



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Estructuras laminares

Apellidos, nombre	Basset Salom, Luisa (lbasset@mes.upv.es)
Departamento	Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Centro	Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

Se presentan las estructuras laminares describiendo su comportamiento estructural y los tipos, profundizando más en la bóveda cilíndrica, cúpula y paraboloides hiperbólico.

2 Introducción

Las estructuras laminares (llamadas también cáscaras) son superficies delgadas curvas de pequeño espesor, comparado con las dimensiones globales de la estructura, que resisten, por su forma, las cargas de peso propio y las cargas exteriores mediante esfuerzos normales de compresión y/o tracción y tangenciales, uniformes en el espesor de la propia superficie.

Su eficiencia se debe a su curvatura y al alabeo, por lo que puede mejorarse su comportamiento resistente con gran economía de sección, material y peso. Son las más eficientes desde el punto de vista estructural.

3 Objetivos

El alumno, tras la lectura de este documento, será capaz de identificar las estructuras laminares, describir su comportamiento, los sistemas utilizados para su rigidización, así como proponer ejemplos reales de edificios con esta tipología estructural.

4 Estructuras laminares

4.1 Antecedentes

El desarrollo de las superficies cilíndricas tiene como punto de partida las bóvedas de medio cañón de ladrillo que fueron perfeccionadas por los romanos. El arte de las bóvedas reapareció con el Románico y, posteriormente, con el Gótico, evolucionando desde las pesadas bóvedas de ladrillo a las esbeltas bóvedas nervadas de sus catedrales.

Por su parte, las cúpulas se han utilizado en arquitectura desde los primeros tiempos. Probablemente la primera prueba de ello se encuentre en un bajo-relieve asirio (705-681 A.C.) que mostraba un grupo de edificios cubiertos con cúpulas hemisféricas y puntiagudas. El desarrollo de las cúpulas va aparejado con el desarrollo de los materiales. En la antigüedad se construían de piedra o mampostería, pasando luego por el ladrillo y la madera. Los romanos utilizaron frecuentemente las cúpulas para cubrir basílicas, mausoleos, baños públicos, etc. La mayor de todas es la del Panteón de Roma (120-124 D.C.), con 44 m de diámetro hecha de hormigón en masa de distinta densidad. Otras cúpulas importantes que fueron marcando la evolución de esta tipología son la cúpula de Santa Sofía de Constantinopla (532-537), la de Santa María de Florencia (s. XV), la de San Pedro de Roma (1546-1590) y la de San Pablo de Londres (1705-1710).



Con la aparición del hierro evolucionaron tanto bóvedas como cúpulas debido a la rapidez de puesta en obra y a su alta resistencia en comparación con su peso, pasando posteriormente a la utilización del hormigón armado. Una de las primeras cúpulas de hormigón armado es la del "Centennial Hall" de Max Berg en Wroclaw, Polonia (1912). Se trata de una construcción excesivamente pesada que no aprovecha las ventajas del hormigón.

La transformación de las bóvedas y cúpulas tradicionales en estructuras laminares de hormigón armado cubriendo espacios de grandes luces (superficies delgadas de pequeño espesor) es un logro de este siglo. La primera cáscara delgada de hormigón armado en forma de cúpula es el Zeiss Planetarium (Jena, 1925), de 6 cm de espesor, 25 m de diámetro y 12.5 m de altura, obra de Walter Bauersfeld y de los ingenieros F. Dischinger y U. Finsterwalder (imagen 1). La armadura está formada por una malla triangulada de acero sobre la que se vierte el hormigón. Este sistema, desarrollado por Bauersfeld fue patentado como sistema Zeiss-Dywidag.

Tuvieron un gran auge a mediados de siglo, al finalizar la 2ª Guerra Mundial, por la escasez de materiales como el acero y el bajo coste de la mano de obra, desapareciendo progresivamente a partir de los años 70.

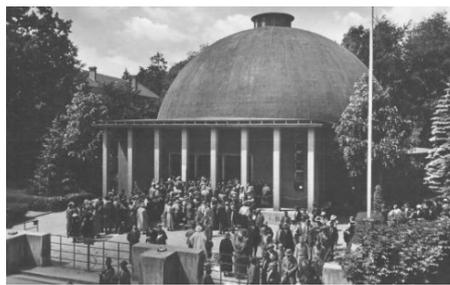


Imagen 1. Zeiss Planetarium, Jena

4.2 Tipos

Las superficies pueden clasificarse en función de su curvatura en:

Simple curvatura o desarrollables: cuando la curvatura en un punto dado es del mismo signo en todas las direcciones, excepto en una de ellas (recta generatriz) en que vale 0. Ejemplos: cilindros y conos

Doble curvatura:

1. **Sinclásticas:** cuando la curvatura en un punto dado es del mismo signo en todas las direcciones. Ejemplos: cúpula (esfera), paraboloides elíptico, elipsoide, hiperboloides de dos hojas (imagen 2 a).

