

I. INTRODUCCIÓN

Si aplastamos la goma de borrar con los dedos estamos aplicando una fuerza capaz de deformarla. Si empujamos el lápiz con un dedo, la fuerza provoca su desplazamiento; la Tierra nos atrae con una fuerza (la de la gravedad) proporcional a la cantidad de materia (masa) de nuestro cuerpo... En el mundo existen innumerables ejemplos de lo que llamamos fuerza, pero: ¿qué es realmente una fuerza?

Fuerza: todo aquello capaz de deformar un cuerpo o de modificar su estado de movimiento o reposo.

Los productos tecnológicos, por sencillo que sean, han de disponer de un esqueleto o armazón que soporte su propio peso, lo proteja frente a fuerzas externas y, además, mantenga unidos todos sus elementos. Dicho de otro modo, todo objeto debe poseer una estructura que soporte las fuerzas a las que se ve sometido.

Estructura: conjunto de elementos unidos entre sí, que permiten, mantener su tamaño y su forma (sin deformarse en exceso) cuando sobre él actúa fuerzas externas.

Por consiguiente, las **FUNCIONES DE UNA ESTRUCTURA** pueden ser muchas y variadas, entre las que destacamos:

- **Soportar el peso** de los elementos sobre la estructura, y de la propia estructura. Ejemplos: los pilares de un puente, la estructura de un edificio....
- **Resistir fuerzas externas**, como en el caso de la pared de una presa o dique que soporta la fuerza del agua contenida, los rompeolas...
- **Salvar obstáculos:** puentes, viales, túneles...



Fig 1: Pont-canal du Cacor (Moissac, Francia)

- **Almacenar materiales**, como por ejemplo, las bombonas de gases licuados, botellas de plástico, latas de refrescos, estanterías...
- **Mantener y proporcionar la forma:** Las estructuras

deben de ser capaces de soportar pesos y resistir fuerzas sin llegar a deformarse en exceso. Algunos ejemplos incluyen nuestro esqueleto, los tirantes de un puente, las varillas de un paraguas, de una tienda de campaña ...

- **Servir de protección:** el chasis de un automóvil protege a los pasajeros, la carcasa de un móvil protege los elementos electrónicos de su interior...
- **Cerrar espacios vacíos:** cúpulas, bóvedas...

Las estructuras están presentes en todo lo que nos rodea pudiéndolas encontrar tanto en los seres vivos como en los objetos: caparazón de un caracol, tronco de un árbol, máquinas, muebles, edificios, etc.. De ahí que las estructuras suelen clasificarse atendiendo a su origen en:

- **Estructuras naturales:** de origen **animal** (nidos de aves, presas de los castores, colonias de corales, túneles de los topos y ratones, huevos de aves, panales de abejas, caparazones...); **vegetal** (troncos, ramas de árboles y arbustos, tallos de plantas...); y **geológico** (cuevas, arcos naturales, montañas.....)



Fig 2: Arco Natural en el Arches national Park (Utah, EEUU)

- **Estructuras artificiales:** Son las creadas por el hombre. Seguro que se te ocurren muchos ejemplos: puentes, barcos, edificios, torres, carcasas... Estudiaremos éstas en un apartado posterior.

II. CARGAS Y ESFUERZOS

2.1. DEFINICIONES

Las estructuras se ven sometidas a fuerzas externas, tales como pesos de objetos situados sobre ellas, su propio peso, la fuerza del viento, del oleaje...etc. Así, la estructura de un edificio habrá de soportar el peso de todos los elementos del edificio (vigas, pilares, ladrillos...), el peso de las personas, los

muebles, la fuerza del viento....

A estas fuerzas externas, ya sean fijas (el peso del objeto) o variables (fuerza del viento, del oleaje, peso de la nieve...), aplicadas sobre las estructuras se les denominan **cargas**.

Cargas: fuerzas externas que actúan sobre una estructura.

Las cargas que soportan las estructuras generan fuerzas internas en la propia estructura (tensiones), que tienden a deformarlas y/o romperlas. A estas fuerzas internas producidas por las cargas se las llaman **esfuerzos**.

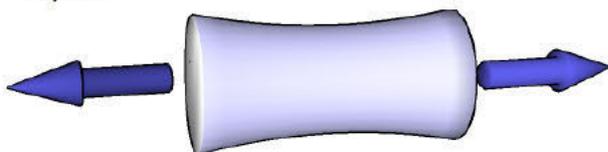
Esfuerzo: tensión interna que experimentan todos los cuerpos sometidos a la acción de una o varias fuerzas.

