



EVALUACIÓN **N**o **D**ESTRUCTIVA

Rocío Ruiz Sánchez
Lorena Marín Hernández
Prof: Guillermo Rus Carlborg

END

E VALUACIÓN **N** O **D** ESTRUCTIVA

1. Introducción

En la actualidad la Fibra de Carbono (CFRP) se utiliza en Construcción Civil como refuerzos estructurales así como en edificación para refuerzos, reparaciones y rehabilitaciones. Destacan:

Construcción civil	Edificación
<ul style="list-style-type: none">- Puentes de carretera- Puentes peatonales- Seismic Retrofit Columns- Reparación y rehabilitación de puentes- Muros de contención, Pavimentos de FRP, Capas de asfalto rodado PPR- Otros- Plataformas petrolíferas, puertos, canales , pilas y mejora de construcciones bajo tierra	<ul style="list-style-type: none">- Refuerzos- Reparación- Rehabilitación

También destaca su utilización en aplicaciones aeroespaciales y automovilísticas.

La objetivo inicial consistía en poder enlazar los caminos andados en los ámbitos de la edificación en arquitectura y las líneas de investigación abierta en materiales compuestos avanzados, en concreto la Fibra de Carbono (CFRP).

Ante estos dos caminos se nos planteó buscar “un puente” que conectara estos dos caminos y permitiera la realidad del uso de CFRP en edificación.

Los pasos seguidos a lo largo de este trabajo de investigación han sido considerados como una evolución desde la necesidad del hombre a través de los recursos naturales. Esto sumado a las nuevas tecnologías abre nuevas posibilidades a otras métodos de alcanzar la forma, de ahí el estudio realizado de CFRP para conocer sus propiedades, características mecánicas, cualidades y ventajas frente al uso de materiales convencionales utilizados hasta el día de hoy.

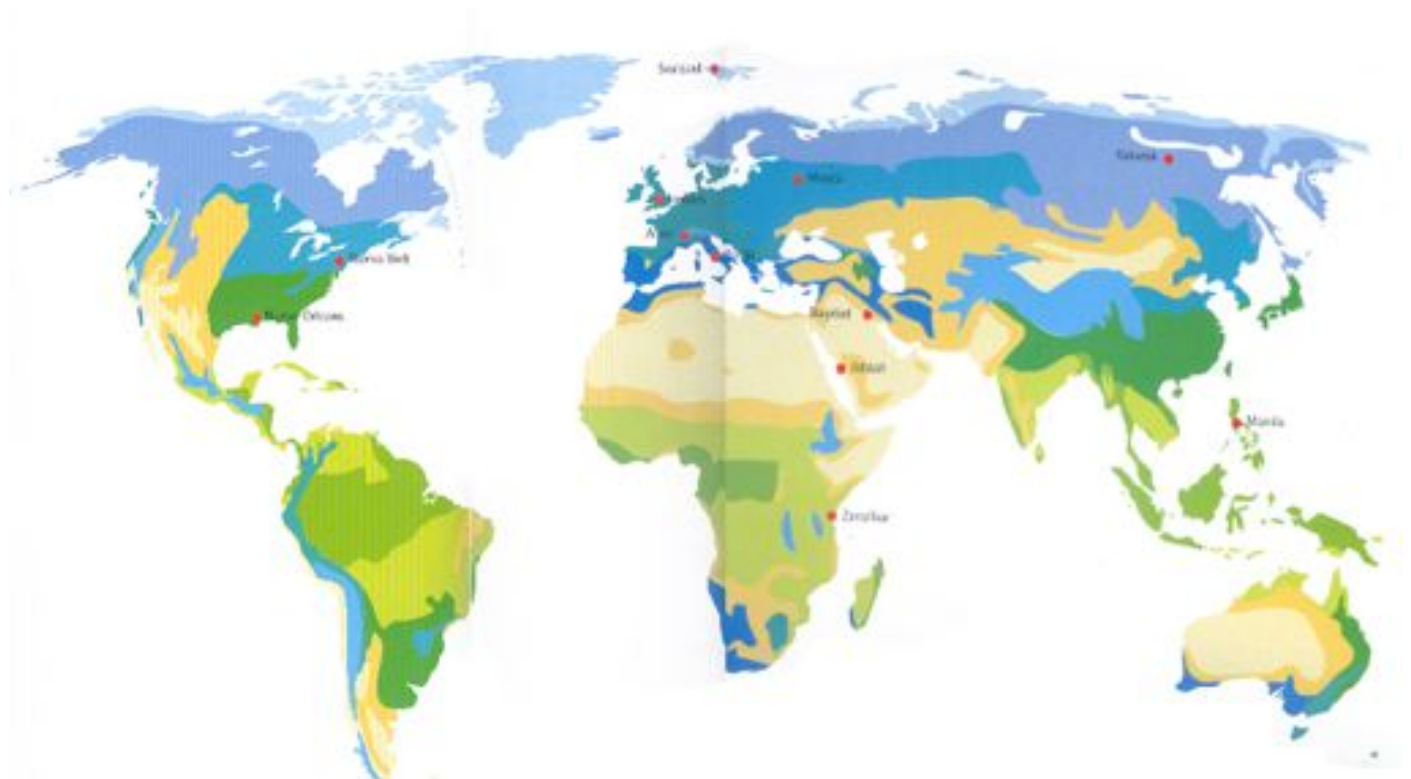
El desconocimiento ante este nuevo material y sus aplicaciones específicas en estructuras , sobre todo en el campo de la arquitectura, sugiere este primer acercamiento por nuestra parte. A lo largo del concurso del Muelle de levante en Huelva se ha realizado un ensayo de las posibilidades y aplicación concreta.

2. Arquitectura vernacular

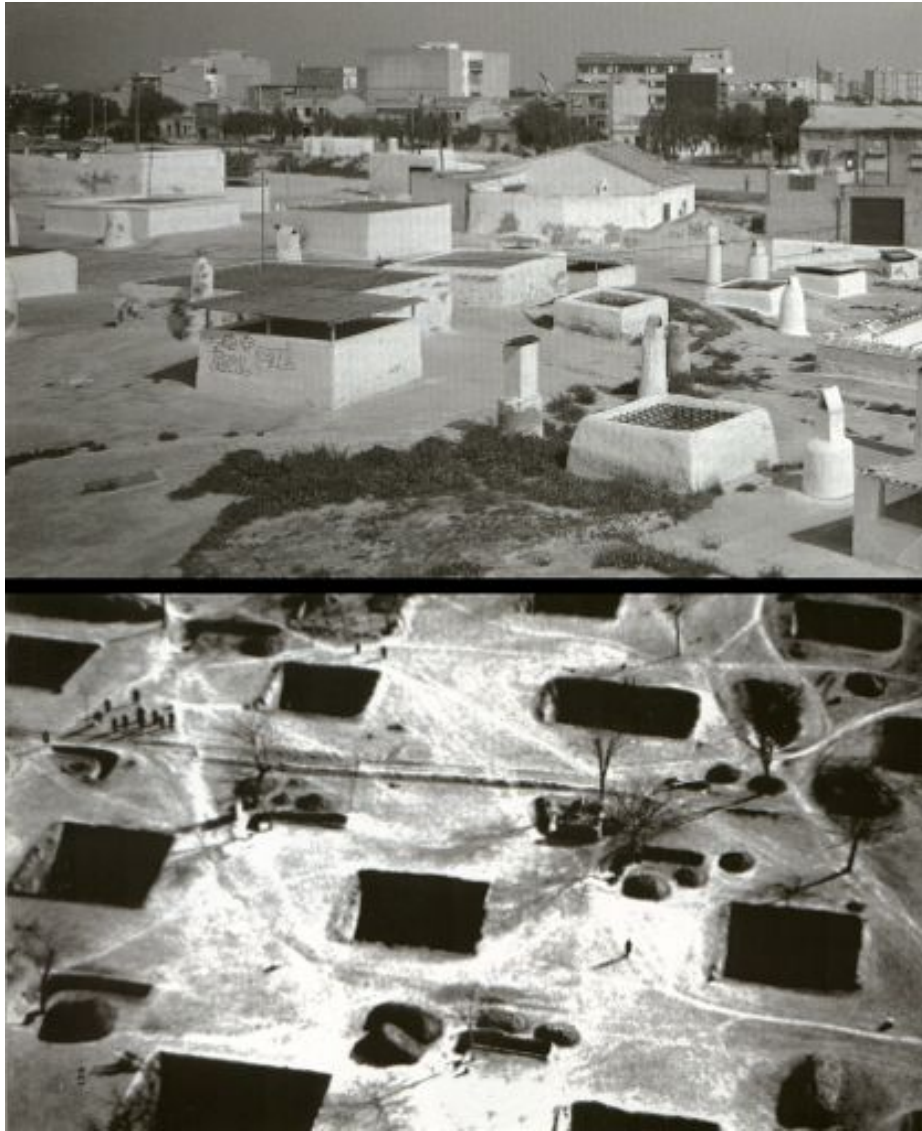
Las zonas climáticas de la tierra. Entre el cielo y el infierno. Las regiones climáticas de la tierra ofrecen al ser humano unos espacios vitales muy diversos, del infierno de las temperaturas extremadamente frías o cálidas hasta el paradisíaco clima de la sabana o del Mediterráneo.

Fundamentalmente se pueden diferenciar las siguientes zonas climáticas en la tierra.

- Ártico
- Alta montaña
- Clima marino
- Clima subtropical
- Sabana
- Desierto
- Tundra / taiga
- Clima continental con veranos frescos o cálidos
- Clima mediterráneo
- Selva
- Estepa



En todas ellas, el hombre, desde los inicios, fuego->vestido->morada ha empleado los medios naturales disponibles a su alcance para protegerse del medio, hablando entonces de una arquitectura de lo mínimo.



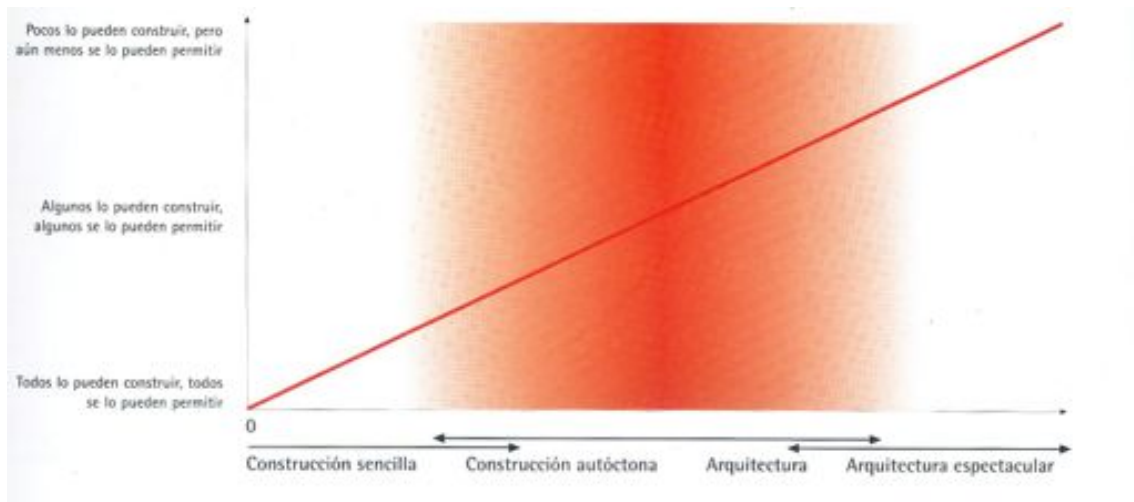
Frei Otto

La arquitectura primitiva era una arquitectura de lo necesario, no usaba nada en exceso, no importa que se tratara de piedra, arcilla, cañas o madera, las pieles o el pelo de los animales. Incluso en la pobreza puede ser muy bella, y es buena en sentido ético.

La arquitectura mínima primitiva puede ser estructura y ornamento a la vez. La decoración tiene sentido si es esencial.

En este sentido, se puede afirmar que la buena arquitectura es más importante que la arquitectura bella, y la arquitectura bella no tiene porque ser necesariamente buena.

Se han levantado demasiados edificios, desperdiciando espacio, terreno, masa y energía. Los edificios son un ejercicio de poder (cambia el medio existente, empleando materiales y energía), aunque no se tenga la intención de hacerlo.



Nuestra época exige edificios más ligeros, con más ahorro energético, más movilidad y adaptabilidad, es decir, edificios más naturales, sin dejar de lado la garantía y seguridad. Esto conlleva desarrollar construcciones más ligeras, una movilidad y cambios nuevos. Se está orientando hacia una comprensión de la naturaleza orientada a formas de alto rendimiento que aúna puntos de vista estéticos y éticos.

La arquitectura de mañana será de nuevo una arquitectura de lo mínimo, una arquitectura resultado de procesos de autoformación y auto-optimización sugeridos por los seres humanos. Debemos verlo como parte del nuevo sistema ecológico en desarrollo.

Construir significa poner cosas en unión (piezas y elementos), edificarlas. Las construcciones naturales no son para nosotros sólo cualquier clase de objetos de diversidad infinitamente variable. Estamos buscando los tipos de construcciones que muestran con claridad aquellos procesos naturales que crean objetos. Buscamos lo esencial.

En este punto queremos hacer referencia al texto de Joan Margarit, poeta y arquitecto profesor de estructuras de la Escuela Politécnica de Barcelona. Sobre la reflexión de "concisión" y "exactitud" en arquitectura.

Cálculo de Estructuras, Joan Margarit

Desde la poesía.....

El autor nos adentra en el mundo de la literatura, la poesía, que como arte nace de una necesidad del hombre de expresarse empleando como instrumento "la palabra". Nos acerca su visión sobre la poesía, qué es y para que sirve, reflexionando sobre lo que él considera "buena poesía".