2. **Anticlásticas:** cuando la curvatura en un punto es positiva en algunas direcciones y negativa en otras. Ejemplos: paraboloides hiperbólicos, conoides, hiperboloides de una hoja (imagen 2 b).

Las superficies pueden generarse por rotación o traslación. En el primer caso la curva gira alrededor de un eje llamado de rotación, mientras que en el segundo se mueve paralelamente a sí misma. Son ejemplos de superficies de revolución la esfera, el elipsoide de revolución, el paraboloides, el hiperboloides o el cilindro. Son ejemplos de superficies de traslación el paraboloides elíptico, el paraboloides hiperbólico o el conoide.

Si la superficie puede describirse por el movimiento de una línea recta se llama superficie reglada, como el cilindro, el cono o el paraboloides hiperbólico.

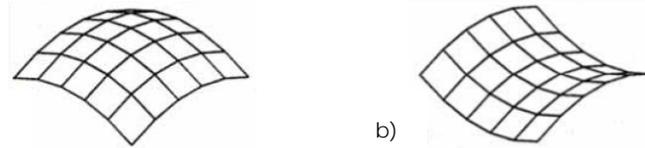


Imagen 2. Superficies de doble curvatura: a) sinclástica, b) anticlástica

4.3 Comportamiento estructural

Una membrana ideal es una hoja de material, tan delgada en comparación con sus dimensiones laterales que sólo puede desarrollar tracciones que serán bidimensionales a lo largo de su superficie (imagen 3). Al ser de pequeño espesor, la rigidez a flexión y cortante es despreciable, así como la resistencia a compresión, puesto que, de lo contrario, con una compresión pequeña pandearía.

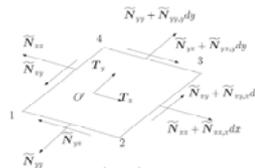


Imagen 3. Elemento diferencial de membrana

La estabilidad de las membranas se debe a su geometría y a las tensiones que desarrolla bajo la carga.

La teoría de la membrana se toma como base para el diseño de superficies curvas, aunque no refleja necesariamente la verdadera distribución de tensiones ya que se asumen condiciones estáticamente determinadas. Sin embargo, esta aproximación es válida para entender algo del comportamiento de estas estructuras, ya que el análisis real es muy complejo

Las superficies reales son lo suficientemente delgadas como para considerar despreciables las tensiones de flexión pero lo suficientemente gruesas como para no pandear bajo pequeñas tensiones de compresión. Por lo tanto, las cargas exteriores se resisten no sólo a través de tracciones superficiales, sino también por medio de compresiones superficiales.

Los materiales que pueden utilizarse son la madera, los metales, los plásticos, aunque el material más idóneo es el hormigón armado o pretensado.

En general las tensiones de membrana suelen ser pequeñas por lo que muchas veces el espesor de las estructuras laminares viene determinado por los momentos inducidos por los elementos de apoyo. A pesar de esto las fuerzas de membrana deben evaluarse por varias razones:

1. Determinar dónde se desarrollarán tensiones de tracción para disponer la armadura o refuerzo adecuado, si el material trabaja fundamentalmente a compresión.
2. Determinar cuál es la tensión de compresión mayor con el fin de comprobar el pandeo.



3. Determinar los desplazamientos de los extremos y las tensiones de flexión que se producen al limitar total o parcialmente estos desplazamientos.

Las membranas no son adecuadas para resistir cargas puntuales por lo que deben evitarse siempre que sea posible, pues se puede producir un colapso local

4.4 Bóvedas cilíndricas

El cilindro es la superficie reglada formada por las rectas que pasan por una circunferencia y son perpendiculares al plano que la contiene.

Las bóvedas cilíndricas se caracterizan por la forma de su sección transversal, por el tipo de apoyo en la dirección longitudinal y transversal, por la clase de diafragmas y vigas de borde y por la continuidad a lo largo de varios vanos

La luz habitual varía entre 24 y 48 m con un ancho de 9 a 13,5 m y una relación luz/altura entre 1/10 y 1/15. El espesor gira en torno a los 8 cm pudiendo aumentar cerca de las vigas de borde.