Imagínate que tu compañero te tira de un dedo de la mano. Los huesos de tu mano conformarían la estructura, mientras que la fuerza externa que hace tu compañero sería la carga. El esfuerzo sería la tensión que notas en el dedo, que te causa cierta molestia. Si tu compañero hiciese mucha fuerza, el esfuerzo que sufrirías podría llegar a doblarte, luxarte o romperte el dedo.

2.2. TIPOS DE ESFUERZO

Los tipos de esfuerzo más importantes, que veremos también en el tema de los materiales son: tracción, compresión, flexión, torsión, cizalla y pandeo.

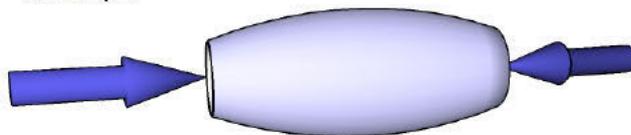
- **Tracción:** la fuerza tiende a **alargar** el objeto. Es el esfuerzo que aparece cuando las cargas actúan en la misma dirección y sentidos opuestos hacia el exterior del objeto.



Ejemplos: cable del que cuelga un peso, tirantes y tensores de un puente, cadenas de un columpio, cable de una tirolina....

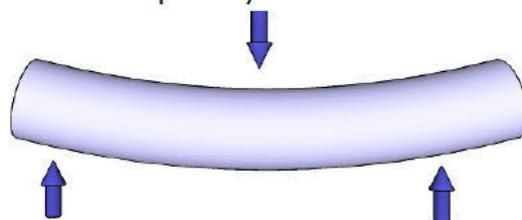
- **COMPRESIÓN:** la fuerza tiende a **acortar** el objeto. Este esfuerzo aparece cuando las cargas actúan en la

misma dirección y sentidos opuestos hacia el interior de un cuerpo.



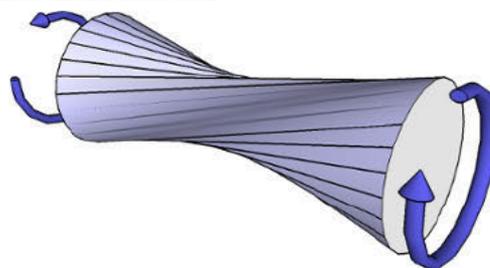
Ejemplos: tus piernas al estar de pie, patas de una mesa o silla, dovelas de un arco, contrafuertes, arbotantes...

- **FLEXIÓN:** la fuerza tiende a **curvar** o **doblar** el objeto. Es el esfuerzo al que se ve sometido un elemento de una estructura cuando sobre él actúan dos fuerzas separadas cierta distancia la una de la otra, y a una tercera fuerza entre ellas de sentido contrario. Es por lo tanto una combinación del esfuerzo de compresión y tracción, ya que, al doblarse, una parte de la estructura estará sometida a compresión y otra a tracción.



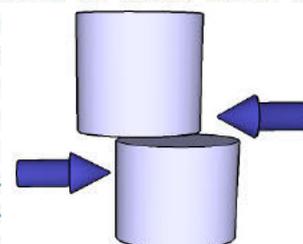
Ejemplos: los estantes de una estantería al colocar libros sobre el, el tablero de un puente, vigas y dinteles de un edificio...

- **TORSIÓN:** la fuerza tiende a **retorcer** el objeto, de manera que las secciones contiguas del objeto se deslizan unas sobre otras.



Ejemplos: ejes de un motor, de una rueda, llave al girar la cerradura, punta del destornillador al girarlo, manivela...

- **CIZALLA O CORTADURA:** la fuerza tiende a **cortar** el objeto. Se produce cuando, en un punto cercano, se aplican fuerzas opuestas en sentido y perpendiculares al elemento. De esa manera una parte de la estructura tiende a deslizarse sobre la otra, haciendo que las partículas del material tiendan a desplazarse las unas sobre las otras.



Ejemplos: las tijeras al cortar, puntos de unión de vigas con pilares, mina del lápiz al escribir, dientes de una sierra al cortar madera, clavo o alcayata del que cuelga

un peso...