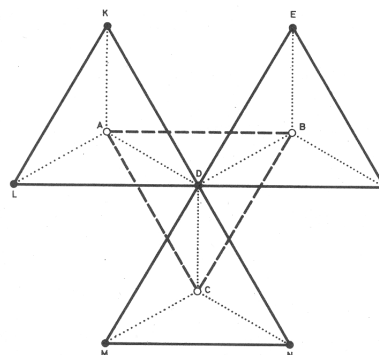


Fig. 2.25

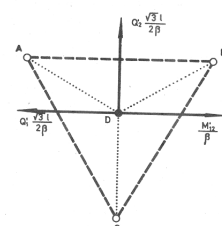


Fig. 2.26

Arquitecto y poeta, ambas artes van cogidas de la mano en tanto que parten de una condición social, una necesidad de expresión del hombre, transmitir, comunicar. La literatura (poesía) se apoya en el instrumento de la palabra, la arquitectura lo hace en las artes plásticas, las formas, los colores,...y la ciencia. No es de extrañar, por tanto, que para adentrarnos en su concepción de buena poesía se sirva de "la arquitectura" y su terminología para tratar de transmitirnos mediante las palabras lo que ha de identificar un buen poema. Podría emplearse "arquitectura" en lugar de poesía y sus textos seguirían manteniendo el mismo sentido y comprensión.

..... a la arquitectura.

Concisión y exactitud como identidad de la "buena arquitectura". Arquitectura entendida como arte y ciencia, como fusión de factores teóricos y prácticos, modo de proyectar y materialización real,..... distintas partes que podrían distanciarse para analizarlas pero que no podrían funcionar por sí solas ni como una sumatoria, perdería todo su valor si no se considerara la "totalidad".

CONCISIÓN Y EXACTITUD

La *concisión* es definida como "precisión y economía de medios para expresar un concepto con exactitud", es decir, *concisión* es *ciencia* en arquitectura, conveniencia y economía en los medios naturales sobre los que se apoya la arquitectura. En lenguaje puramente arquitectónico es la parte justa y precisa determinada por la parte científica de la arquitectura..... *Es conseguir la sección más resistente con el mínimo de acero u hormigón, en poesía, decir el máximo con el mínimo de palabras** es un concepto preciso, en su justa medida, en tanto que parte de una rama de la ciencia que se basa en fórmulas constantes y absolutas, asegurando el equilibrio y la estabilidad. Si pudiera añadirse o eliminarse alguno implicaría que no se encontraba en la justa medida.

La *exactitud* entendida como la veracidad de la arquitectura. La concisión de la que antes hablábamos, "la justa medida en medios" no lleva implícito la exactitud del mismo, es decir, la veracidad de lo que se intenta transmitir. La *exactitud* es lo que eleva a *arte* la arquitectura. Arquitectura que transmita por sí misma, que nos descubra y nos sorprenda, desprovista de todo aquello que intenta falsear o enmascarar, despojar de todo significado que añadido no aporta nada. En estos términos se consigue buena arquitectura, lo complejo es precisamente este paso, dar el poder a la arquitectura de transmitir de forma concisa y exacta, que nos cuente sólo aquello que es veraz, sin significados añadidos, *sin entretenimientos*.

Al arquitecto, al ingeniero, a todos los responsables

Debemos encontrar el edificio biotopo, la ciudad como sistema ecológico, el camino hacia la edificación colectiva mínima, hacia el edificio de la energía mínima, que se hace uno con el paisaje y es al mismo tiempo arquitectura.

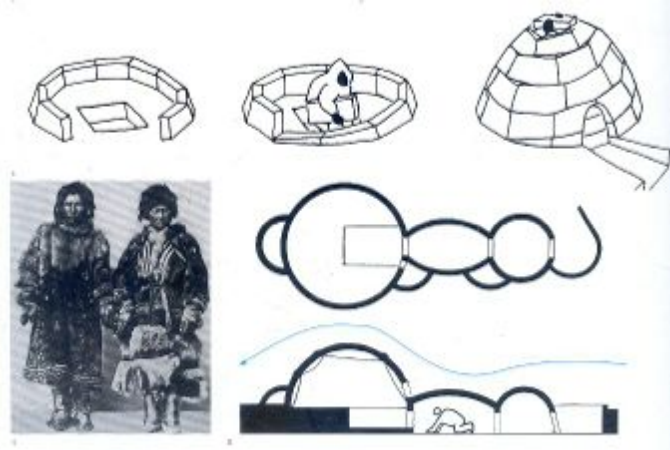
Tarea difícil. Pero en edificación, la búsqueda de lo natural, lo conciso y lo exacto, no restringe las posibilidades, las expande. Los arquitectos van en el camino de la invención, el diseño, del desarrollo de objetos técnicos. Este camino puede usarse para

comprobar si los productos obtenidos suponen mayor ahorro energético, si son más ligeros, más flexibles y accesibles para los seres humanos. Este camino puede llevarnos a obtener productos con un gran rendimiento técnico y que, si se considera su componente estético, pueden representar también una conexión con el arte de la edificación.

2.1. Zonas climáticas. Construcciones vernáculas energéticamente conscientes

a. Ártico. Clima polar. IGLÚ

Construir una vivienda en el ártico sin ayuda de la técnica que asegure la supervivencia durante el invierno es un desafío incluso para el mejor ingeniero. El iglú es la solución perfecta. Los bloques de hielo utilizados para la construcción de un iglú pueden llegar a tener hasta 1 m de longitud, 50 cm de altura y 20 cm de anchura.



El maestro constructor esquimal traza un círculo en el suelo, con un diámetro de 5 m y coloca la primera hilada. Los siguientes bloques están sesgados, para que la cúpula se eleve en una espiral continua. La apertura de la puerta se realiza una vez finalizada la cúpula. Se pueden unir varios entre sí.

El aislamiento se consigue revistiendo el interior con pieles de animales. Esto unido al calor emitido por las lámparas de aceite de ballena y por los seres humanos, un iglú puede llegar a tener una temperatura interior de hasta 5°C, con temperatura exterior de -40°C.

b. Tundra / taiga. Clima ártico. THULE / YURTA

Las moradas de los nómadas. Ante la escasez de materiales de construcción en la estepa, sus habitantes recurren a todo aquello que les pueda ser de utilidad. Excavan sus moradas en el terreno o montan tiendas en la épocas de primavera y otoño, cubriéndolas con pieles cosidas, de caribú o de foca.



Construcción en Thule

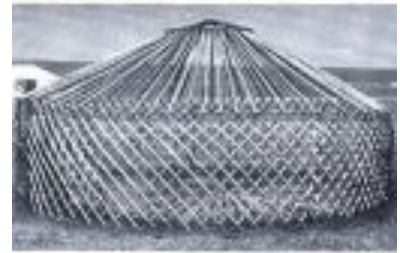
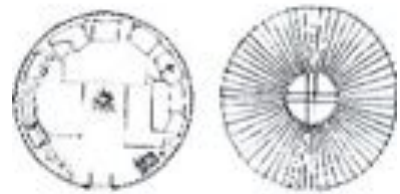
En esta zona se construyen las casas enterradas y la entrada al recinto del hogar se encuentra situada en la cota más baja por razones de calefacción. Abunda la madera como material para la construcción, por lo que las casas están armadas con troncos en su perímetro y cubiertas con capas de césped.

La ventilación se consigue con una abertura en la cubierta formada por vértebras dorsales huecas de una ballena. El kaschim sirve de lugar de reunión. Está construida por una envoltura de tabloncillos y montantes regularmente colocados y cubierta con césped.

La yurta

Capacidad de adaptación en grandes áreas del mundo. Todas las yurtas se basan en la misma estructura, aunque el nombre y otros detalles pueden variar de un país a otro. Forma en planta circular y pared exterior con armazón de sauce. Son construcciones ligeras y adaptables. Para poder transportarse, el armazón puede estirarse y contraerse.

Dimensiones generales de una yurta son 5 m de diámetro, y el armazón lo constituyen 30 varillas de sauce atadas al bastidor. La corona de la yurta se eleva por encima de los mástiles y termina en una abertura por la que se escapa el humo. Este armazón se cubre con fieltro o esteras de caña, y algunas veces se decora el exterior.



c. Alta montaña. Clima frío, húmedo o seco. GRANERO

En las montañas las casas deben adaptarse al terreno, amoldarse a él o elevarse sobre él para evitar la entrada de humedad. En la montaña el material de construcción es escaso y el transporte se hace difícil, por lo que una de las características de las casas debe ser su durabilidad.

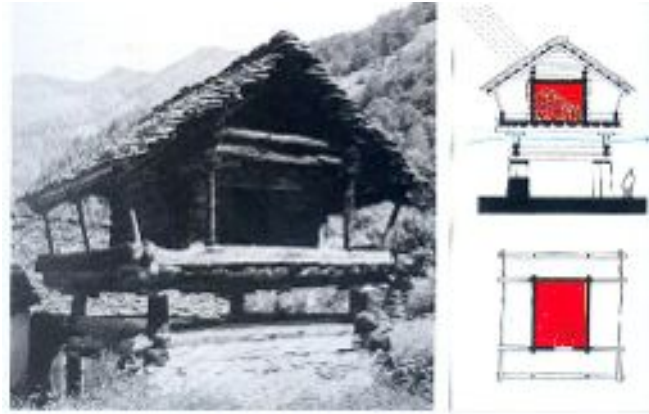
Se construyen casas energéticamente eficientes, de madera, piedra y paja.



Están orientadas al sur para poder asegurar al máximo asoleamiento. También una orientación sureste facilita la optimización de la energía solar durante los largos inviernos. La cubierta se suele prolongar hasta el suelo en el lado opuesto al viento.

En los Alpes los graneros suelen ser habitáculos muy pequeños de un solo espacio adaptados a las necesidades de almacenaje. Sus medidas de 2.2 x 2.6 m se mantiene en pie desde 1561.

Los puntos más relevantes que deben tenerse en cuenta en la construcción de un granero son la orientación, la ventilación y protección contra los ladrones.



d. Veranos fríos o calurosos. Clima continental. CASAS DE TRONCOS/TIERRA

Rusia, Bielorrusia y Canadá. Casas preparadas para veranos fríos. Los materiales de construcción disponibles son la piedra y la madera, utilizándose preferentemente ésta última. La madera es la mayor fuente de energía, y de este modo, se aprovecha al 100% el potencial de esta biomasa. Alta resistencia al flujo de calor, lo que implica que una casa hecha de madera se calienta rápidamente. La madera conlleva ventajas energéticas como material de construcción.

En Rusia, los muros de troncos son anchos y macizos, empleándose troncos enteros. En el caso de las europeas se utilizan entramado de madera con relleno de arcilla y paja. Para proteger de la lluvia y de la nieve cada planta avanza en altura respecto a la inferior.

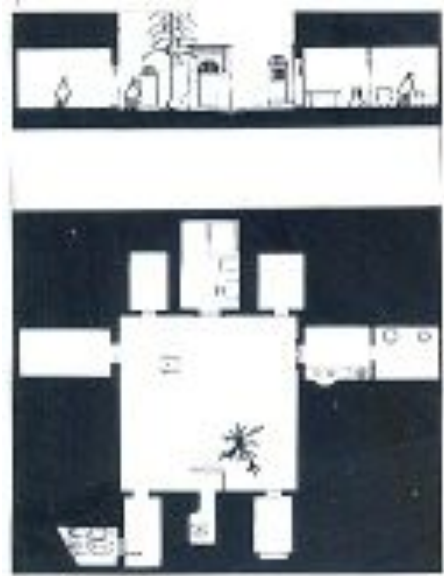


Viviendas trogloditas. Construir con tierra.

Los costes de su construcción pueden llegar a ser de 1/5 parte de una vivienda de ladrillo y madera en la misma región. Las temperaturas exteriores pueden llegar a -10°C en invierno y 30°C en verano.

Para soportar estos cambios de temperatura bruscos se construyen grandes muros exteriores, que absorben el calor, o muros aislantes de madera, para compensar estos continuos cambios atmosféricos.

La construcción en tierra no sólo es más barata, sino que además es un extraordinario aislante. Además del uso de este recurso natural, estas construcciones no perjudican al medio ambiente pues mantiene intacta la superficie terrestre. En el interior de las viviendas excavadas la T° puede ser del orden de 8-15°C menos que en el exterior.



e. Entorno cálido, templado. Clima marítimo. CUBIERTAS PROTECTORAS/CASAS GEORGIANAS/ DENSA

En zonas de mar gruesa se da mucha importancia a la seguridad de las cubiertas. Los marineros normandos desarrollaron cubiertas de paja, parecido al casco invertido de un barco, con la proa dirigida a barlovento y la popa protegida al este. Trasladaron su experiencia de construcción de barcos a sus casas. Para proteger de la lluvia y del viento la parte de la casa más expuesta al mal tiempo (normalmente oeste), las casas deben orientarse cuidadosamente o bien hacer sus cubiertas que lleguen hasta muy abajo. De esta forma se consigue una resistencia mínima al viento.



Las estructuras urbanas densas y los largos inviernos dejan entrar poco la luz. Cuánta menos luz al día penetre, más amplias han de diseñarse las ventanas. Hay que encontrar un equilibrio entre la incidencia de la luz y el aislamiento. El ejemplo del edificio en san Sebastián donde se ha conseguido un microclima creando un espacio intermedio tras los paramentos de vidrio. En este sentido también destacan las casas georgianas por el equilibrio razonable entre iluminación y aislamiento. Combinan ladrillo, madera y cristal, y han demostrado su durabilidad sencilla así como el bajo consumo energético.

f. Condiciones casi ideales. Clima mediterráneo. CASA PATIO

Se acerca bastante al clima ideal para el hombre, aunque debe protegerse del fuerte calor en verano con construcciones que aporten sombra.

La construcción mediterránea es experta en el uso de las sombras. Todas sus soluciones constructivas tienen una larga tradición que ha ido desde el uso de soportales y balcones hasta elementos móviles de protección de huecos.



