipo, fue necesaria la utilización de atirantados, bien formando parte de las cerchas de hormigón arqueadas de apoyo empleadas en el primero o bien como delgadas barras de hormigón conectadas a la lámina con algunos montantes verticales en el segundo.

De este sistema con conoides al que podríamos considerar como característicamente francés dados su origen, sus primeros análisis (Fauconnier, 1933) y la mayor frecuencia con que se empleó en dicho país,

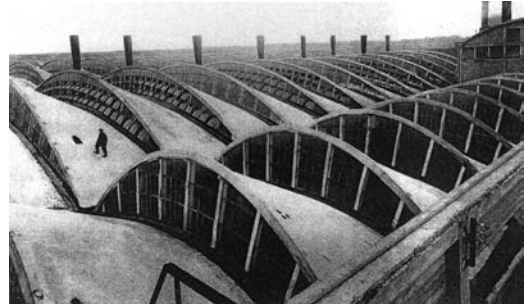


Figura 7
Láminas de conoides. Fábrica radiadores, A. Dammarie-les-lys (S-et-M), E. Freyssinet (*L'Architecture Vivante* 1931, printemps, 21)



Figura 8
Fábrica Kores, Meux (Henn 1965, vol. 2, 212)

sería también destacable por su elegancia, aunque no por sus excesivas dimensiones, la fábrica Kores en Meux con conoides sobre una retícula de soportes de $17,54 \times 8$ m y digna representante de las construidas ya en el periodo de posguerra (figura 8).

Probablemente por un deseo de simplificación de los encofrados, el sistema de conoides fue dando paso a superficies cónicas o cilíndricas de generatrices inclinadas, las cuales suponían, dentro de ciertos límites, una aproximación a la forma exacta del conoide. Un ejemplo interesante de ello es la fábrica de aceros Johnson en Quilmes con unidades mixtas for-

madas por un segmento de superficie cilíndrica horizontal y otro de superficie cónica que produce la inclinación necesaria para la aparición de lucernarios (Laucher 1951, 55). De esta singular solución habría que destacar también la posición de los soportes dejando las superficies en vuelo y en elegante equilibrio a ambos lados del mismo. Ya dentro del tipo con cilindros oblicuos, un caso digno de consideración es la solución para unos talleres en Polonia diseñada por Dragula, Slomczynsky y Zalewsky y enmarcada dentro de las investigaciones de la Oficina para la Construcción Industrial de dicho país. En ella, el ingenioso dispositivo de un soporte doblemente bifurcado permitió, no solo un apoyo de cuatro puntos independientes para cada lámina sino, sobre todo, eliminar los imprescindibles tirantes presentes en todas las soluciones anteriores gracias a la capacidad de los soportes inclinados para asumir fuerzas horizontales (figura 9). Dicha solución es, por otra parte, un exponente de la importante labor investigadora y experimental realizada en el campo estructural, y especialmente en sus aplicaciones industriales, tanto en Polonia como en otros países del este de Europa en las primeras décadas de posguerra.

Por último, y como una cierta variedad de la anterior con soluciones cilíndricas haremos referencia al sistema *compound* patentado por el ingeniero Silberkuhl alemán y en el que los lucernarios se constituían

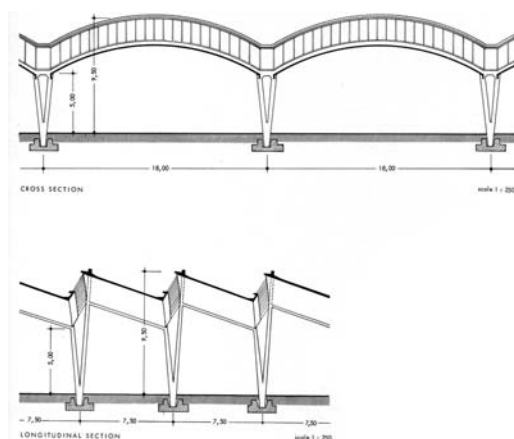


Figura 9
Láminas de cilindros oblicuos, Polonia (Henn 1965 vol. 1: 103)

