

TECHOS DE GRANDES LUCES

**P.HOLGADO/N.FAJRE
2014**

TECHOS DE GRANDES LUCES

Dr.-Ing., Arq. Pablo F. Holgado, Arq. Nora Fajre
Profesores Titulares de Construcciones II Y III en la
Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

© 2014 pfh editor
pabysil@unt.edu.ar

Queda hecho el depósito que marca la Ley N°11.723

Impreso en S.M.de Tucumán, Argentina
Primera edición: Diciembre 2014

Reservados todos los derechos.
Ninguna parte de esta publicación puede ser
reproducida, almacenada ni transmitida por
ningún medio, sin autorización previa de los
autores.

ISBN 978-987-29230-2-0



9 789872 923020

INTRODUCCION

COMPLEJIDAD DE LOS TECHOS

La mayor o menor complejidad en el diseño y construcción de los techos depende de diversos factores.

Sin duda inciden en la complejidad la organización constructiva del techo y el grado de elaboración de los detalles constructivos. El primero suele estar relacionado con condicionantes contextuales mientras que el segundo está frecuentemente vinculado a decisiones volitivas del diseñador.

Como se ha expresado, diversos son los factores que hacen a la complejidad.

El diseño y construcción de un techo ajardinado (Fig.01) o de un techo con cubierta fotovoltaica (Fig.02) o de un techo de vidrio (Fig.03) seguramente contendrá complejidades mayores que un techo convencional.

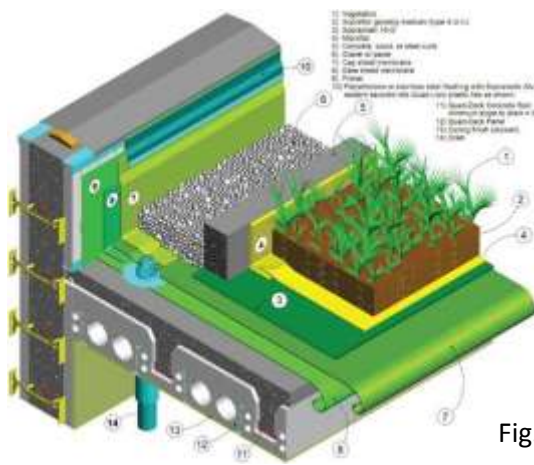


Fig.01



Fig.02



Fig.03

En estos ejemplos la complejidad del techo se ubica a nivel de la cubierta o del material elegido.

Pero si se tuviera que escoger un eje temático para desarrollar la complejidad del techo, convendría tomar una parte esencial del mismo. El tal sentido, la estructura portante asociada con la luz libre entre apoyos constituye un buen elemento ordenador del tema.

Está claro que la estructura portante es tan solo una de las partes constitutivas del techo y que el diseño del mismo involucra muchos más elementos.

No obstante, el desarrollo de los techos complejos se realizará en base a las estructuras que permiten cubrir grandes luces.

INTRODUCCIÓN A TECHOS DE GRANDES LUCES

Conceptos preliminares

Hay cubiertas de grandes espacios que descansan directamente, total o parcialmente, sobre el suelo. En ellas la estabilidad espacial debe resolverse integrada en la estructura del techo (Fig.04: Multihalle Mannheim, Frei Otto 1975; Fig.05: Olimpiastadion Munich, Behnisch 1970; Fig.06: Parque Arqueológico Selinute; Fig.07: edificio en Torre Vieja, Toyo Ito)



Fig.0 4



Fig. 05



Fig.0 6



Fig.0 7

Las cubiertas con formas más convencionales, descansan sobre un sistema diferenciado de apoyos: la estabilidad espacial estará a cargo de estos últimos, mientras que en el plano del techo se resuelve el sistema de distribución de las cargas horizontales.

En estos casos se debe articular adecuadamente la estructura del techo con el sistema de apoyos y arriostramiento.

Para tratar el tema “techos de grandes luces” conviene entonces, diferenciar los techos que responden a geometrías convencionales (formas rectangulares, cuadradas o circulares apoyando sobre columnas), de aquellos que responden a geometrías más complejas e irregulares. Los primeros son más fáciles de ordenar y explicar y abren el camino para el análisis y comprensión de los segundos.

Conviene además recordar que la estructura es una parte muy importante en diseño del techo de grandes luces, pero no es la única. El techo tiene más partes y componentes. Al resolver un techo de grandes luces también hay que pensar en sus apoyos y la estabilidad horizontal de los mismos, el confort y acondicionamiento interior deseado (aislación térmica, impermeabilización, barrera de vapor, cielorraso, etc.) y los detalles pertinentes (evacuación del agua pluvial, las terminaciones de bordes, juntas de dilatación, paso de conductos e iluminaciones cenitales, etc.).

Los techos de grandes luces por lo general cubren salones de grandes alturas. En tales casos cobra gran importancia el estudio de la estabilidad horizontal de la construcción sobre la que apoya el techo. Suelen ser menos viables las paredes portantes y se recurre normalmente a apoyos puntuales.

Dado la gran altura muchas veces no conviene resolver la estabilidad espacial mediante el empotramiento de las columnas en las bases. Por lo tanto las soluciones más comunes suelen ser la triangulación de paños entre columnas o el aporticamiento en dos direcciones normales.

Para no tener que triangular o aporticar muchos paños verticales, el techo debe conformar una superficie rígida con capacidad distributiva de fuerzas horizontales.

De esta manera es posible triangular o aporticar solo el mínimo de paños necesarios. En el siguiente ejemplo se ha triangulado perimetralmente la estructura del techo para que pueda llevar las cargas horizontales hasta los planos verticales de arriostramiento dispuestos en las direcciones X e Y. (Fig.08).

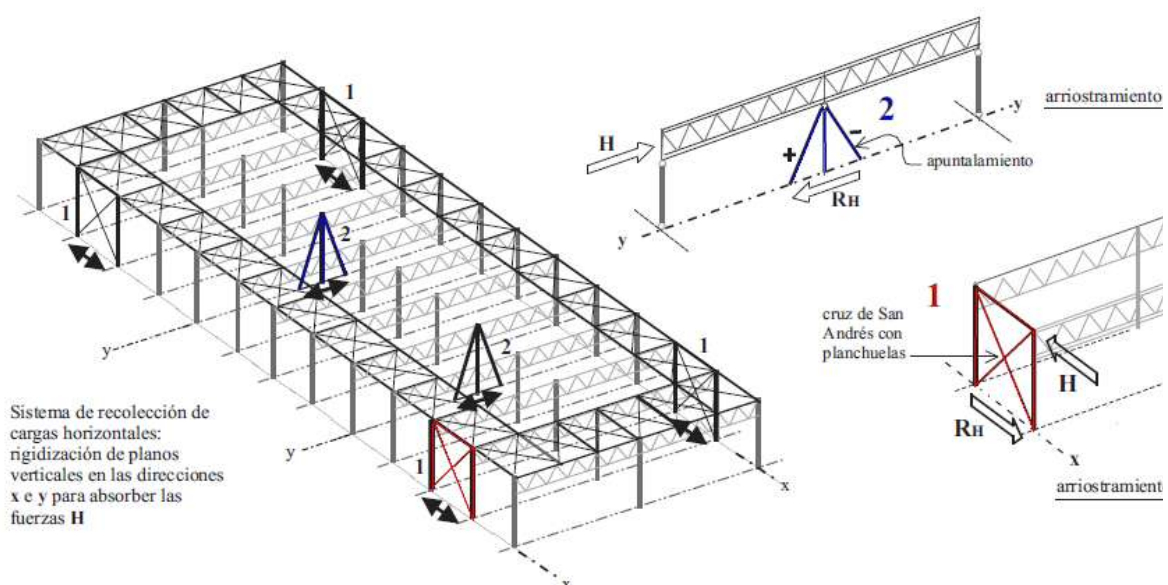


Fig. 08

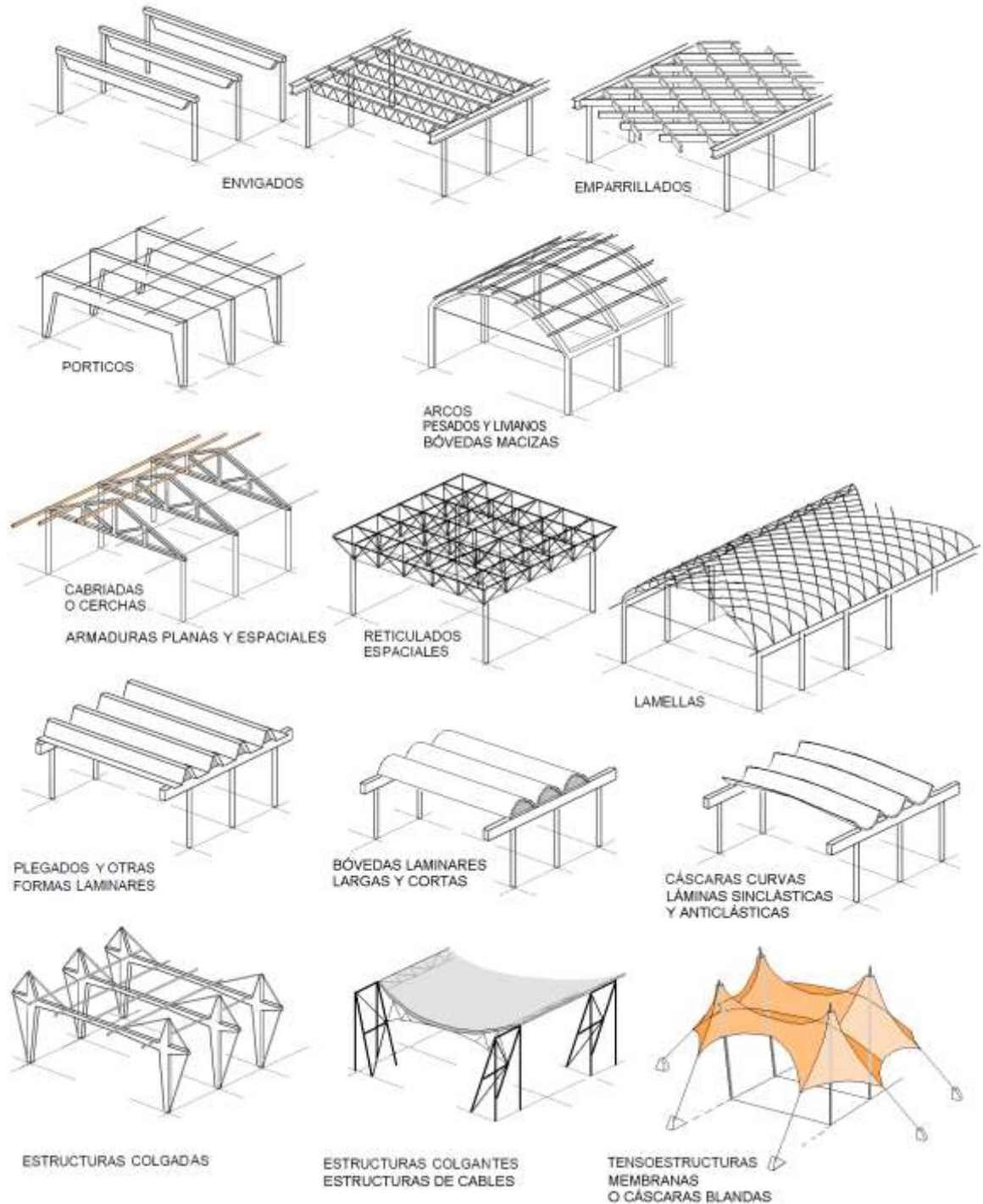
Se verán los techos de grandes luces diseñados con geometrías simples y ordenadas en base a las siguientes tipologías:

TECHOS DE GRANDES LUCES-ORDENAMIENTO GRAL.

	TECHO EN BASE A (tipología de techo)	Tipo de estructura	
01	Envigados	estructura de flexión si son vigas de alma llena, estructura de barras, si son vigas armadas	
02	Emparrillados		
03	Vigas aporticadas (pórticos)		
04	Arcos pesados	Estructuras de masa	Estructuras de compresión
05	Bóvedas macizas		
06	Arcos livianos	Estructura de flexocompresión	
07	Cabriadas y otras armaduras planas	Armaduras planas	Estructuras de barras
08	Reticulados y mallas espaciales	Armaduras espaciales	
09	Lamellas		
10	Plegados	Estructuras laminares o láminas duras	
11	Cáscaras curvas : bóvedas laminares cortas y largas, cáscaras de rotación, superficies regladas, etc.		
12	Techos colgados	Estructuras de cables	Estructuras de tracción
13	Techos colgantes		
14	Tensoestructuras o láminas blandas	Estructuras textiles	
15	OTROS TIPOS DE TECHOS		

En base a la organización del cuadro anterior, se presentan algunos ejemplos gráficos de las formas convencionales de techos de grandes luces, sobre apoyos puntuales.

TIPOS ESTRUCTURALES PARA TECHOS DE GRANDES LUCES



ENVIGADOS Y EMPARRILLADOS

TECHOS DE GRANDES LUCES EN BASE A VIGAS: ENVIGADOS Y EMPARRILLADOS

En ingeniería y arquitectura se denomina viga a un elemento estructural lineal horizontal o inclinado, que apoyando en sus extremos, traslada las cargas que recibe, a sus apoyos sin producir presiones horizontales.

La viga normalmente es un elemento de eje recto, pero también las hay de eje quebrado (Fig.01) y de eje curvo (Fig.02).



Fig.01



Fig. 02

La viga puede estar interrumpida en sus apoyos o continuarse con otras vigas colineales. En este último caso recibe la denominación de “viga continua”, que reduce el momento flector en el tramo gracias a la continuidad que impide el giro libre de sus extremos.

La viga es un elemento estructural que realiza un trabajo interno para trasladar las cargas a los apoyos.

Cuando la sección es llena y dentro de ciertas relaciones ancho-alto, el trabajo interno predominante es de flexión y se dimensiona según los principios que rigen esos esfuerzos.

Cuando la viga está armada en base miembros lineales (viga reticulada, de celosía o armadura) el trabajo interno es axial (barras traccionadas o comprimidas) y se dimensiona conforme los principios de las estructuras de barras.

Un caso particular es la viga llena de sección muy esbelta (viga-pared) en la que el trabajo interno predominante es de corte y se dimensiona de manera distinta a la viga de flexión.

EL ENVIGADO

Es una organización de patrón plano en base a vigas para sostener techos o entrepisos trasladando las cargas unidireccionalmente.

El envigado está formado por una sucesión de vigas paralelas colocadas con una separación conveniente sobre las que descansa la estructura secundaria (el forjado) y el resto de las capas constitutivas del techo o de la cubierta (Fig.03)

Los envigados de vigas paralelas son los más comunes, pero también hay con otras disposiciones, como ser radial, por ejemplo (Fig.04)



Fig. 03



Fig. 04

EL EMPARRILLADO

Es otro tipo de estructura organizado en base a vigas. Está conformado por un entrecruzamiento de vigas que, a diferencia del anterior, tiene capacidad para trasladar las en más de una dirección. Ello posibilita que, comparativamente, para cargas y luces similares, el emparrillado presente alturas menores de las vigas que un envigado. (Fig.05)

No obstante en envigados y emparrillados de grandes luces, las vigas suelen tener altura importante. Las vigas de alma llena pueden resultar con un peso propio excesivo, de allí que frecuentemente se recurra a vigas livianas (perfiles doble T con alma aligerada o vigas reticuladas).

En las vigas de gran altura existe el riesgo de pandeo lateral de las zonas comprimidas (como ser el ala o el cordón superior en los tramos), por lo que deben ser arriostradas convenientemente (Fig.06)



Fig. 05



Fig.06

El siguiente ejemplo, corresponde a un envigado de 30m de luz libre, resuelto en base a vigas reticuladas, simplemente apoyada, cuya altura es igual a $L/15$ (Fig.07).

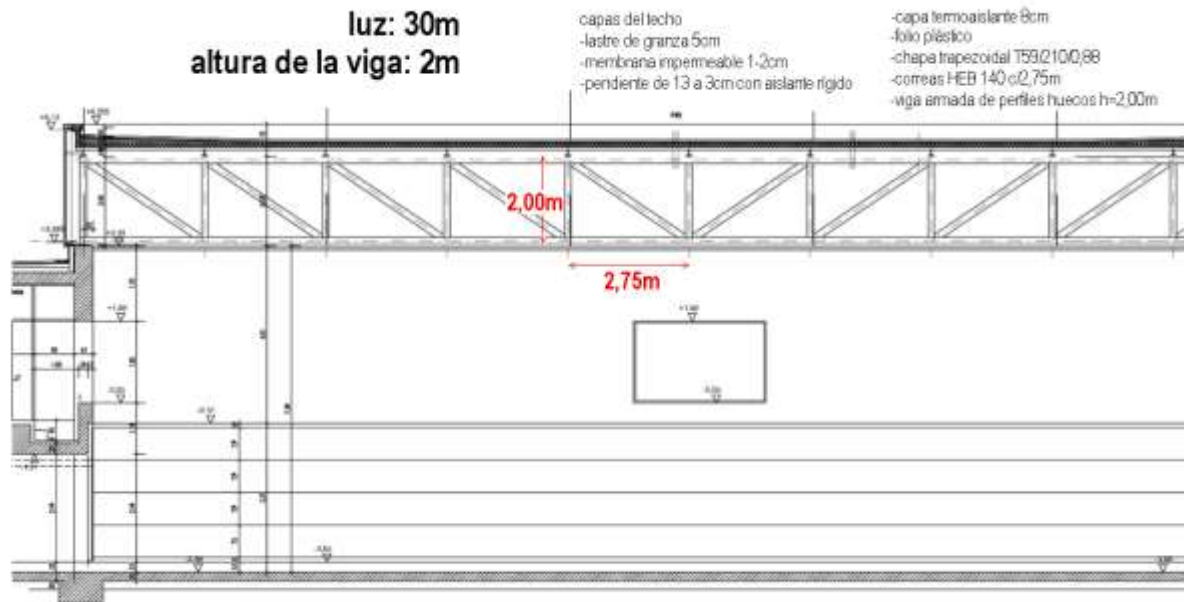


Fig.07

En los con vigas de sección compuesta, conviene que las correas de la estructura secundaria apoyen en los nudos para evitar flexiones en las barras (Fig.08)

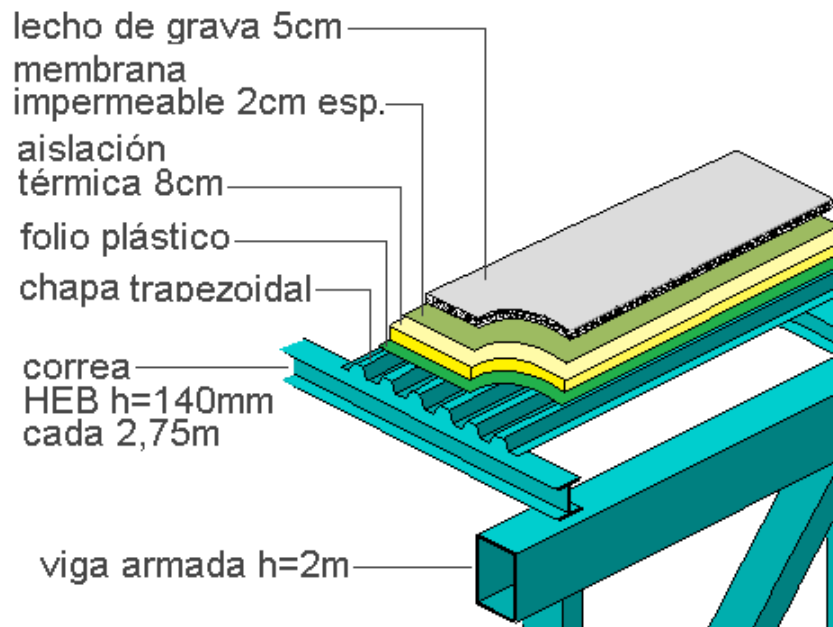


Fig.08

Como ya se expresó, por tratarse de vigas de gran altura y poco ancho se debe prestar atención a la estabilidad lateral y al riesgo de pandeo de las zonas comprimidas.



Fig. 09



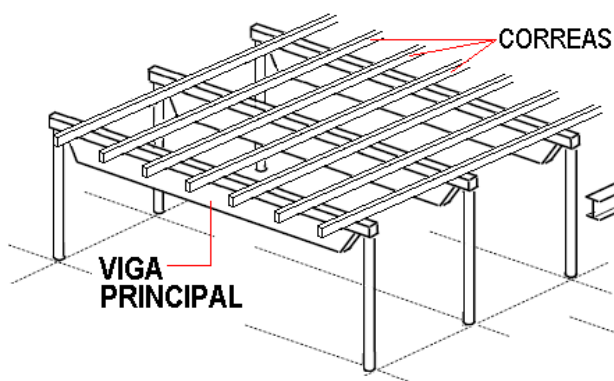
Fig.10

En envigados pesados, con vigas de hormigón armado de un tramo, simplemente apoyadas, de sección llena, separadas cada 3,5m y losas no colaborantes entre las vigas se puede estimar la altura de las vigas principales en $L/10$.

Si la losa es colaborante, se forma una sección "T" (viga-placa), con las ventajas de menor altura. Además el forjado monóticamente fundido a las alas de la viga placa, puede arriostrar contra el pandeo de la zona superior de las vigas.

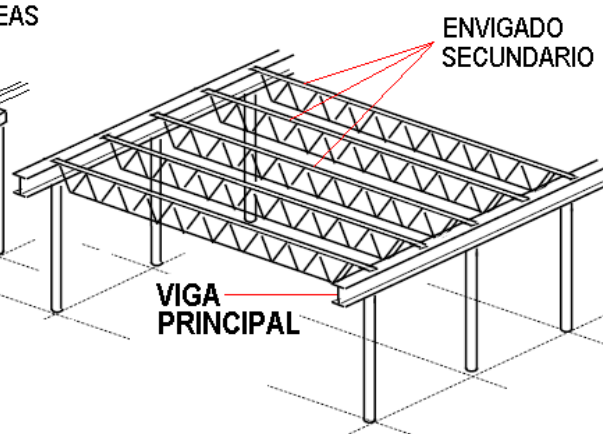
En la medida que el techo es más ligero (Fig.09 y 10) (con vigas reticuladas y forjado liviano), para iguales carga y condiciones de apoyo, la altura de las vigas principales puede bajar a $L/15$ a $L/20$. De todas maneras no conviene reducir mucho la altura para evitar el riesgo de pandeo del cordón comprimido por la magnitud de la fuerza de compresión.

Los envigados en salones rectangulares de crecimiento lineal se pueden plantear en base a vigas principales transversales o longitudinales (Fig.11 y 12)



VIGAS PRINCIPALES TRANSVERSALES
+ CORREAS LONGITUDINALES

Fig. 11



VIGAS PRINCIPALES LONGITUDINALES
+ ENVIGADO SECUNDARIO TRANSVERSAL

Fig. 12

Se debe tener presente lo expresado en la introducción, en el sentido que el diseño del techo implica resolver más cosas que la estructura resistente. Se debe resolver las capas superiores (cubierta) e inferiores (cieloraso), los encuentros con el cerramiento vertical exterior, los borde libres, etc. (Fig.13)

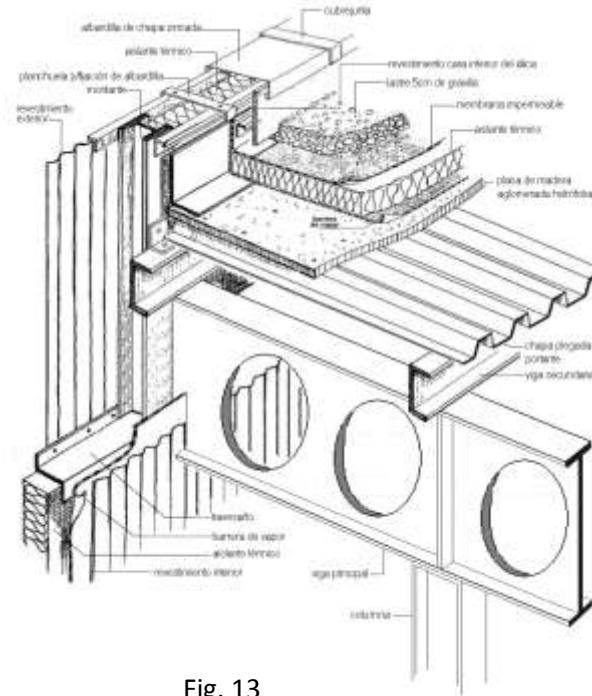


Fig. 13

En los emparrillados de vigas con “traslado bidireccional” no significa necesariamente que las cargas se trasladen a apoyos en cuatro lados.

Existen entrecruzamientos de vigas romboidales que apoyan solo en dos lados (Fig.14).

En estos casos las cargas se trasladan en definitiva unidireccionalmente, pero no inciden sobre una única viga, sino al menos en dos o más. Es decir que es una estructura con mayor grado de hiperestaticidad, mejor efecto distributivo de las cargas, lo que permite alturas constructivas menores que en los envigados clásicos de vigas paralelas.

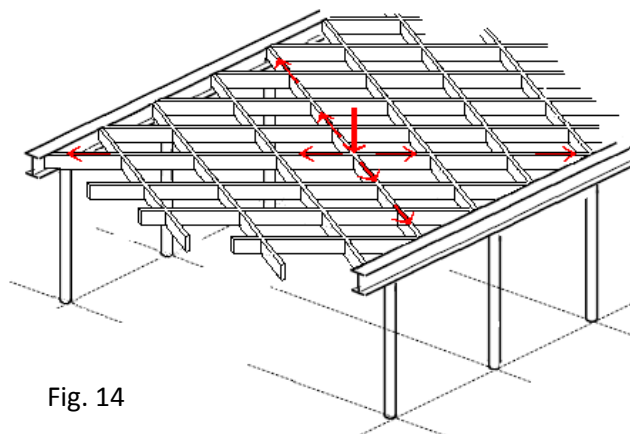


Fig. 14

Son emparrillados más efectivos, aquellos que pueden trasladar las cargas igualitariamente a apoyos en cuatro lados. Para que la repartición de las cargas sea igualitaria, es necesario que el emparrillado respete ciertas relaciones de luces y rigideces de las vigas que se entrecruzan, lo que comúnmente se expresa diciendo que “la relación de lados no debe ser desproporcionada” (de 1-1 a 1-1,5)

La obra paradigmática de techo de gran luz en base a emparrillado de vigas es la Nueva Galería Nacional en Berlín, obra de Mies Van der Rohe del año 1968 (Fig.15 y 16)

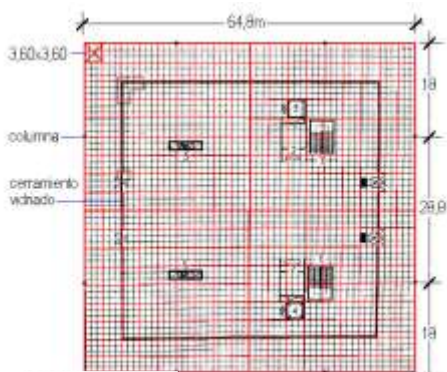


Fig. 15



Fig. 16

El edificio se destaca por poseer un gran techo cuadrado de 64.8 m de lado, apoyado sobre 8 columnas en su perímetro, 2 en cada lado, pero en el cual se dejan libres las esquinas, con lo que el edificio adquiere mucha liviandad.

El emparrillado de vigas metálicas (perfiles doble T de alma llena de 1,8 m de alto) está ordenado en base a una trama de 3,60 x 3,60 m. (Fig.17)

Sólo se apoya en dos columnas por lado, de 8,40 m de altura, con sección en forma de cruz, y la distancia que hay entre estos apoyos y el extremo de los voladizos es de 18 m.

En la Nueva Galería Nacional de Berlín, la altura del emparrillado representa $L/36$ (en una losa maciza cruzada se estima $h=L/50$ pero para una relación peso/luz mas favorable).

El detalle del apoyo del emparrillado sobre las columnas muestra una articulación perfecta (Fig.18). La estabilidad horizontal está asegurada mediante el empotramiento de las columnas en sus bases.



Fig. 17



Fig. 18

Si se toma las proporciones de este techo para el pre dimensionado de estructuras similares, se tendrá:

- Dimensión de la cuadrícula del emparrillado = Luz del emparrillado/18
- Altura del emparrillado = Luz del emparrillado/36

De lo que resultaría que para un emparrillado de menores luces (32,4 x 32,4m por ejemplo) le correspondería una cuadrícula de aprox. 1,80 m x 1,80m y una altura estática de aprox. 0,90m.

Realizado en madera laminada no presentaría riesgo de puentes térmicos (Fig.19).

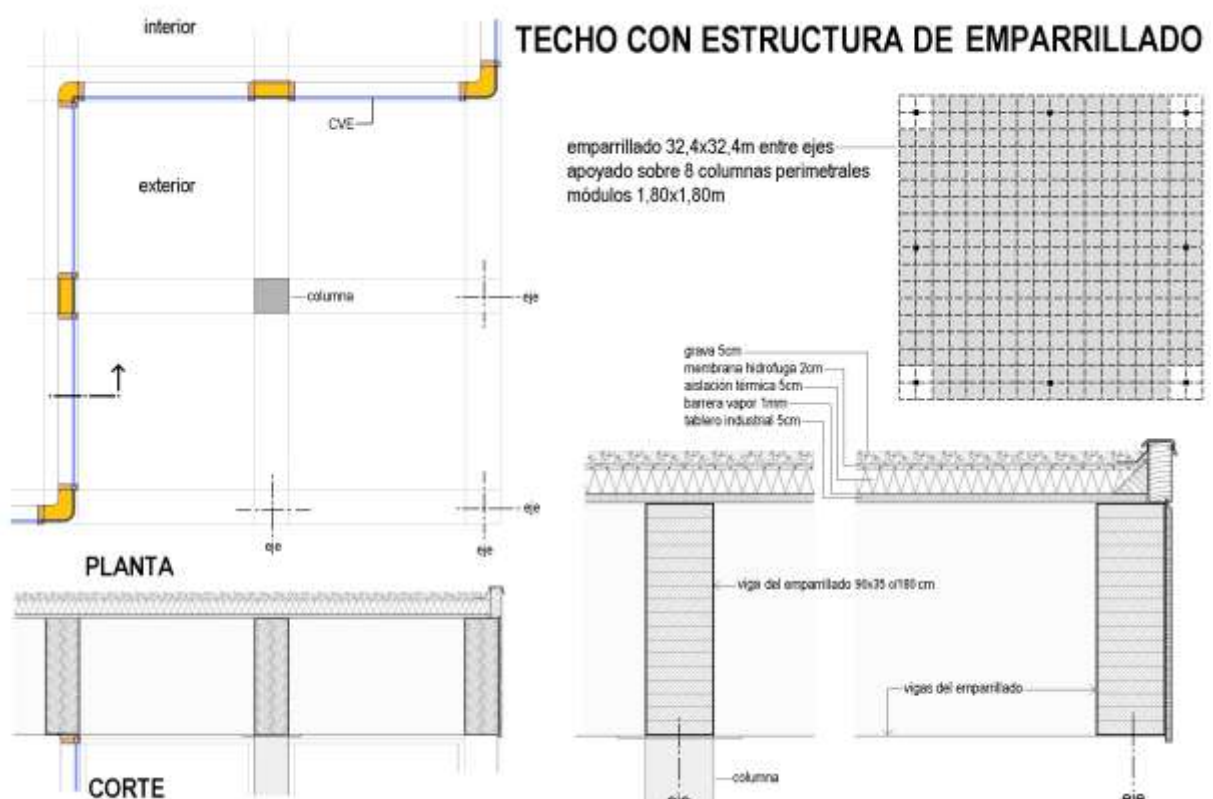


Fig. 19

PORTICOS

TECHOS DE GRANDES LUCES EN BASE A PÓRTICOS

1. CONCEPTO DE “PORTICO” EN ARQUITECTURA

La expresión “pórtico” en la lengua española procede del latín *“porticus”* y representa un espacio de transición cubierto apoyado sobre columnas y que se construye delante la entrada a los templos u otros edificios.

El pórtico suele constituirse como una galería que se extiende en la fachada del edificio (Fig.01).



Fig.01

Cuando el pórtico se halla en un templo romano o de la antigua Grecia, se lo denomina **“pronaos”** (cuyo origen etimológico deriva de un concepto griego que puede traducirse como *“delante del templo”*).

Los pórticos también suelen nombrarse como **“atrios”**, pese a que este término refiere específicamente a un espacio que no está cubierto (Fig.02).

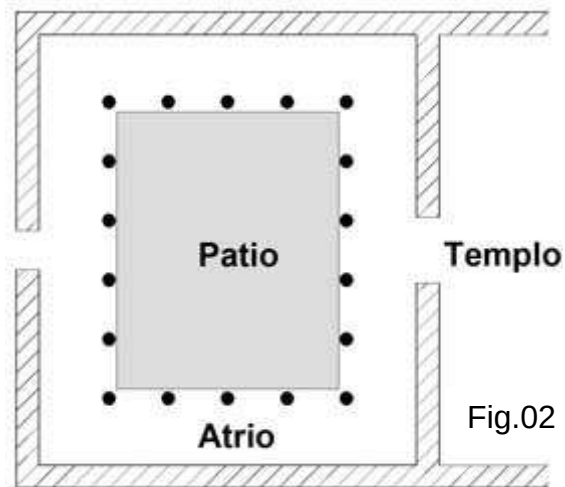


Fig.02

En la actualidad el término **Pórtico** es aceptado y entendido con otras acepciones, como la galería con arcadas o columnas alrededor de un patio, ya antes mencionado, y también se hace extensivo al “porche” de una vivienda (del *catalán Porxe*).

El porche generalmente se ubica en el frente de la vivienda y es un espacio ligeramente cubierto para el resguardo de las personas ante la intemperie climática (Fig.03 y 04).

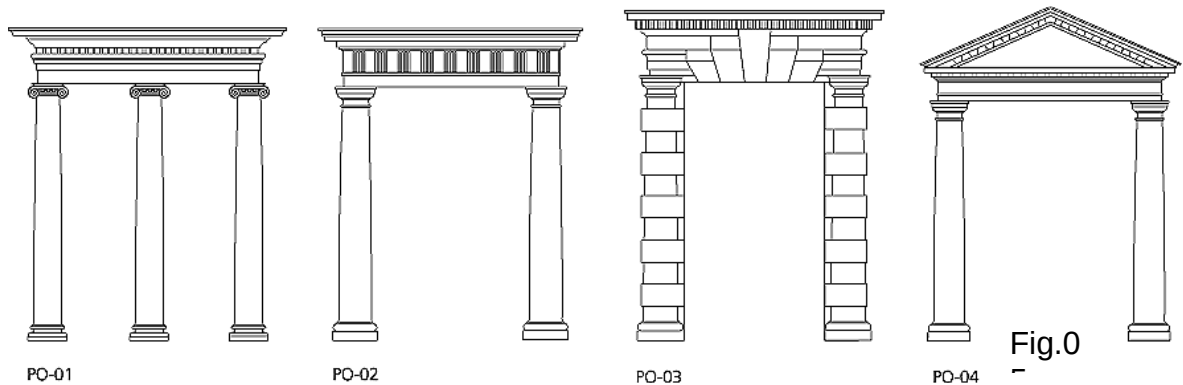
Fig.03
y 04



2. CONCEPTO DE “PORTICO” EN INGENIERÍA

En ingeniería se adoptó la expresión “pórtico” para definir una estructura compuesta por dos columnas y una viga (travesaño o dintel) apoyada sobre éstas.

Es probable que esta acepción proceda por extensión del concepto arquitectónico de pórtico, ya que en los primitivos ejemplos el techo de este espacio de transición apoyaban sobre estructuras de este tipo (Fig.05).



2.1. El pórtico trilítico

La construcción trilítica, compuesta por 2 piedras verticales a manera de columnas y un dintel o piedra horizontal simplemente apoyada sobre éstas, es muy antigua y seguramente precede al concepto arquitectónico de pórtico.

Antes que se configurara el “pórtico” como espacio de transición, ya se habían construido numerosos dólmenes con estructura trilítica (Fig.06).

La estructura trilítica aparece claramente definida 1800 años a.C. en los famosos *trilitos del conjunto de Stonehenge* en Inglaterra (Fig.07).



Fig.06 Dólmen Ballykeel, G.Bretaña



Fig.07 Stonehenge

Eran construcciones de masa, cuya estabilidad estaba asegurada por el gran peso propio frente a la magnitud de las acciones horizontales. Eran verdaderas construcciones de compresión. El dintel era una piedra de grandes dimensiones que salvaba una reducida luz, , dado la escasa capacidad del material pétreo para resistir flexiones (tracciones) (Fig.08).

En estos primitivos pórticos, los vínculos entre dintel y columnas equivalían a articulaciones, en el sentido que el dintel podía girar libremente sobre su apoyo.

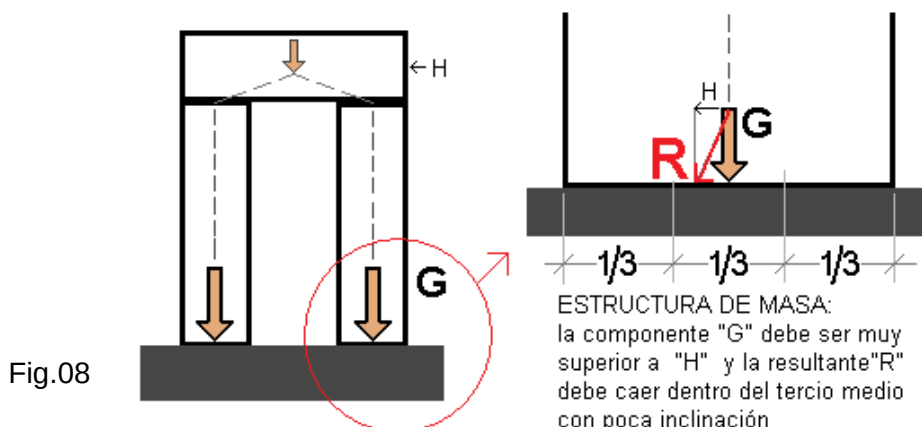


Fig.08

El análisis que sigue se realiza considerando al pórtico como estructura plana.

2.2. El pórtico simple

En ingeniería el pórtico simple es una construcción que consta de dos columnas sobre las que apoya una viga articulada.

Comparada con pórtico trilitico, es una estructura de flexión con miembros más esbeltos y la viga puede salvar luces mayores.

La viga solo transmite cargas verticales a las columnas. Las fuerzas horizontales son tomadas mediante el empotramiento de las columnas en sus bases o por triangulación (Fig.09).