Se pasa del mundo exterior claro y caluroso a un interior oscuro y fresco, la casa-patio. La trama urbana es densa y con calles estrechas para conseguir frescor, de forma que las casas se dan sombra las unas a las otras, reduciendo la radiación solar y aprovechando el patio interior. A veces la inercia térmica se consigue no sólo con muros gruesos sino excavando el terreno construyendo estancias dentro de él, que aprovechen sus características.

g. Espacios vitales cálidos y húmedos. Clima subtropical

La mayor parte del año el clima es agradable. Sin embargo, los veranos son húmedos y es imprescindible prever una ventilación eficaz.

En Japón y en China se ha desarrollado un sistema dinámico de paredes para crear zonas intermedias entre el interior y el exterior.



Las paredes son de papel de arroz, correderas, las cuales se han adaptado a los cálidos y húmedos meses de verano, mientras que las paredes de tapial reforzadas con paja y entramado de bambú mejoran el aislamiento de invierno.

Son de una planta, con cubierta muy inclinada para dejar pasar el sol en invierno y proteger en verano. El piso se levanta 0.50 m respecto del terreno, para mantener una cámara seca y ventilada.

Destaca la casa circular china, a modo de fortaleza. Muros exteriores compactos de 65 m de diámetro, que sirven de defensa para una comunidad de 250 habitantes, que se residen en la 2ª y 3ª planta y mantienen sus funciones en la planta baja.

h. Selva. . Clima tropical

La selva es el entorno perfecto para la vida vegetal. Pero para los seres humanos no resulta fácil aguantar la combinación de calor y humedad. Se necesita por tanto una ventilación eficaz y protección contra el sol y la lluvia.



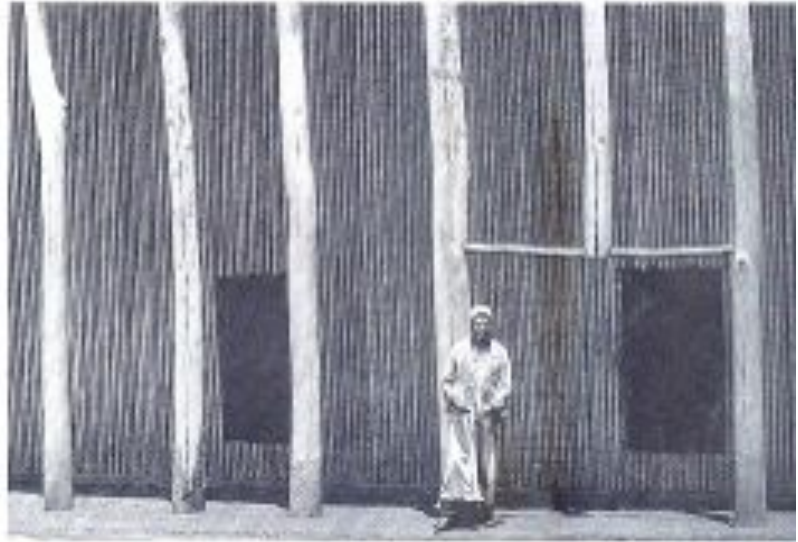
Aerodinámica para sobrevivir. En lugares tropicales para dar mayor sombra, las cubiertas bajas y angulosas vuelan sobre la fachada para dar mayor sombra. Sus grandes cubiertas curvas están construidas para conseguir una ventilación óptima. Sujetadas sobre postes de madera muestran la función y el significado de las actividades que concurren en el interior. Los mismos postes soportan el suelo para que quede bien ventilado.



Ya que apenas hay oscilaciones entre las temperaturas nocturnas y diurnas, lo que se exige aquí es una buena protección contra el sol y una buena ventilación. Las paredes son delgadas y la incidencia de la intensa luz solar que atraviesa las ventanas se amortigua con marquesinas para no dejar de aprovechar hasta la brisa más suave.

i. Espacios vitales cálidos y húmedos. Sabana

Cuando las condiciones climáticas son tan buenas que el hombre puede vivir sin morada ni indumentaria, lo que necesita es sólo sombra y protección ante las lluvias, es decir, lo que necesita es una cubierta. Muchas de las moradas en esta zona climática no son más que una sombrilla.



Normalmente realizadas en materiales vegetales del entorno. Se pueden conseguir condiciones de confort con muy pocos medios.

Los muros son delgados y permeables para conseguir una óptima corriente de aire. Estas sencillas construcciones de protección se transportan como si de una prenda de vestir se tratara.

j. Estepa. Clima caluroso y seco. CASA CHIMENEA / PATIO

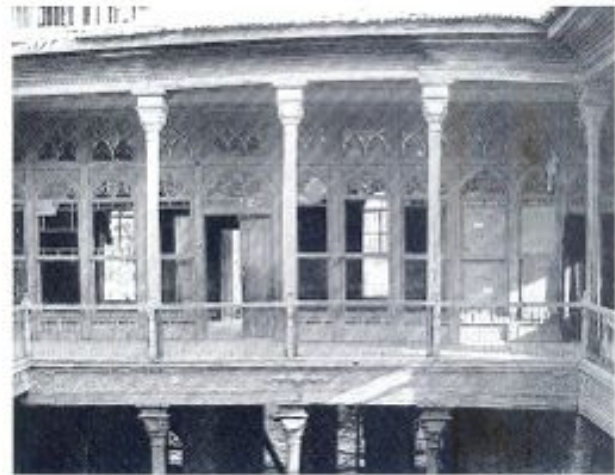
Al igual que zonas próximas al desierto, solamente se puede practicar la agricultura en terreno regado artificialmente. Las casas se encierran en sí mismas eludiendo así el clima adverso.

La casa se ha refugiado en construcciones de masa buscando espacios frescos. Los muros compactos absorben el calor así que las casas pueden estar enterradas para aprovechar el efecto de la tierra.

Los edificios se orientan ingeniosamente para aprovechar los vientos predominantes frescos pues provienen normalmente de la misma dirección para así hacer entrar la corriente fresca de aire en las estancias. El sistema consiste en una chimenea empotrada en la pared que sobresale sobre el tejado.



En las casas patio, éstos pueden actuar como canales de aire verticales que provocan un microclima agradable en todos los pisos, con una T^a que puede variar de 20°C en la planta inferior respecto a la superior. Los patios y logias son espacios multifuncionales. Ayudan a la climatización de la casa a la vez que sirven de corazón de comunicaciones de la estructura.



k. Desierto. La región más calurosa y seca. TIERRA / MORADAS TEMPORALES

Construcciones de gran inercia térmica y realizadas con tierra. Destacan por gruesos muros contruidos en tapial, y en parte se encuentran enterrados para protegerse del calor. Las paredes exteriores y cubierta tienen un gran grosor para poder absorber el máximo calor posible.

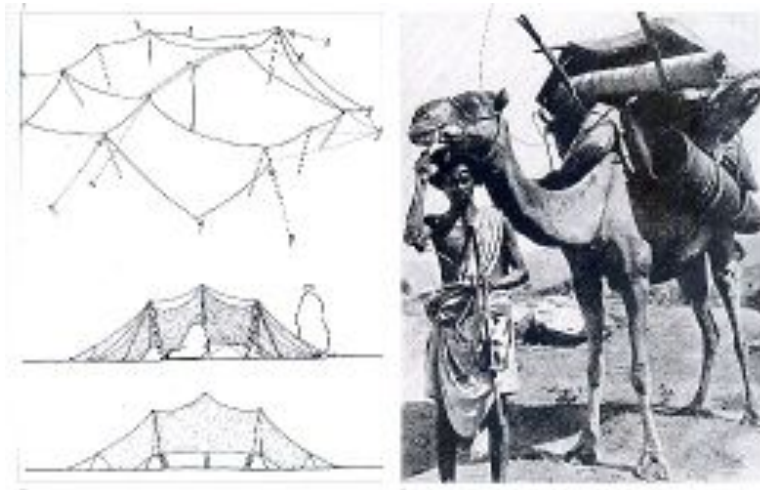


Las precipitaciones suelen ser mínimas, así que la impermeabilización de cubiertas tiene menos importancia. La trama urbana se caracteriza por calles estrechas y edificios altos, que impiden la entrada de luz solar y las tormentas de arenas.

Los edificios de barro del sudoeste americano dan sombra en el día y se usan como almacén donde poder dormir cuando hace frío. Durante el verano la gente duerme sobre la cubierta. También de gran inercia térmica y muros de gran espesor de adobe.

Estas regiones destacan por la escasez de agua y el calor extremo. Esta falta de agua impide el abastecimiento energético mediante la agricultura y ganadería, y convierte a los habitantes de estas regiones en nómadas que dependen de viviendas transportables.

Las tiendas proporcionan su propio microclima, durante el día protegen del calor extremo y durante la noche del frío riguroso. Están fabricadas de tiras cosidas de tejido de pelo de cabra para formar un gran toldo



3. Búsqueda de la forma. MEF

3.1. La forma de la Construcción

La capacidad de abstracción que hay que manejar para comprender sus reglas y su lógica hace de la geometría una potente herramienta de análisis, tanto por sus posibilidades para la especulación como por el sentido práctico que aporta a disciplinas del campo de la construcción.

Basta una mínima incursión en el mundo profesional para darse cuenta de las veces que hay que recurrir a la geometría en mayor o menor grado para resolver una cuestión de forma, de acústica o de estabilidad. Y también muchos ejemplos que han maravillado a todos por sus cualidades arquitectónicas son casos donde la geometría ha podido tener un papel relevante.

Se trata de averiguar en qué modo o hasta qué punto la geometría está presente en la arquitectura y cómo ésta puede llegar a su forma a través de la optimización de sus elementos estructurales. Y el procedimiento que se ha seguido es el análisis detallado de ejemplos concretos, con un interés arquitectónico claro.

En algunos casos la geometría ha estado presente desde la concepción del edificio y esto ha facilitado mucho la puesta en obra. En otros, la geometría ha solucionado problemas de forma que se han presentado durante el proceso de proyecto, especialmente por requerimientos de la construcción.

El atractivo que se puede encontrar en las formas geométricas es mayor cuando se trata de formas constructivas y por lo tanto se han buscado formas cuya geometría va acorde con su construcción.

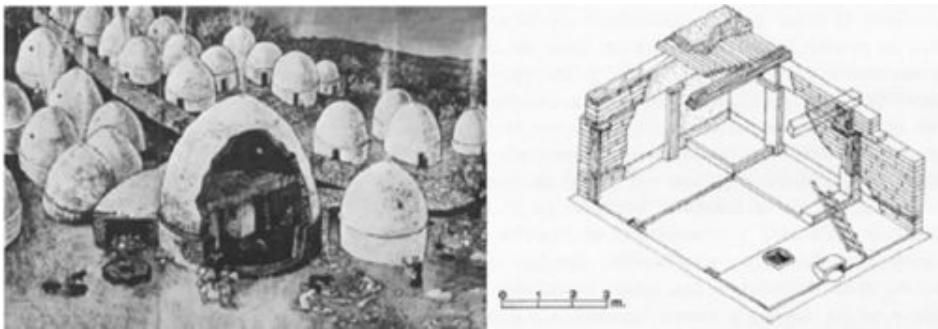
En el estudio de esta relación entre construcción y forma se ha intentado encontrar la justificación de la geometría como estructura interna de las formas construidas y por lo tanto como herramienta para el control de esas formas.

3.2. La evolución de la forma

Parece oportuno un repaso muy sintético por la historia para destacar qué parámetros han incidido en la obtención de una forma u otra y cuándo la forma ha estado por delante de otras consideraciones.

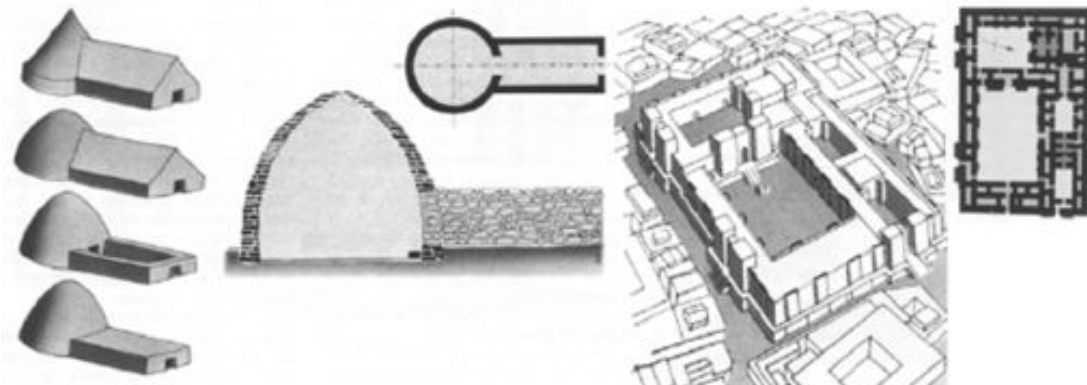
Especialmente interesa para concretar qué se entiende por **forma**. En lugar de definiciones semánticas de la palabra forma es preferible hablar de formas que ha tenido la arquitectura en diferentes lugares y tiempos.

La forma de las obras de la **antigüedad** era, mayoritariamente, la consecuencia de un propósito constructivo para hacer posible una actividad; y la apariencia exterior de los edificios dependía sobretodo del sistema estructural que soportaba su cubierta, ya fuera abovedado o arquitrabado, y de la forma de ésta.



Dibujo del pueblo neolítico de Jirokitia en Chipre. Reconstrucción de una vivienda principal típica en Chatalhuyuk.