El comportamiento de una bóveda cilíndrica es diferente según la dirección considerada: longitudinal (efecto viga) y transversal (efecto arco).

En dirección longitudinal, la bóveda actúa como una viga, de manera que la altura de su sección transversal es la que determina la magnitud de las tensiones axiales. Si la bóveda es larga y baja, necesita contar con unas vigas de borde muy rígidas, mientras que si se aumenta su altura, puede disminuirse el tamaño de la viga de borde o incluso suprimirla.

En dirección transversal, se comporta como un arco, con fuerzas de compresión a lo largo de la superficie curva y transmitiendo empujes laterales, bajo carga vertical, empujes que se transmiten a las vigas de borde. Si son achatadas los empujes serán grandes, disminuyendo a medida que aumenta la altura de la bóveda.

En el caso de que las bóvedas cilíndricas sean largas, se colocarán las vigas de borde de canto, ya que su propósito principal será soportar las fuerzas longitudinales, mientras que si las bóvedas son cortas, las vigas de borde se colocarán horizontalmente para resistir los empujes laterales.

Una de las primeras estructuras laminares en forma de bóveda son los Hangares de Orly (1921-23, destruidos en 1944) de Eugène Freyssinet, imagen 3. Se trata de bóvedas parabólicas nervadas de hormigón armado, de 9 cm de espesor, 88 m entre ejes, 60 m de alto y 175 m de longitud, para los cuales se diseñó un encofrado deslizante reutilizable.

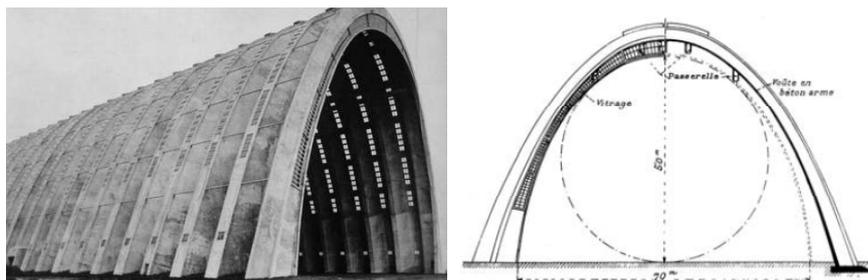


Imagen 4. Hangares de Orly



Otro ejemplo es el Frankfurt Market Hall (1926-27) de los ingenieros F. Dischinger y U. Finsterwalder (Dyckerhoff & Widmann AG) y el arquitecto M. Elsässer. En las 16 láminas cilíndricas de 7 cm de espesor, 14 m de luz y 37 m de largo, se utilizó un armado de doble capa del sistema Zeiss-Dywidag, utilizado anteriormente en el planetario de Jena



Imagen 5. Frankfurt Market Hall

Un ejemplo español de esta tipología es el desaparecido Frontón de Recoletos, (Madrid, 1935) de Eduardo Torroja y Secundino Zuazo, (sección, imagen 6). Dos bóvedas cilíndricas de hormigón armado de diferente tamaño de 8 cm de espesor, 32,5 m de luz y 55 m de longitud, cubren un espacio rectangular limitado por dos muros paralelos de cierre en los extremos del rectángulo y que constituyen los apoyos reales de las bóvedas.

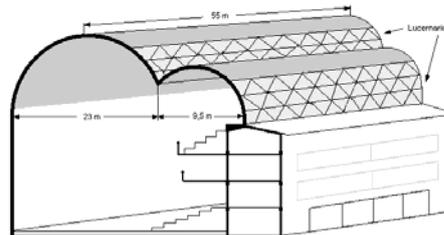


Imagen 6. Esquema de la sección transversal del Frontón de Recoletos, Madrid.

4.5 Cúpulas

Las cúpulas son superficies de revolución definidas por la rotación de una curva plana alrededor de un eje vertical.

Permiten cubrir grandes luces y encerrar la mayor cantidad de espacio con la mínima superficie, por lo que resultan muy aptas para cubrir campos de deporte, piscinas, palacios de congresos, salas de exposiciones, etc., dónde se necesita que los espacios interiores sean diáfanos.