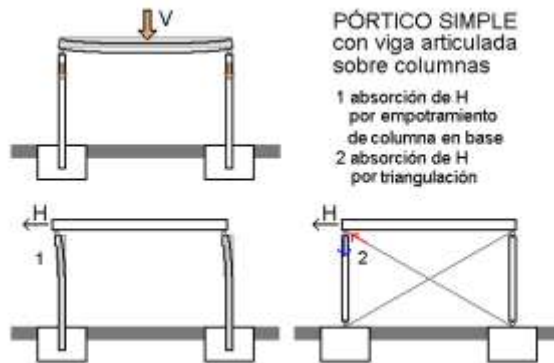


Fig.09

La viga está simplemente apoyada, de modo que ambos extremos tienen libertad de girar y la viga puede dilatarse o contraerse en dirección longitudinal. En una viga simplemente apoyada, una carga aplicada en el punto medio se transmite por mitades a ambos apoyos, la viga se flexiona y se deforma. Debido a la simetría la sección media se desplaza hacia abajo pero se mantiene vertical. Por lo tanto cada mitad de la viga actúa como un voladizo invertido.

2.3 Pórtico rígido, marco rígido, esquina rígida

El pórtico rígido es un sistema estructural en el cual trabajan solidariamente la viga con las columnas, gracias al empotramiento entre ambas (esquina rígida) que impide el libre giro de una respecto de otra.

Esta unión rígida de la esquina posibilita que 1) las flexiones que producen las cargas verticales y horizontales sobre el sistema se distribuyan entre sus miembros, beneficio que se aprecia sobre todo en la viga ante la acción de cargas verticales 2) se puedan absorber las acciones horizontales H sin necesidad de empotrar las columnas en las bases ni de triangular (Fig.10).

Algunos autores denominan a esta estructura "marco" rígido en concordancia con la denominación que se le da en el habla inglesa ("frame") y alemana ("Rahmen")

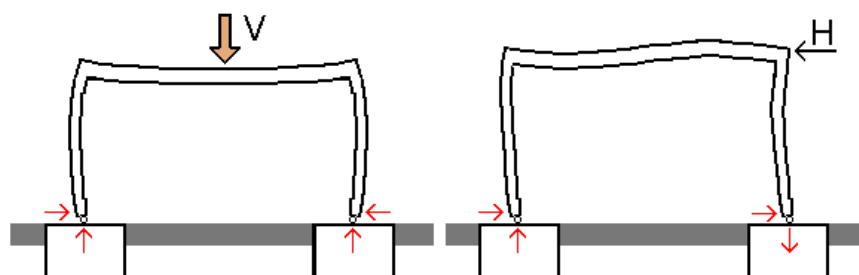


Fig10

PÓRTICO RÍGIDO CON ESQUINAS EMPOTRADAS

UNT 2014

Concretamente, con la unión rígida de la columna y el dintel (viga) se logra que los dos elementos estructurales participen a la flexión en la sollicitación de las cargas verticales y también en las cargas horizontales, dándole al conjunto una mayor “resistencia”, y una mayor “rigidez” o capacidad de limitar los desplazamientos horizontales (Fig. 11 y 12).



Fig11 y 12

Comparando el pórtico simple con el rígido en relación a la flexión que sufre la viga por la acción de cargas verticales uniformemente distribuidas, el siguiente ejemplo muestra las ventajas de uno respecto de otro.

En el caso del pórtico simple, la viga (simplemente apoyada) necesita una altura de aprox. 2m ($L/10$) para salvar una luz de 20m

En el caso del pórtico rígido (vinculo empotrado entre columna y viga) el momento flector en el centro del tramo de la viga se reduce a $1/3$ y en los apoyos sobre las columnas se genera un momento flector negativo de $2/3$. Con ello la viga podría reducir a 66cm su altura en el centro del tramo, que representa $L/30$ (Fig.13).

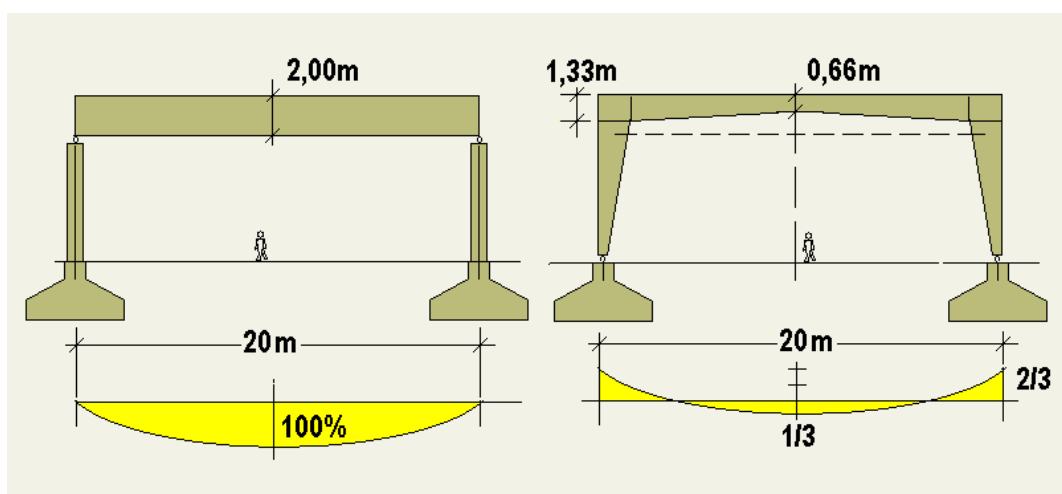


Fig.13

3. TIPOS DE PORTICOS: TRIARTICULADOS, BIARTICULADOS, TOTALMENTE EMPOTRADOS.

Los pórticos rígidos más comunes son los triarticulados, biarticulados y totalmente empotrados (Fig.14).

Se debe tener presente que por las articulaciones solo pueden transferirse fuerzas de un miembro al otro, no así flexiones. Esta particularidad se presenta en los pórticos articulados, con ventajas en el cálculo y en el montaje.

Los empotramientos pueden reducir la flexión en un miembro y transferir parte a otro. Pero el cálculo y la construcción resultan más complicados.

El balance de las ventajas y desventajas para optar por uno u otro planteo de pórtico debe hacerse en cada caso atendiendo la situación contextual (características del suelo).

Los pórticos triarticulados presentan tres articulaciones: una en el pie de cada columna y otra intermedia, por lo general en el centro del tramo de la viga.

Otro esquema frecuente presenta la articulación intermedia en uno de los encuentros entre viga y columna. De esta manera la columna se convierte en una biela articulada arriba y abajo, asegurando cargas axiales sobre la base.

El pórtico biarticulado es un pórtico rígido que presenta articulaciones solo en los pies de las columnas, que les permiten girar y flexionar ligeramente como consecuencia de los esfuerzos producidos por los cambios de temperatura.

Los pórticos totalmente empotrados presentan todos los nudos rígidos en la unión viga-columna y en la unión columna-base. Esta condición, la del empotramiento en la base, exige al sistema un mayor cuidado en la construcción y una consideración en el aspecto económico, ya que la resolución constructiva encarece los costos de materiales y mano de obra.

Las uniones articuladas no transmiten momentos, lo que se traduce en una reducción económica.

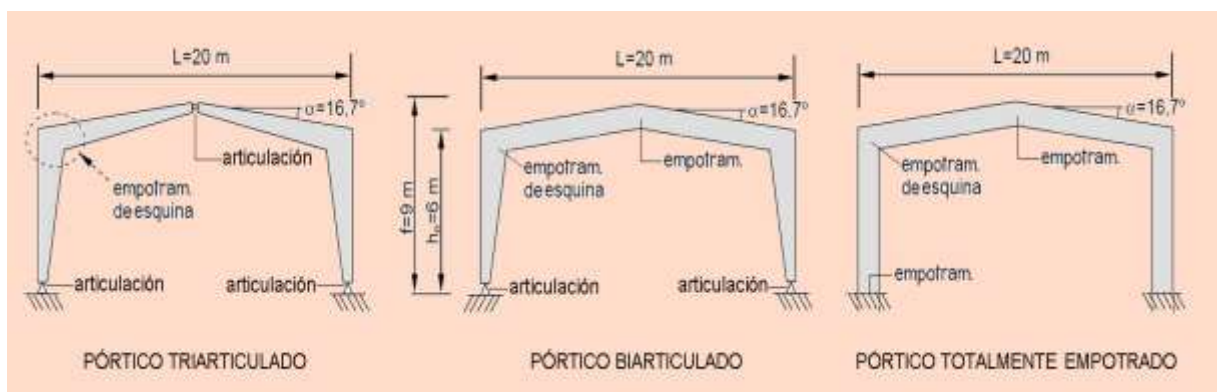


Fig.14

Ejemplo de pórtico biarticulado se observa en el Polideportivo de Ártica, Navarra, España (Fig.15 y 16).

El Museo de Artes de San Pablo, Brasil, sobre la Avda. Paulista es un ejemplo de pórtico de gran luz totalmente empotrado (Fig.17, 18 y 19)



Fig.15



Fig.16



Fig.17



Fig.18

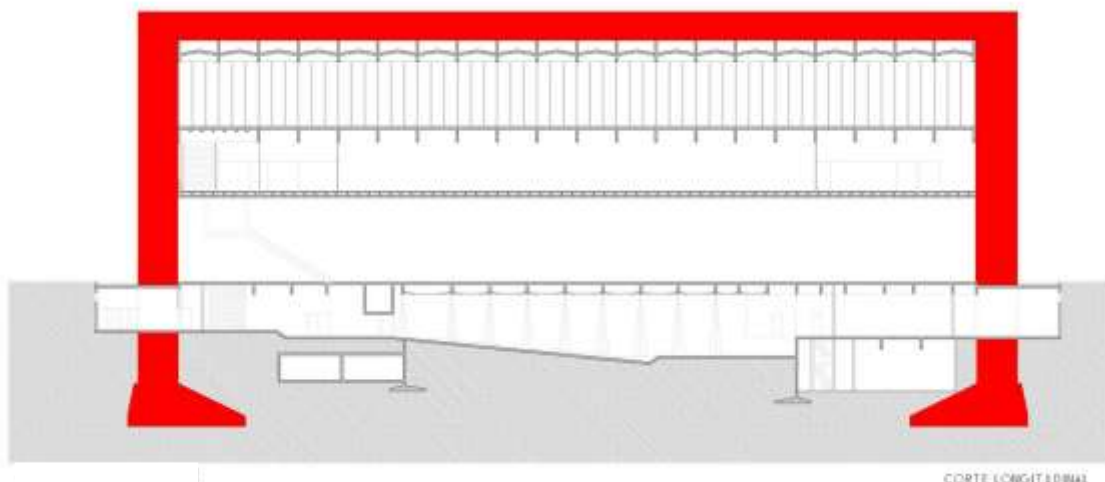


Fig.19

CORTE LONGITUDINAL

4. SOLICITACIÓN INTERNA DE LOS PÓRTICOS

Desde el punto de vista de cómo es el trabajo interno del pórtico para trasladar las cargas a los apoyos, se distinguen tres alternativas: los pórticos de flexión, de barras y laminares. Distinto trabajo interno tienen los pórticos de flexión (Fig.20) que los pórticos de barras (Fig.21) y que los pórticos plegados (Fig.22).



Fig.20: Pórtico de flexión,

Fig.21: Pórtico de barras

Fig.22: Pórtico plegado (modelo)

Los pórticos de flexión tienen sección llena, con proporciones de viga (1 o 2 de ancho x 3 de alto). Se resuelven en hormigón armado o en madera y en acero. El trabajo interno es de flexión (Fig.23).

Las secciones de los pórticos de flexión no deben exceder la relación alto-ancho 4:1. Si la sección es muy esbelta se convierte en una estructura laminar sujeta a otras pautas de diseño (Fig.24).



Fig.23: Restaurante
en Amersfoort,



Fig.24: Pórtico plegado (pórtico laminar)

Los pórticos de barras son armaduras formadas por elementos lineales unidos en nudos (Fig.25). Las barras trabajan a la compresión o a la tracción. No hay trabajo interno de flexión.

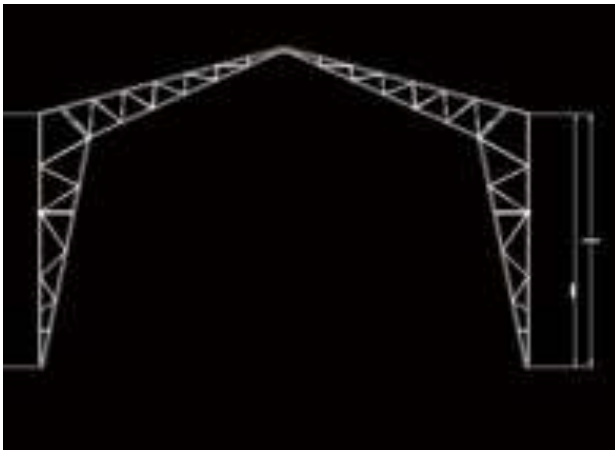


Fig.25

Uno de los ejemplos paradigmáticos de pórticos de barras se presenta en el Sainsbury Center for Visual Arts, proyecto de Norman Foster del año 1974-76, construido para la Universidad de East Anglia en Norwich, Inglaterra (Fig.26)

El edificio se organiza en base a grandes pórticos de barras de caños circulares, con sección triangular formada por dos cordones superiores y uno inferior vinculados por diagonales (Fig.27).

La separación entre los cordones superiores es de 1,8m. y la altura desde los cordones superiores al inferior es de aprox. 2,40m

La luz libre interior del salón es de 28,8m y la altura libre de 7,2m (Fig.28)

Los pórticos están colocados con una separación de 1,80m, espacio en el que ordena una estructura de arriostramiento transversal (Fig.29 y 30).

Los paneles de las fachadas laterales y del techo tienen 1,8x 1,2m (Fig.31)

Los paneles del techo son tipo sándwich, con aislación térmica intermedia (Fig.32).

La cara exterior presenta acanaladuras para conferirle mayor rigidez. Los paneles apoyan y se fijan a planchas planas soldadas a los caños (cordones superiores) de las vigas.

La junta entre paneles está sellada con un “burlete” elastómero de caucho etileno-propileno-dieno (EPDM) (Fig.33).

Los frentes vidriados están organizados en base a planchas de vidrio apoyadas en el suelo de 7,5m de alto x 2, 4m de ancho x 2cm de espesor. En las juntas de los paños de vidrio se ubican aletas de arriostramiento hacia el interior.



Fig.

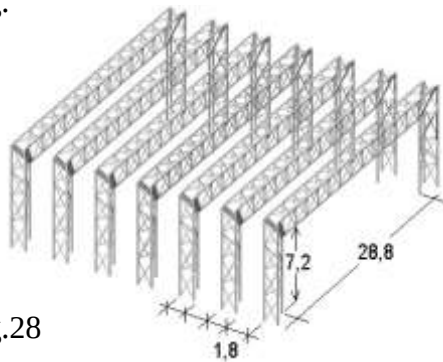


Fig.28

Fig.

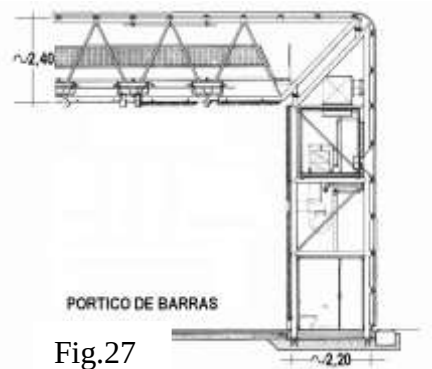


Fig.27



arriostramiento transversal - cordón inferior



arriostramiento transversal - cordón superior

Fig. 30

Y



Fig.

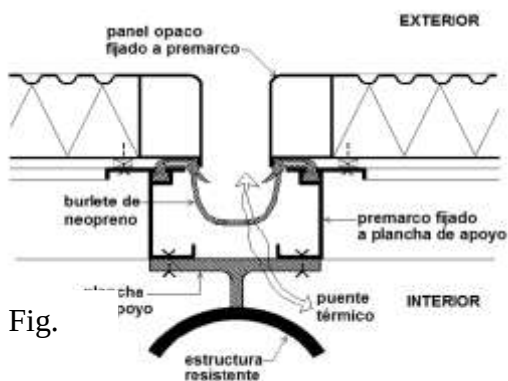


Fig.

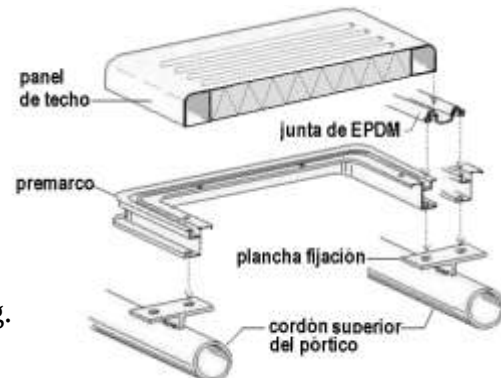


Fig.

5. ESTRUCTURA APORTICADAS PLANAS Y ESPACIALES

Los pórticos como estructuras portantes de techos para cubrir grandes salones, se pueden organizar en base a patrones planos y espaciales.

La organización plana consiste en una sucesión de pórticos espaciados adecuadamente, estables en su plano y complementados con arriostramientos transversales. Se distingue una estructura principal plana y una estructura secundaria normal.

El siguiente croquis muestra las fuerzas horizontales H_p actuantes en el plano principal, que son resistidas por aporticamiento y las fuerzas horizontales H_n actuantes en el plano normal, que son resistidas mediante triangulación (Fig.34).

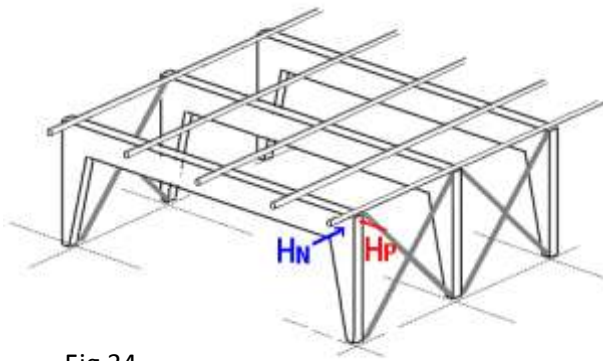


Fig.34

Para la construcción del techo se cierra el espacio entre los pórticos con una estructura de correas o de superficie, que recibirá las capas que conforman la cubierta.

Situación particular se presenta en la sucesión de pórticos transversales en el terreno entre medianeras. Por un lado las columnas contra las medianeras requieren bases excéntricas. Por otro lado, la recolección del agua pluvial debe resolverse mediante sumideros alejados de la medianera (Fig.35)

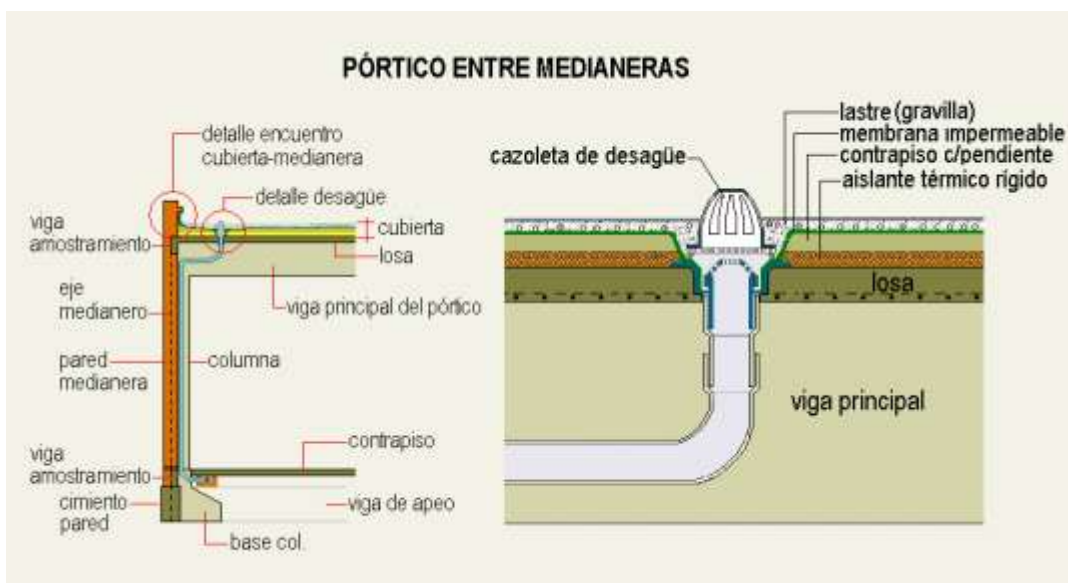


Fig.35

Las estructuras porticadas en base a patrón espacial combinan pórticos en dos direcciones

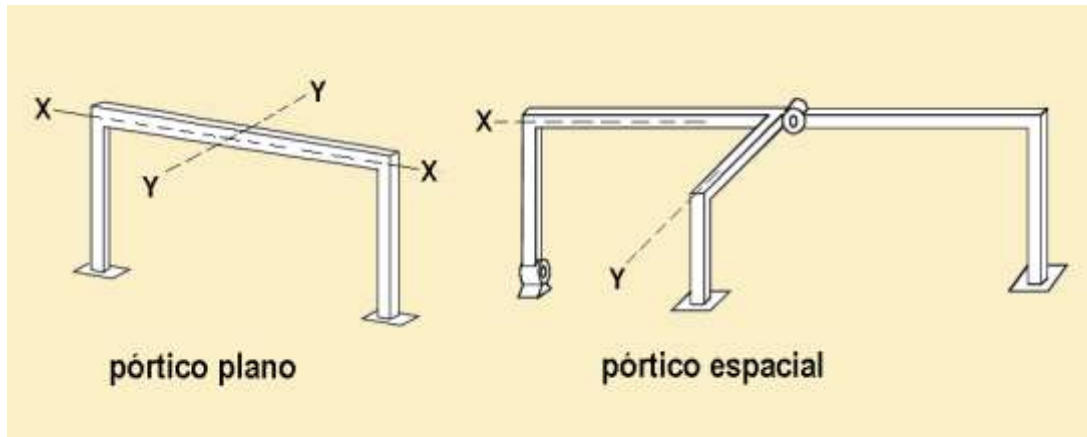


Fig.36

Un ejemplo de aporticamiento espacial se observa en la Catedral Metropolitana de Liverpool. Un sistema de semi- pórticos de hormigón armado, biarticulados, dispuestos radialmente que apoyan en la base y en un anillo central (Fig.37).

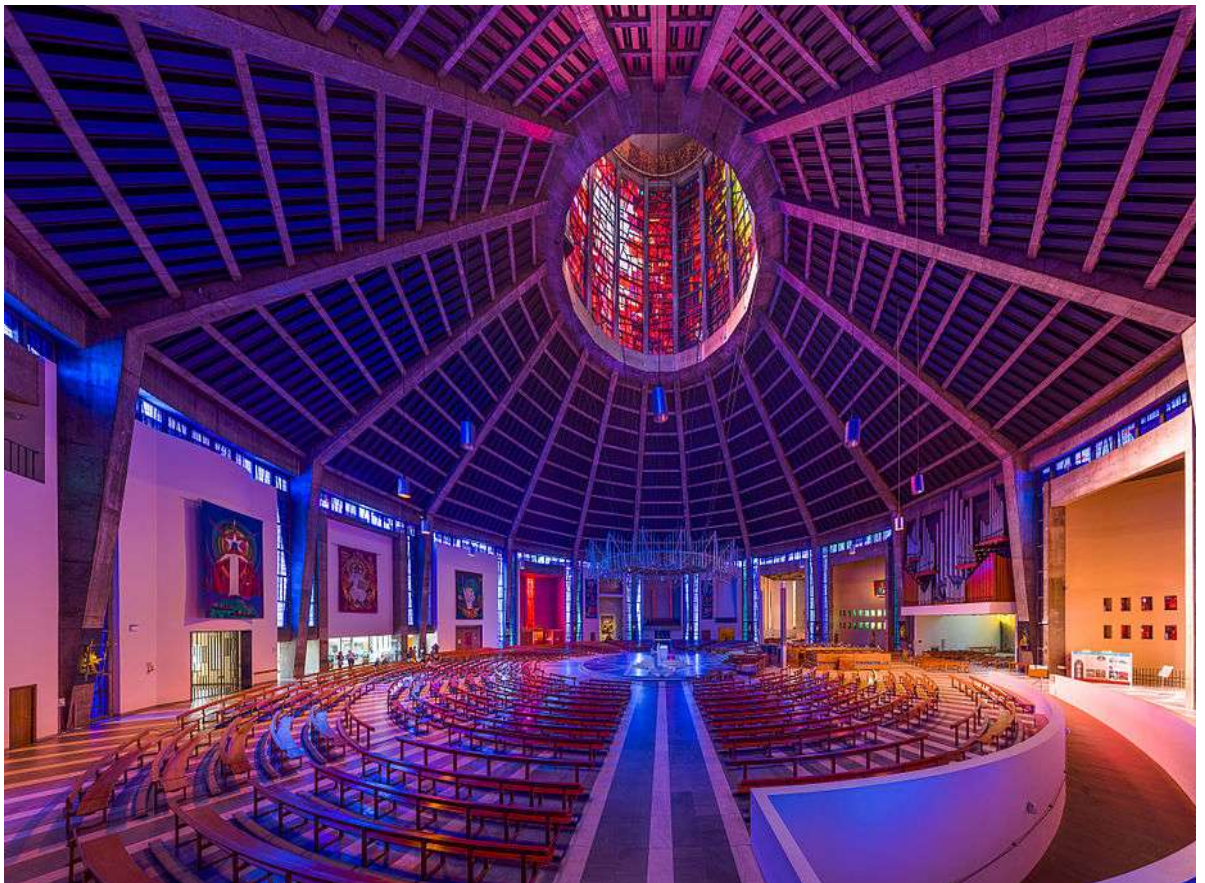


Fig.37

6. LA CUBIERTA DE LOS TECHOS APORTICADOS.

En los techos en base a pórticos de hormigón armado con una losa como forjado entre ellos, la cara superior de la misma ofrece una superficie apta para recibir las capas de la cubierta.

En los pórticos metálicos y de madera, se debe construir un forjado que ofrezca una cara lisa para el asiento a las capas de la cubierta.

Las soluciones más frecuentes para el forjado son: a) una chapa plegada portante que salvando la luz entre los dinteles proporcione la superficie de asiento (Fig.38), o b) un envigado de correas dispuestas cada 1m aprox. (Fig.39), sobre las que apoye un entablonado (Fig.40).

Caso particular son los pórticos que ofrecen apoyos puntuales para un sistema de paneles, como ocurre en el ejemplo visto del Sainsbury Center for Visual Arts. (Fig.41 y 42).

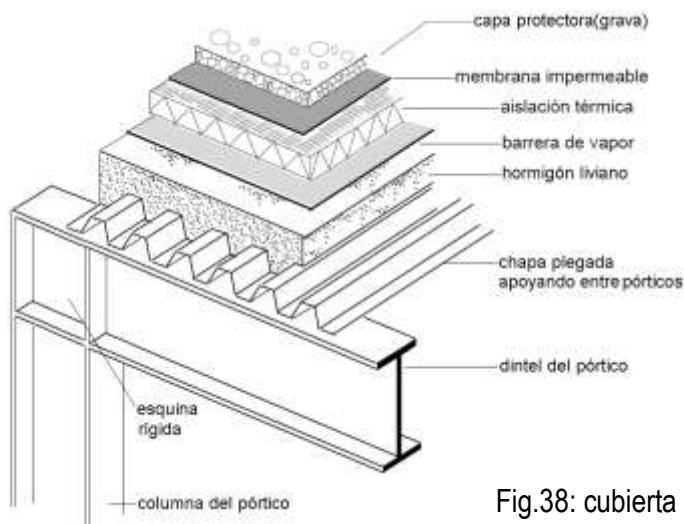


Fig.38: cubierta sobre chapa plegada



Fig.39: estructura secundaria de correas

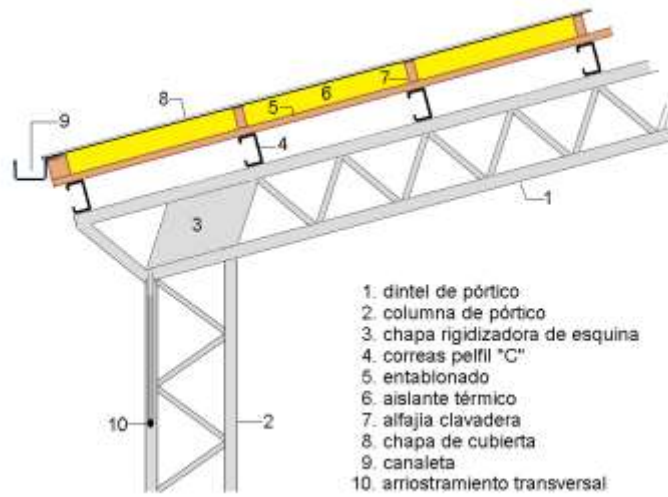


Fig.40:
entablonado
sobre correas

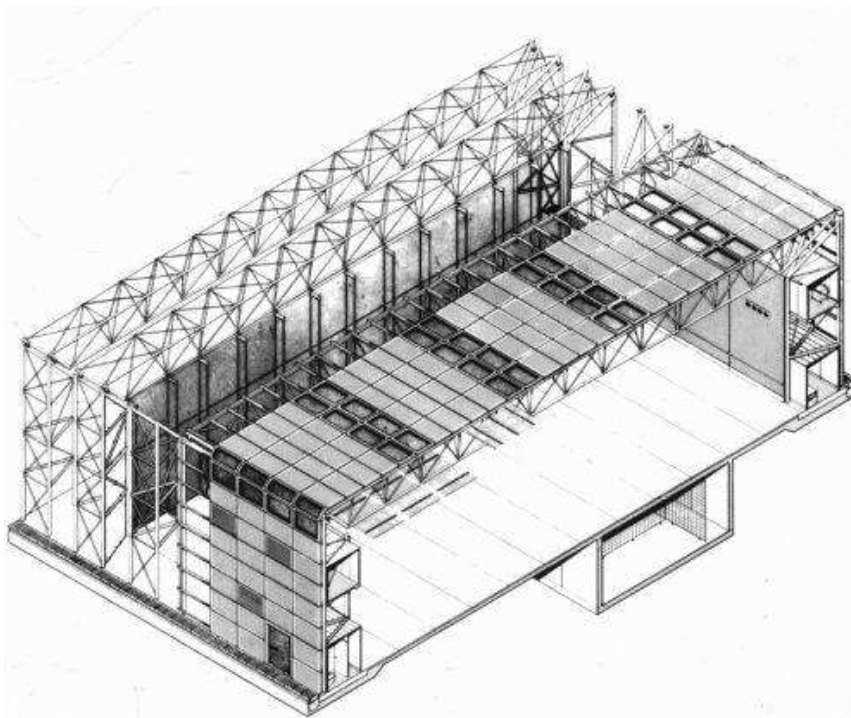


Fig.41:
Sainsbury
Center for
Visual Arts.



Fig.42:
montaje de
paneles de
techo en
Sainsbury
Center

CERCHAS

TECHOS DE GRANDES LUCES EN BASE A CERCHAS, CUCHILLOS O CABRIADAS

1. DEFINICIÓN Y CONCEPTO

La cercha, cuchillo o cabriada es un tipo particular de armadura¹ plana², de forma triangular³ que se utiliza como sustento de techos a dos aguas. Los nombres técnicos y reconocidos en el mundo de habla hispana son los de **“cercha” y “armadura”**. La denominación **“cuchillo”** está reconocida en la bibliografía española y en una extensión geográfica reducida, la de **“cabriada”**.

También se la puede definir como una viga de barras o viga reticulada de forma triangular⁴ con altura variable, mínima en sus apoyos y máxima en el centro del tramo

De todos los términos utilizados para denominar a este tipo de armadura plana, el que más remite etimológicamente al concepto que representa es el de **“cabriada”**⁵.

En efecto, **“cabriada”** procede del italiano **“capriata”**, término que a su vez proviene de **“capra”** (cabra). La cabra es una estructura, generalmente formada por tres palos inclinados en forma de pirámide, que se utiliza para levantar objetos (Fig.01). Sinónimo es **“trípode”** y **“caballete”**. Esta idea, llevada a nivel de una estructura plana para sustentar techos a dos aguas se la denominó **“cabriada”**.

Fig.01: Cabra,
armazón auxiliar
para levantar objetos



¹ Armadura: conjunto de piezas lineales ensambladas por sus extremos en puntos denominado “nudos”.

² Estructura plana, en contraposición a “estructura espacial”, es aquella en la que los miembros que la integran están ordenados en un plano vertical

³ La forma triangular hace referencia a que el conjunto de elementos lineales está circunscripto dentro de una figura triangular cuyos vértices inferiores (los de la base) coinciden con los apoyos y el vértice superior con el cumbrero de un techo a dos aguas

⁴ viga triangular de barras, reticulada o de celosía, tiene cordones superiores inclinados (a dos aguas), inferior horizontal y barras intermedias vinculando ambos.

⁵ La expresión mas usada en la lengua española, “cercha”, no remite claramente al concepto representado. La palabra “cercha” procede del latín “circulus”. La acepción de “cercha” que más se aproxima es la de “cimbra” (armazón que sostiene un arco). Como se ve, no es tan procedente como “cabriada”.

2. COMPONENTES DE LA CERCHA

Las cerchas, como las estructuras en base a barras, presentan una razonable ecuación, costo- beneficio, ya que requieren un gasto mínimo de material y se logran cubrir grandes luces con ellas.

Este tipo de estructuras tiene la característica de ser muy liviano y con una gran capacidad de soportar cargas. Se utiliza principalmente en construcciones de techos para grandes depósitos, iglesias y en general edificaciones con grandes espacios en su interior. Las cerchas también se usaron en puentes, aunque en diversas situaciones resultaron ser más competitivos los puentes atirantados, colgantes (cables), los puentes en vigas de alma llena y las vigas reticuladas.

El rango de luces de la cercha es de 15 a 30 m para cerchas de madera y 15 a 50 m para cerchas de acero (*Beer y Johnston, 1977; Engel, 2001; Nieto, 2006 y Salvadori y Heller, 1998*)

Las componentes de este tipo estructural liviano, se basa en barras que geométricamente se disponen de distintas posiciones y medidas (Fig.02).

Cordón superior o Par de cabios: cada una de las dos piezas inclinadas que forman las aguas de un techo inclinado.

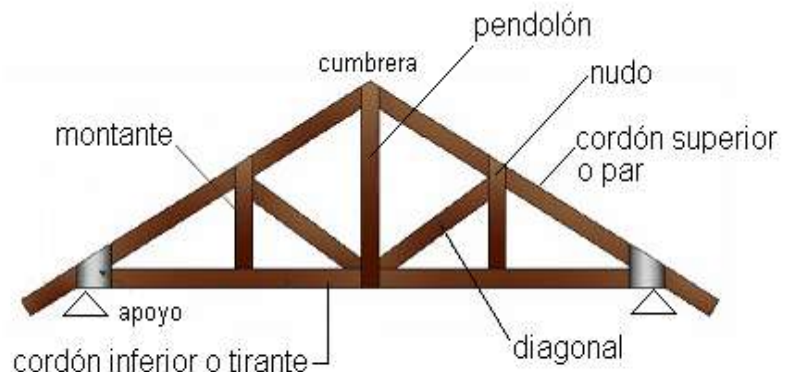
Cordón inferior o Tirante: pieza horizontal de una cercha que une el extremo inferior de los pares e impide que se separen.

Tornapunta o Diagonal: pieza inclinada que puede unir un par con el tirante, o que disminuye la luz de los pares y por lo tanto su escuadría.

Pendolón: elemento vertical que une un punto de la cumbrera con otro del tirante.

Montante: elemento vertical que une un punto del par con otro del tirante.

Fig.02:
Componentes de la



COMPONENTES DE LA CERCHA

En las cerchas utilizadas para techos se busca que su geometría adopte la forma del techo inclinado. Por lo general el cordón superior conforma las pendientes del techo y el inferior es un tensor horizontal.

Los esfuerzos de compresión son absorbidos por el cordón superior y los esfuerzos de tracción por el cordón inferior; las diagonales sirven de unión entre el elemento superior y el inferior.

3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El concepto constructivo de “cabriada” o “cercha” madura alrededor del siglo IV DC, aunque en la época griega, la forma de los techos inclinados de templos y basílicas, tenían estructuras de madera ya complejas, con vigas inclinadas apoyadas en las paredes, pilares, vigas horizontales, pero sin alcanzar, según la mayoría de los estudiosos, el concepto de “estructura de barras”.

Algunos historiadores, plantean que no se puede indicar con precisión el origen de la cercha, tal es el caso de *Francoise A. Choisy*: “se desconoce dónde puede estar el origen de las armaduras de pares.” O de hecho, Vitruvio, en su tratado “De Architectura” no trata las cerchas. Sin embargo, algunos autores especulan que los griegos ya habían puesto en marcha cerchas triangulares, al menos en las colonias de Sicilia, donde tenían una mayor amplitud a ser cubierto por un techo de madera (unos 10 pies).

Otro antecedente de este tipo estructural se presenta en la antigua Roma en el Panteón de Agripa. Esta construcción del siglo II D.C., tiene un pórtico de entrada con una estructura de techo subdividida en tres partes (Fig. 03): la central presenta una “falsa cercha”(Fig.04), ya que es una construcción cuya forma general se asemeja a la de una cercha, pero el trabajo de los miembros lineales que la conforman no corresponde completamente al de una “estructura de barras”, como se verá más adelante. Aún así es un importante antecedente evolutivo hacia las verdaderas cerchas.

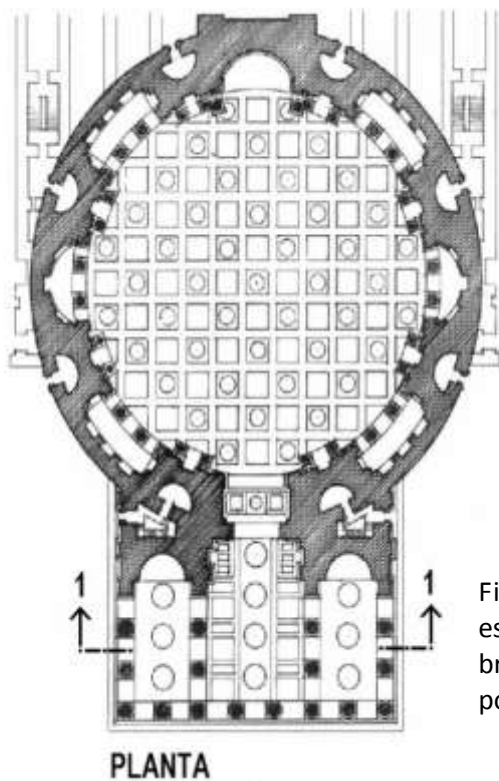


Fig. 03: Panteón de Agripa, parte central del Pronaos, La estructura del techo (central y laterales) originalmente era de bronce con perfiles en “U”. Posteriormente se reemplazaron por madera.



Fig.04: Panteón de Agripa (126 D.C.), parte central del Pronaos o Pórtico de entrada presenta una “falsa cercha”. En los laterales se ven incipientes cabriadas.