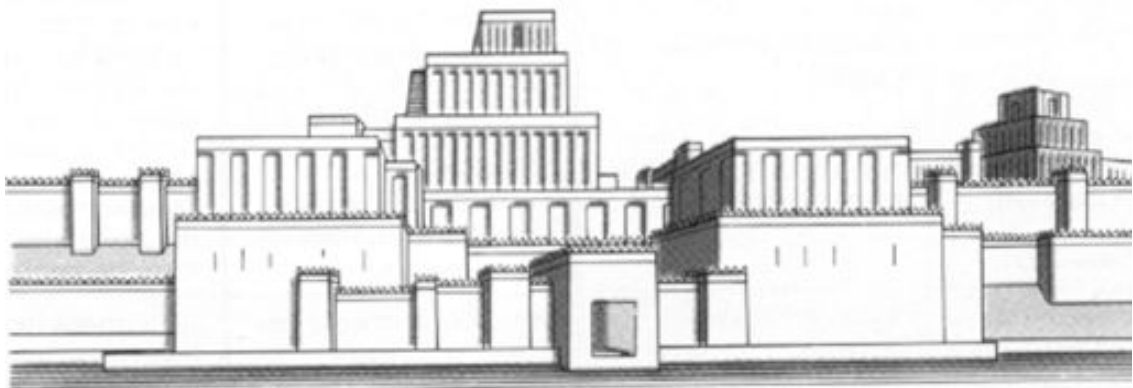
Las civilizaciones mesopotámicas construyeron las formas que serían arquetípicas de la arquitectura desde entonces hasta siglos después. Las formas circulares y abovedadas de las primeras casas (entre el 6000 y el 4000 a.c.) construidas como refugios con falsas cúpulas, dieron paso después a construcciones prismáticas de muros de ladrillos o adobe y vigas de madera. El uso de las formas rectangulares permitía subdividir el interior de los edificios y también ampliar las construcciones adosando nuevos cuerpos a un primer volumen. Los techos planos posibilitaban la utilización de las cubiertas como azoteas.



Modelos de construcciones circulares. Planta y sección de falsa cúpula de Arpasya. Reconstrucción y planta esquemática del Palacio de Ctesifonte.

Desde este momento en la historia se dan simultáneamente estos dos modelos de forma arquitectónica, uno y otro serán preponderantes en unas épocas u otras según dicten los

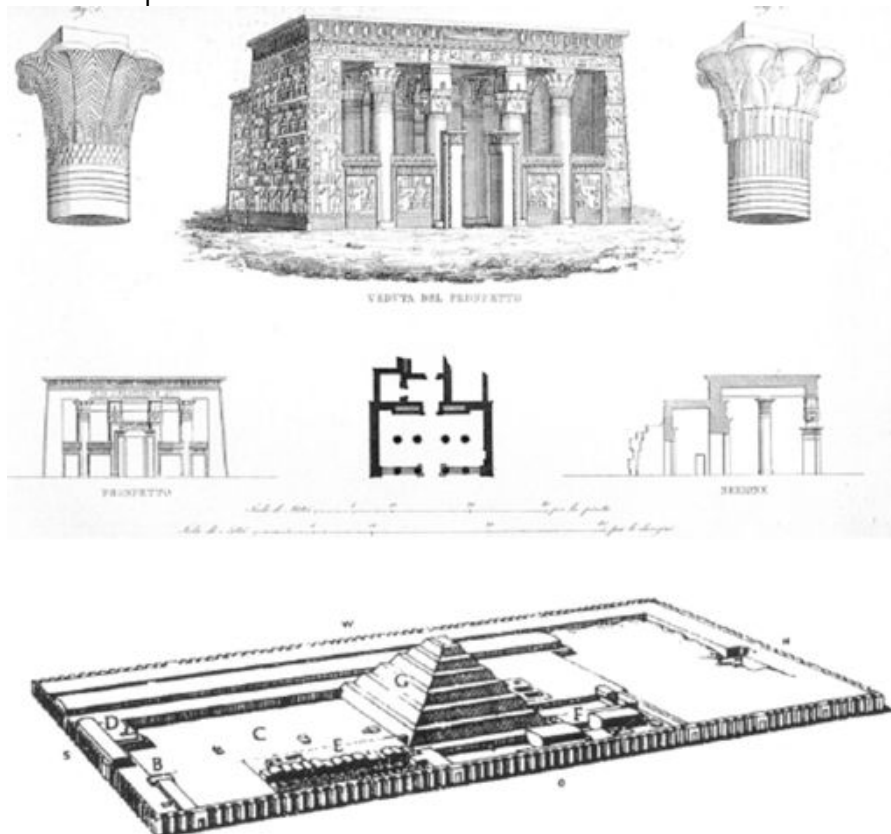
gustos, la voluntad expresiva o las capacidades de innovación en la técnica constructiva: arco o dintel, curva o ángulo recto, techo plano o bóveda.



Reconstrucción del noroeste de la ciudad de Assur.

Los edificios en Mesopotamia eran mayoritariamente cubos y combinaciones de cubos, muros gruesos y terrazas.

Las formas de la **arquitectura egipcia** son el resultado de una gran abstracción, de síntesis a partir de formas naturales, orgánicas o tectónicas. Pilares con forma de palmera, capiteles con forma de papiro, figuras estilizadas. Y edificios troncocónicos con cubiertas planas. Las pirámides, y el uso de otras formas básicas, son la expresión de esta capacidad de síntesis y de abstracción. La simetría obsesiva de las obras egipcias, tanto en planta como en volumetría, expresa el sentido de la proporción, de la armonía y de la simplificación de la cultura egipcia y confiere a las construcciones el estatismo de esa arquitectura.



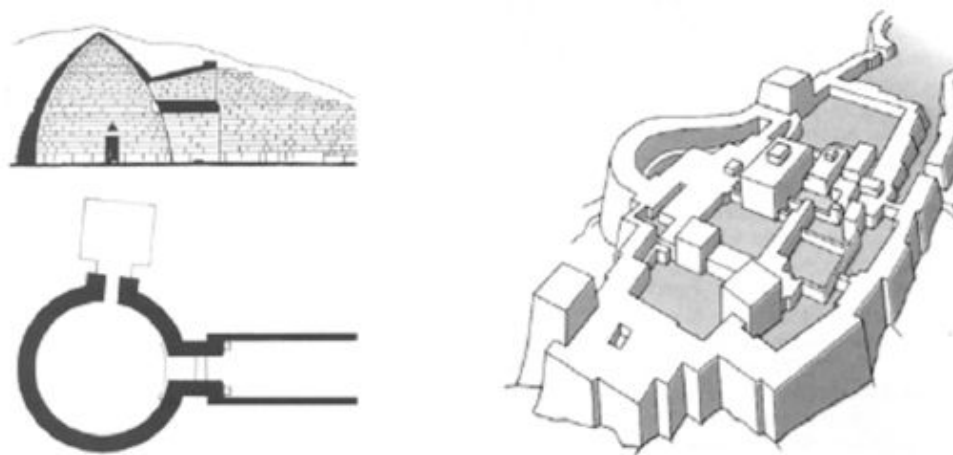
Dibujo de la reconstrucción de una construcción egipcia. Arriba lámina que describe un templo egipcio, vista, alzado, planta y sección.

La arquitectura **minoica** construye unos pilares con fuste más estrecho en la base que en el capitel, contrariando la lógica de la estabilidad que aconseja la forma piramidal propia de Egipto y Mesopotamia.



Columnas del palacio de Knossos en Creta.

En **Micenas** se construyen formas acordes con los imperativos de la función y el material. Las construcciones son defensivas y la disposición escalonada de los volúmenes consigue una monumentalidad.



tesoro de Atreo y fortificación micénica.

Los templos **griegos** clásicos se definían a partir de columnas y cubiertas a dos aguas, las variantes de este modelo reflejaban una concepción más bien escultórica de la arquitectura que atendía más al aspecto exterior que a una idea de espacio.

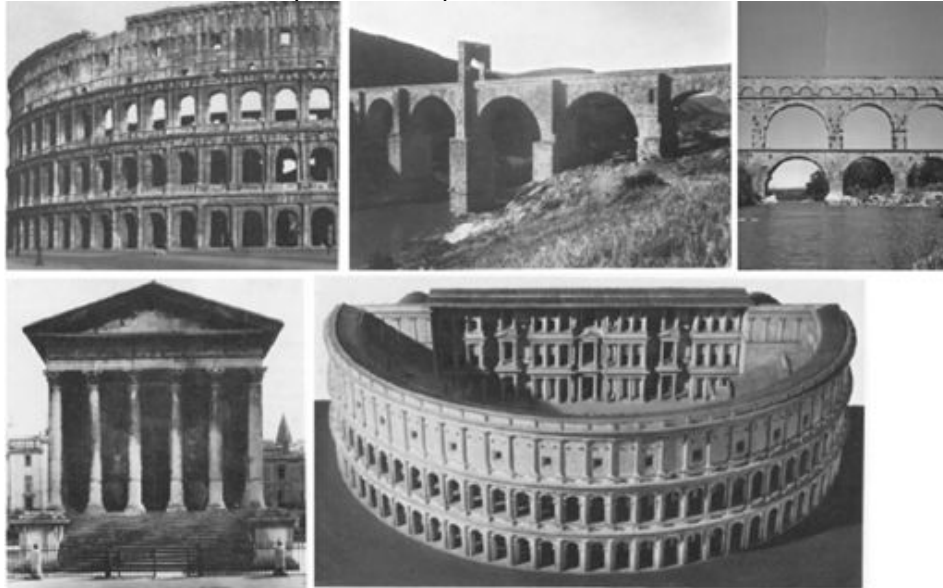


Alzado de templo de Asclepios y vista del teatro de Epidauro.

Las obras de **arquitectura romana** recogen el testigo de Grecia y reproducen muchas de las formas ya puestas en uso, aunque los elementos conocidos se combinan de maneras nuevas. Por ejemplo, la combinación de pilares con arcos – elementos que

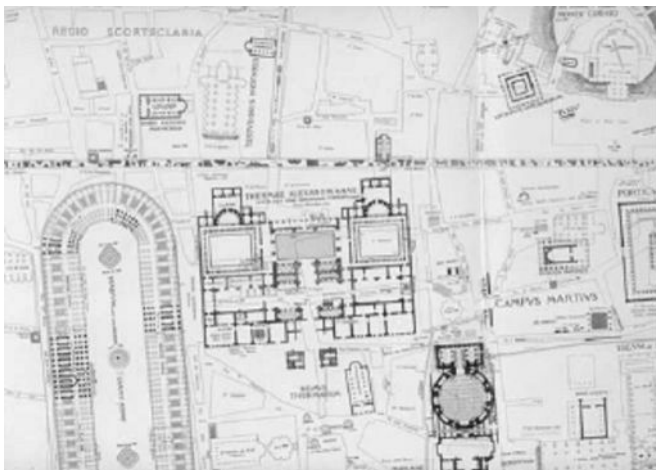
tienen su origen en principios estructurales distintos- se lleva a cabo por razones puramente formales y se abre con eso un abanico de posibles combinaciones.

Las obras de ingeniería civil romana son un interesante catálogo de formas de edificios muy diversos. La figura que adoptan se debe a que se ajustan a una función o a unos conocimientos físicos: los acueductos, las murallas defensivas, y también los circos, los odeones, los teatros (distintos de los griegos por la parte del escenario), etc. Incluso la construcción de cimentaciones de grandes edificios es un ámbito donde se pondrán a prueba sistemas constructivos y métodos que más adelante se llevarán a la vista.



Anfiteatro Flavio en Roma (Coliseo). Puente de Alcántara en Cáceres. Puente del Gard en Nîmes. Templo Maison Carrée en Nîmes. Maqueta del teatro Marcelo en Roma.

Es paradigmática la autonomía de diseño de la forma de los edificios romanos. Estas piezas construidas tenían una razón de ser desde su propia lógica y en general no se disponían al servicio de una idea urbana o de relación con otras construcciones. Cada unidad cumplía su cometido y la ciudad la formaba la yuxtaposición de construcciones singulares, como un collage de formas autónomas.

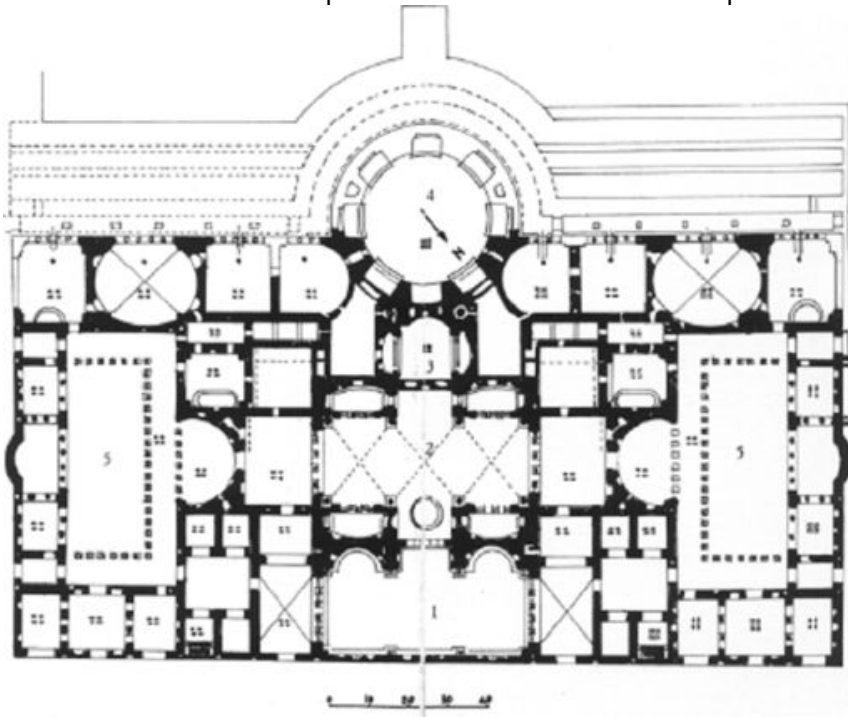


Fragmento de la planta de Roma. Reedición de la "Forma Urbis Romae" de Rodolfo Lanciani. 1893-1901.

La forma de algunas villas romanas es también el fruto de la reunión de cuerpos edificados sin una unidad global aparente; o al menos sin una idea de forma del conjunto.

Cada construcción se sitúa en el lugar y con la orientación más conveniente pero no hay una concepción general que imponga una figura sobrepuesta reconocible.

Las termas romanas son edificios complejos, formados por elementos menores reunidos de una determinada manera, con una forma abstracta que los compone, hay una organización de espacios diferentes en tamaño y uso, hay una idea de simetría y proporción en ellos. La concepción espacial de estos edificios fue recuperada mucho más tarde en diferentes episodios de la historia de la arquitectura.