- **Pandeo:** esfuerzo que aparece sobre elementos esbeltos (con alta relación longitud/sección) sometidos a compresión, en el que aparecen desplazamientos transversales a la dirección de la compresión. Se considera como una esfuerzo de flexión resultante de una compresión. Puedes observarlo fácilmente si comprimes una regla graduada, un espagueti, o una pajita por sus extremos.



Ejemplos: chapas metálicas, barras, muelles, columnas, y pilares largos sometidos a compresión..

III. PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS ESTRUCTURAS

Para que una estructura realice correctamente sus funciones ha de ser: **Resistente, rígida y estable**

3.1. RESISTENCIA

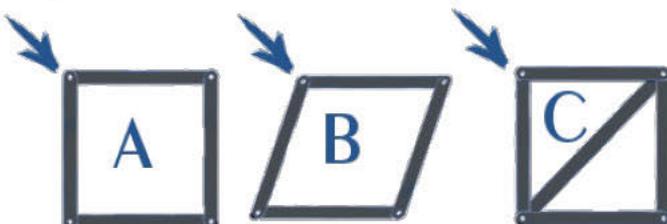
La resistencia mecánica de una estructura es la capacidad de una estructura de soportar las cargas a las que se ve sometida sin romperse. Dicha resistencia de la estructura depende de

- **Tipo de material:** acero, hormigón, madera, papel...
- **Cantidad de material.**
- **Forma de la estructura,**

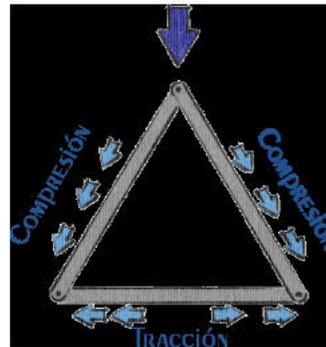
3.2. RIGIDEZ

La rigidez es la capacidad de una estructura de soportar las cargas a las que se ve sometida sin **deformarse**, i.e. sin cambiar de forma. Está íntimamente relacionada con **la forma** de la estructura. Así, por ejemplo, cuanto más canto tenga una viga mayor será su rigidez.

¿Te has fijado alguna vez en la forma en que se disponen las barras de una grúa, una torre de alta tensión....? Una estructura con forma de polígono distinta al triángulo (por ejemplo un cuadrado, **figura A**) se deformará al aplicarle una fuerza (**figura B**) sobre sus vértices. ¿pasará lo mismo en la **figura C**?



El triángulo es el único polígono que no se deforma cuando se le aplica una fuerza en sus vértices.



Por consiguiente, se puede obtener estructuras rígidas haciendo que los elementos estructurales formen triángulos indeformables (**figura C**), constituyendo estructuras planas o reticulares. Esta técnica, denominada triangulación, está asociada a aquellas estructuras de barras o perfiles tales como cerchas o armaduras..

3.3. ESTABILIDAD

La estabilidad es la capacidad de una estructura de, al verse sometida a cargas, mantenerse en su posición original sin desmoronarse o caerse; es decir, de no variar su posición.

Hay varios modos de asegurar la estabilidad de una estructura, dos de los cuales parecen obvios: **anclar la estructura a un elemento fijo** (por ejemplo el suelo o una pared) o **colocarle tirantes**.

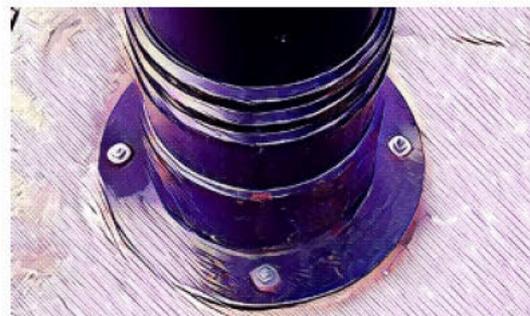


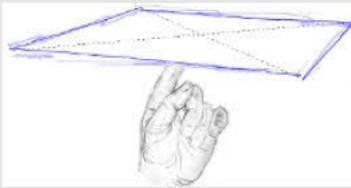
Fig 3: Sujeción de una farola: Una manera de asegurar la estabilidad de los objetos es el anclarla al suelo.

Además, la estabilidad está relacionada claramente con el **centro de gravedad** (o punto virtual en el que podemos representar todo el peso del objeto).