por ligeras celosías metálicas curvas atirantadas unidas rígidamente a los bordes curvos de la lámina, colaborando mutuamente en la resistencia. Lámina en este caso no solo actúa por efecto membrana sino que también colabora como zona de compresión solidariamente con el cordón de la celosía. De este sistema pueden citarse los talleres de la Blaupunkt en Salzgitter proyectados por W. Henn con una luz de 35 m, la fábrica de tractores Porshe en Friedrichscharfen am Bodensee de 1956 o el taller de mantenimiento Mercedes en Essen de 1957, estos dos últimos con luces similares al primero y todos ellos con la ligereza y luminosidad interior que es característica de este sistema.

FORMAS EN CÚPULA

Aunque no tan frecuentes como las anteriores para uso industrial, las láminas sobre plantas cercanas al cuadrado y asimilables por su abombamiento central a las formas en cúpula se utilizaron también en interesantes aplicaciones. Su forma de empleo más característica fue la repetición en ambas direcciones dando lugar a naves con soportes intermedios según retículas regulares. El sistema más utilizado de iluminación fueron las claraboyas y los óculos proporcionando luz cenital, aunque en algunos casos pudieron combinarse con otros sistemas. Una primera categoría se puede establecer con aquellas láminas que apoyan en todo el perímetro curvándose a partir de éste de distintas maneras hacia el centro. Dentro de ellas ocuparían un lugar destacado las láminas formando cubiertas claustrales o en pabellón o sea con cuatro paños curvos reunidos en su centro. Como ejemplo concreto merecedor de un comentario estarían los almacenes de algodón construidos en Le Havre, formados por 60 unidades de $19,30 \times 18,8$ m en las que ya se utilizó el pretensado con cables rectos Freyssinet aunque sólo en las vigas de borde sobre las que apoyaban las láminas (figura 10). Éstas estaban abiertas en su coronación dejando un amplio linternón que servía principalmente para forzar el tiro y localizar la combustión en una sola unidad en caso de incendio.

Alternativamente a este sistema existieron otras soluciones en las que, en forma continua, la lámina se iba curvando suavemente desde los bordes hacia el centro a semejanza de la deformación de una

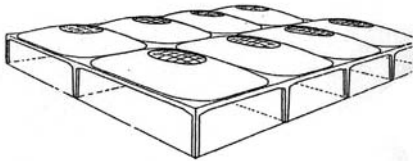
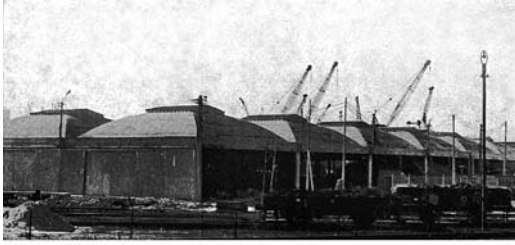


Figura 10
Almacenes de algodón, Le Havre (Van der Vlugt 1954, 249). Sistema «Buckelschale», A. Weder y H. Isler (Bouw 1955, 734)

membrana elástica. Una solución de este tipo fue descrita con la denominación «Buckelschale» en 1955 por los ingenieros suizos A. Weder y H. Isler indicando diferentes casos teóricos de aplicación (figura 10). Sus autores mencionaban el mejor comportamiento que las láminas cilíndricas dada su mayor rigidez y una mayor economía. Sobre ella se reconocía, sin embargo, la imposibilidad de un cálculo teórico, procediéndose por medio de modelos experimentales. Como aplicación práctica se cita una fábrica de vidrio en construcción con una nave de 25×50 m compuesta por tres unidades de este tipo. Las cáscaras resultantes eran en general bastante rebajadas y sus altos empujes tuvieron que absorberse gracias al uso de pretensados en las cuatro vigas horizontales de borde. Isler posteriormente desarrolló ampliamente su solución en múltiples aplicaciones.