Termas de Caracalla en Roma.

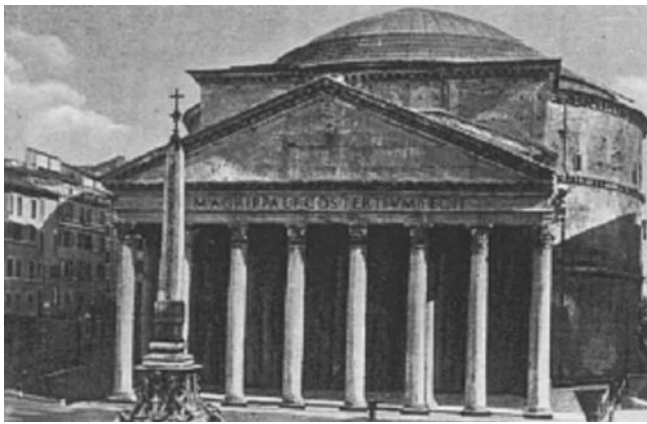


Las ciudades de nueva fundación, generalmente con origen en campamentos militares (castra), tenían también una forma que las estructuraba: una cuadrícula orientada que ordenaba, en islas, las construcciones privadas o particulares y reservaba espacios para uso colectivo, ya fueran espacios abiertos para calles y foros o para edificios de uso colectivo como templos.

Planta de La Valeta, capital de Malta.

En cuanto a la idea de forma tridimensional de la arquitectura, que es donde esta investigación ha centrado su atención, ha tenido su mayor juego de posibilidades en dos propósitos constructivos: el reto de la cubrición de los espacios grandes y el levantamiento de altas torres, desde las cabañas a los estadios y desde las catedrales a los silos o desde faros hasta minaretes.

Los romanos construyeron el referente más emblemático de la cúpula sobre un espacio circular en el Panteón de Roma. En él la técnica constructiva está al servicio de la idea de forma buscada.



Vista desde el exterior del Panteón de Roma.

Otras veces la forma sigue al principio estructural. Las bóvedas, las cúpulas, los arcos, o las cubiertas inclinadas sobre cerchas de madera, y sus combinaciones, constituían las piezas con que se construían los artefactos de los edificios y la forma de estos dependía de la de aquellas piezas y de la ley que las combinaba.

El **Románico**, heredero directo de la construcción romana, pero con menos medios técnicos y económicos, construye bóvedas de crucería, arcos de diafragma, arcos torales, ventanas atrompetadas, pechinas. Las cúpulas se sustentaban sobre espesos muros y un gran logro técnico de la construcción fue resolver, de muy diversas maneras, el paso de la planta cuadrada a la forma circular, para recibir el peso repartido de cúpulas esféricas. Otro logro fue levantar torres de vigía y campanarios.



Cúpula sobre pechinas de la Catedral de Salamanca y cúpulas octogonales sobre trompas en Nuestra Señora en Le Puy –en – Velay (Francia).



Interior de Sant Vicenç en el Castillo de Cardona y campanarios de la catedral de San Pedro y San Jorge en Bamberg (Alemania).

En los edificios más complejos, como los monasterios, se organizaban unas estancias de muy diversas medidas en planta y altura, alrededor de claustros de galerías poligonales. Estos elementos constructivos y las maneras de combinarlos eran lo que daba la forma a los edificios; una forma que se manifestaba en el interior de las construcciones. Se podría decir que el románico es el logro del espacio interior y que en él está lo más interesante de su riqueza de formas. **La forma exterior de los edificios viene a ser el contra molde de la envolvente del espacio interior.** Y es la forma de ese espacio interior lo que se trabaja; un espacio del cual la obra es como el estuche. Las obras defensivas tienen una forma exterior expresa, dada desde afuera: las murallas, las torres, las almenas. Tanto la forma exterior como la interior de iglesias o monasterios están constituidas por figuras geométricas simples. Los elementos de soporte son masivos y tienden a un perfil piramidal o cónico para mejorar su estabilidad. Y los elementos de cubrición son porciones de cilindros o de esferas.

Más adelante las técnicas constructivas y su evolución hicieron posibles nuevas formas estructurales y con ellas nuevas formas de edificios. El **Gótico** es sobretodo un nuevo planteamiento estructural, que conllevaba nuevos sistemas organizativos de la construcción y nuevos conceptos, más abstractos, de la idea espacial. Pero lo más evidente y directo de su innovación es la forma de sus elementos.



Interior de la antigua colegiata de Saint Quiriace en Provins (Francia). Vista posterior de la Catedral de Saint Étienne y vista cenital de la bóveda de crucería de Nuestra Señora de París.

Los arcos de varios centros y apuntados, las bóvedas nervadas, los arbotantes y los pináculos son elementos que construyen toda una nueva imagen de los edificios. Tanto en edificios civiles como religiosos. Las variantes en la arquitectura gótica serán la manera en que se resuelven las crucerías de sus bóvedas y las medidas de las naves en planta y sección, que intentarán superar siempre algún reto de altura o de luz. Los

nuevos edificios cierran un espacio nuevo, más alto, más iluminado. La nueva forma del interior pasa afuera, la forma de los edificios se ve desde el exterior, su artefacto portante se exhibe y será su imagen.

Las catedrales góticas exhiben su estructura que consiste en la construcción nervada como principio resistente, la cubrición de las bóvedas con superficies formadas por piedras talladas y la repetición de una sección característica de cada templo. Esas superficies entre las nervaduras tienen una geometría que se ajusta a su sistema constructivo y se refleja en el despiece de los elementos de piedra que las forman. Desde el cruce de dos cilindros hasta la bóveda por arista de cuatro semiconos, existen innumerables variantes que en general siempre utilizan superficies regladas radiales (conos y cilindros) o esferas en algunos casos particulares. No es frecuente encontrar formas alabeadas si no es en los helicoides de las escaleras de caracol.

El **Renacimiento** toma de la antigüedad clásica los tipos formales. Su novedad está sobre todo en parámetros de índole filosófica, en la concepción del entorno, de la realidad y del papel del hombre como referencia para todo. Parámetros que tienen que ver con la interpretación del mundo más que con la interpretación de la realidad construida. Las variantes de la [arquitectura del humanismo](#) se centran más bien en la proporción y la relación de las partes, en la simetría y en el orden. La aportación más trascendente de los arquitectos del Renacimiento fue la invención de la perspectiva cónica y lo que esto significó.



La "Ventana de Leonardo" según Brook Taylor. Vista del interior del hospital de los Inocentes en Florencia.

Permitió empezar a comprender el espacio de una manera consciente. La posibilidad de dibujar juntas caras paralelas de un objeto y relacionar una fachada con otra, invitaba al arquitecto a pensar esos lienzos en relación con los contiguos y se recuperó el concepto tridimensional del espacio pero esta vez de una manera consciente. Las proporciones se aplicaban no al plano, como en el gótico, sino a las tres dimensiones del espacio. Los módulos eran cúbicos, iguales y ordenados. Los pilares equidistantes permitían sentir, al observador, que entendía las medidas de una sala o de un patio o de una plaza.

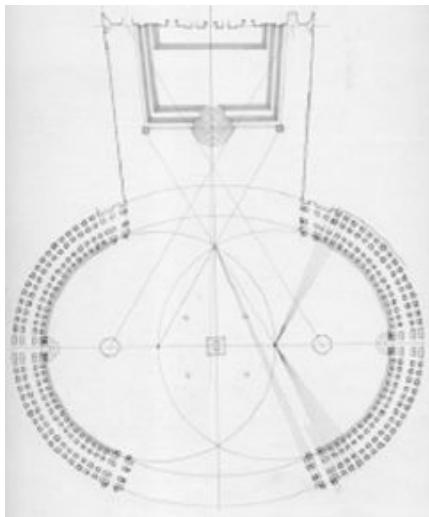
En cuanto a la forma de los edificios, no se puede pasar por alto la importancia de las [cúpulas renacentistas en el paisaje europeo](#). La potencia del espacio central, desde el interior, y el referente urbano por su altura y por su forma, desde el exterior, fueron sus razones de ser. Este elemento constructivo representó el principal reto estructural que los arquitectos de entonces afrontaron. El caso de Filippo Brunelleschi en Florencia es el paradigma y el precedente de muchas otras cúpulas que acabaron identificándose con su ciudad y con su autor.



La cúpula de Santa Maria de las Flores en Florencia marcó un hito en la organización de los trabajos de construcción.

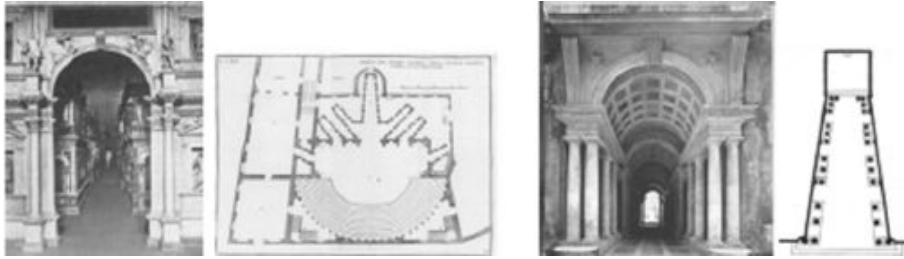
Pero no es estrictamente la forma de estos elementos la novedad o la aportación de esta época a la historia sino las relaciones métricas de los elementos y sus sistemas de construcción. La invención de nuevos procesos en los trabajos de ejecución de una obra de arquitectura revolucionó la construcción. En ese tiempo se unieron ciencia, técnica y arte ante el diseño de arquitectura.

Los arquitectos del **Manierismo** y especialmente del **Barroco** supieron darle la vuelta a la apariencia comedida del clasicismo renacentista y ofrecer nuevas formas mucho más ricas y expresivas. Las formas curvas, tanto en la planta, como en las superficies de las fachadas, potenciaron una gran expresividad. A veces era una figura geométrica potente como la planta oval de la plaza de San Pedro del Vaticano y otras la introducción de un gesto, de un movimiento, en los elementos de la fachada como la iglesia de San Carlino, lo que provocaba una percepción nueva en el espectador.



Planta del trazado de la Plaza de San Pedro de Bernini y vista de la fachada de San Carlo dei Cuatro Fontane de Borromini ambas en Roma.

Le hacía participar de la obra por cuanto su posición respecto de ella le cambiaba la percepción; juegos de sombras que variaban con el transcurrir del día o con el movimiento del que pasea; o bromas formales que engañaban la lógica perspectiva.



Vista de la falsa perspectiva del fondo de escenario en el Teatro Olímpico de Andre Palladio en Venecia y de un corredor construido con truco perspectivo en el Palacio Espada en Roma de Borromini.

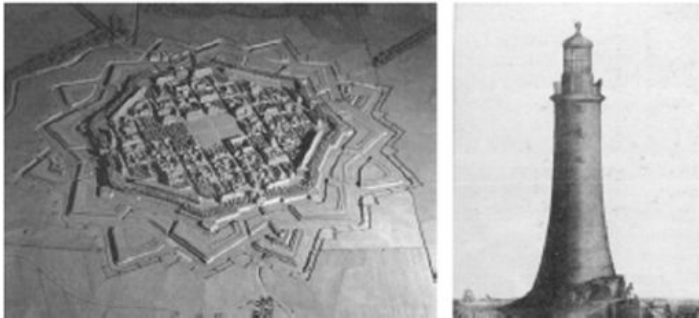
El espectador, que ya se había habituado a la perspectiva fugada, era de nuevo sorprendido con los juegos de las arquitecturas aceleradas o con los trampantojos de los murales o hasta con el uso de espejos como elemento distorsionador de la percepción lógica de un espacio interior. Si en el Renacimiento el visitante es el espectador de una escena en la que está inmerso, en el barroco se convierte en actor. Una vez educado en los órdenes y en las proporciones, ve como los balaustres de las barandas se giran del revés y los frontones se fracturan abriéndose al infinito, al cielo. Y las formas, tan claras y puras, que barajaba el clasicismo para las cúpulas, bóvedas o arcos se toman licencias y alteran su geometría. Pero esto no será por capricho del artista sino en beneficio de un sentido constructivo. Las bóvedas o las cúpulas pliegan su cara interior, en la prolongación de los muros, y encuentran en esto la solución al nunca resuelto enemigo de la estabilidad de las formas abovedadas: los empujes horizontales que provocan irremediamente fisuras.



Detalle de la fachada del Oratorio dei Filippini de Borromini en Roma, un ejemplo de uso libre de las formas conocidas en que los balaustres se alternan del derecho y del revés. Los motivos decorativos fracturan el frontón. Vista cenital de la cúpula plegada de San Ivo in Sapienza en Roma.

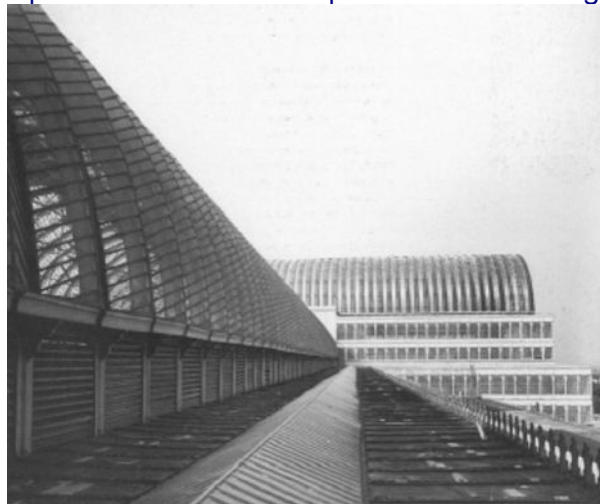
Mas adelante, siguiendo el hilo de la cronología, aparece una época en que la arquitectura cede un cierto primer plano de protagonismo en lo construido a la ingeniería y especialmente a la ingeniería militar. El foco de atención de lo novedoso se centra en la Francia de la revolución y su contexto. Se fundan o se planean ciudades ideales, grandes obras de ingeniería civil como puentes, faros, fortificaciones defensivas. Es un tiempo, también, de grandes planes urbanísticos y de propuestas abstractas. En estos proyectos abundan las formas básicas: polígonos regulares o formas tridimensionales puras.