CENTRO DE GRAVEDAD

El **centro de gravedad** de un objeto es el punto teórico en el que consideramos que está concentrada toda su masa para poder estudiarlo, de forma simplificada, como un objeto sin dimensiones (un punto). Es el punto en el que se aplicaría la fuerza de gravedad, como resultante de las fuerzas de gravedad que actúan sobre las distintas partículas que componen el cuerpo.

Por ejemplo, seguro que alguna vez has intentado mantener una escoba en equilibrio sobre los dedos o la palma de la mano. Para conseguirlo, debes ir realizando ligeros movimientos de modo que el centro de gravedad, siempre esté en la perpendicular al suelo, de modo que la escoba no caiga. Igual ocurre con una carpeta, una hoja, la regla graduada, un lápiz... etc.

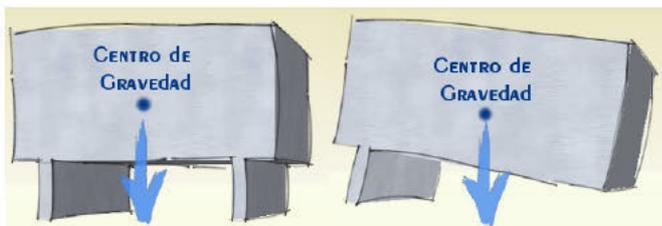


En general se cumplen las siguientes normas:

- **Cuanto mayor sea la base sobre la que se apoya, mayor será la estabilidad de la estructura.**
- **Cuanto más abajo se sitúe el centro de gravedad más estable será la estructura.** De ese modo se concentra casi toda la masa de la estructura cerca de la base.



- **El centro de gravedad debe situarse dentro de la base.** Sino es así, la estructura será inestable, y por lo tanto, automáticamente volcará.



La vertical del centro de gravedad cae dentro de la base (no vuelca) La vertical del centro de gravedad cae fuera de la base (vuelca)



Fig 4: Torres Kio (Madrid). ¿Por qué se mantienen en pié?

Resumiendo, podremos aumentar la estabilidad de los objetos de diferentes formas:

- Anclándola a un elemento fijo
- Colocándole tirantes
- Bajando su centro de gravedad.
- Ampliando su base.

IV. ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS

Como ya hemos visto, la misión que ha de cumplir cualquier estructura es la de soportar las cargas a las que está sometida, sin romperse, volcarse ni deformarse en exceso. Para ello existen una serie de elementos que forman parte de la mayoría de las estructuras y que son los encargados de darle la suficiente resistencia, rigidez y estabilidad. Los principales son:

- **Cimentación:** es el conjunto de elementos encargados de soportar y repartir en el suelo todo el peso de la estructura, impidiendo que ésta sufra movimientos importantes. Los cimientos proporcionan una superficie a la que se anclan todos los demás elementos de la estructura de los edificios. Dicha cimentación dependerá del tipo de terreno sobre el que se asienta la estructura, así como del peso y del tipo de obra.
- **Zapata:** Cubo de hormigón que aumenta la superficie de apoyo de un pilar. Se emplea en cimentaciones cerca de la superficie del suelo, cuando el terreno es resistente (capaz de soportar pesos elevados).
- **Pilote:** Elemento estructural alargado, normalmente de hormigón armado y sección circular, incrustado en el terreno para transmitir las cargas de un edificio. Se usa cuando no es posible la cimentación superficial, en

terrenos blandos, ya sea para transmitir las cargas de la estructura a través de suelos poco firmes hasta estratos más profundos y resistentes, o para repartir las cargas y, así, soportar la estructura con seguridad.