La armadura plana triangular, tal como la reconocemos en la actualidad, fue muy usada en la era cristiana como una estructura de techo para las primeras basílicas cristianas, aunque no en todas queda la estructura original y no se sabe con exactitud la conformación de estas armaduras.

La característica de este tipo de armadura es que no genera empujes laterales en la parte superior de las paredes sobre las que apoya, lo que permitió a las primeras basílicas cristianas, resolver la construcción de dichas paredes sin necesidad de contrafuertes, completamente lisas, caracterizando así la apariencia exterior que denuncia en su simplicidad, el diseño estructural de la cubierta.

A partir del S. XI se construyeron muchas iglesias con cubiertas apoyadas en cerchas que hasta hoy subsisten (Fig.05 y 06)



Fig. 05: Basílica San Miniato al Monte, Florencia. Siglo XI, D.C. Arquitectura Románica.

Fig.06: Basílica Santa Sabina all Avertino, Roma. Siglo V, D.C. Arquitectura paleo cristiana.



4. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista de la ingeniería estructural, la cercha es una estructura compuesta por un conjunto de barras formando triángulos, interconectadas por sus extremos por medio de nudos articulados o rígidos, que recibiendo las cargas externas en los mismos, las transmite a sus puntos de apoyo produciendo en las barras solo esfuerzos axiales de compresión o de tracción, es decir, sin flexión ni corte.

La gran ventaja de este tipo estructural reside en que, en base a barras de poca longitud, se componen armaduras que salvan grandes luces.

Se entiende por "nudo" en una armadura, al punto donde se encuentran y vinculan los extremos de dos o más barras. En el concepto de nudo participan tanto los extremos de las barras que confluyen en ese punto, así como los elementos complementarios para vincularlas mecánicamente.

Según la forma como se vinculen las barras puede resultar un "articulación" (que solo permite el paso de fuerzas entre las barras) o un "empotramiento" (que permite el paso de fuerzas y de momentos flectores entre las barras).

Las armaduras con paños triangulares pueden tener todos los nudos articulados, Existen otro tipo de armaduras, como la denominada Vierendeel, con paños rectangulares sin diagonales, que requiere inevitablemente nudos rígidos.

Las cargas externas actúan sobre los nudos, se descomponen en las direcciones de las barras, de tal manera que producen en éstas solamente esfuerzos axiales (de compresión o de tracción) sin flexiones.

Las barras pueden ser construidas con diversos materiales: acero, madera, hormigón armado, aluminio, etc.

Para unir las barras en los nudos se utilizan en las construcciones de madera tornillos, bulones, clavos, conectores etc. Y en las de acero se utilizan bulones o soldadura. Se han realizado construcciones mixtas, que combinan barras de madera con barras de acero.

Entonces, concretamente, la cercha es un elemento estructural, en base a la composición de barras rectas unidas entre sí en sus extremos para constituir una armazón rígida de forma triangular, capaz de soportar cargas en su plano, particularmente aplicadas sobre las uniones denominada nudos. En consecuencia, todos los elementos se encuentran trabajando a tracción o compresión sin la presencia de flexión ni corte (Fig.07) (*Beer y Johnston, 1977; Hsieh, 1982; Olvera, 1972*).

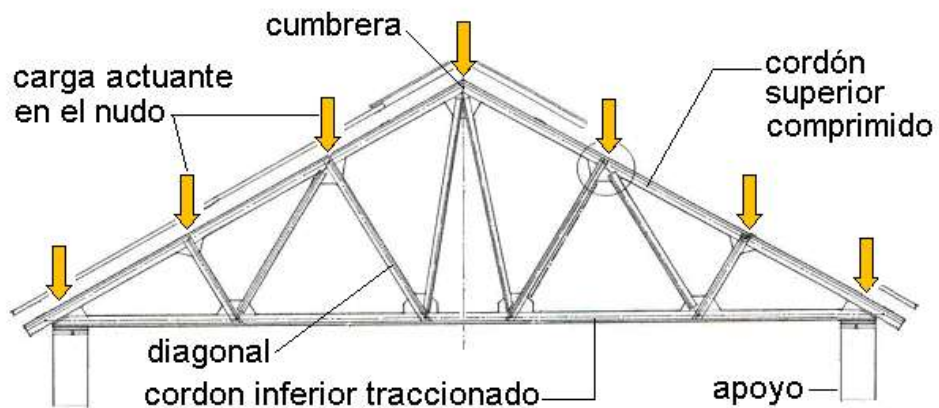


Fig.07: Cercha con cargas externas actuando en los nudos

En la construcción de techos con patrón plano, las cerchas se colocan distanciadas, con una separación conveniente, que se cubre con una estructura secundaria de correas sobre la que descansa la cubierta.

5. ESTABILIDAD DE LA CERCHA PLANA

La cercha, como estructura reticular y plana, presenta muy buena estabilidad ante las cargas verticales en su plano, no así ante fuerzas transversales normales al mismo. Esta estabilidad lateral, se puede resolver triangulando el plano del faldón entre dos cerchas (Fig.08-1), mediante el entablonado (Fig.08-2) o triangulando el plano vertical transversal a las mismas, a lo largo del eje del cumbrero (Fig.08 3-4).

En algunos casos, la disposición de un entablonado machimbrado sobre las cerchas también puede arriostrarlas transversalmente

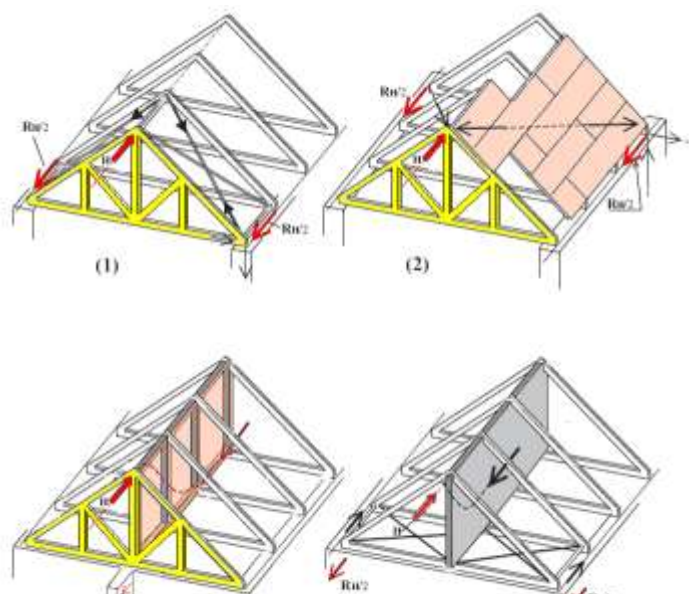


Fig.08:
Arrostramiento
transversal de las
cerchas

6. CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE CERCHAS

Las cerchas están caracterizadas por a) la forma perimetral b) la posición de las barras interiores c) la forma de sus secciones d) los materiales y e) los tipos de uniones.

En la bibliografía predomina la tipificación de las cerchas en función de la posición de las barras interiores.

A) Forma perimetral

Se refiere a la forma exterior o perímetro que representan las barras envolventes, - cordón superior y cordón inferior- identificando las de forma triangular, trapezoidal y curvas, entre otras.

Triangular (Fig.09)

Es la más utilizada y permite salvar todo tipo de luces. Históricamente estuvo constituida por elementos aserrados, pero en luces mayores se hace recomendable emplear elementos laminados, en especial para los pares, evitando tener que solucionar con herrajes especiales los empalmes de tope en piezas.

Su pendiente va generalmente entre los 12° a 45° .

Si tiene una pendiente mayor genera gran altura interior de difícil aprovechamiento, se aumenta la tendencia al volcamiento y se deben aumentar las secciones de las piezas que trabajen a la compresión para evitar el pandeo.

Tener una fuerte pendiente (30° a 60° con respecto a un plano horizontal), permite un escurrimiento rápido de las aguas lluvias y/o nieve, apropiado para el clima lluvioso. También da lugar a buhardillas o altillos utilizables.

Tijera (Fig.10)

Se caracteriza por tener tanto su cordón inferior como superior inclinado, fluctuando el ángulo del par superior entre los 15° y 35° .

La ventaja de este tipo de estructura es que se logra una mayor altura en la parte central del espacio que cubre.

Curvo (Fig.11)

Esta cercha debe su nombre a que el cordón superior es curvo, característica que estáticamente las hace muy adecuadas en caso de cargas uniformemente repartidas, ya que las cargas inducen esfuerzos pequeños en las barras.

Su uso se justifica a partir de luces de 20 m,

Puede llegar a salvar luces superiores a 60 m si se usa barras de madera laminada o de acero.

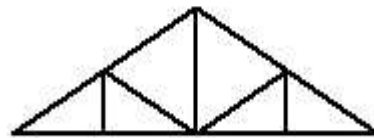


Fig.09: Cercha tipo española



Fig.10: Cercha tijera, cordón inferior inclinado

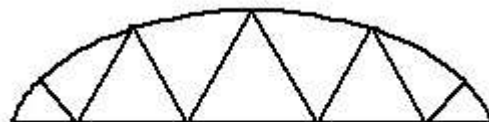


Fig.11: Cercha de cordón superior curvo

B) Posición de las barras Interiores

Están asociadas a los nombres de sus inventores como cercha Howe, Pratt, Warren, Fink, entre otras.

Howe: esta cercha fue patentada en 1840 por *William Howe*. Está compuesta por montantes que trabajan a la tracción y diagonales que lo hacen a la compresión. Es apta para ser trabajada en un mismo material. También conocida como “Armadura de Malla Inglesa”. Las cabriadas de dos aguas Howe son las más usadas y se recomienda ser utilizadas con luces máximas de 27 ó 30m (Fig.12).

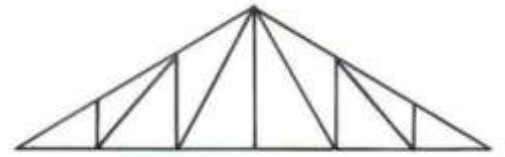


Fig.12: Cercha tipo Howe. Montantes a la tracción, diagonales comprimidas

Pratt: fue diseñada por Thomas y Caleb Pratt en 1844. Consta de montantes verticales que trabajan a la compresión y diagonales a la tracción. Los elementos diagonales encargados de resistir el esfuerzo de tracción son más largos que los sometidos a la compresión (Fig.13).

Se recomienda su uso para pendientes entre 25° y 45° y luces de hasta 30 m.

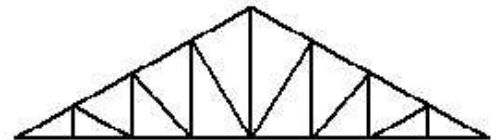


Fig.13: Cercha tipo Pratt. Montantes a la compresión, diagonales traccionadas

Warren: fue patentada por los ingleses *James Warren* y *Willboughby Monzoni* en 1848. También se la identifica como armadura Fink o Polonceau (Fig.14).

El rasgo característico de este tipo de cercha es que forman una serie de triángulos isósceles (o equiláteros), de manera que todas las diagonales tienen la misma longitud. Este tipo de disposición de las barras y con las cargas aplicadas verticales en sus nudos superiores, las diagonales presentan alternativamente compresión y tracción.

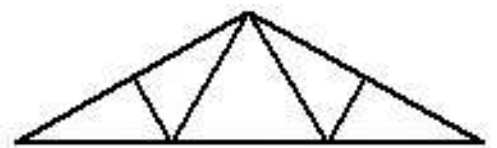


Fig.14: Cercha Warren

Cuando se utiliza en gran escala, ofrece la ventaja de que proporciona un máximo de espacio abierto libre para la inclusión de los elementos de servicio del edificio que deben pasar a través de las estructuras (conductos, tuberías. Etc.)

Cuando se las utiliza para salvar luces de entre 12 a 18 m, se recomienda que la pendiente sea superior a 45°.

Se pueden utilizar para cubrir luces de hasta 90 metros y más.

C) Secciones

Se hace referencia a la posibilidad de duplicar o triplicar los pares, pendolones, diagonales o montantes.

Simple: pares, diagonales y tirante van en un mismo plano. Esto las hace fácil de armar y la solución en la unión de los nudos se debe efectuar por medio de Placas de acero, placas perforadas o dentadas (Fig.15).

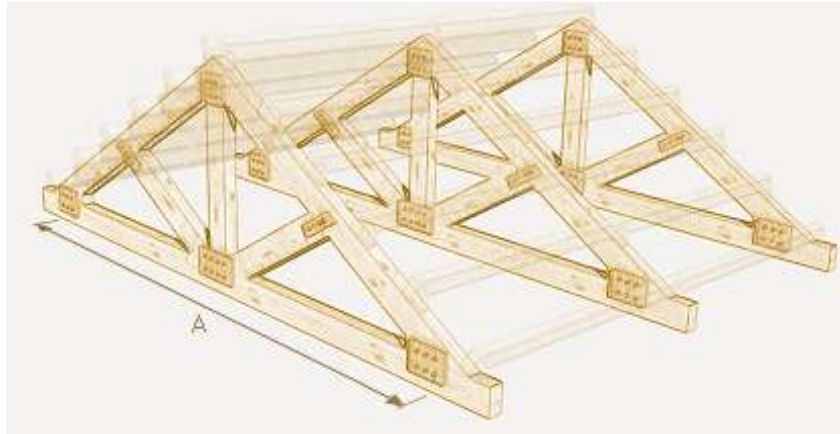


Fig.15: Sección

Compuesta: tiene la particularidad de tener piezas adecuadamente interconectadas para funcionar como una unidad. El hecho de tener elementos dobles o triples da mayor rigidez y facilita la solución de nudos al coincidir los ejes neutros de los distintos elementos. Su unión se realiza por medio de clavos, pernos, pasadores o conectores, así como elementos mecánicos de unión (Fig.16).

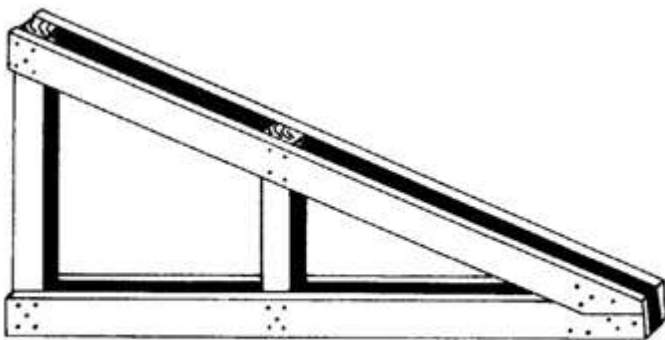
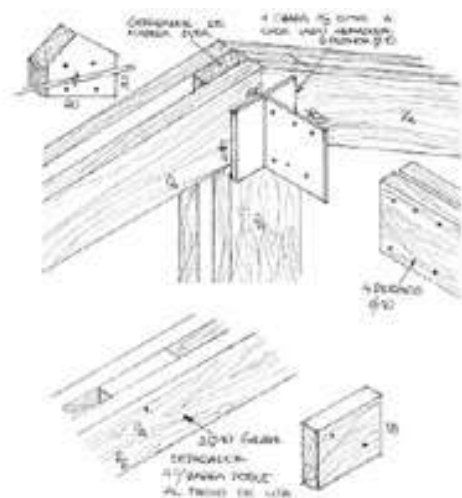


Fig.16: Sección compuesta



D) Materiales

Se pueden fabricar de madera aserrada, madera laminada y barras metálicas.

Madera: Tiene una excelente resistencia mecánica en relación a su peso específico, es un material adecuado para constituir estructuras soportantes. En la fabricación de cerchas y cabriadas, el uso de la madera es óptimo, ya que la limitación del largo comercial de las piezas, se supera, mediante distintas técnicas, combinando elementos de corta longitud.

E) Tipo de Unión

Las uniones de elementos que conforman una cercha difieren si se trata de cerchas de madera, de acero, de hormigón o mixtas.

En madera se pueden realizar a base de clavos, pernos, uniones dentadas, tarugos y adhesivos, entre otros.

Unión madera-madera con clavos: las cerchas con uniones clavadas, son las más antiguas, son de simple fabricación y aplicables a luces relativamente pequeñas (hasta 15 metros). El mayor problema que presentan en la solución de los nudos, es la gran cantidad de clavos que se requiere (se recomienda usar clavos estriados o en espiral),

La norma NCh1198 Of 91 exige la presencia de al menos 4 clavos en cada uno de los planos de cizalle que se presentan en una unión calada de dos o más piezas de madera.

Pernos o bulones (Fig.17): se utilizan principalmente en nudos de cerchas de madera que van a quedar a la vista.

Las piezas, del mismo ancho, se encuentran en el nudo entre dos chapas de acero y son atravesadas perpendicularmente por los bulones. Quedan solicitadas preponderantemente en flexión, induciendo sobre la madera tensiones de aplastamiento. Se deben considerar el diámetro del perno, sus distanciamientos mínimos a los bordes y la distancia entre ellos, dependiendo del tipo de unión; sea traccionada, comprimida o de momento.

Si se coloca una única chapa central embutida en ranuras, los pernos utilizados en uniones estructurales deben llevar arandelas, para evitar que se incrusten en la madera.

Las uniones con pernos son más flexibles que las clavadas, un aspecto relevante de considerar al momento de diseñar para evitar corrimientos exagerados en los nudos.



Fig.17: Unión con pernos o bulones

Tarugos: Los tarugos o pasadores metálicos (Fig.18 y 19) son barras de acero de sección circular con diámetros de 16 a 35mm, frecuentemente con su superficie estriada longitudinalmente y con los extremos con embocadura biselada. Al contrario que los pernos y bulones no tienen cabeza, tuercas ni arandelas, lo que aporta un resultado estético más limpio.

Entran a presión ya que su diámetro debe ser ligeramente superior al del agujero donde penetran. Por este motivo las uniones realizadas con pasadores son más ceñidas y tienen mejor contacto con las paredes del agujero que las resueltas con pernos. La utilización de tarugos requiere una mayor precisión para evitar problemas en el montaje.

En construcciones de madera de pequeña escala, es posible perforar en una sola operación ambas maderas a unir con el tarugo. Pero en construcciones a gran escala, las piezas a montar deben traer las perforaciones hechas en taller, siendo necesaria mayor precisión para que el tarugo concuerde con ambos agujeros.

Finalmente la ocultación de los tarugos es sencilla de realizar consiguiendo mejores prestaciones en caso de incendio y una estética mayor. Se emplean generalmente en las uniones de piezas de madera laminada encolada.

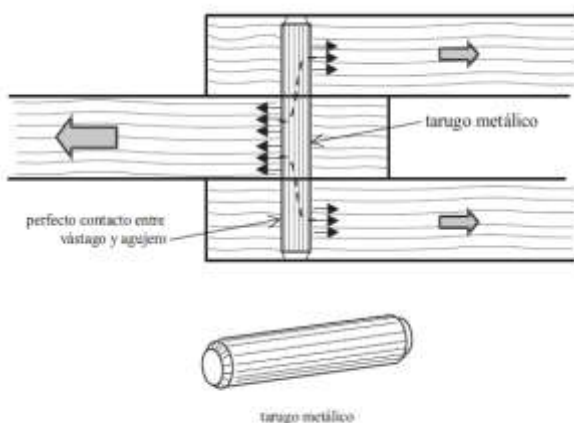


Fig.18: Tarugo metálico uniendo tableros de madera.



Fig.19: Tarugos metálicos insertados a través de chapas intermedias.

Placas de clavos múltiples (Fig.20 y 21): son planchas de acero de 1mm de espesor, con tratamiento para evitar la corrosión. Presenta una serie de dientes o clavos perpendicular a la placa y todos ellos con una misma separación y dirección.

Se disponen de manera que existan dos placas actuando como cubrejuntas, las que se deben incrustar simultáneamente sobre las dos caras de los extremos de las piezas de madera que convergen a una unión o empalme. Deben ser de igual tamaño y quedar dispuestas simétricamente respecto a los ejes de los maderos que se unen.

La placa metálica no se debe deformar al ser clavada. No se acepta uso del martillo, sino de una prensa que haga penetrar completa y simultáneamente todos los dientes en la madera.

Así el eje del diente es hincado perpendicularmente a la superficie de la madera y queda completamente insertado.

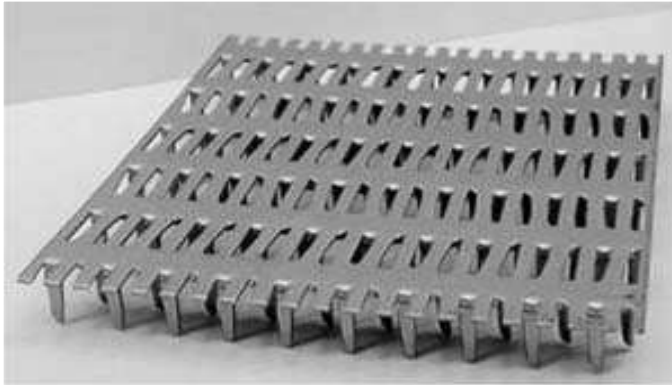


Fig.20: Plancha de clavos múltiples tipo Gang Nail.



Fig.21: Plancha cavada uniendo dos maderas.

En las cerchas metálicas el tipo de unión más frecuente es la soldadura y el abulonado. La soldadura confiere monolitismo y cierto grado de empotramiento a las barras que vincula en los nudos. No es una “técnica de montaje” por lo que se debe realizar “in situ” y no requiere gran precisión (Fig.22).

La unión de barras mediante abulonado, en cambio, responde a una técnica de montaje y requiere mucha precisión, ya que las perforaciones para el paso de los bulones deben ser hechas en taller y deben coincidir con exactitud entre las distintas piezas (Fig.23).

Utilizando bulones de acero de alta resistencia, se pueden hacer agujeros con diámetro más grandes que el del vástago, lo que permite ajustes y menor grado de precisión. Esto es posible porque la transferencia de fuerzas no se produce por contacto entre el vástago y el agujero, sino por el rozamiento entre las piezas que ocasionan la cabeza del bulón y la tuerca al ser ceñida.

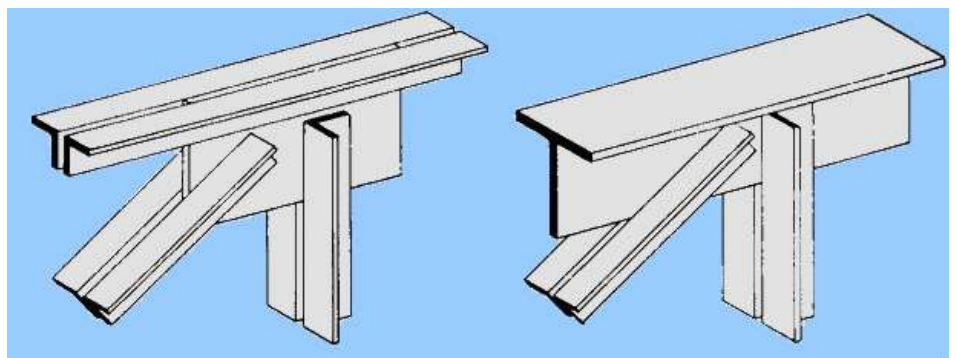


Fig.22: Uniones soldadas

Fig.23:
Uniones
abulonadas



Un tipo de cercha particular es la denominada “cercha invertida”.

Es una cercha en la cual el cordón superior comprimido es recto y el cordón inferior es quebrado (Fig.24). Es una estructura muy parecida a una “viga atensorada” (Fig.25).

Con estas cerchas se pueden hacer techos inclinados de un agua (Fig.26) o de dos aguas con un apoyo intermedio. El apoyo intermedio se puede suprimir articulando dos cerchas invertidas en el cumbrero y agregando un tensor entre A y B (Fig.27), con lo cual se convierte en una especie de cercha Warren.

Fig.24

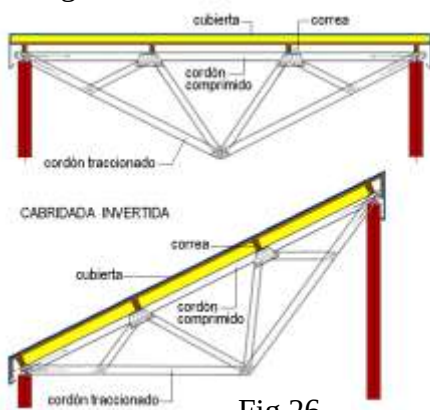


Fig.26



Fig.25: Viga atensorada en Munich-

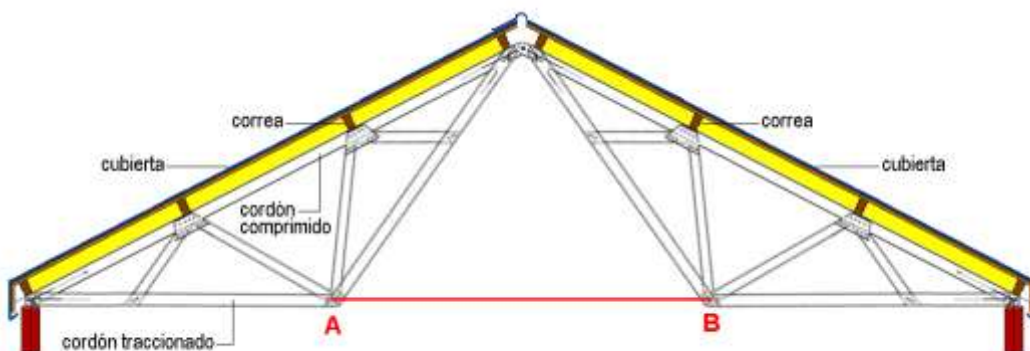


Fig.27

Asimismo se han diseñado cerchas estilizadas, que diferencian las barras comprimidas –mas robustas- de las barras traccionadas de menor sección o resueltas con cables (Fig.28).



Fig.28

7. ENTRECRUZAMIENTO DE CERCHAS

Las cerchas pueden entrecruzarse para que adquieran estabilidad espacial sin necesidad de una estructura secundaria de arriostramiento.

El entrecruzamiento más común de cerchas genera 2 variantes similar a las que se generan con el entrecruzamiento de bóvedas de cañón.

Por un lado se genera el techo en pabellón, a 4 aguas (Fig.29). Por otro lado el “techo de limahoyas”, llamado así porque el cruce genera 4 encuentros inclinados “en valle” (Fig.30).

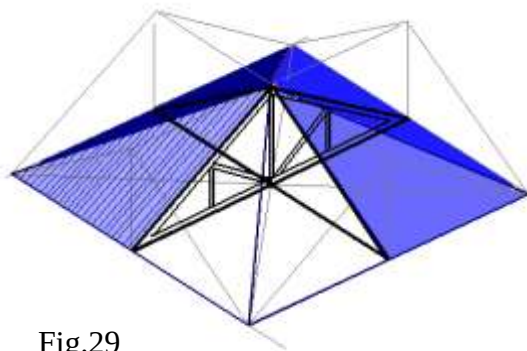


Fig.29

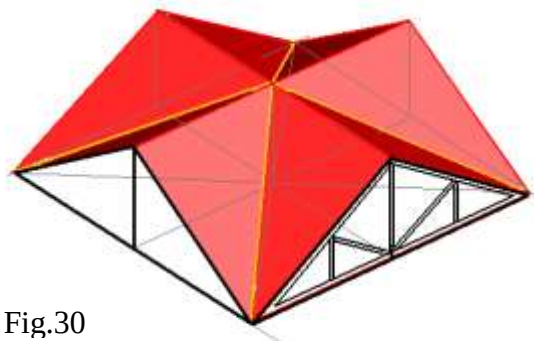


Fig.30

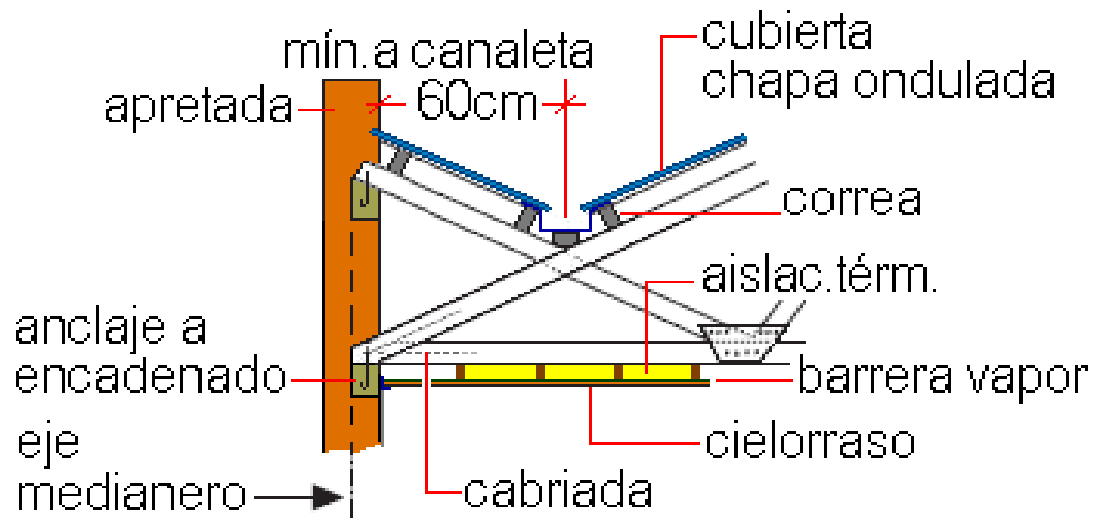


Fig.32: Techo de cerchas entre medianeras

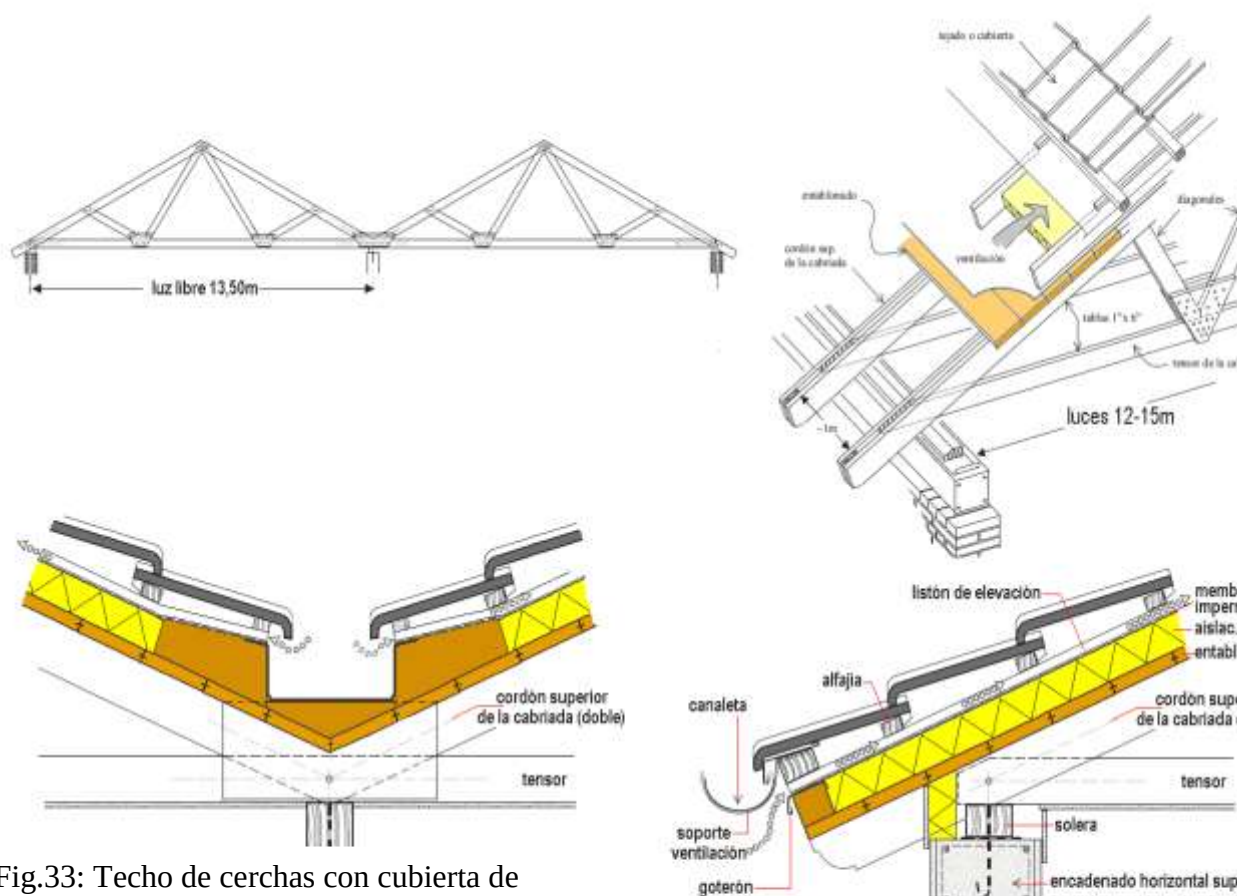


Fig.33: Techo de cerchas con cubierta de

ARCOS

Antecedentes históricos

El **arco**, como elemento estructural, proviene del latín **arcus**, a su vez derivado del vocablo indoeuropeo **arkw**. Es el elemento constructivo de directriz en forma curvada o poligonal, que salva el espacio abierto entre dos pilares o puntos fijos, transmitiendo toda la carga que soporta a los apoyos, mediante una fuerza oblicua que se denomina empuje.

No se debe confundir el arco con un elemento de similar apariencia pero distinto en el comportamiento estructural, como por ejemplo, la viga de eje curvo, que se dimensiona a la flexión y no produce empujes en los apoyos.

En la naturaleza aparecen arcos de forma natural, ya sean los que se forman espontáneamente en el paso de una montaña, y que, debido al desplome de piedras, se ordenan en disposición estable isoestática de un arco. Todos estos arcos espontáneos, formados en la naturaleza, quizás fueran la inspiración a los primeros hombres que colocaron piedras imitando la disposición curvada de los mismos. (Fig. 01 y 02).



Fig.01 Arcos naturales en las costas de Praia de Marinha. Entre Carvaeiro y Armacao de Peira, Portugal



Fig. 02 Arco natural de roca caliza. Puente de 60m de altura. Roussillon, sureste de Francia.



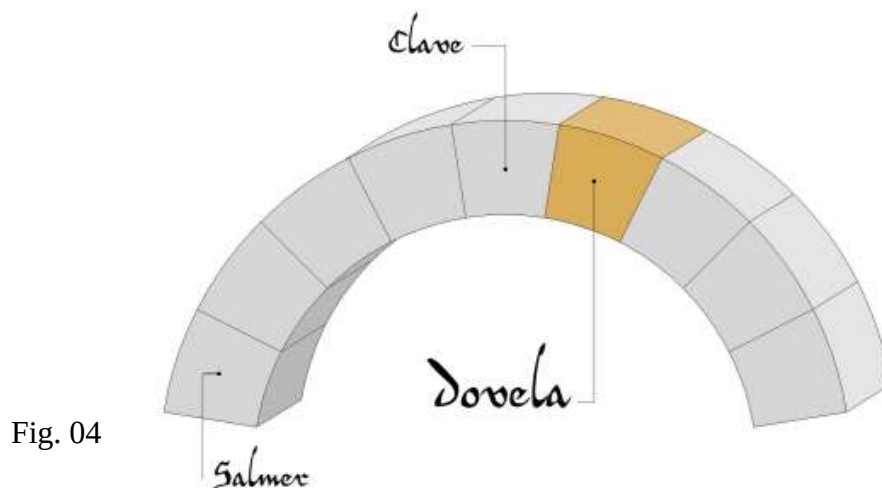
El arco presenta antecedentes en la construcción desde hace seis mil años. Aparece por primera vez en la arquitectura de la Mesopotamia y se transmite a Europa, mediante su uso en el Imperio Romano, hasta alcanzar su máximo esplendor en el siglo XVI. (Fig. 03)

Fig.Nº03 Arcos de medio punto en la Mesopotamia. El zigurat y el palacio fueron construcciones de la Mesopotamia. Se construían con ladrillos de barro cocido o secado al sol (adobes) y se recubrían de betún para hacerlos impermeables a la lluvia.

En los inicios de la historia el arco se utilizaba en edificaciones auxiliares, estructuras subterráneas y de drenaje; fueron los romanos los primeros en usarlos en edificios monumentales, aunque se pensaba que los arquitectos romanos aprendieron su uso de los etruscos.

En el período romano el arco de piedra o ladrillo estaba formado por bloques dispuestos unos contra otros y sujetos por una tensión. De esta forma, se considera que el arco es un sistema en equilibrio, en el que por su propia morfología las piedras que forman la curva (*dovelas*) están sometidas a esfuerzos de compresión.

Las partes constitutivas de un arco son las *Dovelas*, piezas en forma de cuña que componen el arco y se caracterizan por su disposición radial. La dovela del centro, que cierra el arco, se llama *clave*. Las dovelas de los extremos y que reciben el peso, se llaman *salmer* (es la primera dovela del arranque). La parte interior de una dovela se llama *intradós* y el lomo que no se ve por estar dentro de la construcción, *trasdós*. El despiece de dovelas es la manera como están dispuestas las dovelas en relación con su centro. Cuando las dovelas siguen los radios de un mismo centro se llama arco radial aunque ese centro no siempre coincida con el centro del arco (Fig. 04).



Los romanos en virtud de la perfección lograda en la labra de la piedra, labraron el arco de una única rosca de dovelas más amplias, incluso a labraron en punta por su parte superior para escalonarla en el extradós de manera que la parte superior se fundía escalonadamente en el aparejo del muro.

El arco romano es de forma semicircular y se construyó a partir de un número impar de dovelas, para que haya una dovela central o *clave*. Los romanos emplearon este tipo de arco semicircular en muchas de sus estructuras tradicionales, como acueductos, portales de accesos a las ciudades, palacios, y anfiteatros. Los construyeron tanto con extradós curvo como escalonados (Fig.05 y 06).

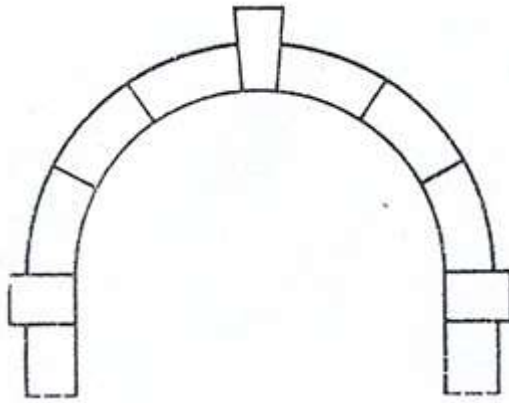


Fig. 05. Arco de medio punto- Extradós curvo

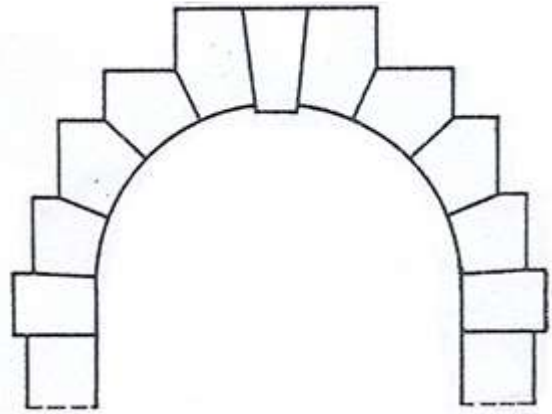


Fig. 06 Arco de medio punto- Extradós escalonado

CLASIFICACIÓN DE LOS ARCOS SEGÚN SU FORMA

En el trazado de los arcos de medio punto, la forma básica, es de un solo centro, aunque existen diferentes formas de arco, derivados del arco de medio punto.