Un urbanismo de grandes avenidas con parterres ajardinados y edificios simétricos. Las fortificaciones son pentágonos y los edificios ideales son esferas perfectas o pirámides regulares.



Plano en relieve de una ciudad ideal para Neuf-Brisach en el 1706. Faro de Eddystone construido por Smeaton en Inglaterra.

En el **siglo XIX** el uso del hierro como material constructivo vuelve a hacer posibles formas nuevas en las obras de arquitectura. El mundo del ferrocarril y la industria siderúrgica hicieron aparecer edificios nuevos con formas hasta entonces no vistas. Los entramados de barras permitieron cubrir grandes luces y levantar torres altísimas que sorprenderían a todos. El segundo material aliado de este nuevo sistema constructivo fue el cristal que permitía mantener el aspecto de artefacto ligero al esqueleto portante.



Palacio de Cristal de Paxton.

El resultado fue un mundo de líneas rectas: cerchas, triangulaciones, cristalerías; una combinación, en definitiva, de barras y nudos, con grandes posibilidades de combinación, que trabajaban a tracción o a compresión. La concepción de estos edificios no se correspondía con una idea de espacio interior, sino que su diseño emanaba de una visión del objeto desde fuera como artefacto.

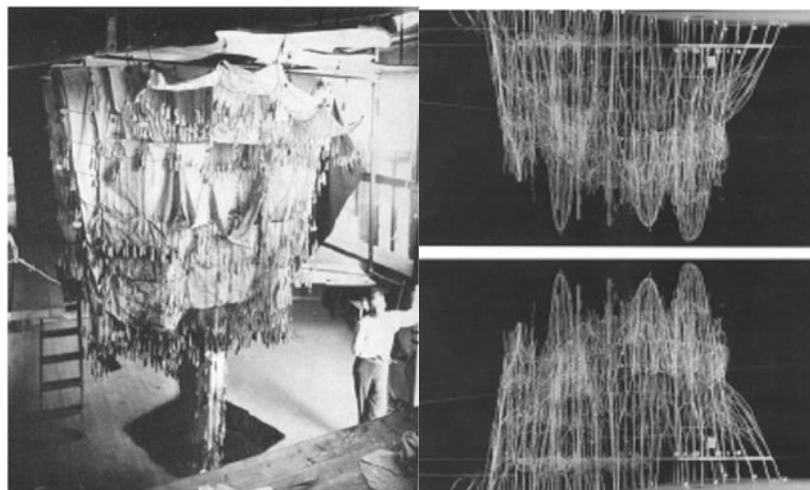
La gran novedad no fue sólo el material sino la evolución de la industria constructiva que producía piezas en fábrica y la, cada vez más consolidada, ciencia de la construcción, que estudiaba con el rigor y la fiabilidad del cálculo los comportamientos de los materiales y su colocación, sin necesidad de recurrir al método de prueba y error. Esta capacidad de la técnica también estaría detrás del empuje que conoció el uso del hormigón durante el siglo XX.

El paso de siglo XIX a siglo XX estuvo presidido, en Europa, por un movimiento que fue el Art Nouveau o **Modernismo** y que aportó un paisaje nuevo a las ciudades especialmente en las formas de los detalles. Los objetos adaptarían su forma a la función que debían desempeñar y a la mano del usuario, o a una **forma tomada directamente de la naturaleza**: las olas del mar, las gotas de lluvia, la caída de los vestidos, el movimiento del agua o del viento o un golpe de látigo.

Los arcos de directriz catenaria o parabólica habían sido utilizados, desde muy antiguo, en arcos o bóvedas de segundo orden, en pasos de servicio, en plantas subterráneas, más sujetos a los requerimientos estáticos que a criterios compositivos.

El arquitecto, a veces, ni siquiera intervenía en su diseño, sino que eran resueltos por el constructor o el artesano que conocían bien el proceso constructivo y experimentaban en directo las leyes internas de la estática de los materiales que manejaban. El modernismo supuso un cambio radical para el uso de estas figuras constructivas porque adquirieron un papel protagonista en la concepción formal de los edificios. Los arquitectos recuperaron un fructífero diálogo con los artesanos de todos los oficios relacionados con la construcción. De la experiencia práctica de unos y de los conocimientos teóricos de los otros surgieron propuestas nuevas.

Los arquitectos de aquel momento, del que **Antonio Gaudí** fue el más prolífico e interesante exponente, escucharon a los artesanos en todos los episodios de la obra ejecutiva y dieron sentido estético a la manualidad. Encontraron la inspiración en las figuras que son estables gracias a la forma que tienen y **estudiaron en modelos a escala su respuesta estructural a las acciones gravitatorias**.



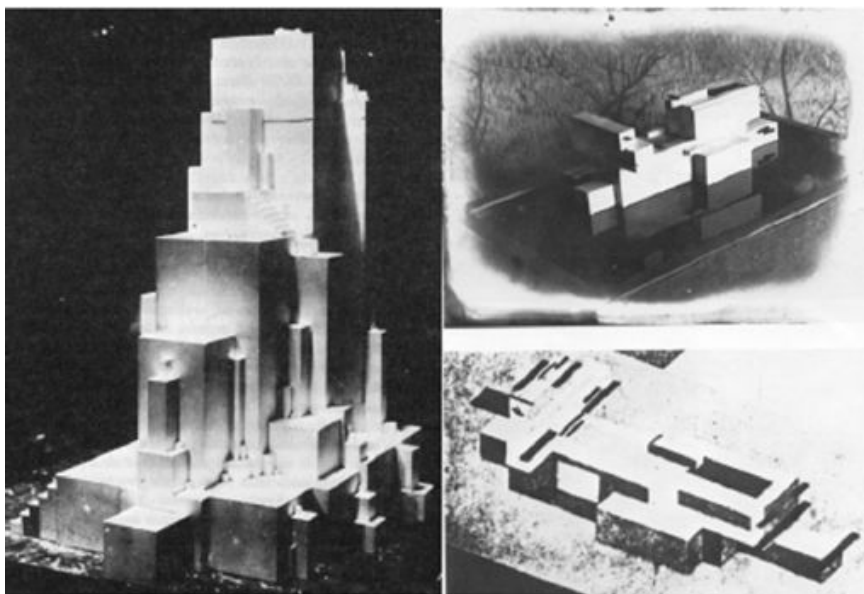
Modelo funicular de la cripta de la Colonia Güell de Antonio Gaudí en Santa Coloma Cervelló, cerca de Barcelona.

Su formación en estática y geometría les dio la capacidad de cumplir también con un deseo de los artistas, que veían en la **naturaleza** la mejor maestra y el espejo donde mirarse. Así aparecieron: conoides, hiperboloides y paraboloides, formas curvas de trazado libre o bien con una geometría muy rigurosa, parábolas y catenarias para los arcos; y **se utilizaron objetos recogidos de deshecho y texturas de inspiración textil**, para dar forma a rejas, fachadas y acabados de cubiertas. Todo buscaba parecerse a los árboles y a las plantas, a los animales y a las piedras y estar hecho con las manos.



Vista interior cenital del templo de la Sagrada Familia.

Inmediatamente después y con muchos puntos en común con esta manifestación artística, se sucedieron una serie de movimientos culturales que tuvieron gran incidencia en los planteamientos futuros y que se han acabado reuniendo bajo el denominador de las **Vanguardias**. Los diferentes movimientos que se agrupan bajo esta denominación son la prueba de lo diversa que puede ser la interpretación del mundo. Sin embargo hay algo que puede verse común a todas las corrientes coetáneas de pensamiento en el tema que aquí interesa. Las formas artificiales que se han barajado, desde siempre, en el arte, se pueden reducir a figuras poligonales simples. Las teorías de De Stijl, establecidas como manifiesto en la revista del mismo nombre, y del Suprematismo de Malevitch plantearon que el arte no necesita representar nada figurativo, sino que debe tomar los elementos abstractos con los que trabaja la propia disciplina y combinarlos: rectángulos, triángulos, líneas y círculos de colores primarios sobre fondos de color deberían bastar para crear obras de arte. Este principio de composición con piezas elementales se llevaría a la arquitectura con los *arquitectones*. Malevitch proponía formas para los edificios a base de la composición de prismas con una colocación y proporción muy estudiada, tanto como la geometría que rige su *"Rectángulos rojos"* o su *"Cuadrado blanco sobre fondo blanco"*.



Composición arquitectónica a base de prismas y propuestas de edificios siguiendo los principios suprematistas de Malévich.

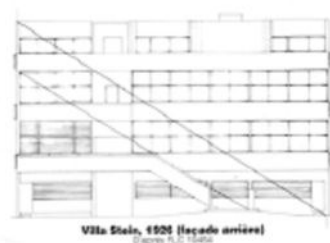
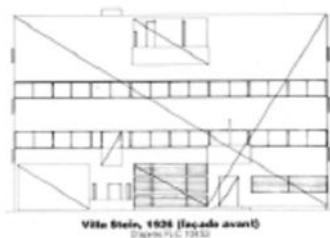
En sus *cinco puntos* Le Corbusier establece las características de la arquitectura moderna, donde también fragmenta el edificio - o, mejor dicho, la propia arquitectura- en sus elementos constituyentes. A partir de esta descomposición de la unidad en partes, se puede volver a construir una obra de arte totalmente nueva: moderna.

El gusto por las máquinas y la admiración por la técnica llevaron a los arquitectos a buscar *formas que no siguieran los dictados de la imagen del pasado, sino que dieran respuesta de una manera honesta a la función* (aunque acabaron pareciéndose a sí mismos). Cajas blancas sin material reconocible, sin cornisas, sin órdenes, sin concesiones a la memoria del pasado, ventanas alineadas en el plano exterior para no expresar los grosores del material. Planos, de colores artificiales, y aristas en lugar de fachadas y esquinas.



Vista de la Urbanización Weissenhof en Stuttgart donde concurren a construir edificios de viviendas arquitectos de primera fila de la época. A la derecha casa Schroeder de Rietveld.

Y en ese mundo desmaterializado de planos y rectas sin grosor y formas prismáticas, el uso de proporciones encuentra un medio favorable. La proporción áurea, la de raíz de cinco o el doble cuadrado, eran la abstracción geométrica que satisfacía la componente intelectual que el arte necesita. Las formas son prismas y cilindros de colores planos.



Fachadas de la Vila Stein de Le Corbusier con los trazados que regulan la ordenación de su huecos y llenos..

Pasada esta revolución cultural de los primeros novecientos y superadas dos posguerras mundiales, aparece un nuevo cambio profundo en la forma de los edificios. La técnica constructiva del **hormigón armado** posibilitó, desde los años treinta y hasta los primeros sesenta, otra revolución formal de la arquitectura, tan novedosa (en cuanto al papel de la estructura en la obra) como el gótico, pero con aportaciones expresivas parecidas a las del barroco.

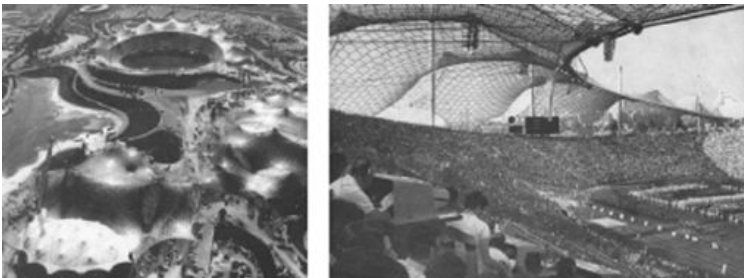
Este episodio de la historia de la arquitectura utiliza la **estructura resistente como elemento expresivo fundamental**. El hormigón y la técnica asociada a él liberan al diseño del lastre de la directriz y la masa, propio de las bóvedas tradicionales, y permiten trabajar con losas tan ligeras como las cáscaras y las láminas, que son autoestables y muy resistentes.



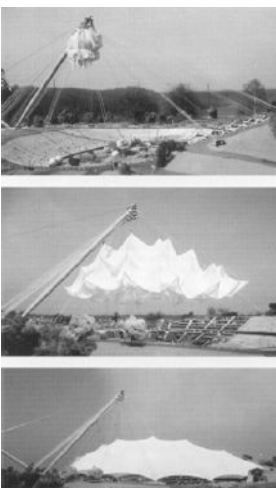
Tres casos emblemáticos de construcciones de láminas de hormigón armado: el restaurante los Manantiales de Félix Candela, el depósito de Fedala y la cubierta del Frontón Recoletos en Madrid de Eduardo Torroja

La fuerza de esos elementos está precisamente en su forma, puesto que los esfuerzos se distribuyen por el material y en el plano tangente en cada punto de la superficie. La arquitectura se llena de láminas alabeadas y plegadas y de formas con caras “blandas” de piedra artificial⁴. Se recupera en cierto modo la formación de espacios cóncavos y envolventes y se ahonda en la búsqueda del máximo aprovechamiento del material, siguiendo criterios de rentabilidad.

El siglo veinte ha conocido, también, la aparición y el desarrollo de otros sistemas estructurales que también han tenido un gran apoyo en la ciencia y la técnica constructivas y con una componente formal importante. Las **estructuras tensadas** han tenido interesantes aplicaciones y representan un caso de traducción literal entre principios estructurales y forma aparente.



Dos vista de la cubierta del estadio Olímpico de Munich construido en ocasión de los Juegos olímpicos que se celebraron en esa ciudad.



Toldos, puentes colgantes, marquesinas, cubiertas de estadios, o construcciones antifuniculares de telas suspendidas, han proliferado en estadios, mercados, ferias, implantaciones provisionales, etc. Las figuras que resultan son superficies alabeadas, regladas cuyas líneas rectas siguen los cables traccionados, y todo un mundo de formas anti-esféricas.