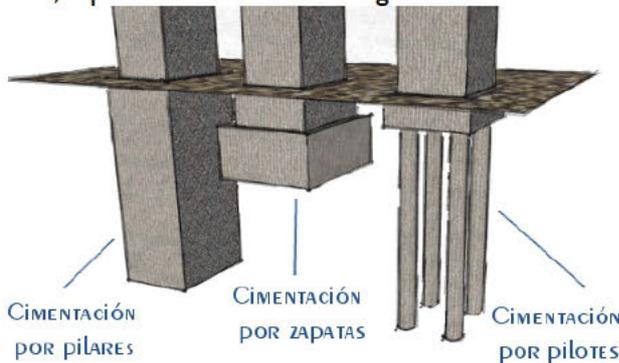


Fig 5: Diferentes tipos de cimentación

- **Pilar:** Elemento constructivo en forma de barra que se apoya verticalmente, cuya función es la de soportar el peso de otras partes de la estructura y transmitirla a la cimentación. Los pilares, tienen sección poligonal (cuadrada, rectangular...). Cuando la sección es más o menos circular recibe el nombre de **columna**.
- **Viga:** Elemento estructural con forma de barra que se coloca horizontalmente y se apoya sobre columnas y pilares. Al igual que en el caso de **dinteles**, y **viguetas**, en las vigas los principales esfuerzos (flexión) se dan en su parte central.
- **Vigueta:** Elemento constructivo con forma de barra que se coloca horizontalmente y se apoya sobre las vigas.



Fig 6: Zapata, pilar, viga y vigueta.

- **Dintel:** Elemento estructural horizontal, con forma de viga maciza que se apoya horizontalmente sobre dos soportes verticales (jambas) y que cierra huecos tales como ventanas y puertas.



Fig 7: Crómlech de Stonehenge (Gran Bretaña).

- **Forjado:** Elemento horizontal (o inclinado, en cubiertas), que forma parte de la estructura horizontal de las diferentes plantas de un edificio. Su función es transmitir las cargas verticales y horizontales hacia otros elementos estructurales (viguetas, vigas, pilares...) que, a su vez, las transmitirán hacia el suelo. Generalmente están formados por **vigas** y **viguetas** de hormigón armado, **bovedillas** y una **capa de compresión** de hormigón ligeramente armada.



Fig 8: Forjado

- **Tirantes:** Elemento constructivo que está sometido principalmente a esfuerzos de tracción.



Fig 9: Puente colgante de Brooklyn (Nueva York, EEUU)

- **Perfiles:** barras, normalmente metálicas, de distintas secciones que se emplean para conseguir estructuras más ligeras que soportan grandes pesos con poca cantidad de material.



Fig 10: Secciones de diferentes perfiles.

- **Cerchas:** composición de barras rectas unidas entre sí en sus extremos formando triángulos planos o pirámides tridimensionales para constituir un armazón rígido reticular. Se diseñan de modo que sean capaces de soportar cargas aplicadas sobre las uniones (llamadas nodos). **Todos los elementos trabajan a tracción o compresión** sin la presencia de flexión y cizalla. Son una

de las principales estructuras usadas en ingeniería, por su rigidez y poco peso.

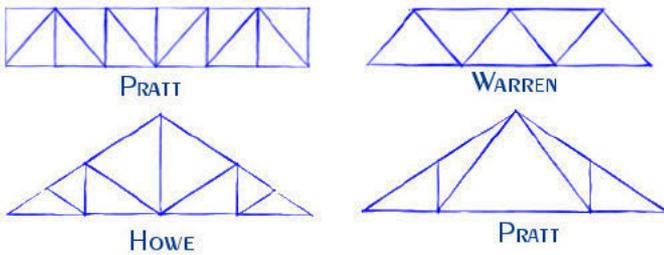


Fig 11: Algunos tipos de cerchas



Fig 12: Cubierta del Pabellón de Les Machines de l'île (Nantes, Francia)

■ **Arco:** Elemento estructural de forma curvada, que salva el espacio entre dos pilares o muros. Es muy útil para salvar espacios relativamente grandes con piezas pequeñas en forma de cuña llamadas **dovelas**. La moldura sobre los que se apoya el arco se denomina **imposta**.

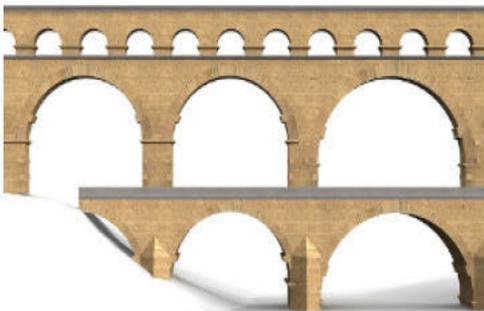


Fig 13: Arcos de medio punto del Pont du Gard (Remoulins, Francia).