Si bien desde este punto de vista se identifican más de 20 formas variadas de arcos, a continuación presentaremos solo las más repetidas.

El arco de medio punto es el que, apoyado sobre sus dos puntos extremos toma la forma de media circunferencia; resultando así su centro a la misma altura que en el centro de la línea imaginaria horizontal que une sus puntos extremos. Inicialmente este tipo de arco se construía a partir de pequeños elementos adosados entre sí, denominados dovelas, generalmente realizados en piedra, ladrillo o adobe. (Fig. 07 y 08).

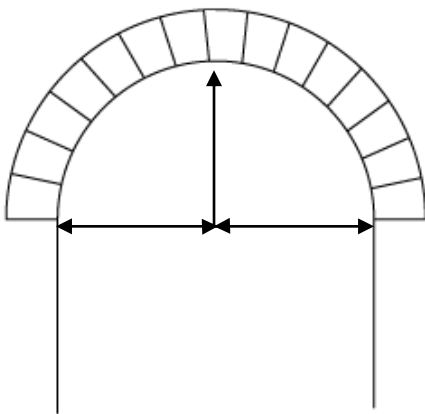


Fig.07 Arcos de medio punto. Conocido también como arco romano, considerado por los arquitectos hasta el S.XVIII como el más estable de los arcos.



Fig. 08 Arcos de medio punto en el Mercado de Abasto Carmona.

Cuando la forma geométrica del arco coincide con una semicircunferencia se denomina arco de medio punto. El arco de medio punto tiene la gran ventaja que es más fácil de construir. Existen distintas variantes del arco de medio punto, entre los cuales los más conocidos son:

El *arco peraltado*, que es el arco semicircular cuyo centro se encuentra en una línea por encima de los puntos de apoyo, quedando entre éstos y los arranques del arco pequeños tramos rectos verticales.

Resulta mucho más esbelto que el anterior, ya que muestra la semicircunferencia completa a veces muy por encima de los puntos de apoyo. Este tipo de arco es característico del pre-románico (Fig. 09 y 10).

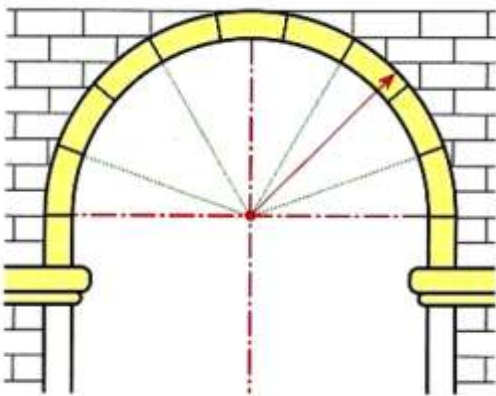


Fig.09 Arco Peralzado. Se usa para conseguir mayor altura, resultando así una imagen que gana en esbeltez



Fig. 10 Arcos Peralzados. Galería de arcos del Claustro del Monasterio de la Cartuja. Sevilla

En el caso de la galería de arcos del Claustro el arco peraltado se levanta sobre un pequeño tramo vertical por encima del capitel de la columna.

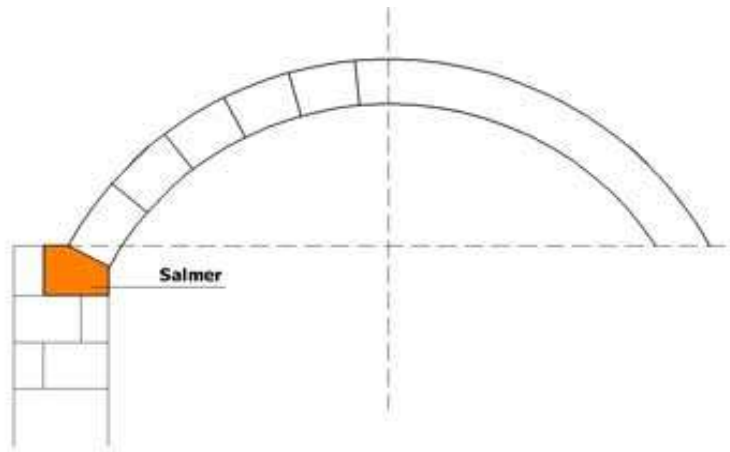
Otro arco derivado del arco de medio punto es *el arco rebajado*. Este tipo de arco también es de forma semicircular, y por el contrario al anterior, la forma de éste aparece como una circunferencia rebajada.

Este tipo de arco fue muy utilizado durante el período del Renacimiento europeo, durante los siglos XV y XVI., en catedrales e iglesias como la galería renacentista de Iglesia de la Santa María la Real en Aranda de Duero, España, entre otras.

En el trazado geométrico, el centro del arco, se ubica en una línea horizontal imaginaria por debajo de los puntos donde se apoya; motivo por el cual el arco es menor que una semicircunferencia y arranca con ángulo agudo.

La imagen del *arco rebajado* aparece a la vista como “aplastada”, como consecuencia de tener el centro de su curvatura a un nivel inferior al de los arranques del propio arco.

Este es el motivo por el que el encuentro del arco rebajado no es tangente a la vertical de sus apoyos; cosa que sí ocurre en el arco de medio punto, donde el centro de curvatura y los puntos de arranque están a la misma altura. (Fig. 11 y 12).



- Fig. 11 Arco Rebajado. Lo habitual es que el *arco rebajado* se muestre al exterior con todas sus caras y sus aristas lisas, y a veces marcando claramente cada una de las dovelas o piezas individuales que lo conforman.

Fig. 12 Arco escarzano, otra variante del arco rebajado. Iglesia de San Ildelfonso. 1794-1841

Según la forma, el trabajo estructural y la función en la arquitectura, distinguimos distintas tipologías de arcos, como los arcos rampantes o arbotantes, arcos perpiñones, arcos con fajones, arcos diafragma, arcos formeros, torales y arcos con tirantes, como para mencionar algunos de ellos.

Si bien este trabajo no tiene el objeto de desarrollar las tipologías estructurales de los arcos pesados, ejemplificaremos solo algunos de ellos, como el arco rampante, cuyos arranques se encuentran a distinto nivel.

Según la función, este tipo de arcos se encuentran para resolver escaleras pesadas, cuya estructura de sostén se encuentra sometida a esfuerzos de compresión. (Fig. 13 y 14).



Fig. 13 Arco rampante. Utilizado como estructura de escalera con solicitud interna a la compresión.

Fig. 14 Patio Turrull. Caixa De Estalvis de Sabadell –1905- 1915- Barcelona-Cataluña- España

Los arcos rampantes, también son conocidos como arbotantes. Muy utilizados en la arquitectura gótica, para la resolución de catedrales.

Estos arbotantes se los utilizaba para alivianar las secciones de apoyo del interior de las naves de catedrales e iglesias, y trasladar las cargas al exterior.

El extremo superior de estos arcos absorbe el empuje de otro arco o de una bóveda, mientras que el inferior descarga las tensiones sobre un contrafuerte o botarel. (Fig. 15)

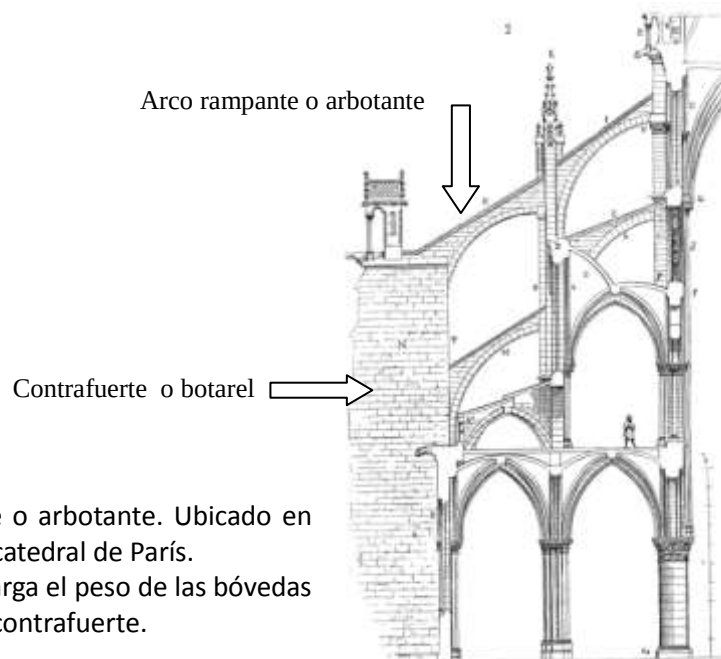


Fig. 15 Arco rampante o arbotante. Ubicado en la parte exterior de la catedral de París. Este tipo de arco descarga el peso de las bóvedas u otros arcos sobre el contrafuerte.

Toda estructura abovedada sometida a cargas gravitacionales uniformemente distribuidas, presenta una sollicitación interna a **compresión**. Se dice entonces, que el arco “trabaja a la compresión” para llevar las cargas a sus apoyos.

Se distingue la “Compresión Pura”, que es aquella en la que los esfuerzos son iguales en toda su sección de la “Compresión Simple” cuando son variables.

El arco de medio punto fue el elemento estructural de compresión simple (la línea de presiones debe ubicarse en el tercio medio). El mismo gozó de gran aceptación por la simplificación constructiva que ofrece en mampostería y donde el peso propio es la carga fundamental.

En los arcos de medio punto es importante determinar la “presión de imposta”. Esta clase de arcos es tres veces “estáticamente indeterminado”, o sea que estamos en presencia de una estructura hiperestática de tercer grado.

Schreyer, C.; “*Estática Gráfica de la Construcción, segunda parte*”, Ed. Labor S. A. Argentina, Buenos Aires, 1953.

En el arco actúan tres fuerzas en cada dovela: 1º) el empuje que tiene de la inmediatamente superior, 2º) el peso propio o la fuerza de gravedad y 3º) la reacción de empuje resultante. Las dos primeras fuerzas combinadas dan una resultante que es que es el empuje que la dovela ejerce sobre la inmediatamente inferior del cuerpo del arco. Los puntos en que estos diversos empujes cortan a las juntas se llaman centro de presión y la línea que los une recibe el nombre de **línea de presión**. (Fig. 16).

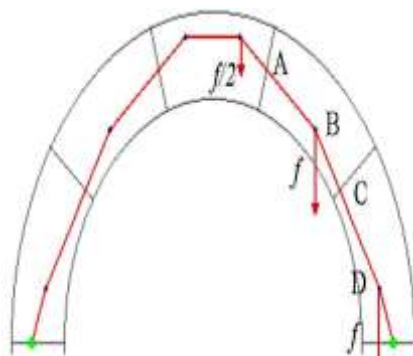


Fig.16

Es la línea que une entre sí los puntos de intersección de las resultantes de las distintas partes en que se divide un arco para analizarlo, con las juntas correspondientes. La resultante E de todas las cargas actuantes sobre el arco y las dos reacciones de apoyo (esfuerzos en la imposta) deben hallarse en equilibrio. (Fig. 17).

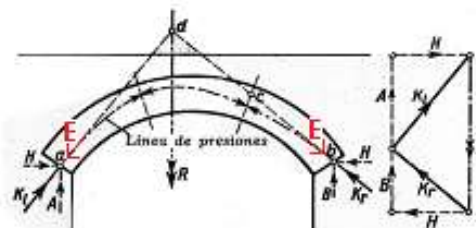


Fig.17

estado de equilibrio en el arco sin articulaciones

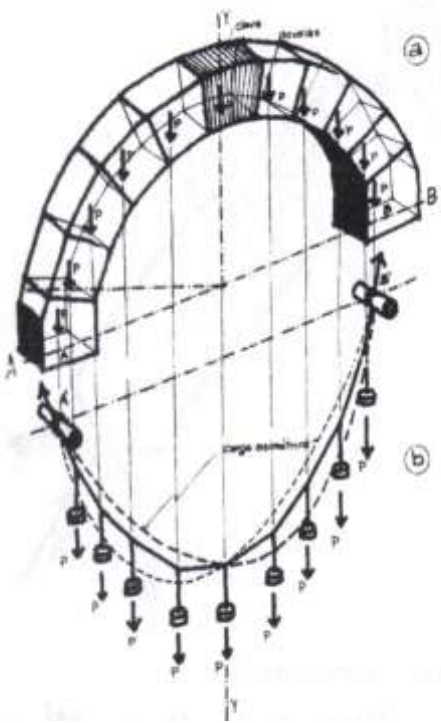
Para cumplir con esta condición las tres fuerzas deben concurrir en un mismo punto. Utilizando este principio se puede emplear un método gráfico aproximado para su cálculo. Para que el arco sea estable esta curva debe pasar por el tercio medio del cuerpo del arco y los ángulos que forman los diferentes empujes deben ser menores que el ángulo de rozamiento del material empleado para la construcción del arco. Si no cumple con estas condiciones cualquier dovela tenderá a resbalar sobre el plano de la junta. Si el centro de presión queda fuera del tercio medio, la dovela tenderá a volcarse y cuando alcanza grandes proporciones puede ocurrir la rotura.

Kidder. Frank E., Parker, Harry *Manual el arquitecto y del ingeniero. Editorial hispano americano. Capítulo VIII pp. 323 a pp. 339.*

El arco pesado es el elemento estructural que permite salvar espacios de grandes luces mediante el uso de aparejo de piezas de reducidas dimensiones.

Las tensiones de rotura que aparecen en la mampostería son sustancialmente más bajas que las tensiones de rotura de la piedra.

Un arco se sostiene si en su espesor hay contenida una catenaria invertida., es decir, la equivalencia entre el problema del arco y el hilo colgante. *“del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así pero invertido se sostendrá el arco rígido” Hooke, Robert (1675).*



Por lo general la forma de un arco de mampostería se elige de modo que corresponda al funicular de la carga debida a la del peso propio.

Es decir la forma ideal de un arco para resistir cargas determinadas por un estado de compresión puede hallarse siempre con la forma del polígono funicular invertido. (Fig. 18).

Fig. 18
Grafico Arcos y cables
“Introducción a la estructura de los edificios.”
Arq. Diego Díaz Puertas, 1985

Un factor que influye en la característica de la curva de los arcos es la relación que existe entre la flecha (*Altura del arco que se mide desde la línea en que arranca hasta la clave*) y la luz.

Los empujes horizontales son inversamente proporcionales a la flecha y deben ser absorbidos por los apoyos. Esta relación depende de distintas consideraciones formales, funcionales, constructivas y/o económicas.

Desde el punto de vista de la morfología, el diseñador o arquitecto podría considerar la volumetría exterior del edificio, o la relación que toma el espacio interior con la altura del techo adoptada.

En un tanteo inicial, Torroja (1996), considera que se tendrán en cuenta la magnitud de los empujes en los apoyos y la necesidad de contrarrestarlos. Es por ello que desde el punto de vista constructivo y económico, los valores ideales de relación entre flecha y luz, resultan con un coeficiente de $L/5$ a $L/7$. Los que resultan satisfactoriamente en los dos aspectos ya mencionados e incluso visualmente.

Según, Regalado (1999), Se podría considerar también la relación $L/8$, sin riesgo de roturas o colapso, pero que, coincide con Torroja, que sin lugar a dudas $L/5$ es la relación más eficaz.

Torroja Miret, E. (1996). Razón y ser de los tipos estructurales. 8ª edición.

Colección Textos Universitarios, nº 13. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias la Construcción Eduardo Torroja. Madrid.

Regalado Tesoro, F. (1999). Breve introducción a las estructuras y sus mecanismos resistentes. CYPE Ingenieros. Alicante.

Empujes Laterales

En el caso de los arcos pesados de mampostería las dovelas están sometidas a esfuerzos **de compresión** fundamentalmente, pero transmiten empujes oblicuos en los puntos de apoyo, hacia el exterior, de forma que tiende a provocar la separación de éstos.

Para contrarrestar estas acciones, o equilibrarlas se utilizaron, históricamente, en la construcción de piedra, contrafuertes y arbotantes, como ya ilustramos anteriormente.

Se debe tener presente que los arcos descargaban sobre paredes, entregando presiones oblicuas en el extremo superior de éstas.

La componente horizontal de la presión oblicua intentaba volcar o deslizar a la pared. Cuanta más alta era la pared, la situación era más desfavorable.

El principio estabilizador en la construcción de piedra fue el aporte de masa (peso muerto) con la finalidad de verticalizar los empujes aumentando la componente vertical. Así se lograba la estabilidad contra el vuelco y el deslizamiento, al conseguir que la fuerza inclinada cayera dentro del tercio medio de la sección y la componente horizontal fuera relativamente reducida.

En las paredes de altura moderada, se introdujeron contrafuertes (especie de pilares exteriores) en correspondencia con cada arco. (Fig. 19).

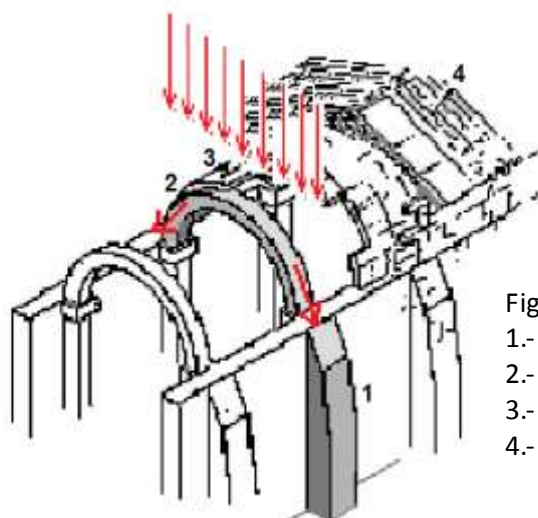


Fig.19

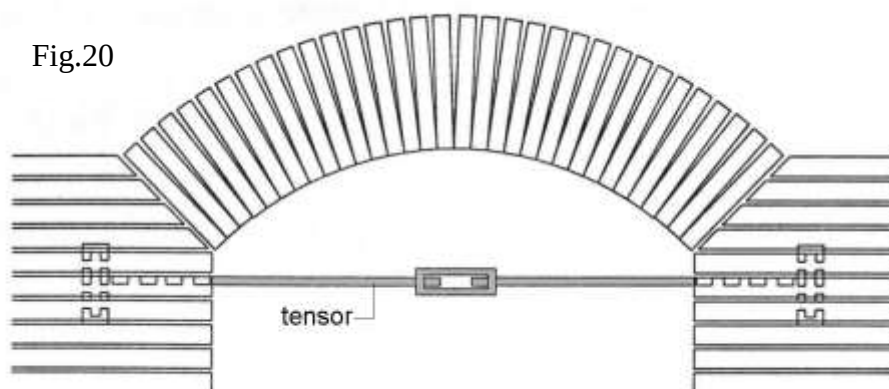
- 1.- Contrafuerte al exterior
- 2.- Arco de medio punto pesado
- 3.- Forjado de cierre
- 4.- Cubierta a dos aguas

Cuando las paredes crecieron en altura, como en caso de las grandes catedrales, los contrafuertes adquirieron grandes dimensiones y gran consumo de material.

Se desarrollaron entonces los “arbotantes”, especies de semiarcos exteriores que canalizan escalonadamente los empujes de los arcos exteriores hasta llevarlos a cumplir las condiciones de estabilidad antes expuestas.

Con el uso de acero los sistemas de gravedad para contrarrestar los empujes cedieron paso al tensor.

El tensor representa una manera diferente de contrarrestar la componente horizontal del empuje. Tiene la ventaja que las componentes horizontales de un lado y del opuesto se equilibran y el arco solo entrega fuerzas verticales en los apoyos. (Fig. 20).



De esta manera las paredes sobre las que descansan los arcos se liberan de la necesidad de contrafuertes o arbotantes y solo deben soportar cargas verticales, debiendo cuidar el riesgo de pandeo cuando son muy esbeltas.

En la construcción moderna de mampostería, los tensores frecuentemente son de hormigón armado. En la construcción sismo resistente, los tensores de hormigón armado se pueden integrar al sistema de encadenados horizontales y verticales (Fig.21 y 22).



Fig.21: tensores de hormigón armado en el Institute for Management, Ahmedabad, India, Louis Kahn, 1962

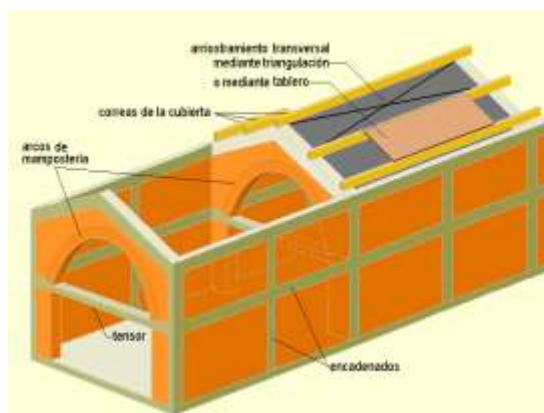


Fig.22: tensores de hormigón armado integrados a los encadenados de las paredes portantes de mampostería.

A nivel del apoyo de los arcos se suele realizar un encadenado o viga horizontal sobre la pared a fin que se distribuyan las tensiones del tensor en un área mayor.

En los casos de apoyos puntuales, este dispositivo es imprescindible sobre todo cuando los arcos no coinciden con las columnas: las vigas reciben los arcos que les producen flexión lateral mientras que las cargas verticales flexionan las vigas en el plano vertical para ser trasladadas a las columnas. (Fig. 23).

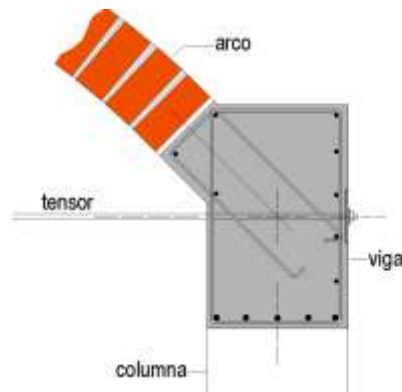


Fig.23

Estabilidad espacial

Los arcos son estructuras planas que, cuando se organizan como una sucesión de elementos paralelos, requieren de un arrostramiento transversal.

El arrostramiento más usual se realiza triangulando los planos entre las correas y los arcos. (Fig. 24).

El sistema en cruz es el sistema más usado para el arriostramiento de los arcos livianos.

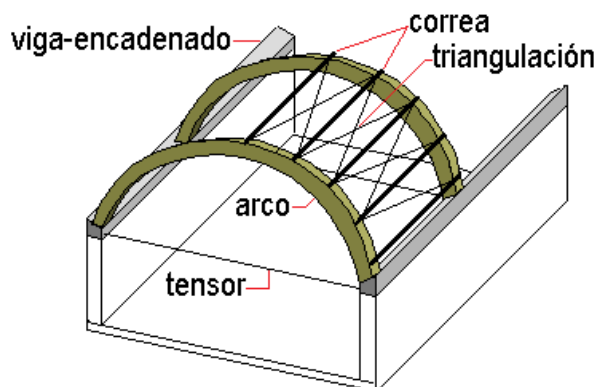


Fig.24

El arco macizo y su traslación paralela a lo largo de una directriz recta generó la bóveda maciza de cañón corrido. Estas son estructuras que han permitido cubrir grandes luces en la antigüedad.

La rotación del arco alrededor de un eje vertical, generó la cúpula y la traslación no paralela del arco a lo largo de un eje curvo generó la bóveda tórica (Fig.25).



FORMAS BÁSICAS

Fig.25

La combinación de sectores de estas formas básicas ha dado lugar a una gran diversidad de formas compuestas, como ser las bóvedas de rincón de claustro, de crucería, cúpulas vaídas y sobre pechinas, etc.

Cortando una bóveda de cañón con planos verticales dispuestos en las diagonales A-C y D-E, se generan 4 sectores (dos rojos y dos azules) (Fig.26).

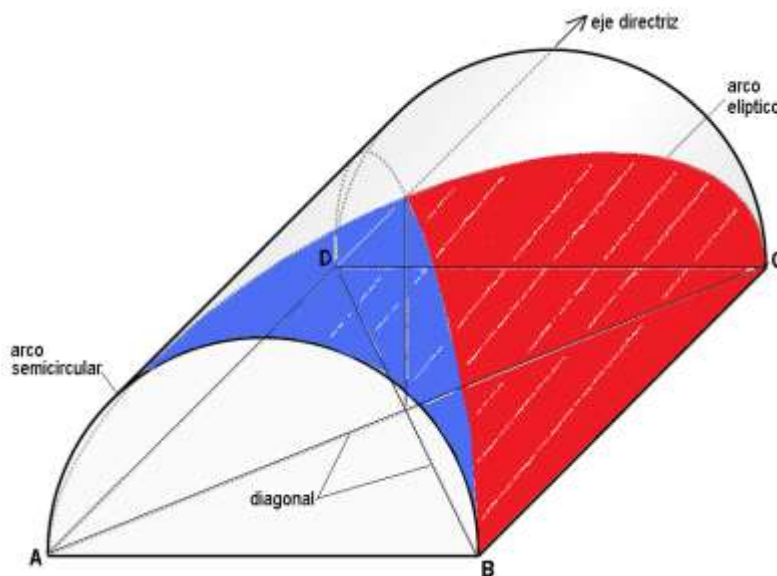


Fig.26

Combinando cuatro sectores rojos se genera una bóveda de “rincón de claustro”, que es una: bóveda de planta cuadrada, constituida por la intersección normal de dos bóvedas de cañón de la misma flecha con aristas entrantes en el intradós, también llamada bóveda claustral. (Fig.27).

Combinando cuatro sectores azules se genera una bóveda “de crucería”, que es bóveda de planta cuadrada, formada por la intersección de dos bóvedas de cañón que se cruzan perpendicularmente, también llamada bóveda por arista. Fig.28.

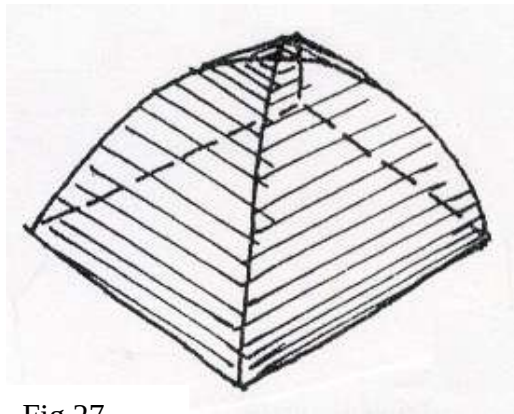


Fig.27

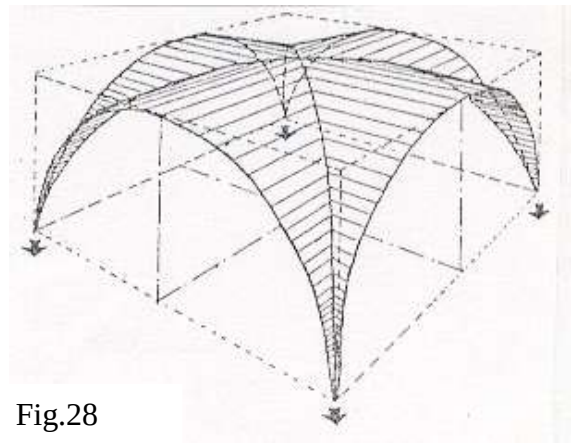


Fig.28

Otras figuras son la bóveda o cúpula vaída y la de pechinas.

La bóveda vaída se forma por la intersección de 4 planos verticales ortogonales sobre una cúpula semiesférica (Fig.29). La denominada cúpula sobre pechinas se forma por un corte horizontal sobre la anterior, que deja cuatro triángulos curvilíneos que forman el anillo que recibe la cúpula con los arcos sobre los que se apoya (Fig.30).

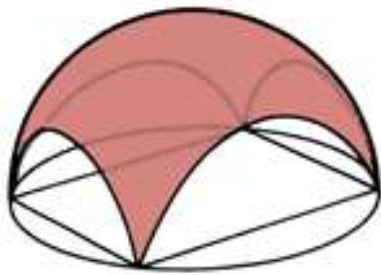


Fig.29: cúpula vaída

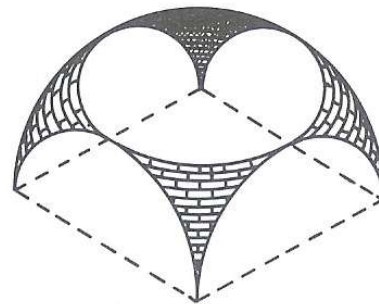


Fig.30: cúpula sobre pechinas

Los mejores ejemplos construidos con estos tipos estructurales los encontramos en la arquitectura religiosa del Románico y del Gótico (fig.31 y 32)



Fig. 31 Estructura del techo bóveda de cañón corrido. Capilla de Saint John- 1078- White Tower-Londres.



Fig. 32 Estructura del techo bóveda de crucería. Abadía de Saint Denis- 1140-1144 París Francia

Los arcos también se pueden disponer radialmente, generando una estructura espacial de forma cupular.

En la antigua Roma encontramos la cúpula más grande realizada en Hormigón, el templo de planta circular, el Panteón de Agripa, construido entre el 118 y 126 d.C y con un diámetro de 43,44m de luz libre (Fig.33).

Otro ejemplo es la Iglesia Románica de Santa María D'Eunate (Fig.34). En este ejemplo no hay una estructura plana de arcos complementada con un arriostramiento transversal como en los casos anteriores. Los arcos dispuestos radialmente se estabilizan mutuamente, generando una forma cupular con estabilidad espacial.



Fig. 33 Panteón de Agripa -Templo de base circular.



Fig. 34 Santa María de Eunate- Iglesia románica, se construyó en la segunda mitad del SXII.

En el período de la arquitectura de comienzo de siglo, encontramos el Centro del Centenario en Polonia. Es un edificio histórico que se encuentra en Breslavia, (Wroclaw) y fue construido con los planos del arquitecto Max Berg entre 1911 y 1913, cuando la ciudad polaca formaba parte del Imperio alemán (Fig.35).



Fig.35 Centennial Hall en Breslavia (Wroclaw) Polonia- Proyecto del Arq. Marx Berg 1913

Otra técnica utilizada para formar cúpulas fue el entrecruzamiento de arcos. Fue una técnica muy utilizada en España por los árabes (Fig.36 y 37), luego heredada en el mundo cristiano (Fig.38), y retomada en algún ejemplo contemporáneo (Fig.39).

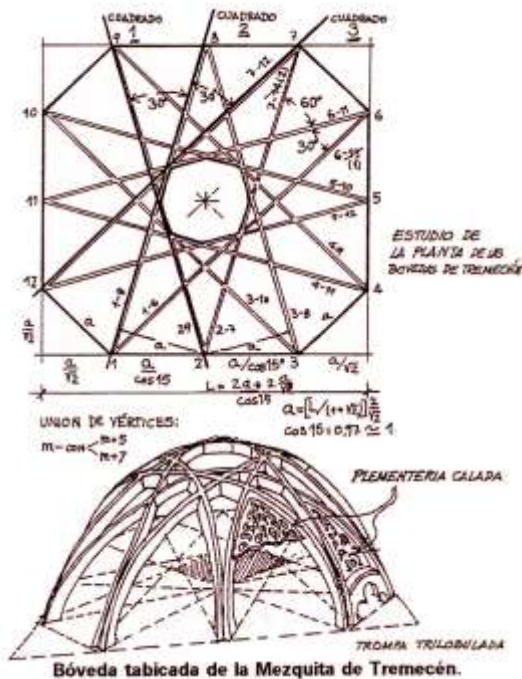


Fig.36: bóveda tabicada, Mezquita de Tremecén, todos arcos iguales.



Fig.37: Torres del Rio, España



Fig.38: arcos entrecruzados, Mezquita de Córdoba



Fig.39: Iglesia San Agustín, Madrid. Arq. L. Moya Blanco, 1946.

En la actualidad los arcos y cúpulas pesadas han perdido vigencia debido al gran consumo de materiales y a la falta de elasticidad, que las hace inadecuadas, por ejemplo, en zonas sísmicas.

El espacio de los techos con estructuras macizas de compresión ha sido ocupado por los arcos livianos y estructuras con formas abovedadas y cupulares resueltas en base a barras.

LOS ARCOS LIVIANOS

Lo presentado anteriormente está referido al tipo estructural conocido como arco pesado o arco macizo, estructura en la cual el gran peso propio uniformemente distribuido predomina en relación a la magnitud de las cargas puntuales o asimétricas. Dicho de otra manera, el gran peso propio asegura la predominancia del trabajo interno de compresión en el arco, a pesar que las cargas puntuales y asimétricas le producen flexión. La resultante de las tensiones de compresión y de flexión siempre será una fuerza de compresión que se mueva dentro del tercio medio de la sección del arco (Fig.40).

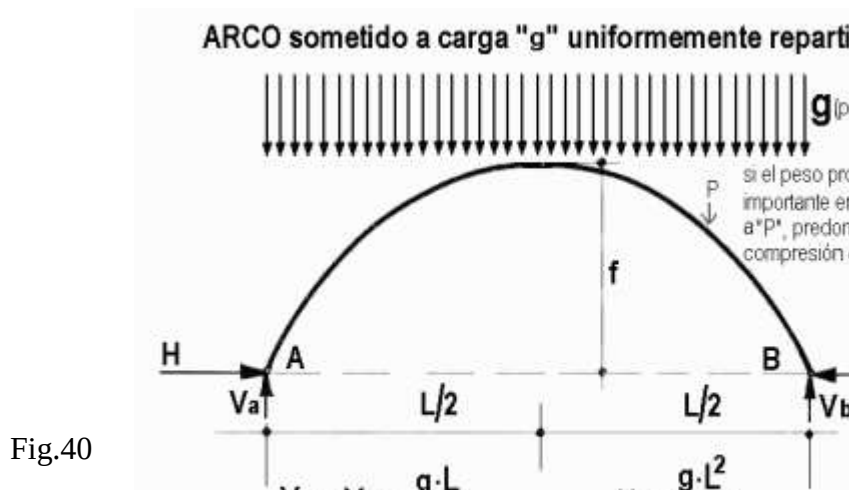


Fig.40

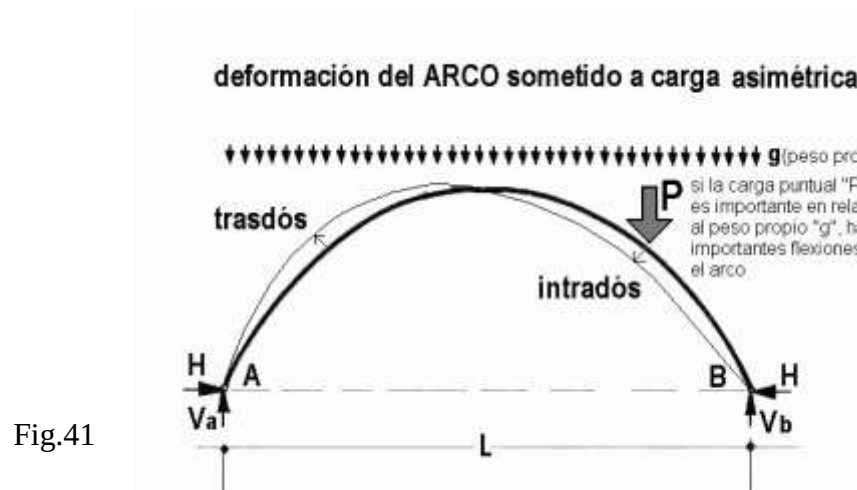


Fig.41

En la actualidad la construcción de arcos pesados ha caído en desuso. La construcción moderna utiliza arcos ligeros en la construcción de techos.

Se trata de arcos reticulados contruidos con barras de acero o de madera. Al carecer de gran peso propio no se puede garantizar que las cargas puntuales o asimétricas no saquen al arco del régimen de compresiones (Fig.41).

En estos casos los arcos deben ser dimensionados también a la flexión (Fig.42, 43, 44 y 45).

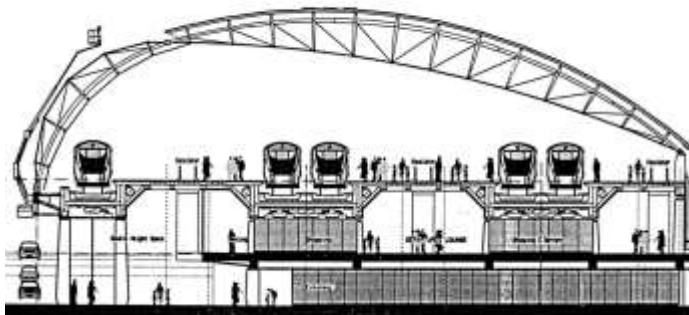
Fig.42:
Arcos ligeros
empotrados en
los apoyos, con
cubierta textil



Fig.43: Bodegas
Protos, Peñafiel,
Valladolid.
Arq. Richard Rogers,



Fig.44 y 45: Arco triarticulado
asimétrico, cubierta parcialmente
vidriada. International Terminal
Waterloo, Londres, Arq. Nicholas
Grimshaw, 1993



EL ARCO LIVIANO DE FILIGRANA

En Argentina es común la utilización de “arcos de filigrana” para techar depósitos y talleres. Es una construcción liviana y económica para salvar grandes luces. Pero se debe señalar que gran parte de su economía reside en el hecho que en depósitos y talleres, las cubiertas no necesitan brindar las condiciones higrotérmicas de habitabilidad que requieren los locales habitables. No son más que pantallas para proteger del rayo solar y de la lluvia. Estos arcos, y las correas entre ellos, se realizan con acero redondo o torsionado doblado y soldado.

La expresión “filigrana” proviene de la orfebrería y se utilizó para denominar joyas hechas con delgados alambres de plata con incrustaciones de piedras en las uniones de los alambres.

La ingeniería alemana adoptó el término para referirse a estructuras de barras que presentaban –con otras dimensiones- un aspecto similar y, en arquitectura, también se utilizó el término para referirse a techos construidos con una trama metálica delgada con paños de vidrio cerrando los espacios intermedios (Fig.46).



Fig.46: Techo filigranado,
Rookery Building, Chicago, 1886

Las estructuras de filigrana argentinas comenzaron a construirse alrededor de la década del 60.

Con tecnología artesanal, se doblaban y soldaban barras de acero redondo para formar elementos lineales rectos (correas y vigas) y curvos (arcos) (Fig.47 y 48).



Fig.47: Correas de acero redondo doblado y soldado



Fig.48: Arcos de filigrana

TECHOS EN BASE A ARCOS DE FILIGRANA

El más común de los techos se construye en base a una estructura principal de arcos, colocados cada 3 a 5m, espacio intermedio que es cubierto por un forjado de correas y chapas de acero onduladas. (Fig.49).

Las proporciones de los arcos se establecen mediante la relación flecha/luz.