Finalmente estarían aquellas soluciones en que la lámina no apoya en todo el perímetro sino solo en algunos puntos aislados. De ellas la solución más utilizada fue la forma de bóveda esférica vaída, es decir apoyada en sus cuatro vértices. Con este tipo de lámina se llegaron a cubrir grandes espacios y fue una de las más frecuentes en aplicaciones no industriales como mercados y espacios de reunión;⁴ sin embargo, existe también un significativo ejemplo en arquitect-



Figura 11
Fabrica Brynmawr, Gales del Sur, 1951 (Haas 193, 103)

tura industrial que parece atestiguar el interés que también despertó en este campo. Su excepcionalidad en este caso estuvo además ligada al papel representativo y casi monumental que desde un principio su propietario quiso dar a la instalación. Nos referimos a la singular fábrica de neumáticos Brynmawr construida en Gales del Sur en 1951 por la cooperativa de arquitectos Co-partnership y por el ingeniero Ove Arup (figura 11). Su nave principal de 100×137 m fue cubierta por 9 bóvedas vaídas de 26×19 m y 7,5 cm de espesor dejando entre ellas bandas libres para permitir la iluminación superior mediante ventanales en arco, completados con 16 grandes claraboyas circulares en cada bóveda. Los puntos de apoyo en las esquinas de cada cuatro bóvedas concurrentes estuvieran formados por cuatro soportes muy cercanos entre sí estando además inclinados mutuamente formando parejas que parecen acordes al mayor empuje proporcionado por el lado mayor de las bóvedas. No obstante, esto se ha de considerar más bien de carácter expresivo ya que todas las láminas están atirantadas por sus cuatro lados.

PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS

Las soluciones con estas superficies regladas no corresponden a un solo tipo o idea formal de cubierta, ya que dada su versatilidad en función de la forma en que se dispongan pueden asimilarse, por su semejanza en el resultado, a muchos de los tipos antes comentados. Por sus particulares características estas láminas permitieron un cálculo exacto relativa-

mente sencillo que fue desarrollado primeramente por Félix Candela y puesto en práctica en sus realizaciones en México, las cuales mostraron con hechos la validez de sus teorías. Geográficamente, por tanto, fueron también los primeros tipos de láminas no desarrollados en Europa, contando con significativos ejemplos en países de América latina. Estas superficies se han estudiado con detenimiento en diversas monografías, aunque aquí, siguiendo el planteamiento de este trabajo, nos centraremos en sus aplicaciones estrictamente industriales, las cuales como se verá ofrecieron a su vez un significativo número de variantes.

De todas sus posibles disposiciones, la que probablemente más y más sistemáticamente se ha empleado en el campo industrial es la que adopta la forma de una sombrilla o paraguas soportado por un solo pilar central. La planta rectangular de cada unidad se forma con los cuatro paraboloides resultantes de dividirla en cuatro partes iguales. Esto configura una superficie compuesta con un perímetro rectangular horizontal en la parte más alta y cuatro aristas descendentes desde los puntos medios de los lados que se reúnen en el pilar. Los paños alabeados «rellenan» la superficie delimitada por el perímetro y las aristas recién descritas. Puesto que la superficie actúa como un colector respecto a la lluvia, ésta se evacua por el interior del soporte que actúa de bajante. Con esta disposición básica, frecuentemente empleada para edificios de almacenaje, la aplicación más notable que conocemos, sin embargo, es el edificio de filtros de la instalación depuradora de agua de Berenplaat en Holanda diseñada en 1959 y finalizada en 1965 por el arquitecto W.G. Quist con unidades cuadradas cercanas a los 22 m de lado (figura 12). En este caso el refinamiento de la transición hacia el soporte y la transparencia hacia el exterior de todos los paraboloides dejan clara la intencionalidad estética del autor, que trasciende lo meramente utilitario. Sobre esta solución base se ha empleado en ocasiones una variante obtenida por la leve inclinación de todas las sombrillas. Ello permite la existencia de aberturas entre las unidades, que pueden aprovecharse para iluminación o ventilación. Muestra son, por ejemplo, los interesantes ejemplos de la fábrica de Ron Barcardi de México en Cuautitlan proyectada por Félix Candela como ingeniero y el arquitecto Luis Félix Landa y de la factoría Volkswagen de Palma Sola en Morón, Venezuela, en sus edificios de ensamblaje y de taller