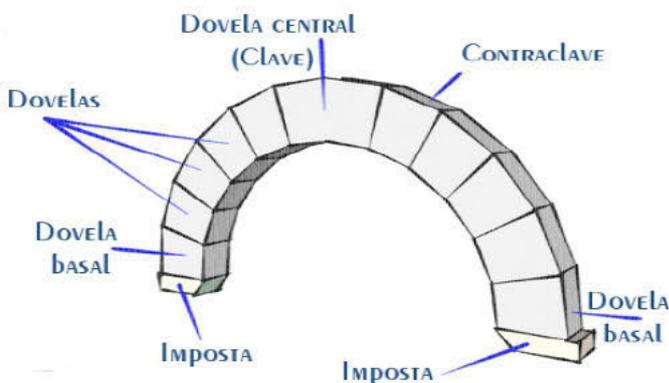
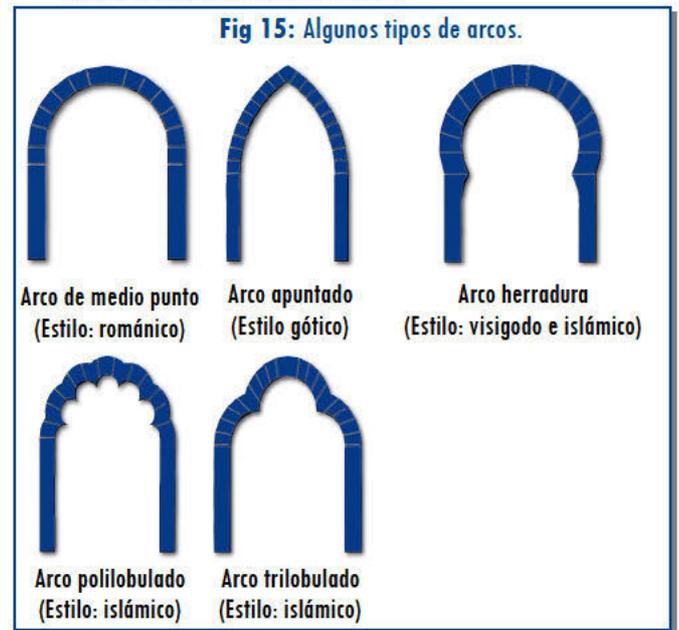


Fig 14: Elementos constructivos de un arco

El arco, **trabaja siempre a compresión**, transmitiendo las cargas que recibe a los puntos de apoyo perpendicularmente y hacia el exterior.

Los arcos pueden adoptar formas curvas diversas, dando origen a múltiples tipos de arco.



■ **Bóveda:** elemento arquitectónico de forma curva, que sirve para cubrir el espacio comprendido entre dos muros o una serie de pilares alineados. Puede formarse por la rotación de un arco (cúpula), por su desplazamiento a lo largo de un eje o por la intersección de varios arcos o bóvedas.

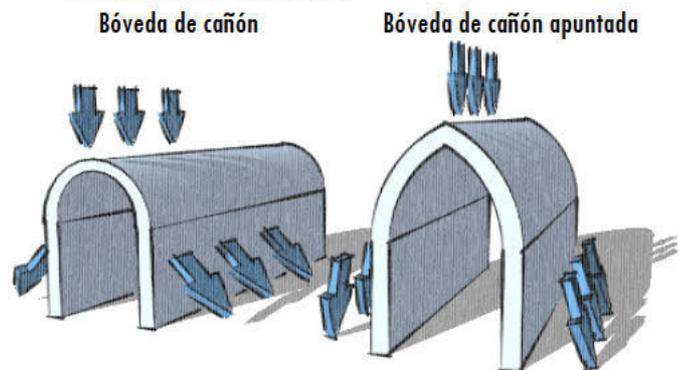


Fig 16 Cargas y tensiones en una bóveda. Puede verse que el empuje lateral es mucho menor en el caso de la bóveda apuntada.

■ **Cúpula o bóveda esférica:** elemento arquitectónico que se utiliza para cubrir un espacio de planta circular, cuadrada, poligonal o elíptica.



Fig 17: Cúpula de la Catedral de Saint Paul (Londres)



Fig 18: Cúpula de Santa Maria del Fiore (Florencia, Italia)

- **Contrafuerte:** elemento constructivo vertical usado para transmitir las cargas transversales de bóvedas y arcos a la cimentación. Pueden encontrarse adosados a un muro o separados de estos.



Fig 19: Sistema de arbotante-contrafuerte de la colegiata de Santa María la Real en Santiago.