Los relaciones máxima y mínima son: flecha " f " = $L/2$ y $L/10$.

Para la flecha $L/2$ los empujes horizontales en los apoyos serán bajos, pero el desarrollo del arco será grande.

Para la flecha $L/10$ los empujes serán grandes y el desarrollo del arco será menor.

Para $f=L/2$ resulta un arco de medio punto en el que la flecha es la mitad de la luz: es un arco bastante alto.

Para $f=L/10$ la flecha equivale a la altura " h " de una viga simplemente apoyada de igual luz.

De allí que las proporciones más usuales de los arcos oscilen entre $f=L/4$ a $f=L/8$, siendo la más común $L/6$.

$L/6$ representa un arco con 30m de luz con una flecha de 5m.

La altura de la sección del arco de filigrana será aproximadamente $L/50$ a $L/60$, lo que le suele conferir rigidez suficiente para las flexiones previstas. El dimensionado exacto surgirá del cálculo ingenieril.

Los techos en base a arcos de filigrana se organizan en base a patrón plano. Los arcos se colocan cada 3 a 5m y su sección es rectangular o triangular

Los arcos llevan tensores para que no se produzcan empujes en los apoyos bajo el estado de cargas que le produce el peso propio y otras cargas uniformemente distribuidas.

Los arcos deben ser anclados en sus apoyos a una construcción pesada para evitar el succionamiento del viento. Normalmente se anclan en un encadenado sobre la pared de mampostería (Fig.50) o en columnas, si coinciden con ellas.

Transversalmente a los arcos se colocan correas de idéntica construcción, sección " T " o triangular, cada 1m aproximadamente. Las correas se abulonon a los arcos (Fig.51).

Sobre las correas se apoya transversalmente la cubierta de chapa ondulada curvada. La chapa se fija a los cordones superiores de las correas mediante “ganchos” de acero o aluminio.



Fig.49: Techo con arcos de filigrana en Tucumán, Argentina.

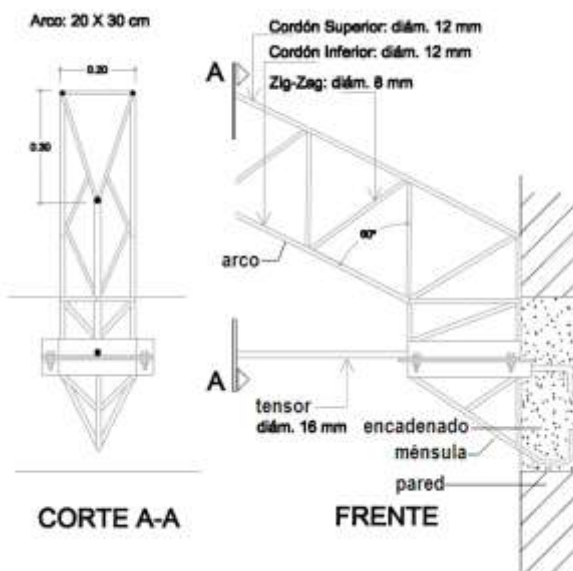


Fig.50: detalle apoyo arco sobre ménsula anclada a encadenado en

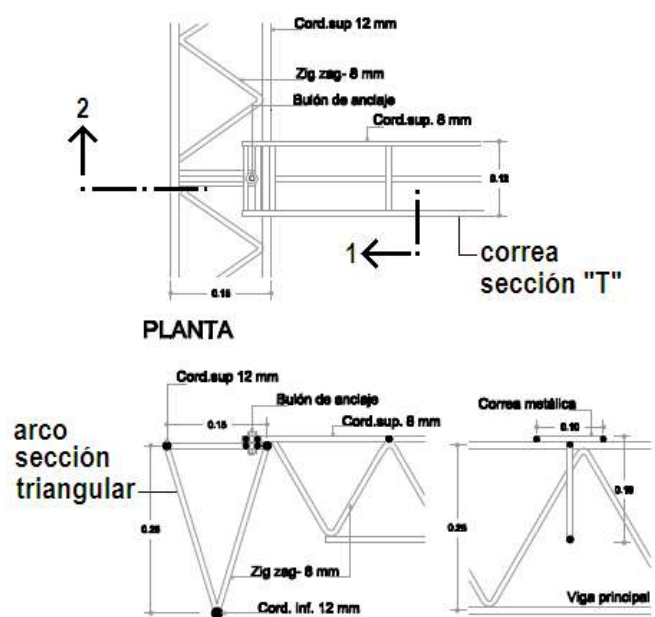


Fig.51: detalle fijación correa a arco : 1

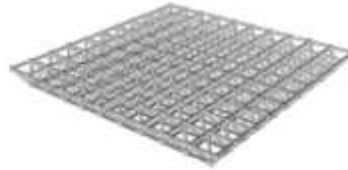
RETICULADOS ESPACIALES

ARMADURAS ESPACIALES: TECHOS EN BASE A RETICULADOS ESPACIALES, ARMADURAS TRIDIMENSIONALES y ESTRUCTURAS DE BARRAS TRIDIMENSIONALES

de transmitir cargas en más de una dirección.

Una clasificación sencilla es la siguiente:

**RETICULADOS
PLANOS DE
DOBLE MALLA**



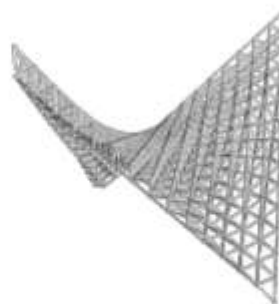
**RETICULADOS
ABOVEDADOS**



**RETICULADOS
ESFÉRICOS**



**RETICULADOS
REGLADOS**



**OTRAS FORMAS
RETICULADAS
ESPACIALES**



Denominamos “reticulados espaciales planos” a verdaderas placas aligeradas compuestas por una trama o malla superior y otra inferior desfasadas, separadas una altura “h”, vinculadas con diagonales.

Los reticulados espaciales planos más comunes se arman en base a tramas cuadradas y triangulares, estimándose la altura en $L/15$ a $L/20$ para que no tengan esfuerzos ni deformaciones excesivas (Fig.01, 02, 03 y 04).

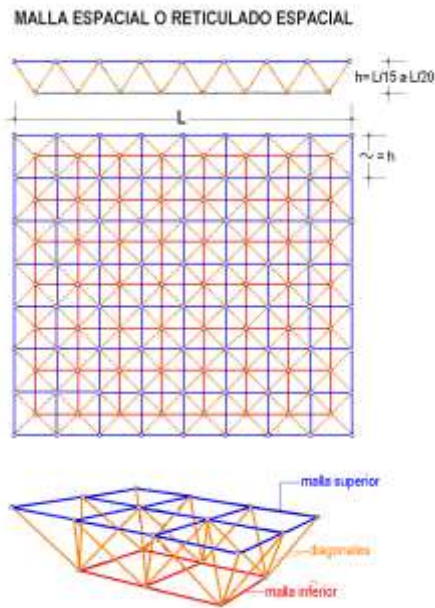


Fig. 01

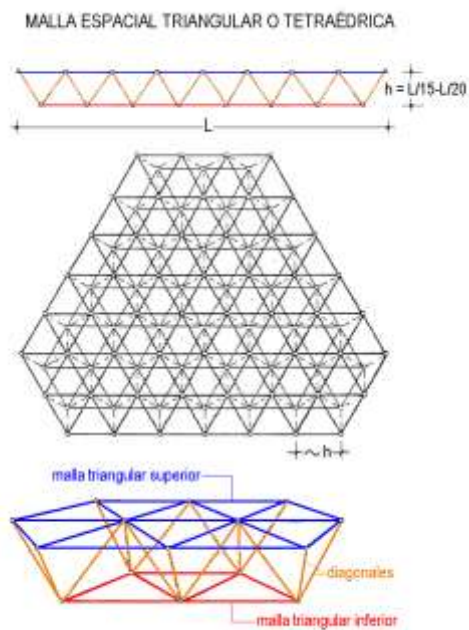


Fig. 02



Fig. 03



Fig.04

Su comportamiento general se encuadra como placa ligera de flexión. Los valores de la flexión se calculan en función de las condiciones externas: luces, cargas y condiciones de apoyo.

El dimensionado en cuanto al trabajo interno de la estructura para resistir y trasladar las cargas a los apoyos, no se calcula como estructura de flexión sino como estructura de barras sometidas a esfuerzos axiales.

La cubierta debe apoyar en los nudos de la estructura para no alterar el trabajo axial de las barras. Por lo tanto resulta importante conocer las resoluciones constructivas de los nudos, para ver cómo está resuelto el vínculo entre las barras y para ver como descansa el techo sobre el nudo.

Existen diversos tipos de soluciones para unir las barras en los nudos.

Uno de los más conocidos es el sistema “MERO” que permite unir barras en diversas direcciones sin excentricidad (Fig.05, 06, 07 y 08)

Las mallas espaciales no ofrecen una superficie continua para asiento de la cubierta.

La cubierta convencional requiere por lo tanto un tablero que cierre los espacios de la malla y proporcione una superficie continua para las capas superiores.

Un caso particular es el del sobre techo climático en el que la chapa que se asiente sobre la malla tiene capacidad resistente para salvar las luces del forjado.

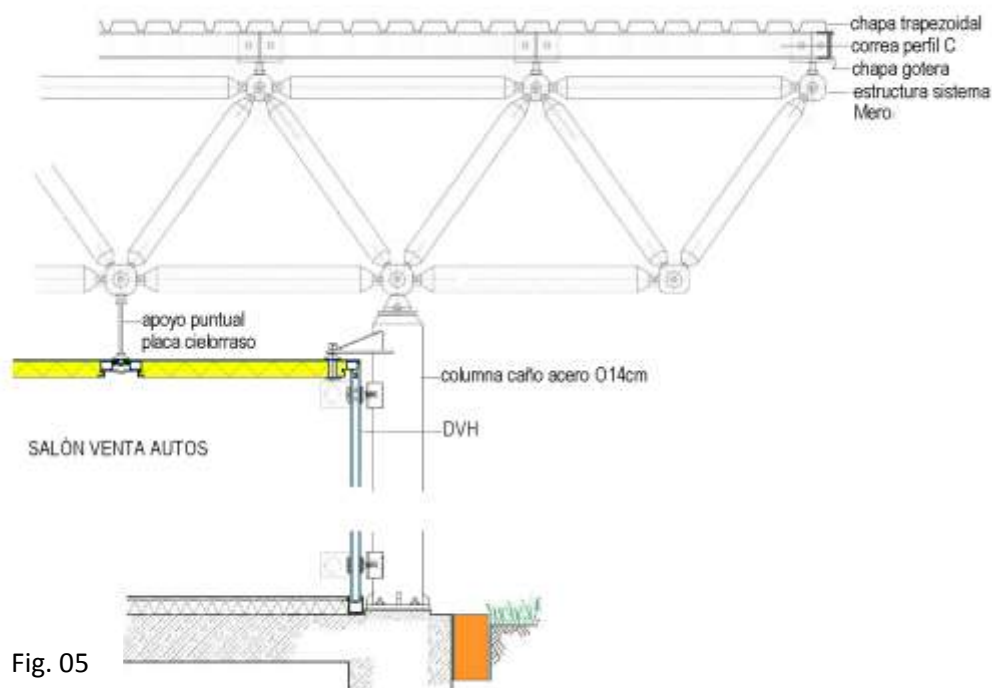


Fig. 05



Fig. 06



Fig. 07

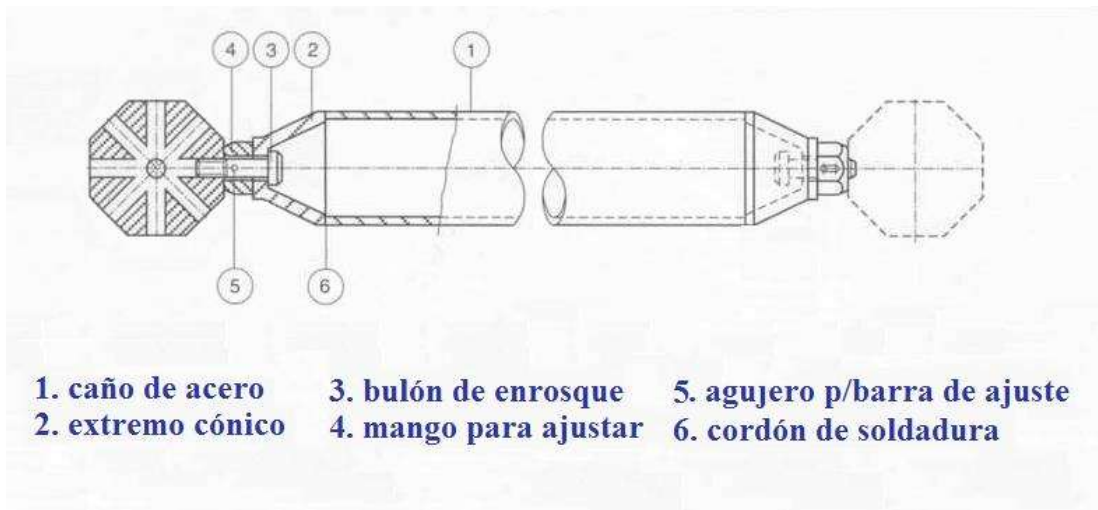


Fig.08

Según Salvadori y Heller (1966) los reticulados espaciales son más rígidos que los sistemas de armaduras paralelas, y pueden ser menos altos. Mientras la altura de una armadura con cordones superior e inferior horizontales es del orden de una décima parte de la luz, los reticulados espaciales pueden tener una vigésima o una treintava parte de la luz

FORMAS ABOVEDADAS, CUPULARES Y OTRAS EN BASE A TRAMAS ESPACIALES DE SIMPLE Y DOBLE MALLA

Durante siglos los arcos, las bóvedas y las cúpulas fueron pétreas y macizas.

La aparición de formas más livianas en base a láminas y barras es un fenómeno que comienza a producirse a partir de la segunda mitad del siglo XIX.

Hoy en día las formas livianas han desplazado totalmente a las formas pesadas.

Al poseer las bóvedas y las cúpulas geometría tridimensional, pueden ser construidas con tramas espaciales de simple malla.

RETICULADOS ABOVEDADOS

Las bóvedas de cañón en base a mallas espaciales, Son mallas espaciales de simple o de doble capa formando bóvedas de cañón corrido.

En principio se comportan como una sucesión continua de arcos, transmitiendo las cargas a apoyos laterales produciendo presiones oblicuas sobre ellos. Pero a diferencia de los arcos no son estructuras planas, poseen estabilidad espacial y mayor capacidad distributiva de las cargas, lo que evidencia un comportamiento espacial.

Antecedente de este tipo de construcción abovedada son las bóvedas laminares cortas (Fig.09)

Una bóveda de cañón corrido se genera geométricamente mediante traslación paralela de arcos adecuadamente trabados para obtener finalmente un elemento constructivo "superficial", más rígido y más estable que los arcos individuales y con capacidad distributiva de cargas. Si estas bóvedas apoyan en las paredes laterales se llaman bóvedas "cortas" o "transversales", para diferenciarlas de las "largas" o "longitudinales" que apoyan por sus extremos en los tímpanos.



Fig.09
Bóveda corta

Las bóvedas cortas trabajan a la compresión solo para resistir su peso propio. Las cargas puntuales y asimétricas les producen flexión, por ello resultan más convenientes las mallas de doble capa, pues ofrecen una altura estática mayor (Fig.10)

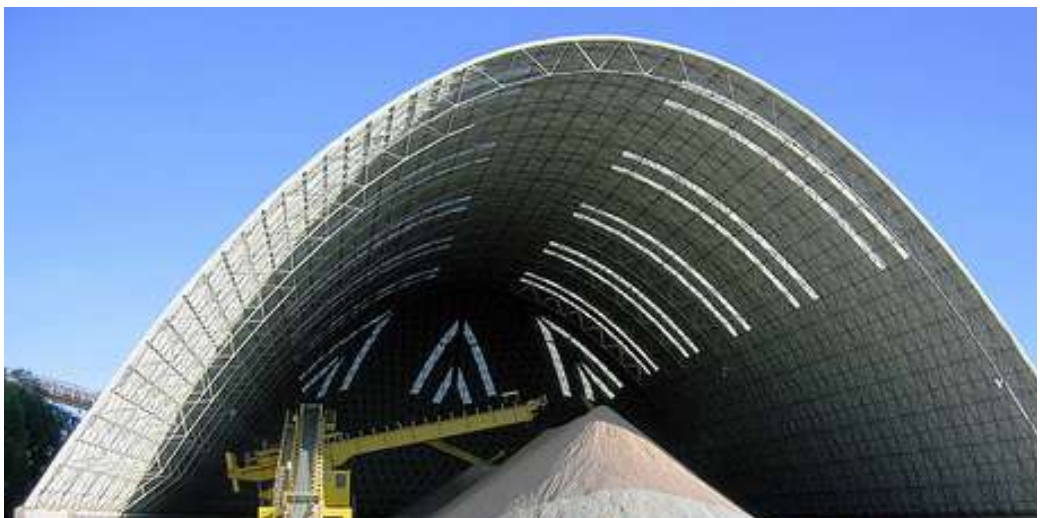


Fig. 10

TECHOS DE LAMELLAS

Los techos de lamellas son un tipo particular de armadura espacial de simple malla con forma abovedada.

Se organizan en base a dos familias de arcos que se cruzan en diagonal con una técnica particular de montaje en base a segmentos de arco denominados “lamellas”.

Los arcos entrecruzados forman una estructura abovedada rígida con estabilidad espacial y gran capacidad distributiva de las cargas.

El hangar de Orvieto (Fig.11) con 45m de luz, diseñado por Pier Luigi Nervi, construido durante los años (1932/1943.* responde a la idea del entrecruzamiento de arcos en diagonal.

**Fuente Aesthetics and Technology in Building. Harvard University Press, 1965.*

Esta obra construida con un tipo especial de hormigón armado denominado “ferrocemento” conforma una especie de cascara nervada en la que el cruce de los nervios se resuelve por vaciado sin alterar la continuidad de los arcos.

Distinto es el caso del techo de lamellas, en donde el cruce de los arcos debe resolver el montaje de los segmentos y, para ello, debe torcer y sacar del plano del arco a cada “lamella” (Fig.12). El resultado es un arco alabeado.



Fig.11: Pier L.Nervi, hangar de Orvieto, Italia

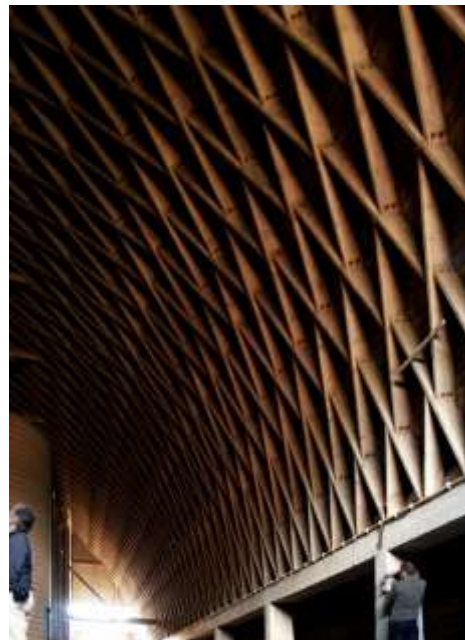


Fig.12: Hugo Häring Garkau, 1923

Las soluciones en base arcos de “lamellas” entrecruzados es un invento del año 1921 atribuido al arquitecto alemán Friedrich Zollinger (Zollinger Lamellendach).

El gran invento de Zollinger fue la técnica de montaje. En cada cruce la lamella en una dirección es continua mientras que en la otra está interrumpida (Fig.13). La solución constructiva patentada por Zollinger consiste en una ingeniosa forma de vincular las lamellas interrumpidas mediante un único bulón, que a la vez que las une, permite el leve giro de las piezas para adaptarse a la geometría helicoidal que describe el arco diagonal sobre una superficie cilíndrica (Fig.14).

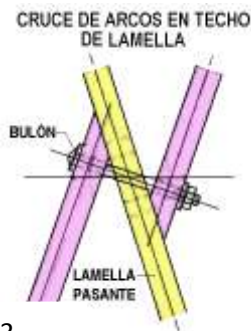


Fig.13

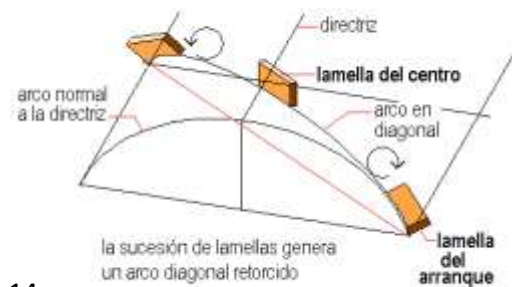


Fig. 14

El gran aporte en la construcción de la bóveda de lamellas de madera, es la solución constructiva dada al cruce de los arcos, que permite el montaje del techo con piezas cortas, prácticamente sin necesidad de cimbras. En cada cruce siempre hay una lama continua y dos que se encuentran.

La construcción del techo de lamellas se completa con las capas de la cubierta, las vigas de apoyo con los tensores, la recolección del agua pluvial, etc. (Fig.15, 16 y 17)

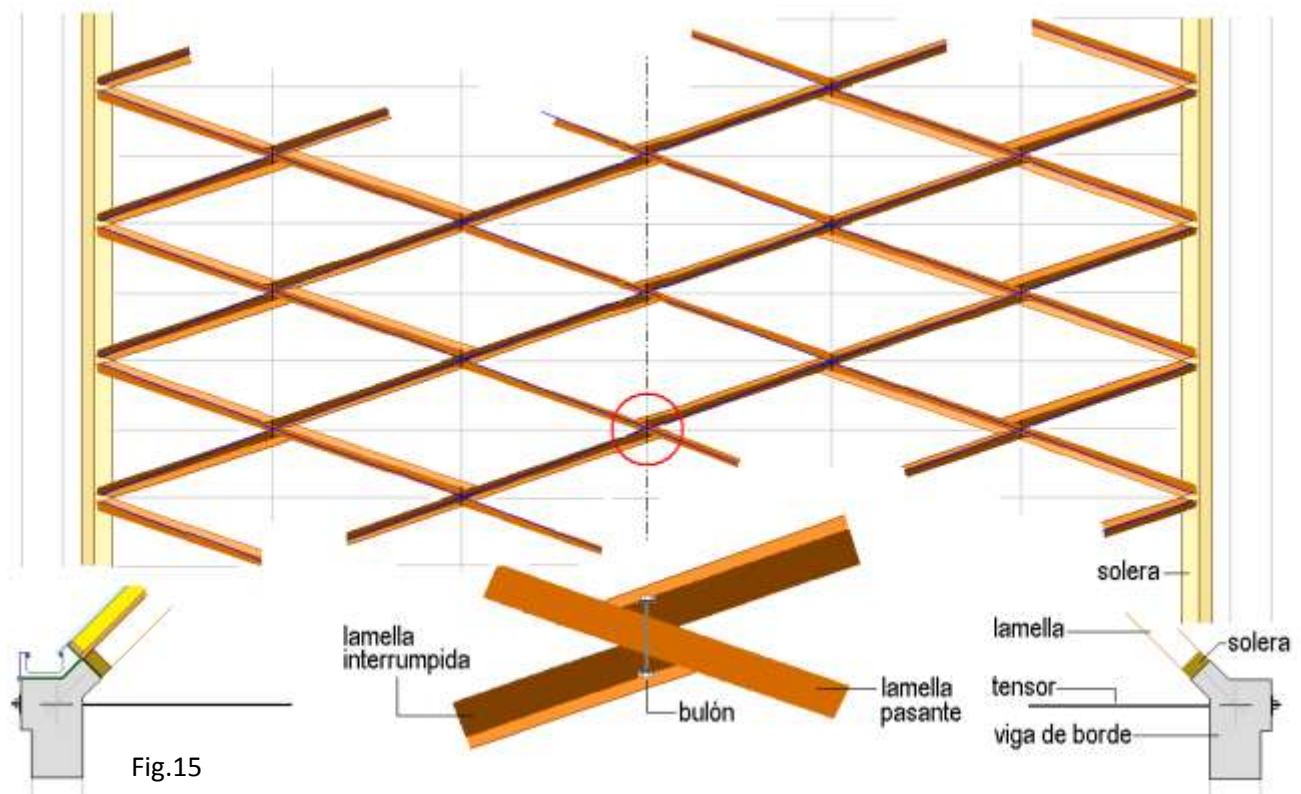


Fig.15



Fig.16

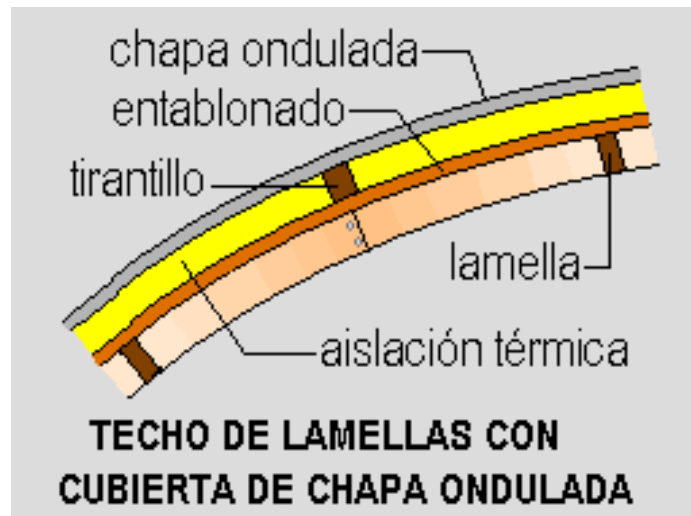


Fig.17

Los techos con lamellas también se han construido con perfiles de acero.

CÚPULAS RETICULADAS ESPACIALES.

Entre las estructuras cupulares resueltas en base a barras, las más conocidas son las llamadas cúpulas geodésicas.

Una cúpula geodésica es parte de una *esfera geodésica*, un poliedro generado a partir de un icosaedro o un dodecaedro, aunque puede generarse de cualquiera de los sólidos platónicos.

Richard Buckminster Fuller es considerado el inventor de las cúpulas geodésicas, ya que es quien ostenta su patente en 1954.

Fuller desarrolló tanto cúpulas de doble como de simple malla. Normalmente las de doble malla se usaron para cubrir luces mayores.

Existen ejemplos anteriores de cúpulas geodésicas, como en el Palacio Imperial de China (1885) o en el planetario de los talleres Carl Zeiss, 1922 (Fig.18).



Fig.18: Cúpula de barras,
Talleres de Carl Zeiss en
Bauersfeld, 1922

El gran aporte de Fuller radicó en el estudio de las geometrías de los distintos tipos de mallas que cumplen con la condición que todos los nudos de las barras se encuentren ubicados dentro de la superficie del casquete esférico.

Las caras de una cúpula geodésica pueden ser triángulos, hexágonos o cualquier otro polígono. Los vértices deben coincidir todos con la superficie de una esfera o un elipsoide (si los vértices no quedan en la superficie, la cúpula ya no es geodésica).

La frecuencia de la esfera o cúpula geodésica, es el número de veces que las aristas del icosaedro o dodecaedro son subdivididas dando lugar a triángulos más pequeños. Para la esfera geodésica se cumple el teorema de poliedros de Euler, que indica que: $C + V - A = 2$, donde **C** es el número de caras (o número de triángulos), **V** el número de vértices (o uniones múltiples) y **A** el número de aristas (o barras usadas).

Para una cúpula parcial que no sea una esfera completa se cumple: $C + V - A = 1$

Para construir esferas geodésicas se utilizan las fórmulas de los radios del dodecaedro o icosaedro. Los radios permiten levantar los nuevos vértices de las subdivisiones a la superficie de la esfera que pasará por los vértices originales del cuerpo.

Las cúpulas geodésicas a diferencia de las cúpulas conformadas por celosías tridimensionales, pueden sufrir pandeo global sin que ninguna de las barras comprimidas que la forman haya sufrido pandeo local. Eso implica que un cálculo como estructura lineal convencional, y comprobación posterior de pandeo local, puede no ser adecuado en muchos casos y para grandes luces se requiere un cálculo no lineal para determinar sus cargas críticas y asegurarse de que no se producen fenómenos de inestabilidad elástica.

Las cúpulas de simple malla (Fig.19) son más sencillas de construir que las de doble malla. Los aspectos prácticos referidos a la construcción de estas cúpulas residen en la solución de los vínculos entre las barras y la solución de la cubierta.



Fig.19: Cúpula de simple malla, Ice Park, Eliat, Israel

Los vínculos entre barras se suelen resolver mediante conectores de diversos tipos. (Fig.20 y 21)



Fig. 20



Fig.21

En las cúpulas de dimensiones reducidas frecuentemente se cubren con una membrana por encima del reticulado (Fig.22 y 23). Esta solución no es apta para espacios habitacionales.

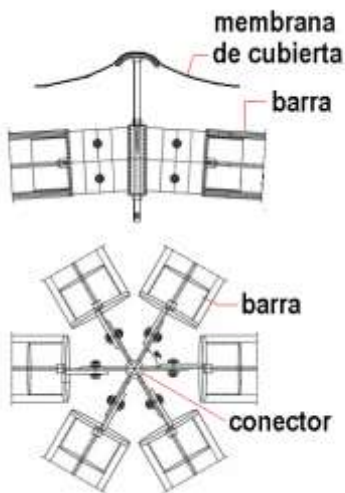


Fig.22



Fig. 23

Cuando se trata de cúpulas que cubren habitaciones, se debe recurrir a paneles opacos y vidriados para cerrar los espacios entre las barras, con condiciones de higrotermicidad adecuadas para el confort interior. En estos casos también cobra especial importancia la hermetización de las juntas (Fig.24 y 25).

Fig. 24
CONSTRUCCIONES IIIFig. 25
HOLGADO/F.

La cúpula geodésica de doble malla de mayor luz construida (80m de luz libre), también conocida como la “biosfera”, fue el Pabellón de Estados Unidos en la Exposición Universal de Montreal, 1967(Fig.26 y 27)



Fig.26: Cúpula de doble malla de 80m de luz y 170m de alto. Buckminster Fuller, Montreal, 1967



Fig.27: Detalle de la doble malla. Pabellón de Estados Unidos, Exposición Universal de Montreal 1967

A partir de las mallas espaciales abovedadas y cupulares se han desarrollado mallas con otras formas menos convencionales (Fig.28, 29 y 30).



Fig.28: Entramado espacial de doble malla, cubierta de tribuna en el Estadio Internacional Sheik Kalifa en Al Ain, Emiratos Árabes Unidos, 2006



Fig.29: Entramado espacial de doble malla, cubierta de tribuna en el Nuevo Estadio Nacional de Costa Rica



Fig.30: Entramado espacial de simple malla con forma libre. Feria de Milán 2005 en Rho/Pero

ESTRUCTURAS LAMINARES

PLEGADOS, CÁSCARAS CURVAS Y OTRAS LÁMINAS DURAS

Las cáscaras son estructuras de placa, generalmente curva, y delgada construidas en material duro. Están conformadas para trasladar las cargas que actúan sobre ellos mediante esfuerzos de compresión, tracción y cortantes que actúan en el plano de sus superficies. Las cáscaras son delgadas y tienen poca resistencia a la flexión por lo que no son adecuadas para cargas concentradas. Un cascarón es una estructura de superficie delgada y curva que transfiere las cargas a los apoyos solo por tracción, compresión y corte. (Una membrana es una hoja tan delgada de material blando que, para todo fin práctico, puede desarrollar solamente tracción)

Son estructuras para techos de grandes luces que por sus características, consiguen convertir las cargas que actúan sobre ellas en esfuerzos planares, de manera de evitar esfuerzos de flexión.

Por definición, la cáscara es una superficie continua, de sección llena, de poco espesor en relación a la luz que salva. El material más utilizado en la construcción de estas cáscaras fue el hormigón armado. En general el espesor de una cáscara se estima en $1/300$ a $1/500$ de la luz, lo que significa 7,5 cm de espesor para 30 m de luz y espesores del orden de 12 cm para luces de 60m. Como ejemplo digamos que la cúpula del Mercado de Algeciras (Eduardo Torroja, 1937) tiene 9 cm de espesor para 47,8 m de luz libre.

Las cáscaras pueden tener diversidad de formas. A partir de una teoría general, el comportamiento estructural presenta particularidades propias de cada forma. Para una introducción al conocimiento de las cáscaras conviene una aproximación geométrica.

En primer lugar hay que diferenciar las formas geométricas simples (Fig.01) de las compuestas (Fig.02).



Fig.01: Cáscara con geometría simple



Fig.02: Cáscara con geometría compuesta

Las superficies laminares se pueden clasificar de diversas maneras. Una clasificación simplificada a los fines del presente, es la siguiente (Fig.03):



Fig.03

PLEGADOS/CÁSCARAS PLANAS

Los plegados son estructuras de gran rigidez (Fig.04 y 05) que se forman en base a láminas planas inclinadas y apoyadas mutuamente formando secciones en zig-zag o trapezoidales. Los plegados se pueden usar como estructura resistente de techos (Fig.06). Gran parte de su comportamiento responde al concepto de viga de alma llena de gran esbeltez o viga-pared (Fig.07), un tipo de estructura mucho más rígida que la placa, con esfuerzos principales de corte.



Fig.04

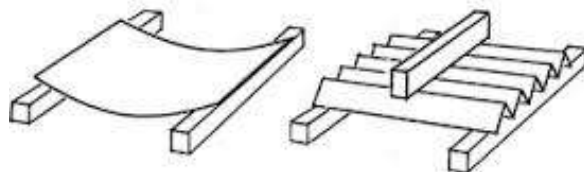


Fig.05



Fig.06

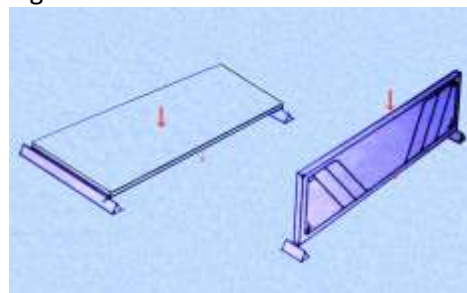


Fig.07

En los plegados diferenciamos su altura estática “ h ” del espesor de la cáscara “ d ” (Fig.08). Cuanto mayor “ h ”, mayor capacidad para salvar grandes luces.

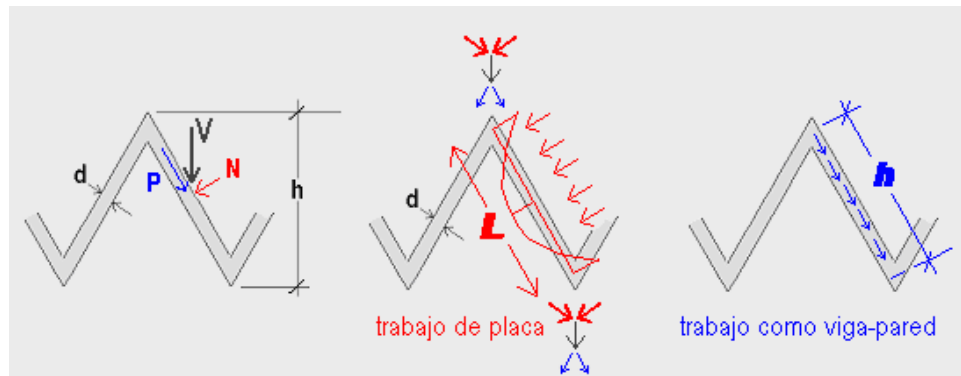


Fig.08

Los plegados pueden responder a un esquema de viga simplemente apoyada o también pueden vincularse rigidamente a patas plegadas formando pórticos (Fig.09, 10, 11 y 12).



Fig.09



Fig10



Fig.11



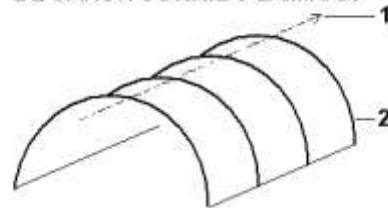
Fig.12

CÁSCARAS DE SIMPLE CURVATURA.

La cáscara de simple curvatura más conocida responde a la geometría de la bóveda de cañón corrido.

Geométricamente, las superficies con forma de medio cañón corrido se generan por la traslación paralela de una línea generatriz curva a lo largo de un eje directriz recto (Fig.13).

GENERACIÓN DE UNA BÓVEDA DE CAÑÓN CORRIDO LAMINAR



- 1 directriz es un eje recto sobre el que se traslada la línea curva semicircular
2 generatriz es la línea curva que se traslada paralela a sí misma sobre la directriz

Fig.13

La cáscara construida con forma de medio cañón corrido puede trabajar transversalmente o longitudinalmente.

Si trabaja transversalmente traslada las cargas por compresión en forma transversal al eje, descarga sobre apoyos laterales paralelos al eje, produciendo presiones oblicuas sobre ellos (Fig.14).

Dado que las cáscaras tienen poco espesor, no cuentan como construcción de masa y su peso propio no puede asegurar compresión dominante ante cargas puntuales o asimétricas. De allí es que en el caso de las cáscaras “cortas”, conviene hacerlas nervuradas, para proporcionarles una altura mayor y consecuentemente, algo de resistencia a la flexión.

Si trabaja longitudinalmente traslada las cargas principalmente por corte en forma longitudinal, descarga sobre los tímpanos produciendo presiones verticales (Fig.15). Su comportamiento se asocia al de una viga-pared o viga esbelta. No necesita ser nervurada.

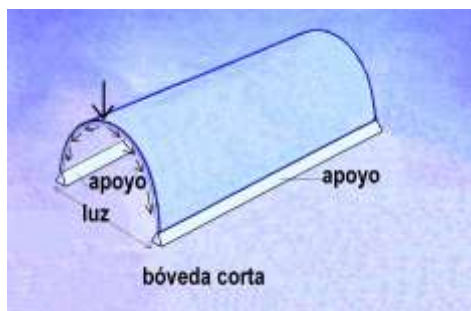


Fig.14

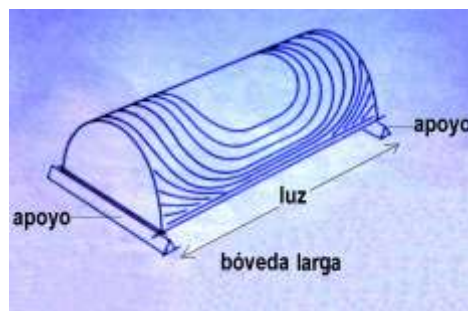


Fig.15

Estas cáscaras necesitan engrosamiento de refuerzo en los bordes: la bóveda corta a lo largo de los apoyos laterales y la bóveda larga sobre los tímpanos.

Para una primera aproximación, el espesor de las cáscaras curvas se estima en $L/600$.

Pero esta estimación puede variar en función del tipo de cáscara y deberá ser definida por el cálculo ingenieril.

CÁSCARAS TÓRICAS.

Un toro se genera cuando se hace deslizar una línea generatriz curva en el plano vertical sobre un eje directriz curvo en el plano horizontal (Fig.16). La traslación de la línea generatriz no es paralela, sino con un ángulo radial.