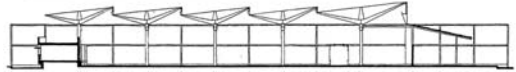


Figura 12

Instalación depuradora de Berenplaat, edificio de filtros, W. Quist, 1965 (Wieschemann 1968, 146). Factoría Volkswagen, Morón, Venezuela. Bornhost y Neuberger. Nave de montaje (Wieschemann 1968: 144)

mecánico, ambos construidos en 1963 según diseños de Dirk Bornhorst y Pedro Neuberger (figura 12). Las unidades de paraboloides del último edificio mencionado, de tamaño 10×10 m, iban acompañadas además por un pequeño anexo denominado refresquería en el cual se emplearon unidades más pequeñas de 5×5 m pero posición invertida. En España un ejemplo con unidades inclinadas es la fábrica Tecosa en La Carolina obra de Fernando Higueras (1966–7).

En la fábrica de ron recién mencionada, Candela nos ofrece también otra solución completamente diferente usando paraboloides hiperbólicos, la cual fue destinada a la nave de embotellado. Se trató de una nave formada por tres bóvedas de arista de algo más de 25 m de lado puestas en sucesión pero conformada cada una de ellas por la intersección de dos paraboloides de ejes perpendiculares. En cada una de las bóvedas resultantes los arcos parabólicos de borde están levemente inclinados hacia fuera lo que, además de proteger con su vuelo las grandes superficies acristaladas de fachada, deja entre bóvedas contiguas unos paños triangulares libres que se acristalan para aumentar la iluminación natural. Dadas las excelentes condiciones estáticas de la lámina su espesor se redujo a sólo 4 cm (figura 13).

Otras aplicaciones de interés derivan de la colocación del paraboloide con el plano tangente de su vértice en posición horizontal y limitado por planta

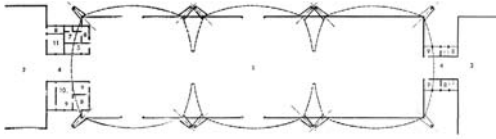


Figura 13
Fábrica Barceló, Cuantitlan. Candela y Landa. Nave embotellado (Henn 1965, vol. 2: 30)

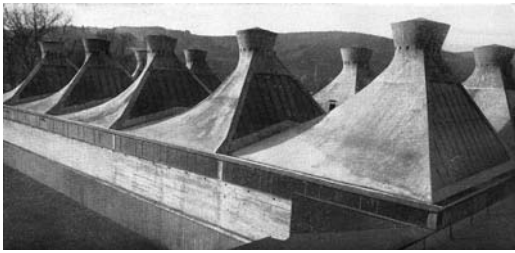


Figura 14
Talleres de fundición G. L. Rexroth GmbH, Lohr am Main. C. Siegel y R. Wonneberg (Henn 1965, 80)

rectangular. Esto da por resultado líneas de borde según parábolas generalmente verticales, alternativamente cóncavas y convexas, y formas generales que se asemejan a bóvedas parabólicas con ligeras depresiones en su interior. Un sistema patentado de esta clase fue el realizado por Silberkuhl con unidades prefabricadas que se colocan contiguas a modo de grandes placas de cubierta con doble curvatura y que tuvo gran difusión. Finalmente, y como último ejemplo digno de atención por su singularidad mencionamos los talleres de fundición G. L. Rexroth GmbH en Lohr am Main, Alemania cuyo empleo de los paraboloides hiperbólicos sirvió además de cómo forma de cubrición, como solución adecuada para la iluminación y evacuación de gases (figura 14). Proyectados por los arquitectos Curt Siegel y Rudolf Wonneberg, su particularidad estriba en la