- **Arbotante:** elemento estructural exterior con forma de medio arco que recoge la presión en el arranque de la bóveda y la transmite a un contrafuerte. Muy usados en la arquitectura gótica, normalmente incluyen un canal que conduce el agua de lluvia de la cubierta a las gárgolas.
- **Pináculo:** Remate piramidal o cónico de los contrafuertes que sirve como contrapeso al empuje del arbotante sobre el contrafuerte. Por consiguiente, los pináculos refuerzan el contrafuerte y le ayudan a recoger el peso de las bóvedas. El empleo de pináculos ricamente decorados en las edificaciones góticas acentuaba la sensación de verticalidad de los templos.

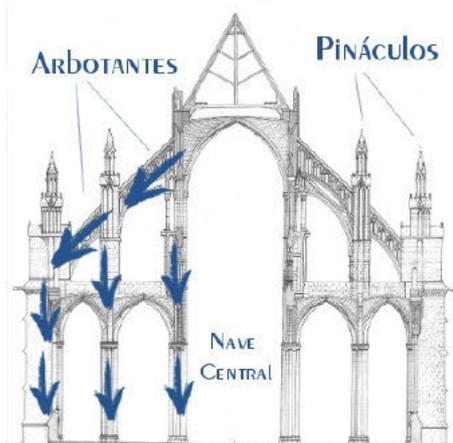


Fig 20: Sección de la Catedral de Amiens (Francia). Función de arbotantes y contrafuertes.

V. TIPOS DE ESTRUCTURAS ARTIFICIALES

A lo largo de la historia se han empleado diferentes tipos de estructuras para las edificaciones, desde las chozas de pieles, madera y piedras, hasta los castillos hinchables y cúpulas geodésicas, pasando por los acueductos, castillos, grandes catedrales, puentes colgantes...

5.1. ESTRUCTURAS MASIVAS Y ADINTELADAS

Son estructuras muy pesadas y macizas, construidas con elementos muy gruesos, anchos y resistentes. Las primeras

construcciones realizadas por el hombre se obtuvieron excavando en la roca o acumulando materiales sin dejar apenas huecos. En ellas se emplearon dinteles de piedra o madera para las ventanas o pasos libres. Es el caso de las pirámides mayas y egipcias, dólmenes, templos griegos, iglesias excavadas en la roca, presas ...



Fig 21: Templo maya de Kukulkán, en Chichén Itzá (México)



Fig 22: Templo griego en Selinunte (Sicilia, Italia)



Fig 23: Puerta de Brandeburgo (Berlín, Alemania)

5.2. ESTRUCTURAS ABOVEDADAS

El descubrimiento posterior del arco y la bóveda permitió cubrir cada vez espacios mayores, aumentando los huecos de las estructuras y su altura. Algunos ejemplos de estructuras abovedadas incluyen iglesias, acueductos, túneles, anfiteatros romanos, panteones, mezquitas...

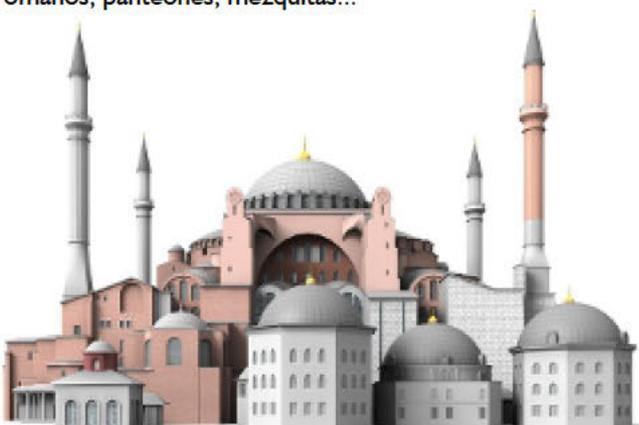
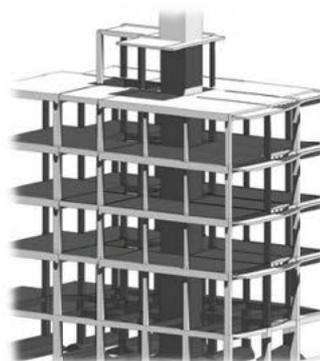


Fig 24: Mezquita de Santa Sofia (Estambul, Turquía)

5.3. ESTRUCTURAS ENTRAMADAS

Estructuras constituidas por barras unidas de manera rígida formando un emparrillado, donde cada elemento de la estructura tiene un cometido diferente. En ellas se emplean pilares, vigas, viguetas... como principales elementos de sostén.