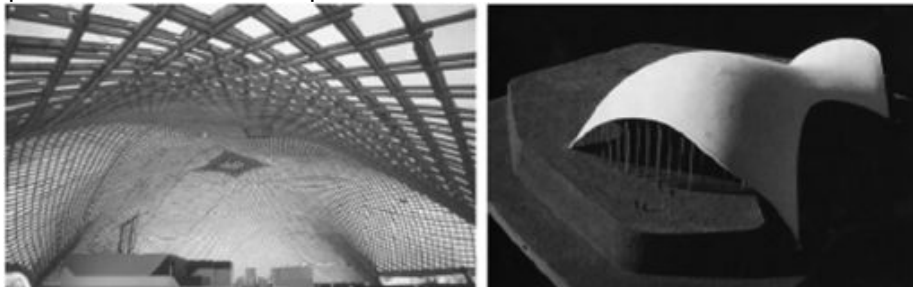
Cubierta plegable para un estadio multimedia.

También se han desarrollado sistemas de **lonas hinchables** para construcciones temporales o itinerantes. Su uso se ha consolidado en instalaciones en el ártico y en pabellones provisionales de instalaciones para exposiciones. La forma que resulta en estas lonas llenas de aire es fruto de ese estado tensional y pocas variantes puede tener una vez que se fijan las piezas unidas entre sí por soldadura o cosido: esferas, toros, elipsoides y cualquier figura de globo, hasta forma de muñecos.



Pabellón Fuji diseñado por Yutaka Murata en ocasión de la Expo'70 de Osaka. Pabellón del restaurante "Brass Rail" para la Feria Universal de Nueva York de 1963-64. Bubble house, Hobe Sound (Estados Unidos).

La forma ha tomado un protagonismo innegable en la arquitectura contemporánea. El uso de mallas espaciales ha permitido construir grandes cubiertas con formas irreconocibles, salidas del gesto manual del arquitecto, que parecen casuales, o parecen poder cambiar en cualquier momento.



Cubierta de celosía de madera para el edificio de la exposición Federal de Jardinería (Manheim 1971). Maqueta de la cubierta del Club Tachira en Caracas (Venezuela 1957.)

3.3. El papel de la forma

Todos los sistemas estructurales y los modelos constructivos que se han citado aquí, y que en algún momento ha parecido que los arquitectos los habían inventado, tienen un **precedente en la construcción tradicional o vernácula** de algún lugar. Las vigas de madera de los primeros cobertizos, las cabañas de piedra de los pastores, esparcidas por el mediterráneo, las tiendas de lona tensada de los pueblos nómadas del norte de África, etc. Para cada "novedad" estructural o constructiva que se ha citado encontraríamos una construcción anterior.

Pero lo interesante no es la novedad de los principios estructurales sino la búsqueda de nuevas posibilidades formales y expresivas que esos principios tienen en manos de los arquitectos.

Desde que los movimientos de vanguardia del siglo XX se deshicieron de la ornamentación como gesto físico del rompimiento con los principios del pasado, la forma ha pasado a cargar con la responsabilidad de la expresión arquitectónica. El peso de la composición recae desde entonces en la geometría más elemental en la relación de posición y medida. La ausencia de ornamento como expresión artística obliga a la forma desnuda a ser la encargada de esa expresión.

Lo realmente interesante es que estos sistemas han satisfecho el viejo propósito constructivo con nuevas concepciones espaciales. Lo que se quiere resaltar es cómo esto ha ocurrido y cómo se ha podido tener un control de esa forma.

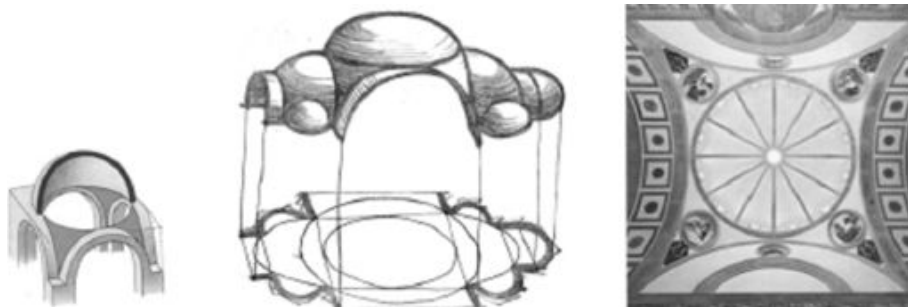
3.4. Las formas de transición

El trabajo se ha restringido a ciertos casos por una necesidad de concretar el problema en un terreno abarcable. Esta concreción tiene interés por otro motivo además de la mera reducción del campo de estudio. Las formas de transición no han sido, por sí mismas, un tema compositivo, sino que han sido la consecuencia de elementos fijados previamente y de la necesidad práctica que impone la construcción material de un edificio.

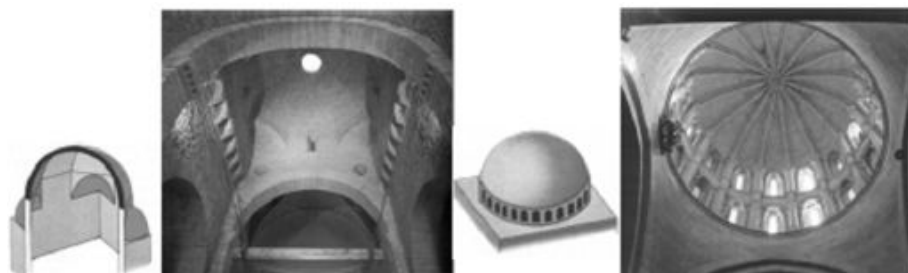
La transformación entre una figura y otra ha aparecido en todo tipo de edificios, como problema secundario en su diseño. Estas formas no son en sí mismas o por sí solas el objetivo de la obra de arquitectura, pero su resolución debe –necesariamente ajustarse a la lógica de los sistemas constructivos propios de la arquitectura: son, por naturaleza, formas constructivas. Por esto tienen, en mi opinión, el mismo interés que pueda tener la obra completa, pero se pueden analizar desde puntos de vista más objetivos, donde la carga emotiva o ideológica del artista sea, cuanto más, equiparable a las solicitudes de la construcción material. De otro modo, es muy difícil emitir una opinión que valore la bondad de la solución adoptada o que ponga en duda lo que sería una opción casi sentimental.

Hay temas recurrentes en la historia de la arquitectura que entrañan un problema de transición. Por ejemplo el paso de la forma cuadrada de la planta de un crucero en una iglesia, a la forma circular o poligonal de la cubierta resuelta en cúpula.

El uso de pechinas trompas o tambores como elementos constructivos son tres maneras de resolver esta transformación formal.



Dos ejemplos de formación de cúpula sobre un espacio cuadrado como Santa Sofía de Istambul y la Capilla Pazzi de Filippo Brunnelleschi en Florencia.



Solución con trompas: crucero de San Daniel en Girona y ejemplo con tambor: cúpula de la catedral de Salamanca.

El cambio de sección de un pilar entre su base y su capitel sería otra familia de la cual se recogen algunos ejemplos más adelante y de la que formarían parte las columnas que Antoni Gaudí diseñó para la Sagrada Familia.



Capiteles de las columnas de San Egidio en Kleinkomburg y Modelos de estudio en yeso de las columnas para la Sagrada Familia de A. Gaudí.

Estas columnas plantean un caso claro de transición puesto que la sección cambia desde un polígono hasta otro. Sin embargo, su principio generador es un movimiento constante helicoidal en dos sentidos rotatorios opuestos a la vez y la simultánea intersección de las dos formas “salomónicas” que resultarían de este movimiento. El objeto de este planteamiento pone el interés en el propio movimiento (que, por otro lado, tiene vocación de ser infinito puesto que parece querer llegar, por la multiplicación de los lados, al círculo) y no tanto en las dos secciones extremas del fuste, como punto de partida de la definición de su forma.

Un capialzado resuelve cómo debe construirse la superficie interior en un muro de piedra que plantea, por ejemplo, un arco de medio punto en la cara exterior y una abertura rectangular en el interior, o arcos de diferente trazado o tamaño.



Dos soluciones de capialzado en una misma puerta de Santa Maria de El Parral en Segovia y cuatro ventanas que resuelven la transición entre las dos aberturas de maneras distintas en la cabecera del refectorio de Santa Maria de Huerta en Soria.

El análisis que pueda estudiar los motivos de esta elección inicial puede ser muy amplio y puede perderse por el siempre resbaladizo mundo de la elección personal. Sin embargo, una vez planteado el problema de partida, la transformación entre una y otra

figura es una excusa para hablar de forma, de geometría, de construcción, de luz y de material; es una excusa, en definitiva, para hablar de arquitectura en términos más o menos objetivos.

La peana de un pilar, o de una escultura, que empieza con una basa de planta cuadrada y debe llegar a recibir la circunferencia del fuste puede preparar la forma de su sección para hacer esa transformación más suave interponiendo formas de transición que resuelvan el acuerdo entre el polígono y el círculo.

El uso de la geometría en una obra de arquitectura concreta puede ser, en opinión de algunos, sólo una opción personal del arquitecto en la definición de la forma general. Pero si esa herramienta abstracta es el camino para controlar la forma en sus detalles más pequeños, en su construcción no es una opción sino una utilidad.

La relación entre la abstracción geométrica y la utilidad práctica han sido, a lo largo de la historia, como dos caminos ondulantes que se han ido entrecruzando, encontrándose unas veces y separándose otras. El trabajo de los teóricos ha sido de gran utilidad para aprender de la abstracción, pero el sentido práctico que da la construcción real debe necesariamente poner en un sitio instrumental a la geometría.

3.5. El hormigón armado.

Ya desde mediados del siglo XIX se realizaron algunas obras con hormigón armado. Al principio eran elementos parciales como terrazas, y macetas jardineras (Monier 1849) o hasta barcos (Lambot 1848). El primer forjado de vigueta metálica y placa armada, lo construyó Ward en 1875 y el mismo Monier patenta la primera viga en 1878. Hennebique edificó en 1900 el primer edificio construido completamente con hormigón armado: muros forjados y escaleras. Aunque es más conocido el edificio que construyó, en 1903, Auguste Perret en la calle Franklin de París con estructura de hormigón armado o el garaje Ponthieu de 1905.

A partir de entonces se suceden los proyectos de puentes, chimeneas, depósitos y edificios. Pero quizá lo más significativo de la construcción en hormigón fue que tendría siempre el soporte de una intensa investigación de nuevas técnicas y sistemas que mejoraban aspectos parciales y complementarios: desde la formación de los sistemas auxiliares de encofrado hasta la composición química del propio material.

La ciencia de la construcción estuvo también aportando [avances en los métodos de cálculo de la estabilidad de los edificios](#). Y en este terreno el uso de computadoras representó un gran salto adelante desde mediados del siglo XX.

La apuesta de estos pioneros por todo un sistema constructivo y el empuje de los avances técnicos y científicos, hizo que en muy poco tiempo se hicieran grandes progresos. Nombres como Freyssinet, Maillart, Boussiron, Le Corbusier, Eduardo Torroja o Frank Lloyd Wright irán alternándose en el candelero de los primeros en hacer una propuesta o en construir una novedad técnica: la primera cúpula, el primer encofrado con apertura en la clave, la primera casa prefabricada, la primera lámina plegada o el primer rascacielos, sistemas nuevos de encofrado, desencofrado, armado u hormigonado.

Las dos primeras décadas del siglo XX fueron un tiempo de búsqueda, de innovación, de estudio y prueba. En los años veinte, treinta y cuarenta aparecieron construcciones interesantes que junto con una solución ajustada al cálculo y al coste, tenían una innegable elegancia. Sobre todo las construcciones laminares de los años 40 y 50 que redujeron a hojas las bóvedas de las cubiertas.

3.5.1. La continuidad y el monolitismo de las formas del hormigón

Una aportación que es especialmente interesante en lo que se sucederá para el diseño de las formas construidas es la continuidad entre elementos distintos del edificio. Desde que Maillart creó el forjado fungiforme en 1908, que anulaba los ángulos aristados entre el fuste de las columnas y el plano del forjado, se inicia un camino que tendrá gran implicación en el diseño de las formas construidas.

La continuidad está en concordancia con el sistema portante. Las estructuras monolíticas hiperestáticas permiten reducir grosores en los forjados porque los nudos de las estructuras de barras provocan una transmisión de esfuerzos entre vigas y pilares. Esta característica será un gran estímulo para que aparezcan propuestas con diseños ricos en superficies curvas que resuelvan la continuidad entre arco y pilar. Si la columna es la técnica y el arco es el arte, el hormigón armado integra en un solo elemento las dos componentes de la arquitectura, una vez superada la separación formal y casi ideológica del Movimiento Moderno, entre pilotis y forjado. Para Nervi la ventaja más destacable del hormigón armado es el monolitismo que puede tener un edificio construido con esa técnica.

La propiedad más característica de las estructuras de hormigón armado es el monolitismo y es también de donde pueden nacer sus más brillantes y específicas soluciones estáticas.

3.5.2. Nuevas tipologías estructurales

Con los sistemas constructivos de piedra y cerámica, las estructuras debían seguir necesariamente la trayectoria de las resultantes del peso para asegurar la estabilidad. En la época del hierro la tracción se pudo incorporar a la construcción en elementos lineales superando las dimensiones de la madera. La técnica del hormigón permitiría la flexión en elementos superficiales.

Quizá fuera la estrecha colaboración que se dio en la época entre arquitectos e ingenieros de la construcción lo que favoreciera el uso de superficies cuya geometría permitiera comprender los cálculos estructurales, como también es cierto que las dimensiones de las obras (propias de edificios de equipamiento con grandes salas de reuniones, palacios de congresos, pabellones de deportes, sedes de instituciones internacionales..) obligaban a racionalizar la construcción, haciendo a veces más importantes los procesos constructivos -como los encofrados o la prefabricación en serie- que el propio resultado final. La geometría posibilitó construir edificios-artefactos que serían extraordinarios o curiosos alardes de equilibrio para el usuario.