formación sobre cada una de sus naves paralelas de una serie de unidades de cubierta constituidas por dos paraboloides simétricos cada una, dispuestos de forma que en uno de los lados de la cubierta dejan un lucernario trapezoidal inclinado limitado lateralmente por los bordes rectos libres de los dos paraboloides. La planta de cada unidad cubre un rectángulo de $13,5 \times 15$ m. Dicha solución geométrica no es sin embargo pura y como remate superior se colocó un elemento circular de ventilación con acuerdos en transición hacia las superficies de los paraboloides.

NOTAS

1. DYWIDAG, como nombre comercial corresponde a la contracción de Dyckerhoff & Widmann AG primeros socios de la firma creada en 1922.
2. El primer ejemplo de cables pretensados incluidos dentro de láminas cilíndricas simétricas se realizó en Le Havre. En cuanto a la introducción del pretensado según directrices parabólicas en las láminas cilíndricas, la primera presentación completa se atribuye al francés Y. Guyon en una ponencia en Roma el 26 de febrero de 1951 (Van der Vlugt y Bouvy 1954, 248–9).
3. Para dicha estructura, realizada con el sistema Freyssinet de pretensado se contó con la colaboración del laboratorio de materiales de Madrid dirigido por Carlos de Benito, en el que se realizaron modelos de rotura a escala que confirmaron los resultados de cálculo.
4. En Leningrado se construyó una bóveda de estas características cubriendo un almacén portuario cuadrado de 120 m de lado (Henn 1965, 138).

LISTA DE REFERENCIAS

- Bloem, H. 1954. «Betonen schaaldaken II». *Cement*, 209–11.
- Bouw. 1955. «Het gewelfde shaaldak» (Uit andermans eigen koker), 734–5.
- Easton y Robertson. 1957. «Drukkerij van de Bank of England». *Bouw*, 120–1.
- Fauconnier, M. «Essai de Rupture d'une Voute Mince Conoide a Beton Armé». En *Proceedings, IABASE*, vol. II, Zurich, 1933.
- Gravesen, J.O. 1953. «Schaaldaken met golf profiel». *Bouw*, 90–1.
- Haas, A.M. 1953. «De nieuwerubberfabriek te Brynmawr, Zuid-Wales». *Cement*, 103–5.

- Haas, A.M. y Baas, J.G. 1955. «Prestressed concrete north-light shell structure of 2 × 131' continuous span at Oosterhout». *Cement* 144–6.
- Hajnal-Kónyi, K. 1950. «Tonvorming gewelfde daken». *Bouw*, 770–4.
- Havenwerken, s.f. *Daken in Betonschaalbouw*. Publicación de la Nederlandse Maatschappij voor Havenwerken N.V.
- Henn, W. 1965. *Buildings for industry*. Vol 1 y 2. Hayden Book Co, New York. [Ed. original en alemán 1961.]
- Hossdorf, H. 1963. Geprefabriceerde schedschalen voor de bouw van een opslagplaats in Wangen (Zwitserland)». *Cement*, 554–7.
- Laucher, C. 1951. «Sheds coniques pour la fabrique de aciers Johnson à Quilmes». *L'Architecture d'aujourd'hui*, octubre, vol. 22, 54–5.
- L'Architecture Vivante*. 1931. Printemps. Fotos y planos estructuras de Freyssinet sin comentarios, 20–4.
- Rühle, H. 1958. «Rationalisatie bij de toepassing van schaaldaken». *Bouw*, 226–233.
- Van der Vlugt, B.W. y Bouvy, J.J.B.J.J. 1954. «Voorgespannen Schaaldaken». *Cement*, 247–51.
- Van der Weiden, P.A. 1942. *De 8 en Opbouw*, 141–6.
- Wischemann, P.G. 1968. *Edificios de hormigón*. Barcelona: Gustavo Gili. [Ed. original en alemán.]