Su empleo permitió una gran disminución de peso respecto a las estructuras masivas o abovedadas, lo que se tradujo en la posibilidad de aumentar la altura de las construcciones. Son las estructuras empleadas en los edificios de bloques de pisos de hoy en día.



Fig 25: Templo budista de Byodo-in (Uji, Japón).



Fig 26: Casa de entramado de madera (Monasterio de Maulbronn, Alemania)

5.4. ESTRUCTURAS TRIANGULADAS

Son estructuras planas o reticulares formadas por perfiles, mediante la repetición de formas triangulares. Se caracterizan por su gran rigidez y ligereza. Habitualmente están hechas de acero, por su gran resistencia a la compresión y a la tracción, y gran variedad de barras y perfiles. Son ejemplos de estructuras trianguladas: las cerchas, vigas trianguladas, grúas, andamios, norias, ciertos puentes, torretas de alta tensión y de telefonía...



Fig 27: Las grúas son estructuras realizadas a base de una retícula espacial de perfiles triangulados.



Fig 28: Detalle del London Eye (Londres, Reino Unido)

5.5. ESTRUCTURAS COLGANTES O ATIRANTADAS

En este caso las estructuras emplean cables, llamados tirantes (cuando se pueden regular estirándolos o acortándolos se llaman tensores) de los que *cuelgan* gran parte de la estructura.

Algunos ejemplos de este tipo de estructuras incluyen carpas, puentes colgantes o atirantados, cubiertas de pabellones, torres...



Fig 29: The O2 Arena (Londres, Reino Unido)

5.6. ESTRUCTURAS LAMINARES



Están constituidas por láminas finas de metal, plástico o materiales compuestos que se emplean como carcasas en todo tipo de objetos y en cubiertas onduladas que envuelven y protegen. A

pesar de su poco espesor ofrecen una gran resistencia debido a su curvatura (*actúan como bóvedas*).

La carrocería del coche, las carcasas de equipos electrónicos, las cubiertas de ciertos edificios, los cascos de embarcaciones, juguetes de playa como las palas, y cubos son ejemplos de estructuras laminadas.

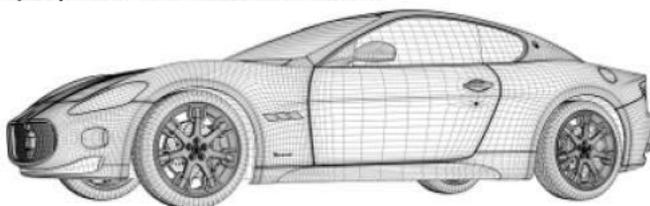


Fig 30: El chasis de los coches es un ejemplo de estructura laminar.



Fig 31: Cubierta del Palacio de las Artes Reina Sofía (Valencia).

5.7. ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS



Consisten en una delgada pared de material compuesto, llamada membrana, que contienen aire a presión en su interior. Este aire es el que sujeta la propia estructura

sometiendo a la membrana a esfuerzos de tracción.

Las construcciones neumáticas pueden estar *hinchadas* o *soportadas* por el aire a presión. En ambos casos, este tipo de estructuras poseen un peso estructural extremadamente bajo y el tiempo de montaje/desmontaje es muy corto, lo que las hace fáciles de trasladar y de almacenar después de su uso.

Así se emplean en embarcaciones neumáticas, ruedas de vehículos, atracciones infantiles, colchones de aire, carpas, cubiertas de escenarios....

5.8. ESTRUCTURAS GEODÉSICAS

Son estructuras trianguladas tridimensionales que combinan las propiedades de las bóvedas y de las estructuras de barra. En las **cúpulas geodésicas**, los triángulos forman elementos hexagonales y pentagonales, cuyos vértices deben coincidir, todos, con la superficie de una esfera (si los vértices no quedan en la superficie, la cúpula ya no se considera geodésica).

Cuanto más grande es una cúpula geodésica, más resistente se vuelve. Es la única forma de estructura que puede cubrir grandes extensiones sin la necesidad de soportes interiores, tales como pilares.



Fig 32: Cúpula geodésica: "Montreal Biosphère".