La mayoría de las cúpulas actuales son casi hemisféricas para evitar los empujes laterales, ya que, cuando son más rebajadas se necesitan anillos de tracción para resistirlos

Una cúpula esférica resiste la carga con un sistema de fuerzas internas situadas en su superficie. Normalmente, suele haber una fuerza principal de compresión a lo largo de los meridianos (verticalmente) y una fuerza horizontal menor, generalmente de tracción actuando alrededor de ella (en los paralelos). Para que la teoría de la membrana pueda aplicarse verdaderamente a la cúpula debe estar soportada uniformemente a lo largo de sus bordes. Por otra parte, el desplazamiento de la cúpula debe ser compatible con el desplazamiento de la



estructura sustentante, hecho que no suele ocurrir en la realidad. Esta incompatibilidad produce flexiones, aunque suelen quedar limitadas a las zonas próximas a los bordes.

El espesor habitual de las cúpulas de hormigón armado varía de 7,5 cm a 11,5 cm para luces de 30 a 60m, con un aumento de espesor de un 50 a un 75% en la periferia. Si las luces son mayores se aumentará su espesor, se rigidizará con nervios o bien se formará una doble capa para evitar el pandeo a compresión.

Un ejemplo en España de este tipo de estructura es la cúpula esférica de 47.80 m de diámetro, 44.10 m. de radio de curvatura y 10 cm de espesor del Mercado de Algeciras (1934-1935) de Manuel Sánchez Arcas y Eduardo Torroja (imagen 7). La cúpula cubre un espacio octogonal de 18.2 m de lado y descansa sobre 8 pilares situados en cada una de las esquinas, a los que transmite únicamente carga vertical. La tensión de tracción horizontal se absorbe mediante un anillo octogonal que une los extremos superiores de los soportes.

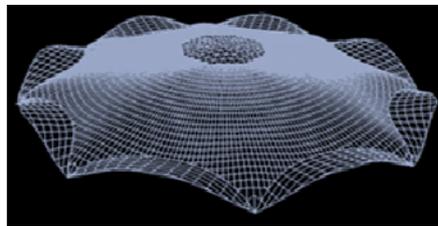


Imagen 7. Esquema de la cúpula del Mercado de Algeciras.

4.6 Paraboloide hiperbólico

El paraboloides hiperbólico (imagen 8) se inscribe bien en un cuadrilátero formado por cuatro bordes rectos. Se trata de una superficie anticlástica de gran rigidez estructural, que transfiere cargas normales a su superficie mediante tensiones tangenciales a ella misma (compresiones en la curvatura convexa, acción de arco y tracciones en la curvatura cóncava, acción de tirante), trabajando en estados de membrana, sin provocar flexiones en el borde.

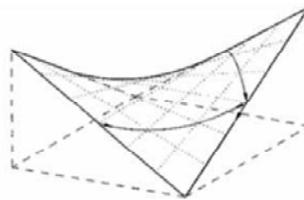


Imagen 8. Paraboloide hiperbólico.

El paraboloides hiperbólico es una superficie reglada generada por dos familias de generatrices rectas que permite ser hormigonada sobre un sencillo encofrado realizado a base de tablas de madera que siguen sus generatrices rectas.

La forma de un paraboloides hiperbólico dependerá de muchos requisitos arquitectónicos de diseño tales como la escala (altura, luz), los materiales, el sistema constructivo, la función y geometría del edificio, etc. Además pueden construirse aislados o combinados de infinidad de formas.

El comportamiento de membrana con fuerzas axiales y tangenciales constantes a lo largo de la superficie se basa en una situación ideal bajo carga uniforme y sin tensiones adicionales debidas a los soportes, situación que no coincide



exactamente con la realidad. El hecho de que la carga no sea uniforme, que no esté articulado en el contorno, que no sea despreciable la rigidez de los elementos de borde en el plano de la superficie, etc., conduce a la existencia de esfuerzos de flexión y esfuerzos cortantes adicionales en las zonas próximas a los bordes.

Puede considerarse adecuada la aproximación a la membrana si el cociente luz/altura es del orden de 9 y la pendiente de las vigas de borde (para piezas rectangulares) varía de $1/5$ a $1/3$.

En España, en 1935, Eduardo Torroja construyó el hipódromo de la Zarzuela en Madrid con una marquesina consistente en una batería de láminas cilíndricas adosadas en un gran voladizo de muy poco espesor.