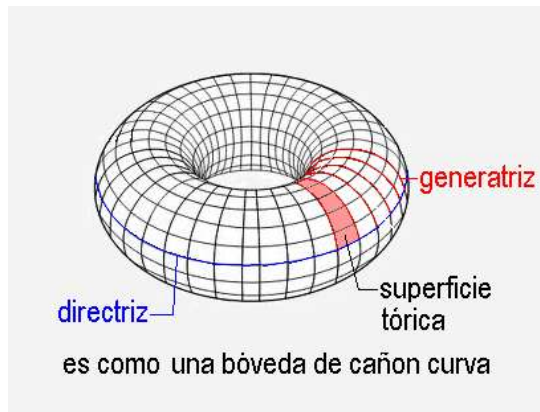


Fig.16



Fig.17: Bóveda tórica o bóveda anular en el anfiteatro de Nîmes

Las bóvedas tóricas se comportan estructuralmente de manera similar a las bóvedas de cañón corrido cortas, con eje directriz recto: transmiten sus cargas transversalmente produciendo empujes oblicuos en los apoyos laterales.

CÁSCARAS DE DOBLE CURVATURA POSITIVA (SUPERFICIE SINCLÁSTICA)

De las cáscaras de doble curvatura en un solo sentido, la más conocida es la cúpula de planta circular (casquete esférico, parabólico, etc). Geométricamente la superficie se genera por la rotación de una línea generatriz curva alrededor de un eje directriz vertical recto. De allí que también se denomine a la cúpula laminar como “cáscara de rotación”.

El mecanismo resistente de la cúpula tiene la particularidad que las hace superar ampliamente la capacidad estructural de los arcos. Cada meridiano se comporta como si fuera un arco funicular de las cargas aplicadas, es decir, resiste las cargas sin desarrollar tensiones de flexión. Los paralelos (los anillos) impiden las deformaciones asimétricas.

Por ello las cúpulas de espesor constante son menos deformables que las bóvedas de cañón ante cargas puntuales o asimétricas que tienden a producirles flexión.

En la parte superior de la cúpula esférica los paralelos se encuentran comprimidos y tienden a cerrarse. En la parte inferior se encuentran traccionados y tienden a abrirse.

Siempre se pasa por un paralelo neutro, libre de tensiones, cuya longitud no varía. La posición del paralelo neutro depende del tipo de carga. En las cúpulas sometidas a su peso propio el paralelo neutro se encuentra a 52° del eje vertical. Bajo carga uniformemente distribuida (nieve, por ej.) $\alpha=45^\circ$ (Fig.18).

No obstante se pueden conferir mayor rigidez a la cáscaras cupulares mediante el nervurado, como en el caso del Palazetto dello Sport, proyecto de Nervi del año 1957. (Fig.19 y 20)

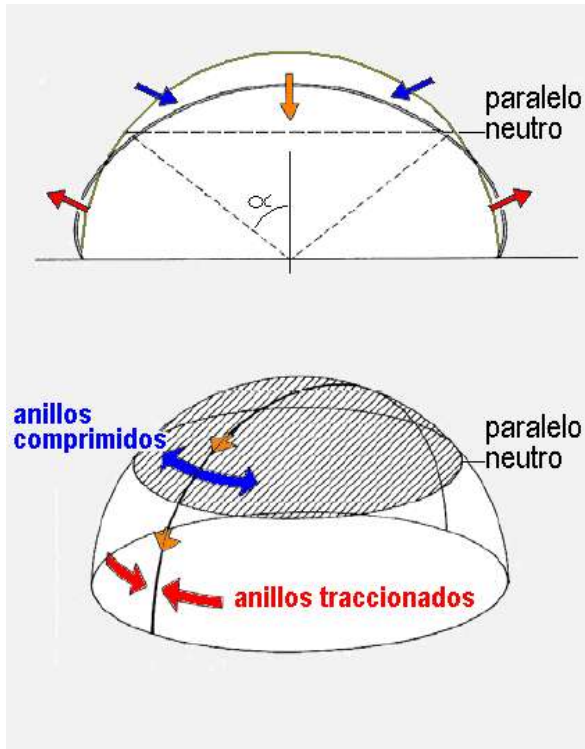


Fig.18



Fig.19



Fig.20

El Palazetto tiene planta circular. La cúpula salva una luz de 60 m y apoya en 48 columnas inclinadas perimetrales en forma de "Y". La técnica utilizada en la construcción de la cúpula fue el "ferrocemento" (Fig.21).

La capa 1 de "ferrocemento" actúa como encofrado sobre el que se hormigona "in situ" los nervios, y la capa 2 es de recubrimiento.

La cáscara, sin los nervios, resulta de un espesor de 9cm.



Fig.21: Técnica del "ferrocemento" en el Palazetto dello Sport.



Fig.22: Cáscara de doble curvatura sinclástica sobre el Río Manzanares, Madrid: doble curvatura positiva.

GENERACIÓN DE LA SUPERFICIE SINCLÁSTICA POR TRASLACIÓN.

Si deslizamos una línea curva en un sentido sobre un eje curvo normal en igual sentido dispuesto en el plano vertical, se genera una superficie de doble curvatura positiva. (Fig.22 y 23)

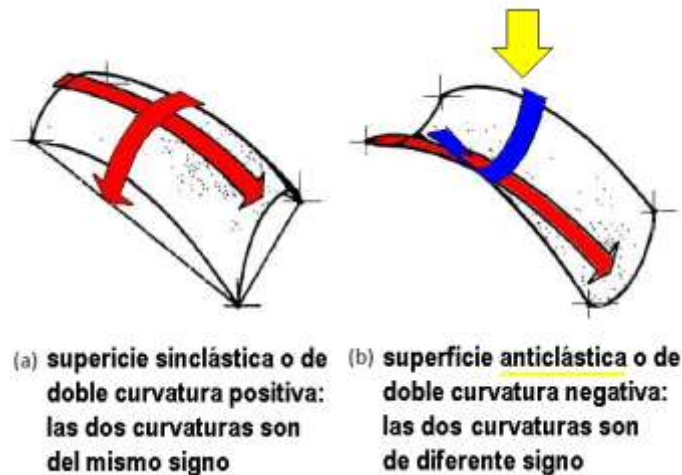


Fig.23

Superficie Anticlástica

Cáscaras de doble curvatura de distinto signo (superficie anticlástica) (Fig.24)

Si deslizamos una línea curva en un sentido sobre un eje normal con curvatura en sentido opuesto, se genera una superficie de doble curvatura negativa. (Negativa significa que el radio de una curvatura es opuesto al de la otra)

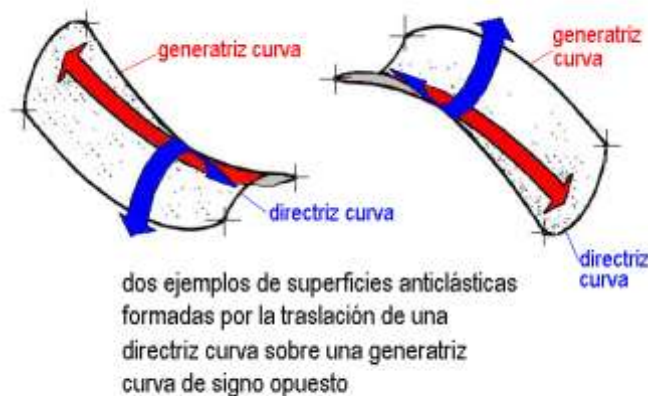


Fig.24

Superficies Regladas – Superficies Alabeadas

Una superficie reglada, en geometría, es la generada por una recta, denominada generatriz, al desplazarse sobre una curva o varias, denominadas directrices. En función de las características y condiciones particulares de estos elementos, recibe diversos nombres.

Clasificación de las superficies regladas

Superficies regladas son:

- A) El plano
- B) Las superficies de curvatura simple:
 - superficie cilíndrica
 - superficie cilíndrica de revolución
 - superficie cilíndrica de no revolución
 - superficie cónica
 - superficie cónica de revolución
 - superficie cónica de no revolución
- C) Las superficies alabeadas
 - cilindroide
 - conoide
 - superficie doblemente reglada
 - paraboloides hiperbólicos
 - hiperboloides de revolución
 - helicoides cilíndricos
 - cónicos
 - esféricos

Entonces las superficies alabeadas son un tipo de superficie reglada, es decir, que se forma por el desplazamiento de una recta sobre una directriz.

Paraboloides hiperbólicos

La geometría hiperparabólica se puede generar de dos maneras: a) por la traslación de una directriz recta sobre generatrices rectas en planos normales con inclinaciones opuestas (Fig.25) b) por la traslación de una generatriz curva parabólica sobre una directriz de curvatura opuesta en el plano normal también parabólica (Fig.26).

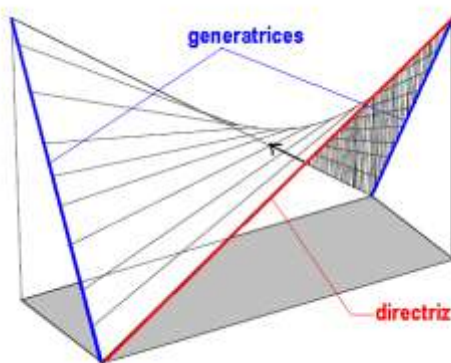


Fig.25:
Superficie reglada: HP generada por traslación de directriz recta sobre generatrices rectas con inclinaciones opuestas

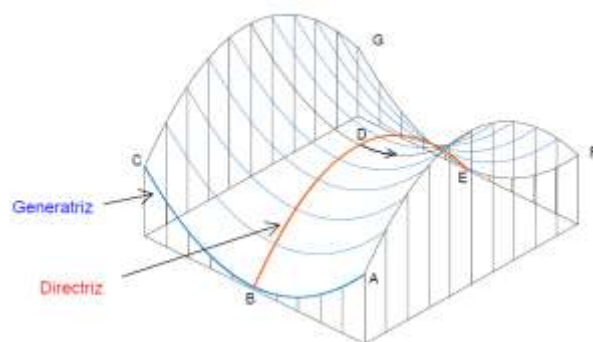
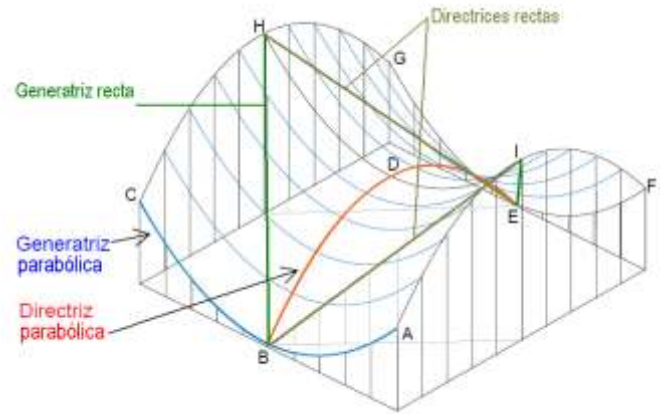


Fig.26:
Silla de montar: HP generada por traslación de directriz parabólica ABC sobre generatriz parabólica BDE

En la Fig.27 se ve la relación entre el HP generado por deslizamiento de línea recta y por deslizamiento de curva parabólica. Si deslizamos la generatriz recta GH sobre las dos directrices con pendiente opuesta BI y HE se genera mediante una recta el sector de la silla de montar BHEI.

Fig.27:

El HP presenta la particularidad que cualquier corte vertical en planos paralelos a ABC o AEF describen una parábola sobre la superficie, mientras que cualquier corte horizontal paralelo al plano ACGF genera dos hipérbolas sobre la superficie.



Las superficies HP generan bandas de compresión y de bandas de tracción de curvatura parabólica que, al encontrarse en los bordes componen fuerzas axiales.

Si las fuerzas axiales descienden por el nervio de borde hasta encontrarse con el otro nervio descendente para descargar en un apoyo ubicado en el vértice inferior, se necesitará un tensor entre ambos vértices inferiores para absorber los empujes hacia fuera que generan el encuentro de las fuerzas descendentes. El tensor también se puede colocar entre ambas bases, debajo del piso (Fig.28 y 29).

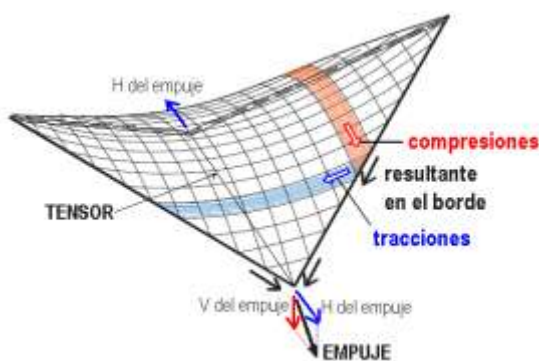


Fig.28



Fig.29

Si el HP posee solo 2 apoyos, los nervios de borde deben estar necesariamente empotrados en la base para evitar el vuelco de la cáscara (Fig.30).

Si se realiza al menos un apoyo adicional, entonces se pueden prever vínculos articulados entre nervios y apoyos (Fig.31).

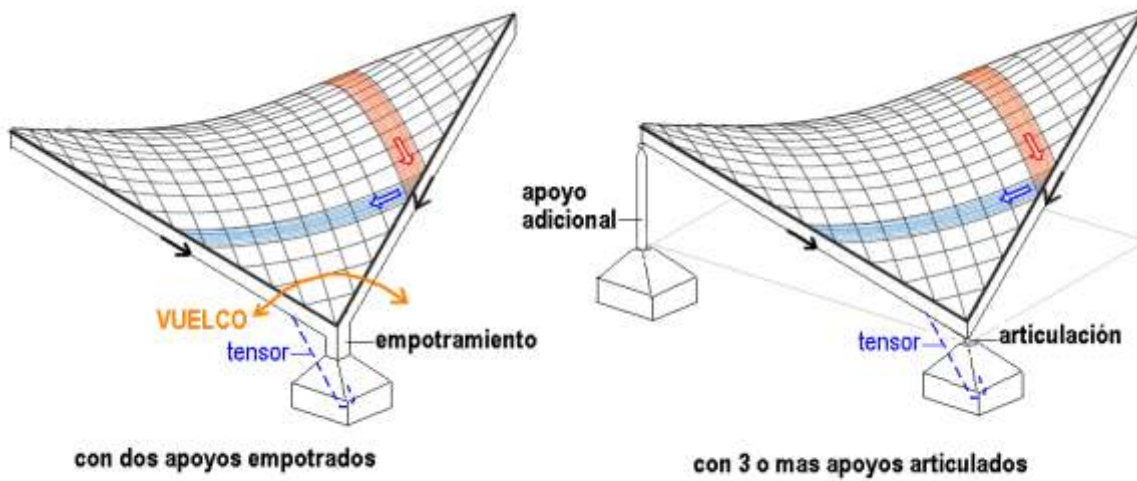


Fig.30

Si los dos apoyos se encuentran en los vértices superiores, las fuerzas en los nervios tiran de ellos, dando como resultante presiones oblicuas. Las componentes horizontales de dichas presiones empujan hacia adentro, debiendo las columnas tener el diseño adecuado para absorberlas (Fig.32).

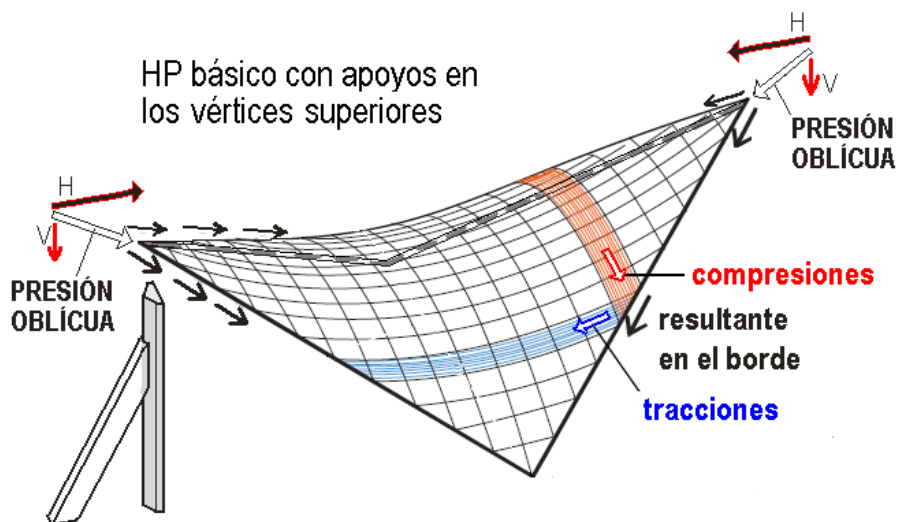


Fig.32

El paraboloide hiperbólico elemental como el que acabamos de ver, se ha construido con variantes en cuanto a la geometría de la planta (romboidal, poligonal de 4 lados no paralelos, etc.) y con diferentes alturas de los vértices.

Frecuentemente se combinaron paraboloides hiperbólicos elementales para formar techos con geometría más compleja. Las imágenes de Fig.33 ejemplifican.

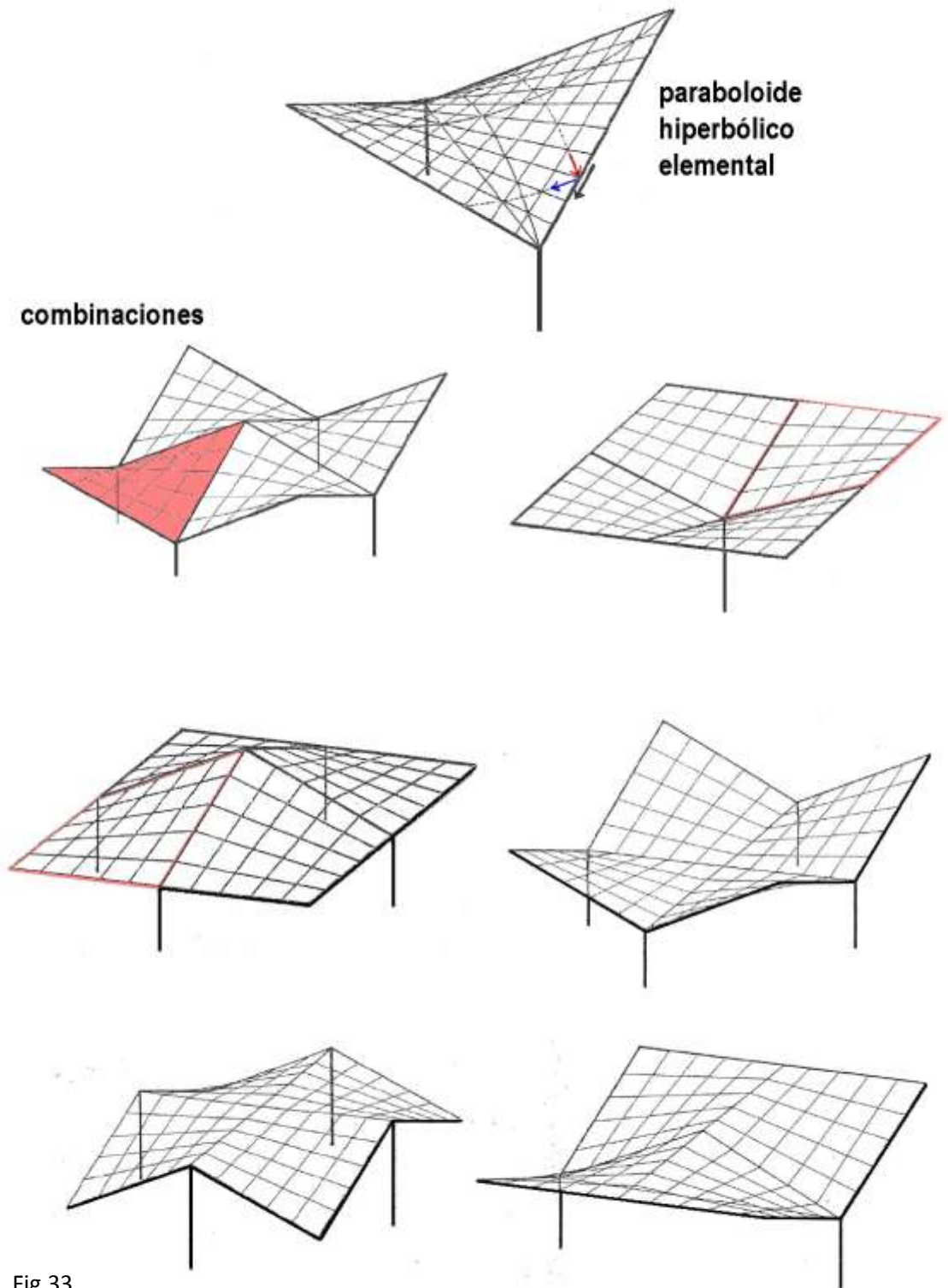


Fig.33

Un caso de combinaciones complejas es la Iglesia Medalla Milagrosa en México, obra de Félix Candela (Fig.34).



Fig.34: Interior de Iglesia Medalla Milagrosa, México City.
Arq. Félix Candela

La sala multifuncional Friedrich Ebert Halle en la ciudad alemana de Ludwigshafen es un proyecto del Arq. Roland Reiner construido en 1965 (Fig.35 y 36).

El techo es un paraboloide hiperbólico de hormigón armado que salva una luz de 80,32m (Fig.37) entre los dos apoyos principales ubicados en los vértices de una planta cuadrada de 60m de lado (Fig.38). Estos dos apoyos están unidos con un tensor subterráneo de hormigón armado 80x200cm de sección para anular las presiones oblicuas de sentido opuesto, que inciden sobre cada apoyo.

Adicionalmente las vigas de borde sobre dos lados de la planta cuadrada, están apoyadas en 2 columnas cilíndricas de 80cm de diámetro.

Un reborde en las vigas de borde conduce el agua pluvial a los dos apoyos principales para entregarla a los sumideros (Fig.39).



Fig.35

Fig.36

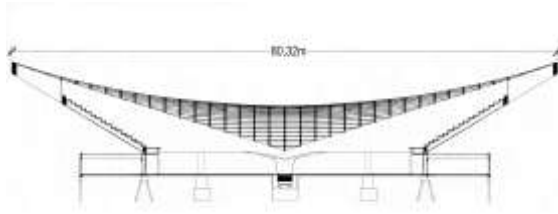


Fig.37

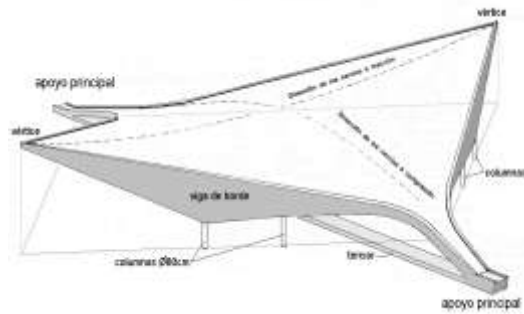


Fig.39

Un tipo particular de lámina HP se genera la “silla de montar” sobre una planta de forma rectangular alargada (Fig.40). Se generan superficies alabeadas de gran largo y poco ancho que, aptas para ser construidas en hormigón armado pretensado porque poseen haces rectos de armadura en diagonal (Fig.41 y 42).

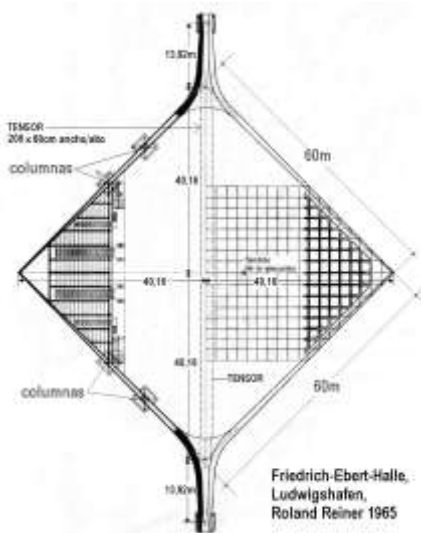
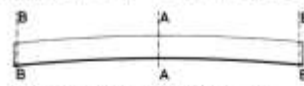


Fig.38

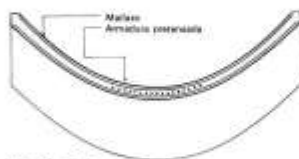
LÁMINA HP PRETENSADA



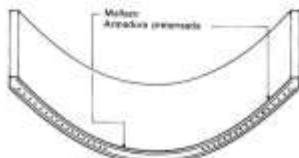
Sección longitudinal de la lámina HP



Posición de las armaduras en la lámina HP



Sección A-A



Sección B-B

Fig.40



Fig.41



Fig.42

Estas láminas de curvatura negativa en hormigón armado pueden salvar luces de 22 m con espesores de 8 cm apoyando en sus extremos (en los tímpanos).

No se debe olvidar que las láminas constituyen solo la estructura resistente del techo y que requieren de capas adicionales para cubrir las necesidades habitacionales.

En Fig.43 se muestra un ejemplo un techo en shed de láminas HP.

En Fig.44 se muestra un detalle del techo con todas las capas suplementarias que conforman la cubierta.

SHED CON LÁMINAS HP PRETENSADAS

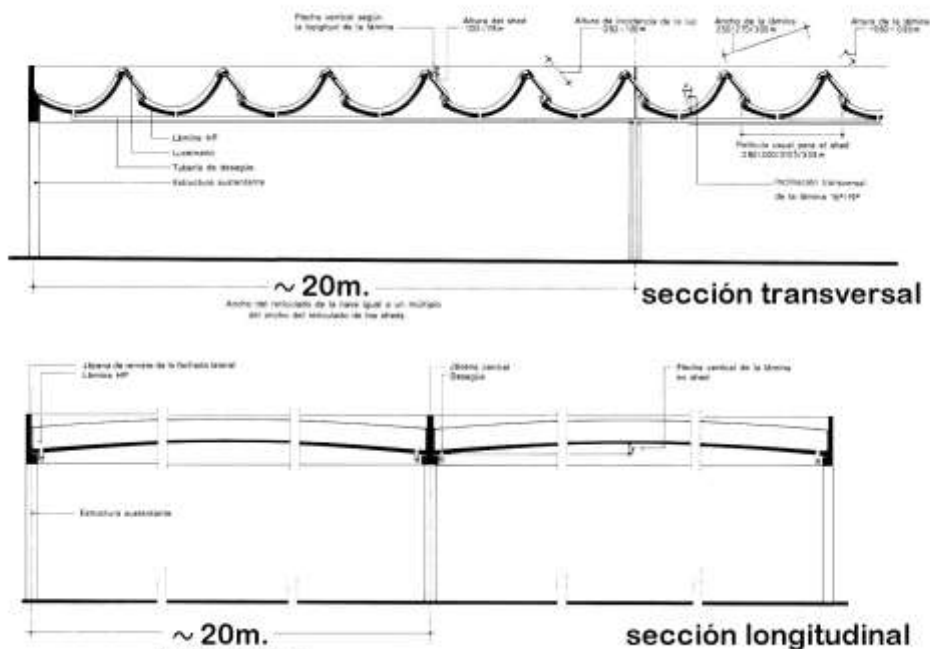
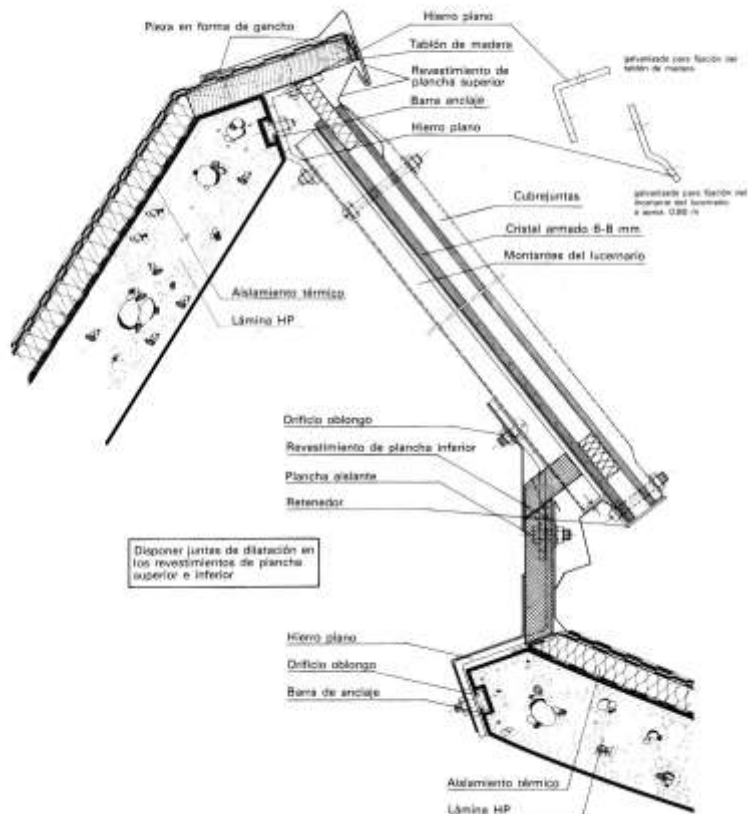


Fig.43

SHED CON LÁMINAS HP PRETENSADAS



CON: Fig.44

CONOIDES

Conoide es la superficie generada por una recta que se desliza apoyando un extremo en una directriz curva y el otro en una directriz recta (Fig.45). Según el tipo de curva, el conoide será circular, elíptico o parabólico. Conoides horizontales se pueden vincular rígidamente con conoides verticales para formar pórticos (Fig.46)

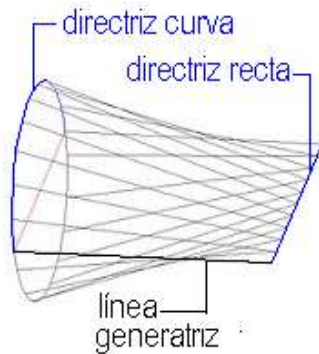


Fig.45

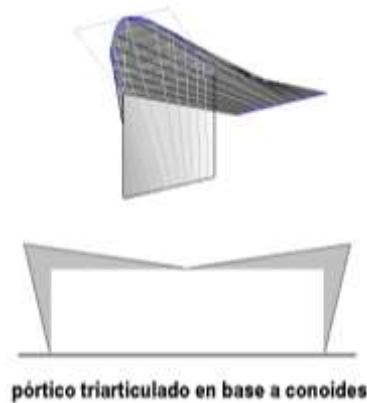


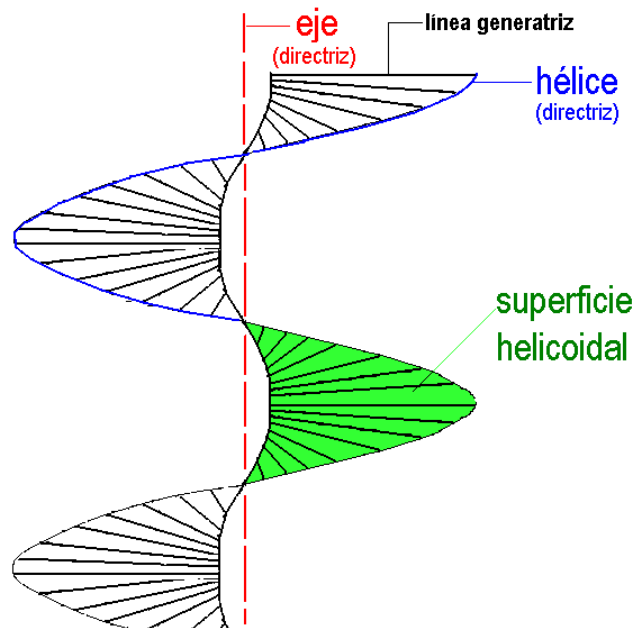
Fig.46

SUPERFICIES HELICOIDALES, CILÍNDRICA, CÓNICA Y ESFÉRICA

Las superficies helicoidales son superficies alabeadas que se generan cuando se traslada y gira alrededor de un eje, una línea generatriz recta apoyando un extremo en un eje directriz recto y el otro en una hélice directriz (Fig.47).

Fig.47

La hélice directriz puede desarrollarse en la superficie de un cilindro, de un cono o de una esfera. Según eso, se generan helicoides cilíndricos, cónicos o esféricos. La geometría helicoidal se puede complicar aún más, si la línea generatriz es curva, en vez de recta, o si el eje directriz no es recto sino curvo u ondulado.



El helicoide es la geometría implícita en las escaleras de caracol. Se utilizó con menor frecuencia en la construcción de techos.

El techo del **Gimnasio Yoyogi, de Kenzo Tange**, muestra una superficie alabeada de geometría helicoidal, aunque en este caso se trata de una cáscara sino una estructura de cables (Fig.48 y 49).



Fig.48

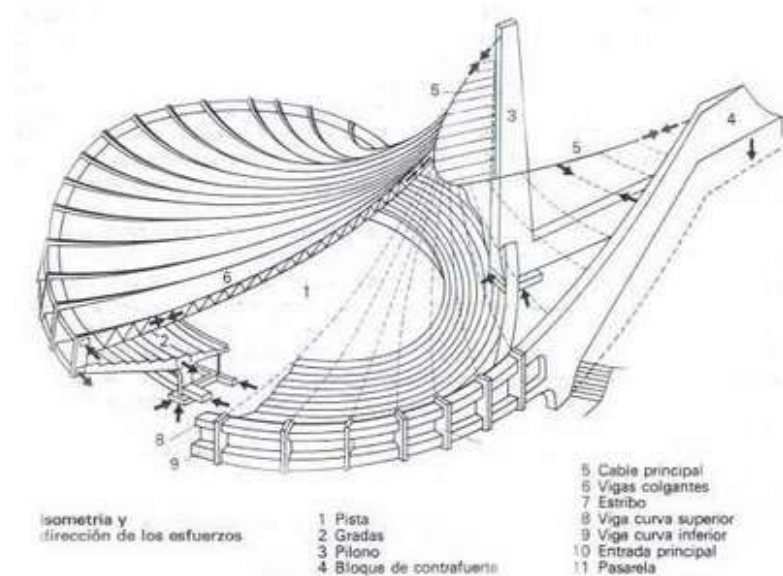


Fig.49

TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

Desde el punto de vista constructivo las cáscaras se pueden realizar con distintas técnicas y materiales:

1. Cáscaras de hormigón armado vaciado en encofrado: Sin duda alguna la técnica del vaciado en un molde es un principio adecuado para la materialización de este tipo estructura (Fig.50). En el caso de las láminas plegadas el encofrado es fácil de hacer. Tampoco resulta complicada la realización del molde para las láminas de simple curvatura-la bóveda de cañón, por ejemplo. Pero el encofrado para cáscaras de doble curvatura suele resultar mas complicado. En el caso de las superficies regladas, es viable la construcción del encofrado a partir de elementos lineales (tablas y tirantillos) (Fig.51) que admiten pequeñas deformaciones para formar el molde de doble curvatura.

En la construcción de cáscaras pétreas ha sido siempre una preocupación el desarrollo de tecnologías que no necesitaran de una superficie continua de madera como molde, ya que la doble curvatura en base a elementos planos siempre es complicada.

2. Cáscaras nervuradas – ferrocemento: Esta técnica no necesita encofrado. Los elementos premoldeados apoyados en un andamiaje sirven de “encofrado perdido”, sobre el que vacía el hormigón (Fig.52 y 53). Fue la técnica predilecta del ingeniero italiano Pier Luigi Nervi.

3. Cáscaras de mampostería armada: Técnica utilizada por el ingeniero uruguayo Eladio Dieste. Sobre una cimbra deslizable se colocan los ladrillos con armadura en las juntas que se rellenan con mortero cementicio que adquieren en 24 hs. suficiente resistencia para deslizar la cimbra y construir un nuevo paño (Fig.54 y 55).

4. Cáscaras de madera laminada: Ejemplo experimental construido en el ILEK/Stuttgart. Es una lámina de doble curvatura de madera encolada apoyada en 4 puntos, con 4cm de espesor, peso de menos de 20Kg/m² y luz libre más de 10m. Se construyó con chapas de pino de 5cm de ancho x 3m de largo (Fig.56).

5. Cáscaras de material plástico: Se pueden premoldear módulos que, por ser livianos, se pueden levantar y vincular por los bordes casi sin necesidad de andamiaje, para ir formando la superficie laminar (Fig.57).

6. Cáscaras de vidrio: Es una superficie laminar totalmente de vidrio. No se debe confundir con las cáscaras afiligranadas que constan de una trama resistente metálica con paños de vidrio como cerramiento. En este caso se trata de cáscaras de vidrio resistente. El ejemplo de la Fig58 muestra una cúpula experimental totalmente de vidrio construida en el ILEK/Stuttgart en el año 2008.



Fig.50

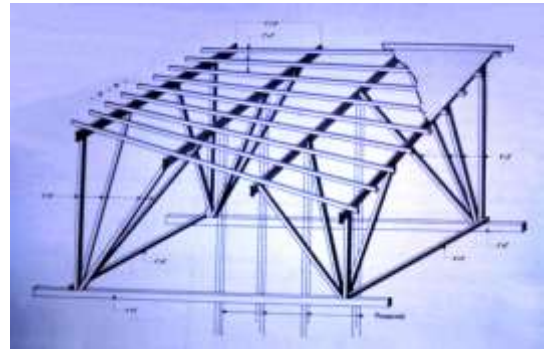


Fig.51



Fig.52

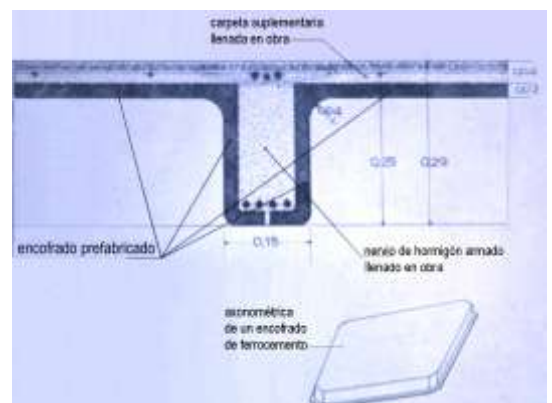


Fig.53

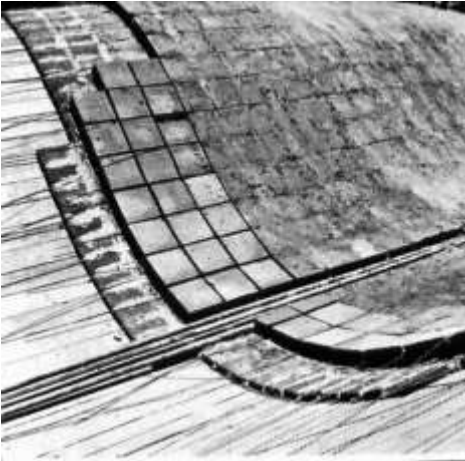


Fig.54



Fig.55



Fig.56



Fig.57



Fig.58

CABLES, COLGADOS Y COLGANTES

CABLES, TECHOS COLGADOS y TECHOS COLGANTES

1. CONCEPTOS Y DIFERENCIACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE TRACCIÓN

Se diferencian los techos “colgados” de los techos con estructuras de tracción y de las tenso estructuras membranales.

En los primeros, nos referimos a techos muchas veces resueltos en base a estructuras convencionales de flexión, en los que, para evitar apoyos desde abajo, se sostiene la estructura desde arriba mediante cables (tensores) que cuelgan desde mástiles o puntales (Fig.01).

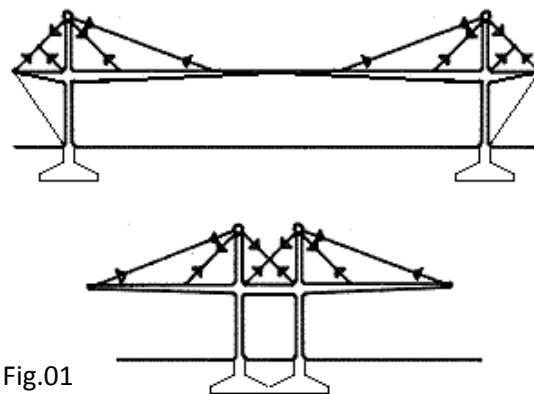


Fig.01

Los techos cuya estructura interna está formada por cables que trabajan a la tracción bajo la acción de las cargas, han sido llamados techos “colgantes” para diferenciarlos de los anteriores que son “colgados”.

Los cables tienen una alta resistencia a la tracción, pero no ofrecen resistencia a la compresión o a la flexión. Deben usarse solamente a tracción. Cuando se cuelgan cargas concentradas, la forma de un cable consiste en segmentos de línea recta.

Bajo una carga uniformemente distribuida adoptará la forma de un arco invertido.

Las estructuras de curvatura simple utilizan una serie paralela de cables sobre los que apoyan vigas o placas que cierran la superficie de cubierta. Son susceptibles de vibrar inducidos por los efectos aerodinámicos del viento. Este riesgo puede reducirse aumentando la carga muerta en la estructura o anclando los cables primarios al suelo con contravientos transversales.

Las estructuras con cables dobles tienen conjuntos superiores e inferiores de cables con curvaturas opuestas, pretensionados por amarres o por puntales a compresión par hacer al sistema más rígido y resistente a la vibración (Fig.02).

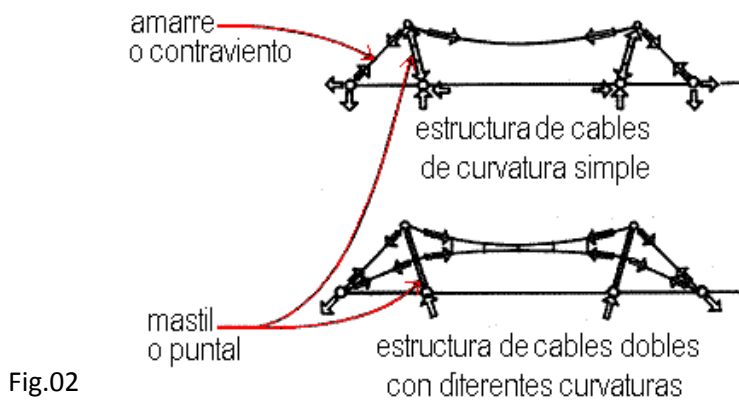


Fig.02

Las denominadas “tenso estructuras” se refieren más a construcciones donde a toda la superficie del techo se le confiere estabilidad mediante el tensado. El material a tensar debe ser membranar, resistente a la tracción (normalmente textil) y requiere que, al ser estirado de puntos firmes y otros elementos, resistan las fuerzas de tracción que genera el postensado.

De allí que las tenso estructuras presentan una superficie de cubierta tensada, combinada con diversos elementos tales como mástiles, puntales, pilones, arcos, vigas, etc., que no trabajan a la tracción pero son parte de la estructura del techo.

Este tipo de construcción muchas veces ha recibido el nombre de “carpa”, por su parentesco conceptual con las tiendas de los pueblos nómades y con las carpas de circos.

Debido a su escasa capacidad acondicionante del espacio interior, se utilizan como cubierta de locales de permanencia transitoria.

2. TECHOS COLGADOS

Un gran problema de los techos colgados es la resolución del punto donde el tensor atraviesa la cubierta para sostener la estructura que se encuentra por debajo. Este punto debe permitir el movimiento de la estructura brindando la adecuada hermetización.

a) Fábrica de microprocesadores INMOS, en Newport, 1982, proyecto del Arq. R. Rogers

La fábrica se organiza a lo largo de un corredor de 106 m de largo y 7,2 m. de ancho, donde se ubican 9 torres reticuladas se paradas cada 13,25 m (Fig.03 y 04).

En forma transversal al corredor y en coincidencia con cada torre, se ubican vigas reticuladas de 40 m de largo, sección triangular, con 2 cordones superiores, uno inferior y diagonales de caño de acero. Un extremo de las vigas apoya en la torre y el otro en una columna de dos patas en forma de “V” invertida (Fig.05 y 06).

A los tercios de su longitud (aproximadamente de 13,25 m) la viga tiene apoyos suspendidos mediante tensores de las torre, de tal suerte que la planta queda libre de columnas intermedias. Estas vigas principales se encuentran cada 13,25 m. Hay vigas secundarias reticuladas planas entre las vigas principales cada 6,5 m.

La cubierta está fabricada de planchas de acero de 6 metros con aislamiento térmico y una membrana de cinco capas



Fig.03



Fig.05

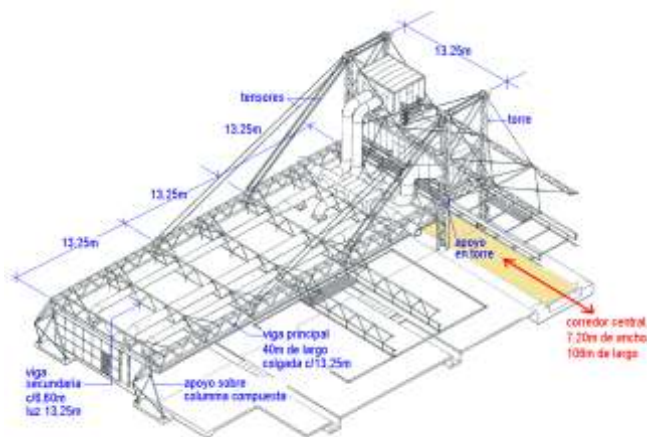


Fig.04



Fig.06

b) Patscenter en Princenton, New Jersey, 1985, proyecto del Arq. R. Rogers.

Esquema similar al anterior, pero con corredor longitudinal de 6m de ancho y 72m de largo (Fig.07). Las vigas transversales cada 8m cuelgan de torres en forma de "A". La longitud total de cada viga es de 25 m. Los tensores de los que cuelga la dividen en 3 tramos de aproximadamente de 9,5 m, 4,75 m y 9,5 m.

Igual que en el caso anterior, la planta está libre de columnas intermedias (Fig.08).

La Fig.09 muestra detalle del techo en su encuentro con la pared exterior y las Fig.10, detalles del colgado de la estructura del techo.

La Fig.11 muestra detalle del arriostramiento transversal y las Figs.12 y 13 muestran vistas del edificio.

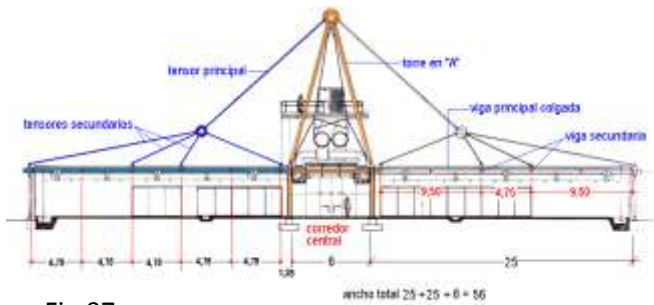


Fig.07

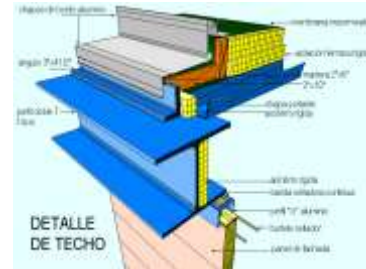


Fig.09

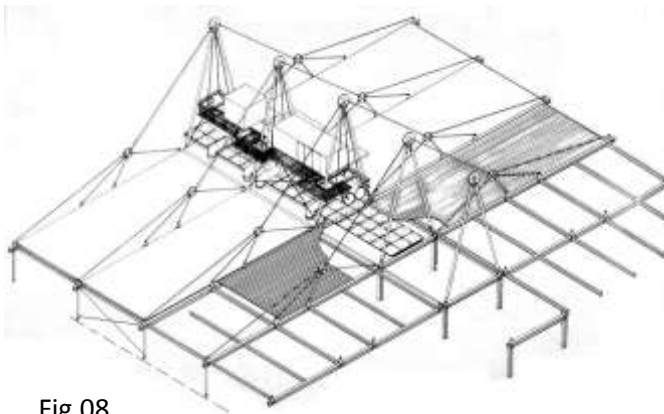


Fig.08

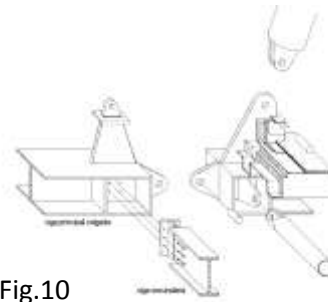


Fig.10



Fig.11



Fig.12



Fig.13

c) Fleetguard Factory en Quimper, Bretaña, Francia, proyecto del Arq. R. Rogers 1979-81.

El techo de la fábrica está formado por módulos cuadrados de 18 x 18 m, con una columna-mástil en cada esquina de caño de acero de 35,5 cm. de diámetro (Fig.14).

De la punta al pie de los mástiles hay una triangulación en los planos ortogonales. En el mismo plano hay tensores de los que se suspenden en los tercios de su longitud las vigas de borde.

En los planos diagonales entre mástiles hay tensores desde los que se suspenden las vigas centrales también a los tercios de sus longitudes.

De esta manera la planta de la fábrica queda libre de apoyos inferiores, salvo por las columnas cada 18m.

La viga que apoya sobre la columna de fachada presenta una prolongación con una barra de acero en su extremo que la ancla a la base. Un puntal en diagonal desde el anclaje de la barra en la base hasta la cabeza de la columna completa el sistema (Fig.15).

La Fig.16 presenta una vista general del edificio.

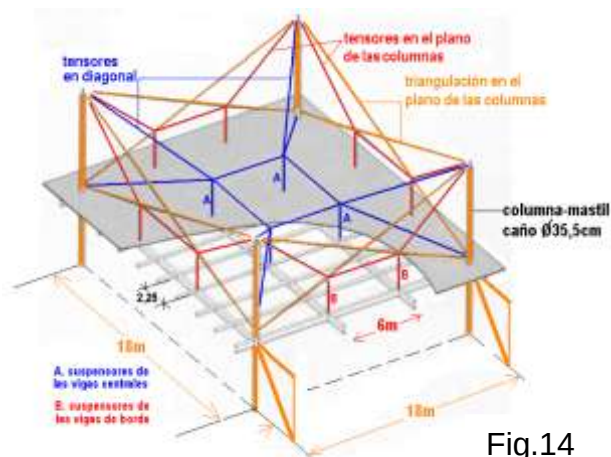


Fig.14

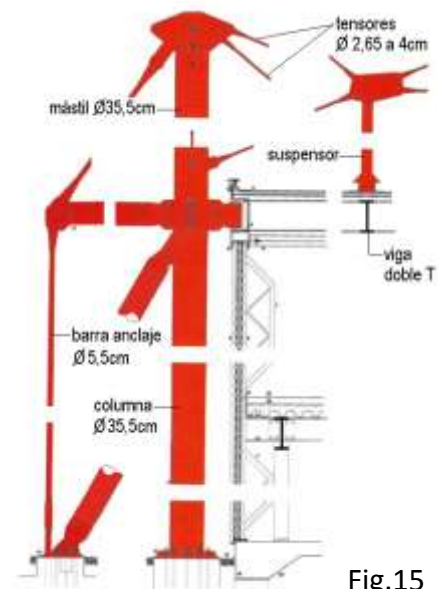


Fig.15



Fig.16

d) Salón de Atletismo en Luftschiffhafen, Potsdam, Alemania.

Salón rectangular de aproximadamente 30m de ancho x 60m de largo.

El techo está organizado en base a un envigado de vigas de celosía cada 10 m (Fig.17 y 18).

Desde pilones externos cuelgan manojos de 4 tensores de los que suspenden las vigas aproximadamente en la mitad de su longitud (Fig.19).

Los pilones presentan “vientos” anclados a peso muerto que contrarrestan las acciones horizontales de los tensores (Fig.20).

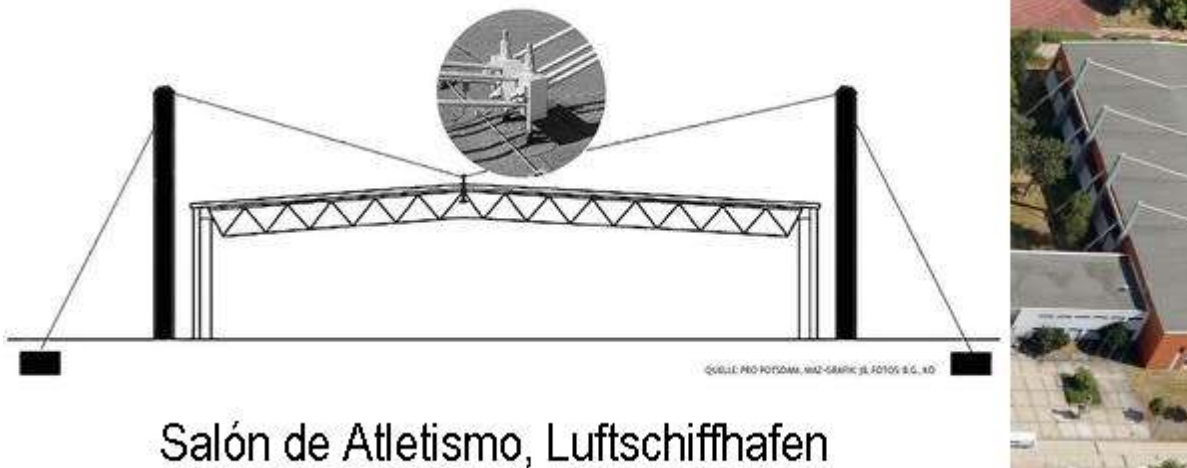


Fig. 17 y 18



Fig.19

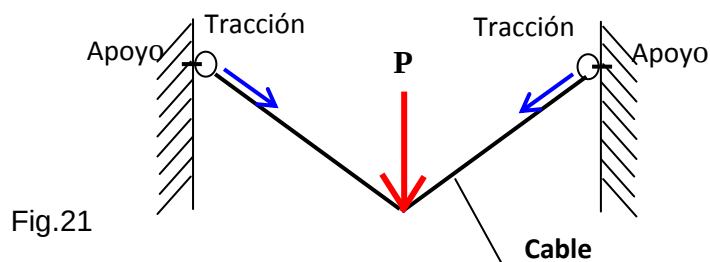


Fig.20

3. TECHOS COLGANTES - ESTABILIZACIÓN DE LOS CABLES.

Teoría del funcionamiento y estabilidad de los cables como estructuras planas.

El cable es una estructura colgante que sometida a cargas genera fuerzas de tracción oblicua en sus apoyos (Fig.21). Las estructuras de cables son muy eficientes, en el sentido que con pequeñas secciones se pueden soportar grandes cargas y salvar grandes luces. El material más adecuado, por su alta resistencia a la tracción, es el acero.



Cuando el cable cuelga bajo su propio peso describe una curva llamada catenaria (Fig.22). Toda carga puntual o asimétrica tiende a desviarlo de su forma original (Fig.23 y 24).

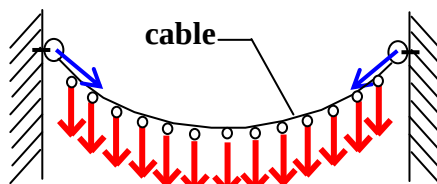


Fig.22
Catenaria

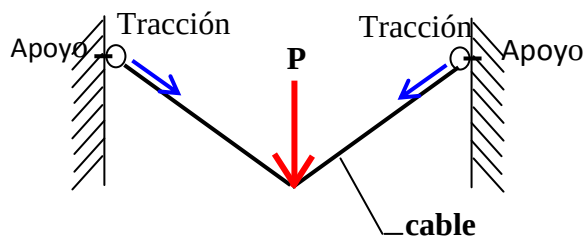


Fig.23
Carga Puntual

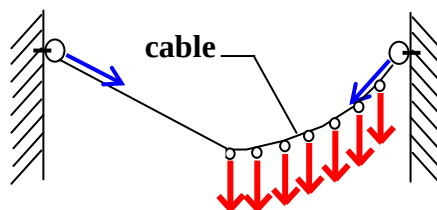


Fig.24
Carga Asimétrica

El problema es: ¿cómo estabilizar al cable para que conserve su forma catenaria, aún cuando se encuentra bajo la acción de cargas puntuales o distribuidas asimétricas?

a) Incrementando la carga muerta de la estructura:

La posibilidad más simple es dotarlo de masa o peso muerto (Fig.25). Es el principio inverso del arco pesado. Si su peso propio es muy superior a las cargas puntuales o asimétricas, éstas no podrán sacarlo de su curvatura original. Se representa este principio de la siguiente manera

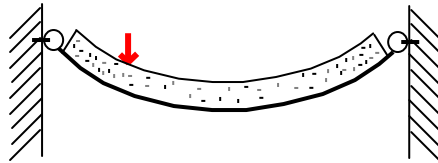


Fig.25

b) Anclando con las correas los cables de la cubierta:

Otra forma de estabilizar los arcos ordenados en patrón plano es mediante el anclaje de la estructura secundaria al suelo (Fig.26). Una fuerza puntual asimétrica no puede deformar el cable porque para descender tendría que levantar el punto opuesto de simetría, lo cual es imposible si el mismo se encuentra anclado al suelo.

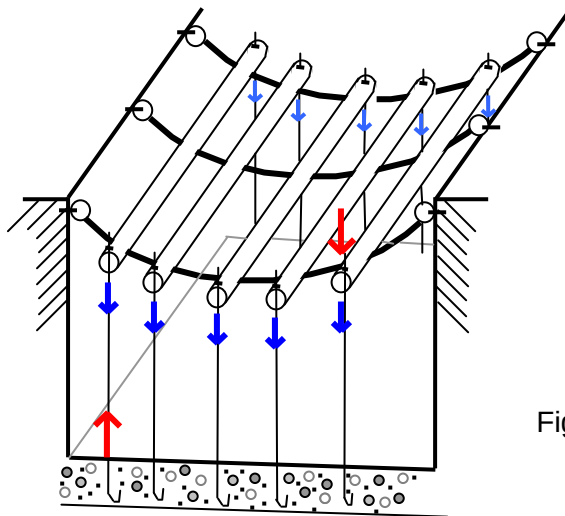
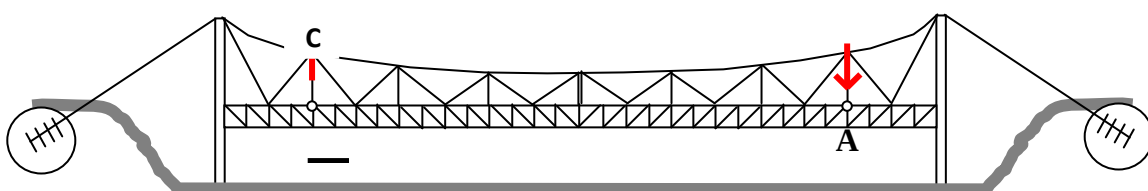


Fig.26

c) Incorporando tablero rígido:

Otra forma de estabilizar los cables es mediante un tablero rígido (Fig.27). Este principio se aplica en los puentes colgantes. Para que una carga puntual asimétrica haga descender al cable, tiene que levantarse el punto simétrico opuesto, lo cual es imposible porque el tablero rígido se lo impide. Para que el punto A descienda por efecto de la carga actuante, tendría que ascender el punto C, pero el tablero se lo impide.



d) Disponiendo cables normales cruzados:

Fig.27

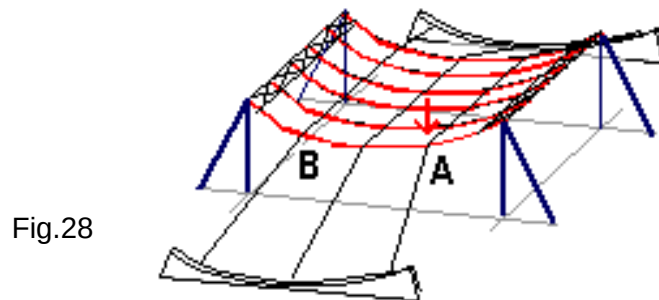


Fig.28

Para que el punto **A** descienda por efecto de la carga concentrada, el punto **B** debería ascender, lo cual es imposible porque el cable normal cruzado lo impide (Fig.28)

e) Utilizando sistema de “contracable” en el plano

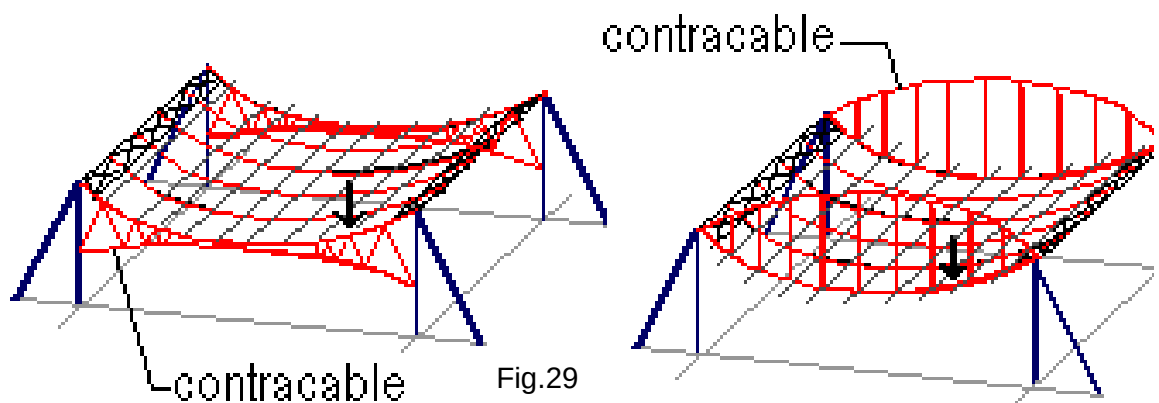


Fig.29

La carga puntual no puede deformar el cable porque el contracable lo impide (Fig.29).

4. TECHOS COLGANTES ORGANIZADOS SEGÚN PATRÓN PLANO

Consisten en una sucesión de cables paralelos que cuelgan de ambos lados.

Presentamos algunos ejemplos representativos de esta tipología:

A) Neue Messe Stuttgart (Nueva Feria de Stuttgart), proyecto del Arq. Wulf y Asociados del año 2000, cuya construcción se concluyó en 2007.

Presenta 7 salones standard para exposiciones de 155m de largo x 56m de ancho c/u. La estructura del techo consta de apoyos a ambos lados en forma de caballete. Vigas

reticuladas inclinadas con su canto mayor en la dirección de las tracciones que generan los cables del techo apoyan en los caballetes (Fig.30). De las vigas reticuladas cuelgan los cables del techo.

Presenta 5 caballetes de cada lado, enfrentados, dejando una luz libre de 34 m.

Los caballetes de un lado tienen 14 m de altura y los del lado opuesto 20 m de altura. El punto más bajo del techo está a 12 m del piso.

Los caballetes de apoyo tienen 4 patas, 2 caños verticales de compresión y 2 inclinados de tracción. Así los caballetes resuelven la estabilidad tanto en sentido longitudinal como transversal del salón. Los caños de acero están rellenos con hormigón. Los caños de las columnas de compresión tienen 813mm de diámetro en los caballetes altos (711mm en los bajos) con un espesor de la pared de 16mm.



Fig.30: etapa constructiva, antes que se monten los contracables estabilizadores

Los caños inclinados tienen 610 de diámetro (559 mm en los bajos) y 20 mm de espesor de pared. La construcción satisface una resistencia al fuego F90.

El techo del salón se resuelve con estructura de patrón plano, consistente en una sucesión de cables colgantes cada 6,70 m, estabilizados mediante cables de curvatura opuesta (contracables) ubicados en correspondencia con las patas de los caballetes (Fig.31).

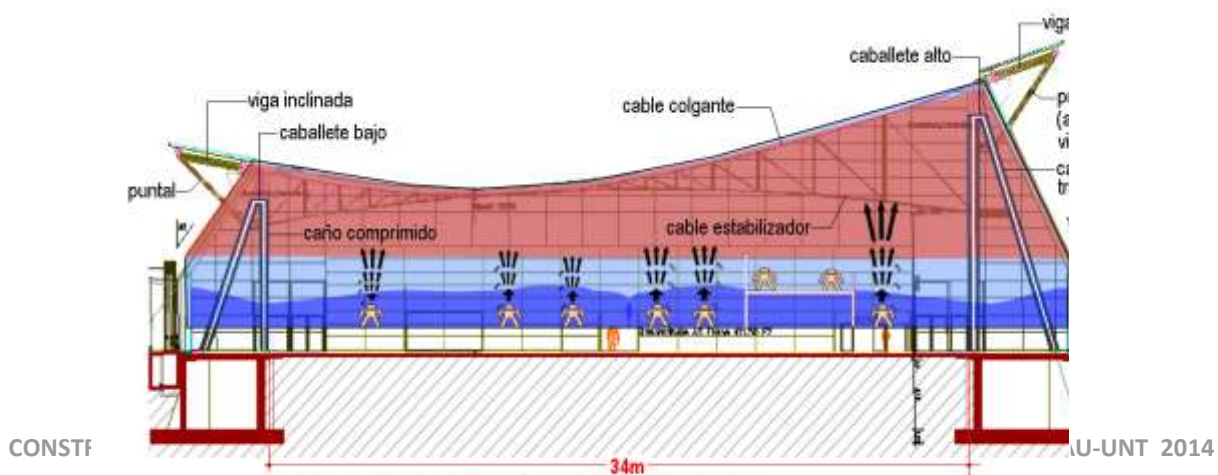


Fig.31

El cable rigidizador se vincula con el cable colgante mediante montantes y diagonales. La Fig.32 muestra una vista interior del salón, donde se percibe el forjado de chapa plegada salvando la luz de 6,70 m entre cables.



Fig.32

b) El natatorio cubierto “Schwimmoper” con capacidad para 2000 espectadores, proyecto de Friedrich Hetzelt, fue construido en la ciudad de Elberfeld entre 1953 y 1956.

Es una obra emblemática de edificios con techo colgante.

Presenta un techo de 46m de luz libre resuelto como cáscara de tracción de simple curvatura en hormigón armado, que cuelga de 10 vigas inclinadas a cada lado, que son también sostén de las tribunas (Fig.33 y 34).

Las cabeceras o “tímpanos” del salón es transparente, totalmente vidriada resuelta en pequeños paños, enmarcados en una estructura de montantes y travesaños de aluminio extruido (Fig.34). La otra comunica al salón con otras dependencias.

Fig.35 muestra una vista interior del natatorio y Fig.36 una vista exterior.

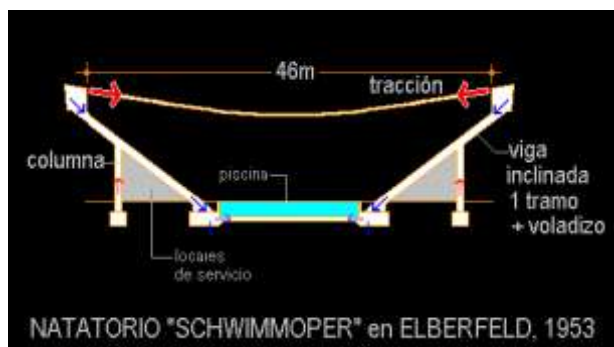


Fig. 33



Fig. 34



Fig. 35



Fig. 36

c) Oficinas de la Compañía Lowara en Montecchio Maggiore, Italia, Renzo Piano 1985.

Las nuevas oficinas están anexadas al establecimiento preexistente. Tiene 15m de ancho x 150 m de largo (Fig.37)). La sección muestra un techo colgante en forma de catenaria, que arranca con 2,4m de altura y asciende al apoyo opuesto a una altura de 7,2m (Fig.38).

La estructura principal consta de perfiles que cuelgan de apoyos a ambos lados. Los apoyos han sido diseñados para resistir la tracción oblicua del techo. El lado vidriado está formado por una columna y un puntal en el mismo plano (Fig. 39, 40 y 41). El del lado opuesto las columnas están apuntaladas con 2 puntales formando una "V" que aparte de resistir la tracción del techo, confiere estabilidad en sentido longitudinal. Entre las alas de los perfiles se apoyó una chapa ondulada que sirvió de encofrado perdido al hormigón que se vació encima de ella. La chapa ondulada dejada a la vista constituye el cielorraso interior (Fig.42).



Fig.37

Fig.39

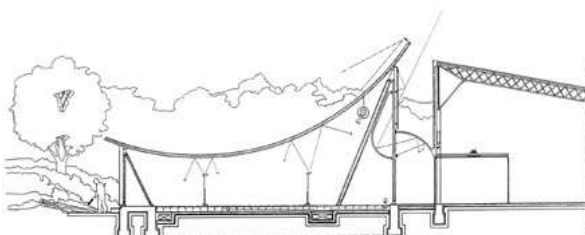


Fig.38

Fig.40





Fig. 42



Fig. 41

4. TECHOS COLGANTES, PATRÓN RADIAL

Los techos colgantes con patrón radial siguen el principio de la “rueda de bicicleta” (Fig.43 y 44). Si se tensan familias de rayos oblicuos desde un aro o anillo perimetral hasta un eje central, la estructura resultante es capaz de soportar cargas verticales normales al plano de la rueda y trasladarlas al perímetro.

Estos tipos de estructuras se consideran activas, pues no entran en régimen solo por la acción de las cargas pasivas, sino por las cargas negativas que introduce el tensado de los rayos produciendo tracción en el anillo central y compresión en el anillo perimetral.



Fig.43



Fig.44

Con este principio Lev Zetlin diseñó la estructura del Memorial Auditórium de la ciudad de Utica, New York, en 1959 (Fig.45)

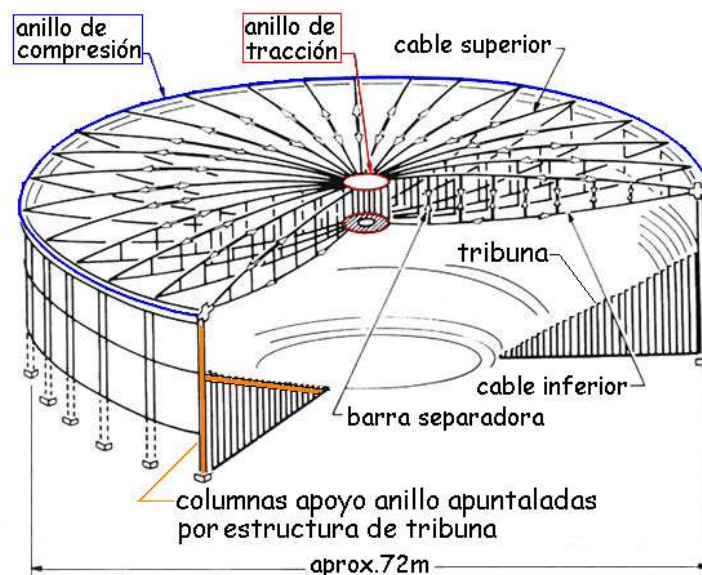


Fig.45



Fig.46: Utica Memorial Auditorium, 1959



Fig.47: Utica Memorial Auditorium, interior

New York State Pavilión, Feria Mundial de Nueva York 1964, proyecto de Philip Johnson y Lev Zetlin. La Planta presenta dos óvalos, el mayor con un diámetro de 105 m y el menor de 75 m. (Fig.48 y 49).



Fig.48: New York State Pavilión Vista



Fig.49 - New York State Pavilion

El techo descansa sobre 16 columnas y presenta 1 (un) anillo perimetral de compresión y otro menor, central, de tracción. Las columnas de Hº Aº son de 30 m. de altura y 3 m de diámetro (Fig.50).

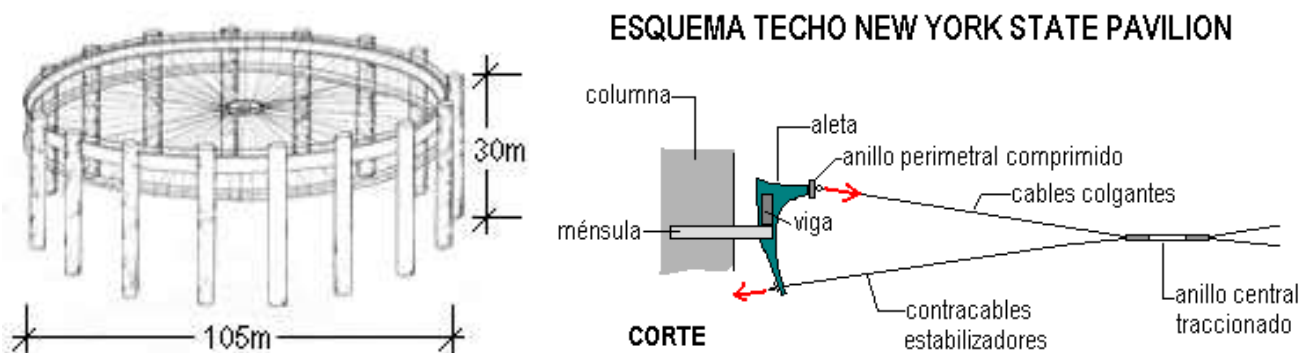


Fig.50: Esquema del techo, N.Y.State Pavilion

Unas curiosas-ménsulas, en forma de aletas en “V” abiertas (Fig.51), sostienen en su parte superior el anillo perimetral, del que cuelgan los cables del techo hacia el anillo central. De la parte inferior de aletas se tensan los contracables estabilizadores (Fig.52 y 53)



Fig.51



Fig.52



Fig.53

Estas estructuras fueron precursoras del moderno concepto de “Tensegrity”, un tipo de estructura de cables tensados entre barras comprimidas que parecen flotar en el aire (Fig.54). Con este principio el Arq. Hashimoto diseñó la cúpula del Amagi - Yugashima Gymnasium en Shikoku, Japón en 1991 (Fig.55).



Fig.54: Escultura tensegrity, Kenneth Snelson



Fig.55: Kano Dome, Arq. Hashimoto 1991

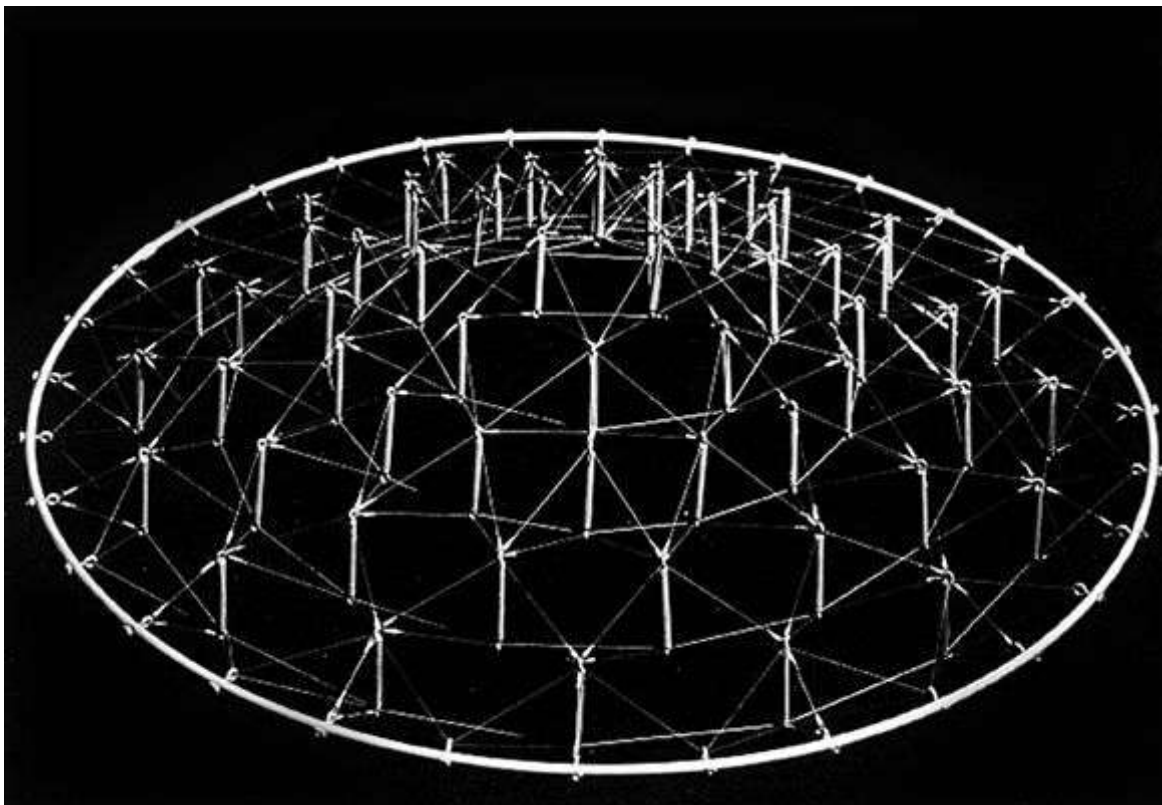


Fig.56: Proyecto de cúpula tensegrity, Arq. Robert Ricolais.

MEMBRANAS

ESTRUCTURAS MEMBRANALES BLANDAS - TENSOESTRUCTURAS:

Una membrana es una hoja tan delgada, de material blando, que para todo fin práctico, puede desarrollar solamente tracción.

MATERIALES DE LAS MEMBRANAS TEXTILES

Tela

Una tela es una estructura laminar flexible, a la industria que fabrica las telas tejidas a partir de hilos, en general, se le llama tejeduría.

Lona

La lona es un tejido muy pesado que se utiliza para la fabricación de velas, tiendas, marquesinas, mochilas, y otras funciones donde se requiere robustez. También es popularmente utilizada como superficie de la pintura, cubiertas en general, y en bolsas y zapatos de moda.

Propiedades

Son propiedades de las telas y lonas que determinan su calidad y diversos usos.

- Permeabilidad al aire
- Permeabilidad al agua
- Tenacidad (máxima tensión que soporta sin romper)
- Solidez de colores
- Elasticidad
- Densidad (Peso por unidad de área)
- Espesor
- Resistencia a la temperatura

Las telas y lonas para techos deben ser resistentes a la intemperie.

Desde los primeros toldos, de tela o lona, a la actualidad, los materiales han mejorado mucho su calidad. Hoy existen lonas vinílicas con poliéster, telas plásticas, lonas acrílicas, tejidos de trama abierta llamados "media sombra", etc.