No obstante, la riqueza visual y arquitectónica de esta forma superficial ha sido explotada fundamentalmente por el mejicano Félix Candela, después de la segunda Guerra Mundial. Algunas de sus obras son: el Pabellón de los Rayos Cósmicos con Jorge González Reina (en la Universidad Nacional Autónoma de Méjico, 1951), formado por dos paraboloides hiperbólicos paralelos apuntados de 1.5 cm de espesor (imagen 9); el prototipo de paraguas invertido formado por 4 timpanos de paraboloides hiperbólicos de hormigón armado apoyado sobre un soporte central, que se iba repitiendo según las dimensiones del edificio proyectado (Iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa, Fábrica textil High Life en Coyoacán o Mercado de Anahuac en Tlaloc), la capilla de Nuestra señora de la Soledad del Attilo (Coyoacán, 1955-59) con Enrique de la Mora, Fernando López Carmona, imagen 10, y el Restaurante Los Manantiales (Xochimilco, 1957-58) con Joaquín y Fernando Álvarez Ordóñez, imagen 11.



Imagen 9. Pabellón de los Rayos Cósmicos, Méjico.



Imagen 10. Nuestra señora de la Soledad del Attilo.



Imagen 11. Restaurante los Manantiales, Xochimilco.

5 Cierre

A lo largo de este tema hemos descrito el comportamiento estructural de las estructuras laminares, dando ejemplos de edificios de los tipos más habituales.

Se proponen buscar ejemplos de estructuras laminares actuales.

Solución: Ejemplos de estructuras laminares actuales: Estación de autobuses de Casar (Cáceres, 2004, arq. Justo García Rubio st: Jaime Cervera Bravo), el Restaurante Submarino en L'Oceanografic (Valencia, 1997-2002, Félix Candela, ing: Alberto Domingo, Carlos Lázaro), imagen 12, o la Terminal TWA del aeropuerto de New York (New York, 1958-1963, Eero Saarinen), imagen 13.



Imagen 12. Restaurante Submarino en L'Oceanografic, Valencia.



Imagen 13. Terminal TWA, aeropuerto de New York, 1958-1963, Eero Saarinen



6 Bibliografía

6.1 Libros:

- [1] Basset, L.; Abdilla E. "Modelos estructurales y diseño estructural", Servicio de Publicaciones SPUPV-98.268, 1998.
- [2] La cubierta laminar del Frontón de Recoletos. Manuscrito original perteneciente al archivo Torroja depositado en CEHOPU
- [3] Analysis of Thin Concrete Shells Revisited: Opportunities due to Innovations in Materials and Analysis Methods. Master's thesis, Delft University of Technology, Bart Peerdeman, 2008
- [4] Eugène Freyssinet, un ingeniero revolucionario. Fundación Esteyco

6.2 Referencias de fuentes electrónicas:

- [5] <http://www.wikipedia.org>
- [6] La cubierta laminar del Frontón de Recoletos.
http://www.cehopu.cedex.es/img/bibliotecaD/Cubierta_laminar_fronton_recoletos
- [7] <http://es.wikiarquitectura.com>

6.3 Figuras e imágenes:

Imagen 1. Zeiss Planetarium, Jena. Disponible en:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planetarium_Jena.jpg

Imagen 2. Superficies de doble curvatura: a) sinclástica, b) anticlástica. Autora: Luisa Basset

Imagen 3. Elemento diferencial de membrana. Autora: Luisa Basset

Imagen 4. Hangares de Orly. [4]

Imagen 5. Frankfurt Market Hall. Autora: Eva K. Disponible en:

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Grossmarkthalle_Frankfurt_Panorama_1.jpg

Imagen 6. Esquema de la sección transversal del Frontón de Recoletos, Madrid. Disponible en:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fronton_Recoletos.png

Imagen 7. Esquema de la cúpula del Mercado de Algeciras. Autora: Luisa Basset

Imagen 8. Paraboloide hiperbólico. Autora: Luisa Basset

Imagen 9. Pabellón de los Rayos Cósmicos. Autor: GAED. Disponible en:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pabell%C3%B3n_de_Rayos_C%C3%B3smicos_01.jpg

Imagen 10. Nuestra señora de la Soledad del Altillio. Autor: GAED. Disponible en:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Iglesia_del_Altillio_01.jpg

Imagen 11. Restaurante los Manantiales, Xochimilco. Disponible en:

http://es.wikiarquitectura.com/images/8/81/Los_Manantiales_250.jpg

Imagen 12. Restaurante Submarino en L'Oceanografic, Valencia. Autora: Luisa Basset

Imagen 13. Terminal TWA, aeropuerto de New York. Disponible en:

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:08terminal5.jpg>