Características físicas

La lona moderna es generalmente de algodón, aunque históricamente hablando, era a base de cáñamo. Se diferencia de otros tejidos de algodón pesados, como el denim, al ser de tejido simple en lugar de sarga.

La lona está disponible en dos tipos básicos: plan y duck. Los hilos del tipo duck son tejidos más apretados. El término *duck* viene de la palabra holandesa por "tela", *doek*.

En los Estados Unidos, la lona se clasifica de dos maneras: en peso (onzas por yarda cuadrada) y por un sistema numérico de clasificación con los números en sentido inverso del peso (un número 10 de lona es más ligero que el número 4.)

MEMBRANAS TEXTILES MODERNAS

Las modernas “lonas” para toldos y tenso-estructuras, son verdaderas membranas textiles. El gran avance respecto a las clásicas lonas antecesoras se basa en: a) el reemplazo del tejido orgánico por tejido inorgánico con hilos de mayor resistencia mecánica e inerte a la acción de hongos, insectos, etc. y b) la incorporación de recubrimientos sintéticos del tejido que lo protegen, mejoran la impermeabilidad y la durabilidad de la membrana.

Estas membranas textiles se forman en base a un tejido –que hace las veces de “armadura”, embebido o recubierto por capas de sustancias sintéticas que le proporcionan cualidades complementarias que no posee el tejido solo.

Telas vinílicas

Este producto se compone de 2 láminas de PVC de 0,165 Mm. de espesor cada una, y un tejido entramado de Poliéster en el centro, de alta tenacidad, baja contracción y baja elongación, de 7 x 5 pasadas por centímetro.

Las tres capas no están cocidas ni pegadas, las mismas están soldadas entre sí.

Resulta así un producto absolutamente impermeable, con gran resistencia a los rayos del sol, a la abrasión, al desgarro y no es propenso a la propagación de hongos

Suelen presentarse en rollos de 30 metros 1,10 metros de ancho nominal.

Telas screen

La evolución de los tejidos contruidos con hilos de fibras minerales, como la fibra de vidrio, y las fibras sintéticas como las fibras de poliéster, acrílicos y similares, recubiertas por PVC, ha hecho que estos tejidos puedan ser utilizados en otras aplicaciones como pueden ser la tapicería exterior o la arquitectura textil.

Para tener tejidos de distintos factores de apertura o coeficientes de transparencia, debemos partir de hilos de mayor o menor grosor. La fibra de vidrio nos permite tener un abanico de apertura desde un 10 % (máxima apertura) hasta un tejido totalmente opaco (Fig.01).



Fig.01

Un tipo particular de tela screen es el moderno tejido de PES (PolyEtherSulfone) recubierto de PVC (PolyVinil Chloride), que combina el equilibrio entre la transmisión solar y la aireación proporcionando un ambiente fresco y agradable.

Las mismas cuentan con un factor de abertura (perforaciones) del 5 % y 7% dependiendo de la trama provista por el fabricante. Esta tela se caracteriza por ser ignífuga. Son ideales tanto para toldos como para cortinas roller.

Su estructura abierta permite la evacuación del calor por convección del aire y le ofrece la posibilidad de disfrutar de un ambiente agradable y luminoso sin renunciar a su intimidad permitiéndole al mismo tiempo la visión al exterior (en caso de lluvia hay que tener en cuenta que dicha estructura abierta no proporcionará suficiente protección). Fabricada con una textura que aporta modernidad allí donde se instala y en una gama de colores actuales que permite una agradable integración con el ambiente donde se la incluye.

También se combinan con TEFLÓN, que 1) protege el tejido formando una barrera que refuerza la repelencia al agua y retrasa la adherencia de la suciedad. 2) es imperceptible a la vista, olfato y tacto 3) no disminuye la permeabilidad al paso del aire

Características:

- Material: Acrílico 100% tintado en masa.
- Hilos: Urdimbre: 30 cm. Resistencia: 140 daN/5 cm | Trama: 15 cm. Resistencia: 95 daN/5 cm.
- Peso: 300 gr/m² aprox.
- Columna de agua: Estándar: 300 mm. Resinado: 800 mm.
- Acabado: Fluorcarbono.
- Tratamientos: Contra las algas y moho, impermeable, repelente al agua, repelente a la suciedad, resistente a la luz y a la intemperie, protección contra los rayos ultravioletas, acabado fungicida y certificación estándar Oko-Tex 100 (no toxicidad de tejidos acrílicos tratados hidrófugos).
- Confección: Máquina automática con hilo de nylon.

Telas y tejidos acrílicos

Las telas acrílicas responden muy bien a la exposición prolongada en exteriores contra los agentes contaminantes, agua, sol, salinidad y microorganismos, etc..

- Material: Acrílico 100% tintado en masa.
- Hilos: Urdimbre: 30 cm. Resistencia: 140 daN/5 cm | Trama: 15 cm. Resistencia: 95 daN/5 cm.
- Peso: 300 gr/m² aprox.
- Columna de agua: Estándar: 300 mm. Resinado: 800 mm.
- Acabado: Fluorcarbono.
- Tratamientos: Contra las algas y moho, impermeable, repelente al agua, repelente a la suciedad, resistente a la luz y a la intemperie, protección contra los rayos ultravioletas, acabado fungicida y certificación estándar Oko-Tex 100 (no toxicidad de tejidos acrílicos tratados hidrófugos).
- Confección: Máquina automática con hilo de nylon.

Telas microperforadas en base a fibra de vidrio

- Material: Fibra de vidrio.

- Hilos: Fibra de vidrio embebido en PVC.
- Peso: 520 gr/m².
- Acabado: PVC satinado.
- Reacción al fuego: M1.
- Tratamientos: solidez de color 7/8.
- Resistencia a la rotura: Urdimbre: 200 daN/5 cm | Trama: 200 daN/5 cm.
- Confección: Máquina de soldadura de alta frecuencia

Tela microperforada en base a fibra de poliéster

- Material: Fibra de poliéster.
- Hilos: Armadura de hilos de poliéster pretensados de alta tenacidad resistentes al desgarro.
- Peso: 290 gr/m² a 420 gr/m².
- Acabado: PVC.
- Reacción al fuego: M1.
- Tratamientos: solidez de color 7/8, 100% reciclable. Precontraint Ferrari y certificación Oeko-Tex 100 (no toxicidad de tejidos hidrófugos).
- Resistencia a la rotura: Urdimbre: 160 a 310 daN/5 cm | Trama: 170 a 210 daN/5 cm.
- Confección: Máquina de soldadura de alta frecuencia.

Pvc para toldos

- Material: Fibra de poliéster recubierto de PVC.
- Hilos: 1100 Dtex PES HT.
- Peso: 590 gr/m².
- Acabado: Lacado "doble cara".
- Reacción al fuego: M2.
- Tratamientos: solidez de color 7/8, 100% reciclable. Precontraint Ferrari y certificación Oeko-Tex 100 (no toxicidad de tejidos hidrófugos), anti Rayos UV.
- Resistencia a la rotura: Urdimbre: 250 daN/5 cm | Trama: 250 daN/5 cm.
- Confección: Máquina de soldadura de alta frecuencia.

ESTRUCTURA DE LAS CUBIERTAS MEMBRANALES

Las cubiertas membranales también se llaman “membranas postensadas”, porque a partir de puntos firmes de los que cuelgan, son estabilizadas mediante postensados en sentido opuesto.

Algunos autores las llaman *cáscaras blandas*. Es necesario conferirles *rigidez* mediante el tensado, para evitar que salgan de servicio ante las variaciones de cargas.

El tensado se realiza normalmente mediante un elemento de borde del tejido (un refuerzo o un cable fijado a los bordes), que se estira hasta puntos de anclaje. Por lo que, en estos techos, son detalles importantes el refuerzo de los bordes y los puntos de anclaje, donde hay concentración de tensiones.

Hay dos tipos de tenso estructuras con cubiertas membranales: a) aquellas cubiertas en que la membrana está constituida por una malla de cables sobre la que se asienta la cubierta, en ellas es posible diferenciar la estructura resistente y la cubierta.

b) aquellas en que la membrana es un tejido textil, cuyo tejido es simultáneamente estructura resistente y material de cubierta.

En ambos casos se trata de mallas “pretensadas” (en realidad, “postensadas”), tendidas desde mástiles y otros puntos y/o líneas firmes en el espacio, cuyos bordes se tensan hacia anclajes en el suelo, para que adopten las formas convenientes.

Los siguientes ejemplos muestran construcciones membranales.

a) Estadio Olímpico de Munich, Arq. Behnisch + Partner, 1972.

El complejo deportivo diseñado por Behnisch para las olimpiadas, incluye el estadio, la arena de deportes además del área de natación. Veremos en particular la cubierta del estadio de fútbol (Fig.02 y 03).

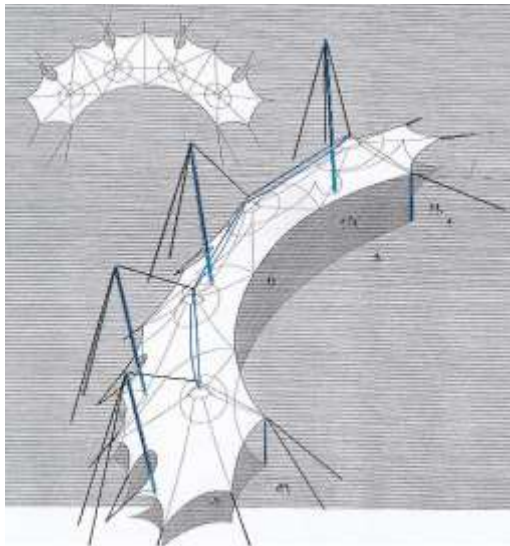


Fig.02



Fig.03

El techo presenta una estructura resistente de malla de cables de acero sobre la que apoya una cubierta de planchas traslúcidas de acrílico (Fig.04).

La malla de cables está pretensada con la característica de doble curvatura para prevenir el aleteo del viento. Consta de cables de acero de tres diámetros diferentes. El techo de malla ancha se compone de cables de 25.4mm de diámetro arreglados en pares de 50.8mm separados en intervalos de 76.2mm en cada dirección, con conexiones con abrazaderas en las intersecciones.

Los cables más largos se usan como tirantes (que conectan los cables de borde a la cimentación), como soportes (que conecten los picos a los mástiles superiores) y en la catenaria de cable principal de 439 metros de largo, que soporta la parte frontal. Este cable está sometido a cargas de tensión superiores a 4.535 toneladas.

El soporte vertical primario lo proporcionan doce mástiles tubulares de acero de una altura que varía entre 50.3 a 79.9 metros y hasta 3.5 metros de diámetro con un espesor de pared de hasta 76.2 mm. Fig.05 vista general. Fig. 06 –Detalle de la cubierta.

La hermetización de los encuentros entre paneles de acrílico se realiza mediante bandas de presión de aluminio que aprietan los bordes de los paneles y una junta de neopreno entre ellos.

El apoyo de los paneles sobre la malla de cables es puntual, se realiza mediante pernos forrados con neopreno atornillados a las abrazaderas en los cruces de los cables.



Fig.04



Fig.05

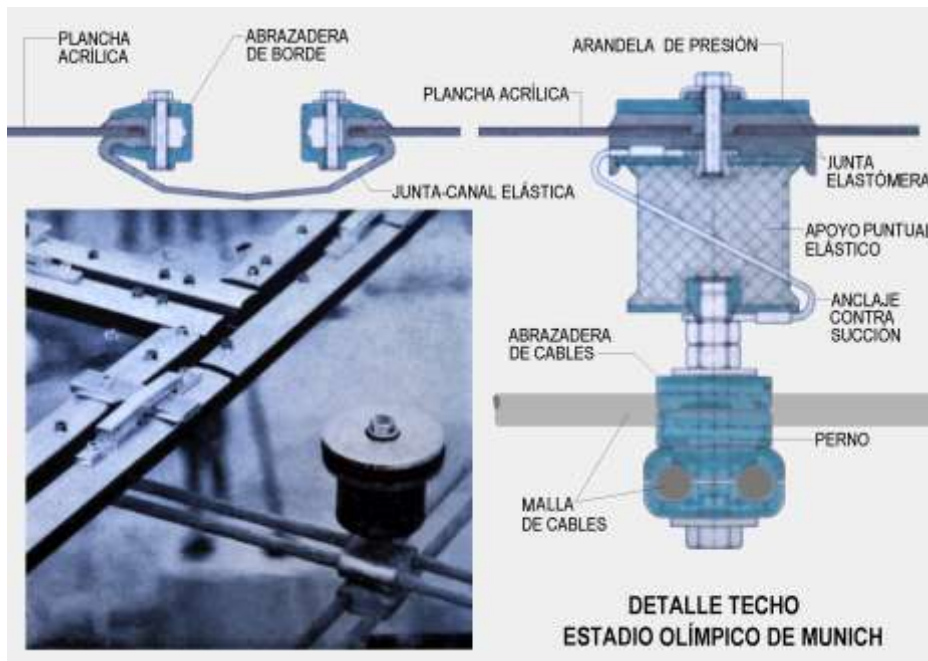


Fig. 06 Detalle de la estructura del techo y la cubierta

b) Denver Int. Airport, Colorado, USA: cubierta textil de la Terminal Jeppesen.

El Aeropuerto Internacional de Denver está a 24 millas al noreste de la ciudad de Denver en el Estado de Colorado. Es uno de los aeropuertos más grandes de Estados Unidos con casi 100.000 pasajeros diarios.

Sobre un eje en forma de espina se ubican sucesivamente una nueva terminal en construcción, la Terminal Jeppesen, y luego, sucesivamente, los halls de embarque A, B y C donde atracan los aviones. (Fig.07 y 08)

La Terminal Jeppesen fue diseñada por Fentress-Bradburn Architects en 1994. El edificio está cubierto por una membrana de tejido de fibra de vidrio revestido con teflón, que con una extensión de casi 8000m² fue la mas grande del mundo en su momento (Fig.09 y 10).

El techo de la terminal tiene 40m (126 pies) desde el piso al punto de mayor altura. Está apoyado 2 hileras 17 mástiles enfrentados, distanciados cada 11,25m y salvando una luz de 45m (150 pies). Usa un sistema de cables catenarios similar al del puente de Brooklyn. La membrana pesa menos de 10Kg/m² (2 libras por pie²) y puede resistir vientos de hasta 150Km/h (100 millas por hora)(Fig.11 y 12). Para el ascenso y descenso de pasajeros se han realizado marquesinas de menor envergadura. (Fig.13)

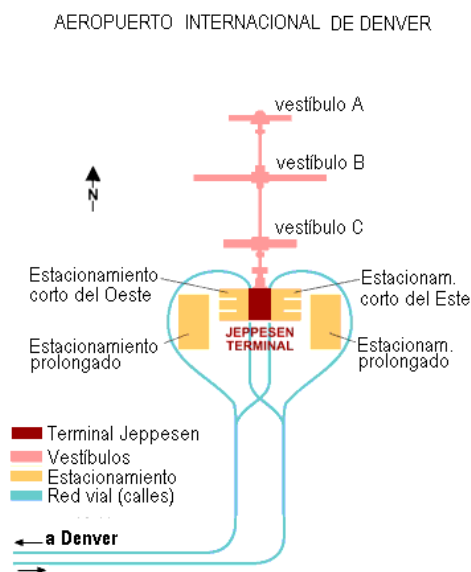


Fig.07



Fig.09



Fig.08



Fig.10

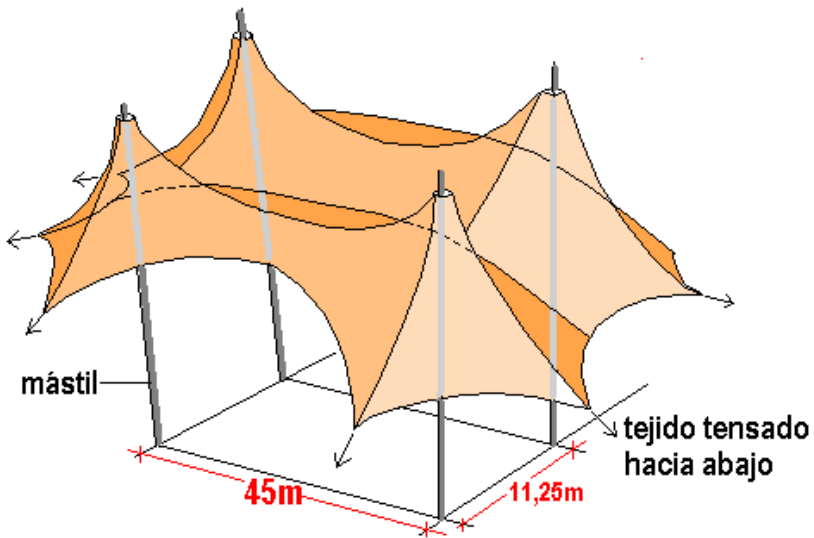


Fig.11



Fig.12



Fig.13

c) Aeropuerto Internacional de Bangkok

Por lo general las cubiertas textiles se usan como pantalla protectora de la lluvia y del sol. Cubren espacios abiertos que no necesitan proporcionar condiciones de confort similares a las de los espacios habitacionales cerrados.

Un caso particular es la cubierta textil de los vestíbulos de embarque del Aeropuerto Internacional de Bangkok, proyecto del Arq. Helmut Jahn. Allí se requería una cubierta membranaral que proporcionara condiciones de confort para un espacio cerrado de uso permanente.

Para ello se desarrolló una membrana de 3 capas que se verán en detalle más adelante.

Un plano esquemático del aeropuerto muestra la terminal principal y los corredores o vestíbulos de embarque (Fig.14 y 15).

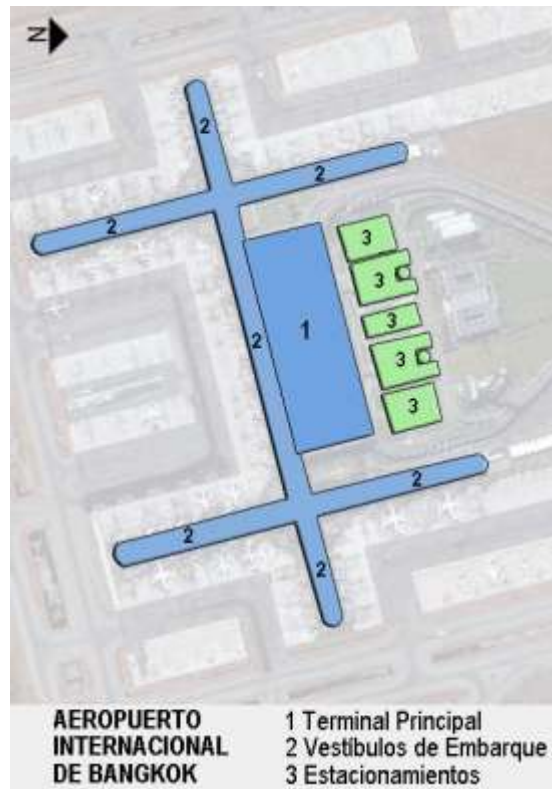


Fig.14



Fig. 15

TECHO DE LOS VESTÍBULOS DE EMBARQUE

Los corredores de embarque presentan techos que alternan cubiertas membranales con cubiertas vidriadas (Fig.16).

Las cubiertas membranales arrancan de un punto y se van ensanchando hacia arriba.

Las cubiertas de vidrio presentan una forma inversa con una base ancha abajo, que se va aguzando hacia la parte más alta del techo.



Fig.16

AEROPUERTO DE BANGKOK: ESQUEMA ESTRUCTURAL

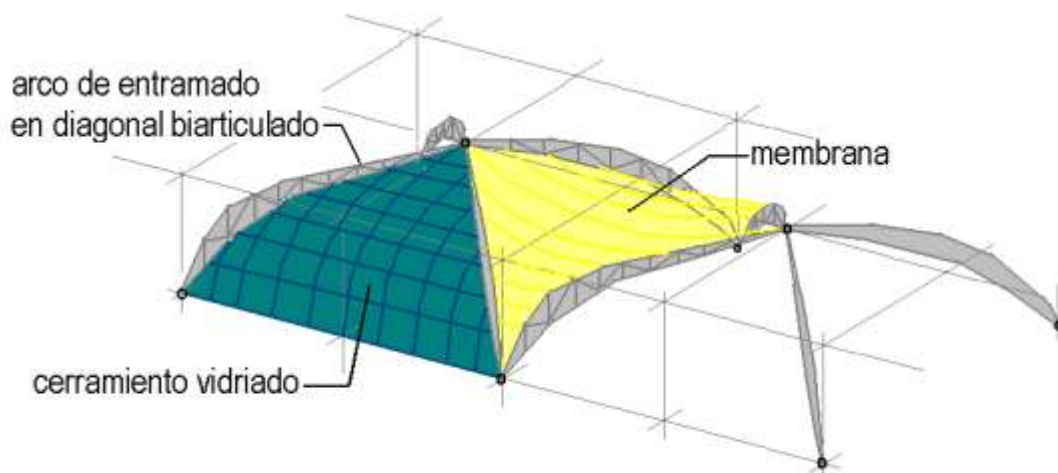


Fig.17

La estructura resistente del techo se organiza en base a arcos biarticulados que se cruzan diagonalmente en el vértice del techo, estabilizándose mutuamente (Fig.17).
Salvan transversalmente al corredor una luz de aproximada de 60m (Fig.18).



Fig.18



Fig.19

Los arcos están materializados en una construcción reticulada de sección triangular. Cada medio arco presenta sus extremos aguzados evidenciando los vínculos articulados. A mitad de la longitud del medio arco, los cordones se distancian alcanzando una altura estática del orden de 2,20m (Fig.19 y 20).

Las barras de esta armadura en forma de arco están constituidas por caños de acero de aproximadamente 40cm de diámetro.

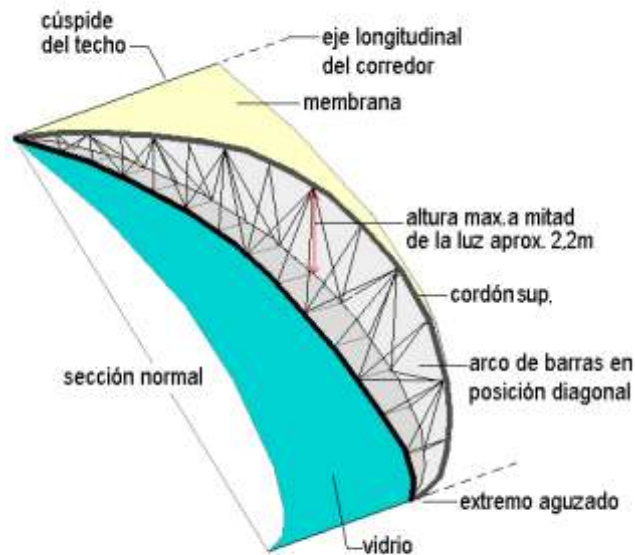


Fig.20



Fig.21



Fig.22

La vista exterior (Fig.21) e interior (Fig.22) muestran como es el hall.

La construcción membranal funciona como amortiguador para brindar protección sonora del exterior (ruidos de los aviones) y acondicionamiento acústico de los sonidos interiores. Es una construcción de 3 capas.

Entre la membrana climática exterior hecha de fibras de vidrio revestidas con teflón y la membrana interior, se monta una capa de pantallas acústicas traslucientes separada con una capa de aire de la membrana superior e inferior. La capa de pantallas absorbe ruido externo e interno.

La membrana interior es un laminado doble. La lámina que da hacia el espacio interior es un film transparente de baja emisividad ("low-e") que intercambia radiación con todas las superficies interiores del edificio (Fig.23).

Una lámina metálica delgada bloquea el intercambio de calor radiante entre la construcción membranal caliente y el interior del edificio y es permeable a la luz natural y al sonido dado su muy bajo espesor. Esta lámina con revestimiento "low-e" tiene una ventaja adicional. En vez de irradiar calor del techo caliente, la radiación de las superficies del piso enfriado es reflejada al ambiente por la lámina de "low-e" que mejora el confort térmico de los ocupantes porque sienten superficies envolventes más frescas.



Fig.23

La parte vidriada del techo se ha resuelto con vidrios serigrafiados pegados por delante de una trama rectangular de acero (Fig.24 y 25).

Fig.26 muestra una vista general.

Aeropuerto Internacional de Bangkok: vidrios serigrafiados

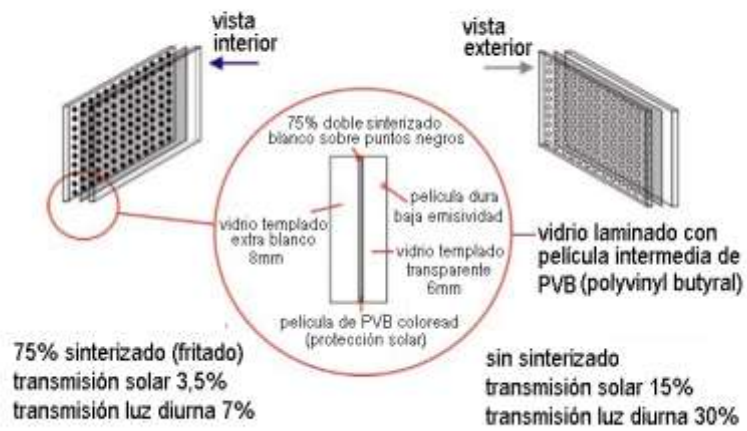


Fig.24



Fig.25



Fig.26

DETALLES CONSTRUCTIVOS

Detalles de borde, de los puntos de estiramiento y de los pies de anclaje.

Las lonas se pueden estirar mediante:

- a) tracciones normales distribuidas a lo largo de sus bordes (Fig.27, 28 ,29 y 30) y
- b) tracciones concentradas en puntos (Fig.31, 32 y 33).

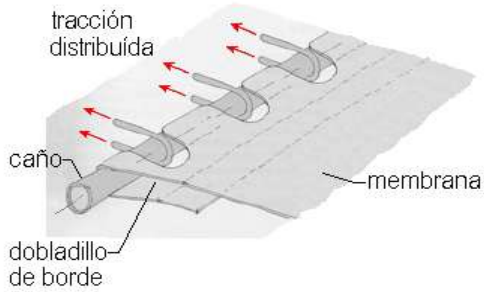


Fig.27

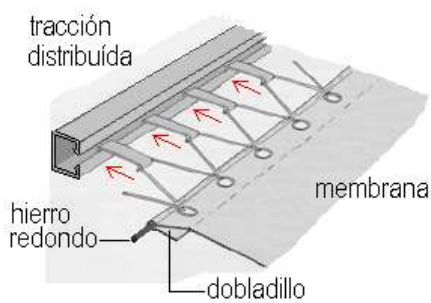


Fig.28

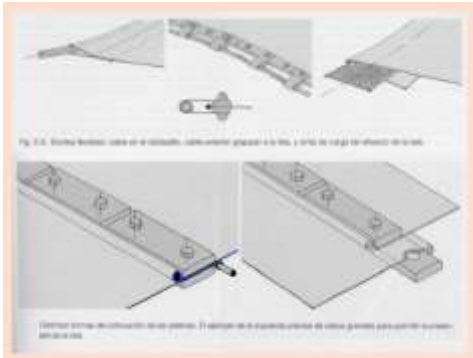
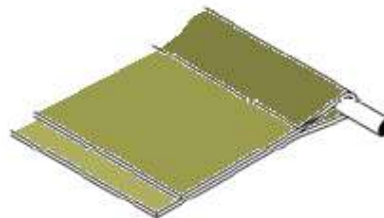


Fig.29



jarete o dobladillo

Fig.30



Fig.31



Fig.32



Fig.33

Detalles de los pies de apoyo (Fig.34 y 35) y de los anclajes en el suelo (Fig.36 y 37).



Fig.34

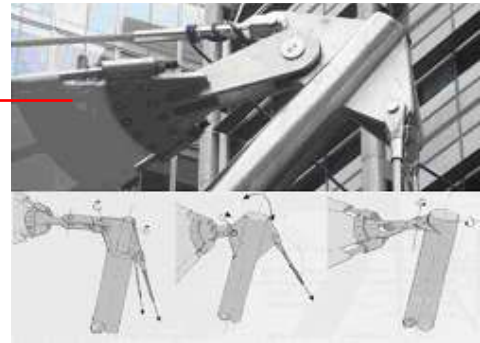


Fig.35



Fig.36



Fig.37

Las Figuras 38, 39, 40, 41 y 42 muestran la diversidad de elementos estructurales que suelen aparecer en los techos membranales para sostener y tensar la cubierta.



Fig.38



Fig.39

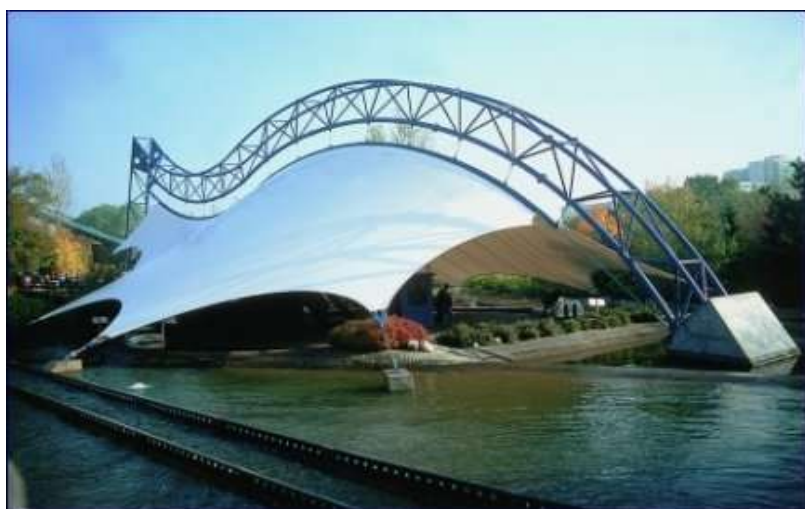


Fig.40



Fig.41



Fig.42

BIBLIOGRAFÍA

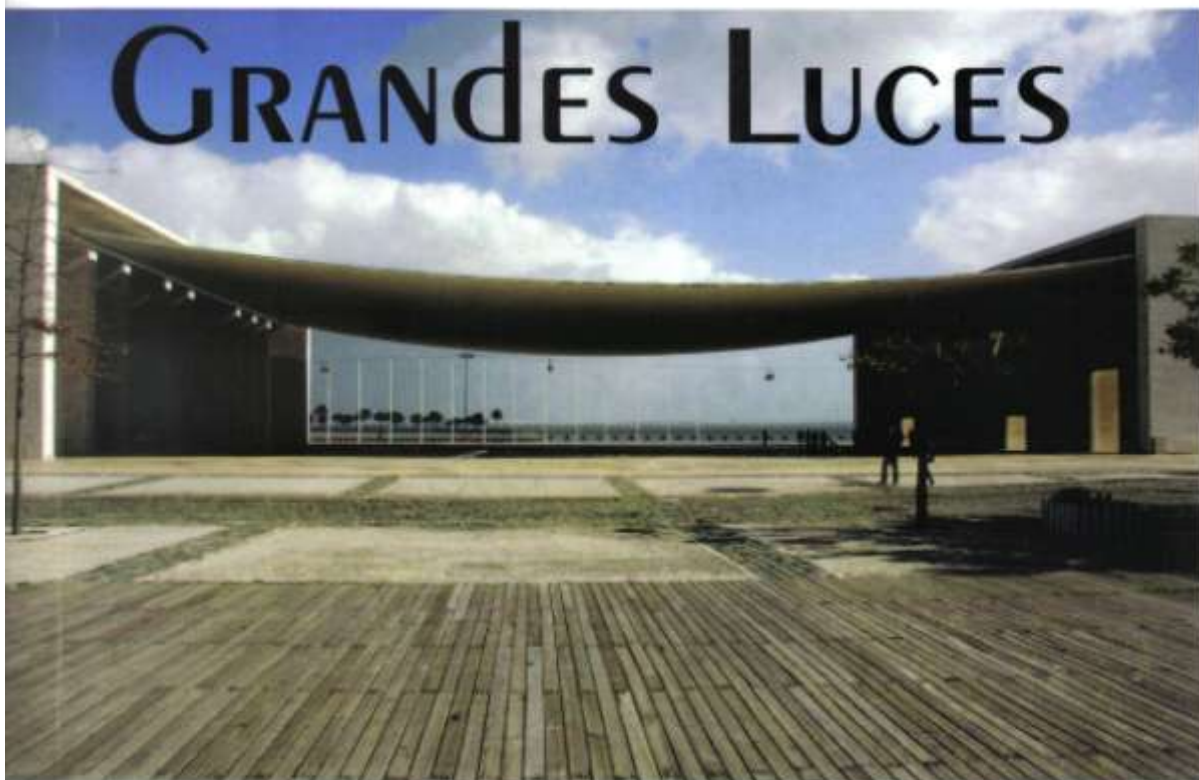
- Argüelles Álvarez, “La estructura metálica hoy”, Nuevas Gráficas, Madrid 1975.
- Aroca Hernández Ricardo, “Vigas trianguladas y Cerchas”, Instituto Juan de Herrera.
- Broto, Carlos “Cubiertas, Innovación y Diseño”, Barcelona, España 2009.
- Cardellach Félix, “Filosofía de las Estructuras”
- Charon Marcos P., “Cálculo Práctico de Vigas y Pórticos” Editores Técnicos Asociados, Barcelona
- de la Serna Díaz Carlos, “Cercha a la española para techumbres rústicas”, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- De Llorens Duran José Ignacio, “Los Detalles Constructivos de las Tenso-estructuras”, Escuela de Arquitectura de Barcelona
- Engel Heinrich, “Sistema de Estructuras”, Ediciones H. Blume
- Ferreras/Moisset de Espanés, “Cáscaras de Rotación”, FAU-UNC
- Ferreras/Moisset de Espanés, “Estructuras en Arco”, FAU-UNC
- Ferreras/Moisset de Espanés, “Paraboloides Hiperbólicos”, FAU-UNC
- Forster Brian/Mollaert Marijke, Arquitectura Textil – Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas”, Tensinet
- Giovannardi Fausto, Fèlix “Candela costruttore di sogni”, www.giovannardierontini.it
- Instituto Juan de Herrera, “Félix Candela, arquitecto”, Madrid 1994.
- Kidder, Frank –Parker, Harry “Manual del Arquitecto y del constructor” México, 1965
- Llorens J., “Atlas de detalles de la construcción textil”, II Simposio Latinoamericano de Tenso-estructuras, Caracas, Venezuela, 2005.
- Llorens J., “Detailing”, in Textile Roofs, Technische Universität Berlin, 2009
- Makowski Z.S, “Estructuras Espaciales de Acero”, Gustavo Gili
- Monjo J., “Introducción a la arquitectura textil. Cubierta colgadas”, 1991 COAM, Madrid
- Moore, Fuller “Comprensión de las Estructuras en Arquitectura”, México 2000.
- Nervi Pier Luigi, “Scienza o Arte del Costruire”, Edizione Della Russola.
- Owen Roy E., “Cubiertas”, Editorial Blume, Barcelona 1978
- Salvadori y Heller, “Estructuras para Arquitectos”, Edit. La Isla
- Savorra Massimiliano, “Félix Candela, Pier Luigi Nervi and formalism in architecture”, in P.Cassinello (ed.).
- Schmitt H., “Tratado de Construcción”, Gustavo Gili,
- Siegel Curt, “Formas Estructurales en la Arquitectura Moderna”, Cía. Editorial Continental-
- Torroja Miret Eduardo, “Razón y Ser de los Tipos Estructurales”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas de Madrid.
- Tensinet Syposium 2010-Tensile Architecture:”Connecting Past and Future”, Tensinet.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	03
COMPLEJIDAD DE LOS TECHOS	05
INTRODUCCIÓN A TECHOS DE GRANDES LUCES	06
CLASIFICACIÓN	08
TIPOS ESTRUCTURALES	09
2. ENVIGADOS Y EMPARRILLADOS	11
TECHOS DE GRANDES LUCES EN BASE A VIGAS	13
EL ENVIGADO	13
EL EMPARRILLADO	14
3. PORTICOS	21
CONCEPTO DE PORTICO EN ARQUITECTURA	23
CONCEPTO DE PORTICO EN INGENIERÍA	24
EL PÓRTICO TRILÍTICO	25
EL PÓRTICO SIMPLE	25
PÓRTICO RÍGIDO, MARCO RÍGIDO, ESQUINA RÍGIDA	26
TIPOS DE PÓRTICOS	28
SOLICITACIÓN INTERNA	30
ESTRUCTURAS APORTICADAS PLANAS Y ESPACIALES	33
LA CUBIERTA DE LOS TECHOS APORTICADOS	35
4. CERCHAS	37
DEFINICIÓN Y CONCEPTO	39
COMPONENTES	40
ANTECEDENTES HISTÓRICOS	41
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	43
ESTABILIDAD DE LA CERCHA PLANA	44
CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE CERCHAS	45
ENTRECruzAMIENTO DE CERCHAS	52
LA CUBIERTA DE LOS TECHOS DE CERCHAS	53
5. ARCOS	55
ANTECEDENTES HISTÓRICOS	57
CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FORMA	59
TRABAJO ESTRUCTURAL DE LOS ARCOS	61
LOS EMPUJES LATERALES	65
LA ESTABILIDAD ESPACIAL	67
LOS ARCOS LIVIANOS	72
EL ARCO LIVIANO DE FILIGRANA	74
TECHOS EN BASE A ARCOS DE FILIGRANA	75

RETIKULADOS ESPACIALES PLANOS	80
RETIKULADOS ABOVEDADOS	82
TECHOS DE LAMELLAS	84
CÚPULAS RETIKULADAS ESPACIALES	86
7. ESTRUCTURAS LAMINARES	93
PLEGADOS, CÁSCARAS CURVAS Y OTRAS LÁMINAS DURAS	95
PLEGADOS	96
CÁSCARAS DE SIMPLE CURVATURA	97
CÁSCARAS TÓRICAS	99
SUPERFICIE SINCLÁSTICA	99
SUPERFICIE ANTICLÁSTICA	101
SUPERFICIES REGLADAS	101
PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS	102
CONOIDES	109
SUPERFICIES HELICOIDALES	109
TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS	110
8. TECHOS COLGADOS Y COLGANTES	113
CONCEPTOS Y DIFERENCIACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE TRACCIÓN	115
TECHOS COLGADOS	116
TECHOS COLGANTES-ESTABILIZACIÓN DE LOS CABLES	121
TECHOS COLGANTES ORGANIZADOS SEGÚN PATRÓN PLANO	123
TECHOS COLGANTES-PATRÓN RADIAL	127
9. MEMBRANAS	131
TENSOESTRUCTURAS	133
MATERIALES DE LAS MEMBRANAS TEXTILES	133
MEMBRANAS TEXTILES MODERNAS	134
ESTRUCTURA DE LAS CUBIERTAS MEMBRANALES	136
DETALLES CONSTRUCTIVOS	146

TECHOS de GRANDES LUCES



pabloholgado/norafajre