Así, obras que no son más que una concha autoportante apoyada en tres o dos o incluso un punto; o extensas superficies que cubrían grandes áreas sin apoyos intermedios con ligerísimas losas; o insensatos voladizos que parecían llevar escrito “más difícil todavía” fueron posibles por la audacia de los arquitectos pero también por la aportación de las ingenierías, las empresas constructoras, los avances en el cálculo estructural y el empeño económico de los clientes.



Auditorio del Instituto de Tecnología en Massachussets (Eero Saarinen). Marquesina en voladizo de una escuela en Cataguazes, Brasil (Oscar Niemeyer).

Pero lo más decisivo en cuanto a la irrupción del hormigón armado en el panorama arquitectónico fue que el avance en varios frentes se produjo de una manera simultánea. Por un lado los adelantos de la ciencia con nuevos métodos de cálculo y especialmente con nuevas máquinas como los computadores; por otro lado la constante investigación en los componentes químicos del material -cementos, aditivos y áridos- la sucesión imparable de patentes de nuevos métodos o elementos colaborantes o auxiliares del sistema como encofrados, desencofrantes, camiones hormigoneras, y las mejoras en la industria auxiliar en general como talleres de prefabricación.

Todo se puso al servicio de poder experimentar nuevas posibilidades con planteamientos estructurales nuevos. No se puede tampoco olvidar que esto ocurre en un momento en que los clientes potenciales de este tipo de encargo apuestan por lo novedoso, como una manera de acercarse al futuro. La voluntad de compartir la aventura de nuevas propuestas con los técnicos haría posible que las propuestas más imaginativas se hicieran realidad.

La arquitectura de los años cincuenta ni siquiera se asocia con ese material de manera inmediata y exclusiva. En esa época aparecen edificios prismáticos, de estuco y cristal, de estructuras metálicas que entroncan con su tiempo y lo caracterizan incluso. Sin embargo si se piensa al revés, si se intenta situar la arquitectura del hormigón armado parece que ese período es lo más parecido a su mejor momento.

Ludovico Quaroni sitúa sintéticamente lo que el hormigón ha supuesto en la evolución de la arquitectura como material y como medio expresivo:

..., el aspecto tosco del hormigón no revocado, no tratado, pudo expresar mejor que cualquier otro material la angustia del hombre moderno... (...)

Terminada la guerra vuelve la estructura vista, con Perret, (...), y posteriormente con Le Corbusier, que robustece y refuerza su línea, (...), trazando el camino a todos sus seguidores, buenos y malos: desde Kenzo Tange a Oscar Niemeyer y Félix Candela, mientras que Maillart, Nervi y

Morandi parten solos para conducirnos a la cruda potencia de los pilares de los viaductos de las autopistas o la elegancia de los prefabricados de Mangiarotti.

El hormigón a la vista trata de rescatar ciertos valores de masa y de muralla, ciertos juegos de luces toscas y de sombras profundas que habían quedado atrás en la prehistoria. Las posibilidades plásticas de este material son infinitas, porque es posible producirlo en componentes simples, como paneles paredes o paneles de cobertura, como pilastras o pilotes, como parasoles: pero también es posible echarlo en moldes de cualquier forma y dimensión. (...) Al contrario que el hierro, que goza de la explicitación de los comportamientos estructurales, (...), el hormigón armado (...) pretende ser el único en caracterizar, en su sustancia táctil, las construcciones modernas: y esta ruda fascinación sirve mejor que el hierro para caracterizar la pesadumbre de la situación actual, los impedimentos para hallar una solución elegante de los problemas, la poca confianza en nosotros mismos, en nuestra civilización, en la misma cultura tecnológica que lo ha creado. La falta de refinamientos, el rechazo del acabado, de los revoques y de las decoraciones que no broten de lo vivo del molde caracterizan, después de tanta esterilización racionalista, el grueso de la edificación de esta última posguerra, en la que la crisis de la civilización burguesa debe ajustar cuentas con las poquísimas esperanzas de un futuro mejor.

Es en ese momento, al final de la primera mitad del siglo XX, que el uso del hormigón armado se transforma en cierto modo. Si primero se usó el hormigón como refuerzo escondido de la piedra, luego como sustituto o sucedáneo de la madera y el hierro (con las estructuras de barras que posibilitaron su uso generalizado), en ese tiempo se asumió por fin, en la concepción formal de la arquitectura, que el hormigón podía ofrecer su propio proceso de elaboración. Siempre se había construido en hormigón siguiendo la secuencia propia del material: una mezcla de áridos y aglomerante vertida en un recipiente donde antes se han colocado unos refuerzos metálicos de manera que resuelvan las posibles tensiones. Cuando por fin se comprende que ese recipiente es molde, se incorpora una visión escultórica (en cuanto al proceso) del posible resultado formal.

Por su parte el problema estructural se concentra en los nudos, en los enlaces. Aparecen maneras distintas de afrontar el cálculo estructural que implican tomar los elementos superficiales como estructurales. Ya no son sólo las barras y cables, que se pueden asimilar matemáticamente a un elemento lineal, o los arcos que se pueden analizar en el mismo plano en que se plantean los esfuerzos. Los elementos arquitectónicos superficiales deben calcularse como caparazones que responden a las sollicitaciones de manera conjunta y se debe estudiar la trayectoria que las tensiones siguen por ellas para apurar el cálculo hasta donde se pueda. Los apoyos y las articulaciones pasan a ser empotramientos, de modo que las tensiones se reparten por todo el esqueleto contribuyendo a un monolitismo general para todo el edificio. La posibilidad de este empotramiento en los nudos permitió fusionar la viga al pilar y pensarlos a la vez. Se iba configurando una "nueva" arquitectura para un "nuevo" material, una arquitectura que permitiría formar conchas, cáscaras, esbeltas estructuras con continuidad real entre pilares y vigas, concavidades y convexidades y una plástica de la línea curva y las superficies continuas que ofrecía una nueva expresividad.

Este cambio en la concepción de la arquitectura de la mano del cambio en los procesos de construcción y el tipo de cliente favorece una madurez del proyecto en hormigón.

El inevitable paralelismo entre esta arquitectura y la que se produjera de la mano de la piedra obliga a una reflexión. Por un lado, es cierto que los edificios de hormigón

“rescatan (según Quaroni) ciertos valores de masa y muralla y ciertos juegos de luces toscas y sombras profundas”; pero sólo eso. No reviven todos los conceptos arquitectónicos que subyacen en la arquitectura de piedra, en lo que atañe a la construcción y a los principios estructurales, ni siquiera a los diversos conceptos espaciales que el Románico y el Renacimiento construyen en piedra.



Vista cenital de la capilla de los Reyes en Santo Domingo.



Interior del restaurante Los manantiales en México.

No se trata sólo de un nuevo material para un “revival” arquitectónico, con la facilidad de formar las piedras en fábrica (lo que ha ocurrido con la llamada piedra artificial), sino de una nueva posibilidad plástica que permite a la modernidad dar otro uso a aquellas formas curvas que, resolviendo problemas estructurales, adquirieron una gran carga simbólica y una gran potencia espacial.

También desde la llamada “piedra artificial” se pudo haber llegado, en la lógica evolución técnica, a lo mismo; puesto que la posibilidad de formar “sillares” artificiales, en taller, está en el arranque de la prefabricación que acompañó a la arquitectura del hormigón armado. Sin embargo el interés que tiene hablar de una arquitectura de hormigón situada en el centro del siglo veinte, radica en la capacidad de la producción de obras que ofrecieron un referente arquitectónico, y por tanto artístico, a su tiempo.

En este sentido hay que entender que el interés de la prefabricación no está en la posibilidad de fabricar sillares con la forma deseada, sino de estructurar el propio proceso de ejecución a través del diseño de formas descomponibles en fragmentos que se acoplan, como procedimiento alternativo al vertido “in situ”.

3.5.3. Formas blandas

En los años 30, la arquitectura de Wright, prefigura un camino de diseño en las formas arquitectónicas que utiliza lo organicista como material de trabajo y como reacción opuesta a los edificios prismáticos abstractos y estucados del racionalismo; manejándose con comodidad con soluciones que expresamente fracturaban los volúmenes abstractos para construir hogares más “acogedores”:

Tampoco se puede ignorar lo que representó en la arquitectura racionalista la adopción de formas constructivas vernáculas, como la bóveda catalana o los movimientos en los muros que se apartaban de una geometría simple. Este acercamiento del racionalismo más abstracto a la materialidad propia de lo tradicional abre las opciones formales, que parecían cerrarse en sí mismas, del movimiento moderno.

Las cúpulas, las bóvedas, los arcos, etc., fueron en su momento el resultado de una voluntad constructora más o menos novedosa; pero no de una voluntad de expresión; esas formas espaciales de una potente claridad han contribuido a configurar la memoria colectiva. Las formas curvas de la arquitectura histórica han aportado la

expresividad y la concepción espacial que la arquitectura moderna ha adoptado como material de trabajo.

La coincidencia en el tiempo de ciertas condiciones propició que la arquitectura de los 50 acabara ofreciendo un panorama de cierta entidad y distinto de lo que ocurriera antes y después sin que, de todos modos, se pueda hablar de un estilo arquitectónico.

3.5.4. Años cincuenta

Si hubiera que caracterizar la arquitectura de la década de los cincuenta sería ineludible hablar de lo peculiar de las formas de ciertos edificios (siempre sin ignorar otros muchos coetáneos que siguieron la plástica heredada del racionalismo): formas redondeadas, aristas curvas, superficies continuas, alabeadas, etc. Una estética, o mejor, una plástica que no esconde una especie de antojo por lo *blando*, por el aspecto de lava volcánica. La proximidad con las cualidades formales de la lava o de las formaciones calcáreas de las grutas parece venir de la mano del propio material, un fluido que solidifica: el hormigón. La arquitectura echó mano de las formas de la naturaleza por la puerta de la geología y de la zoología en su camino de la búsqueda de formas que encarnaran con una nueva figura los nuevos conceptos estructurales que sólo el hormigón había aportado. Así que en la arquitectura del hormigón coinciden *grutas* y *huesos*.



Centro comercial de Windward City en Kanehoe , Hawai (1957, George J.Wimberly, Howard L. Cook). Basílica de Syracuse (1956, Bourbonnais y Sainsaulieu). Prefabricados para el Centro de Estudios Hidrográficos (1960, Miguel Fisac).

3.5.5. Estática, estética y construcción.

Cuando se pueden aceptar tracciones las formas pueden ser más libres. Sin embargo, esta libertad no siempre ha significado más belleza, aunque estas apreciaciones estéticas son difíciles de valorar. La colaboración entre científicos, técnicos y artistas que se ha dado en la construcción en hormigón armado ha sido buena para evitar que la imaginación de los artistas se desbordara en algunas ocasiones y también para impedir que la frialdad de los cálculos apartara definitivamente los valores estéticos del proyecto de arquitectura.

La economía de medios y la organización de los procesos constructivos, ha sido clave para no perder la sensatez que, por otro lado, ha abundado en los proyectos más interesantes. Algo para lo que ha sido trascendental la colaboración entre arquitectos e ingenieros. Proyectos muy libres en su apariencia se han sometido al rigor del cálculo y de la geometría para poderse construir.

Muchos arquitectos e ingenieros de la época han escrito sobre su obra construida y han aportado su punto de vista. Curiosamente muchos de ellos coinciden en que la colaboración entre una y otra profesión ha sido una característica fundamental en la

arquitectura del siglo veinte. Pier Luigi Nervi, por ejemplo, habla de la colaboración entre tres agentes: arquitectos, ingenieros y constructores que aportan a la obra de arquitectura otras tantas componentes: la estética, la estática y la técnica.

Nervi considera que una obra de arquitectura no lo es sino se construye o se define todo para que la construcción sea posible. Sin eso es sólo un dibujo. La definición de la forma de la obra arquitectónica debe, pues, incorporar, como un condicionante más, la precisión del cálculo tensional y la técnica constructiva y sus respectivas servitudes.

Aunque, tal como opina Nervi, lo óptimo no es que haya una colaboración entre estética, construcción y estabilidad sino que sean tres caras de un mismo prisma, que intervengan a la par en el diseño de la obra. Tanto da si se trata de tres personas distintas como si se trata, como en el caso de los arquitectos del Renacimiento, de que las tres mentalidades estén en la misma persona. En cualquier caso la sintonía entre ellas sería lo deseable.

Por su parte Eduardo Torroja, ingeniero, publicó varios textos con un marcado carácter pedagógico, donde ayudaba a tener una visión generalista de las obras de arquitectura sin separar nunca técnica de arte:

"Pero sin olvidar que el cálculo no es más que una herramienta para prever si las formas y dimensiones de una construcción, simplemente imaginada o ya realizada son aptas para soportar las cargas a que ha de ser sometida.

(...) Pero todo proyectista que olvide sus principios, está expuesto a grandes fracasos.

" El nacimiento de un conjunto estructural, resultado de un proceso creador, fusión de técnica con arte, de ingenio con estudio, de imaginación con sensibilidad, escapa del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración."

De hecho la historia está llena de casos en que uno o dos de los tres puntos de vista no ha estado en el tablero desde el principio y los desajustes se han pagado, o bien con dinero del cliente o bien con cambios imprevistos que han modificado la forma del edificio.

El deseo de conseguir una figura con una silueta concreta no es siempre consecuencia del material o del sistema constructivo. Las formas, que propongo llamar *blandas*, han aparecido en la arquitectura desde siempre, pero las que derivan del lápiz o del cincel del proyectista no tienen justificación más que en la inspiración de éste. Algunas formas curvas del Expresionismo o del Modernismo eran gestuales, no emanaban de requerimientos estructurales o constructivos, sino que eran buscadas por su potencia o sus valores plásticos. Este tipo de figuras no aparecen en la arquitectura de los años cincuenta de pronto o de una manera espontánea, como casi nunca ocurre. Desde la Einstein Turm de Mendelson (1920), a la fachada ondeante de La Pedrera de Gaudí (1905) son trabajos cuyo motivo plástico es la superficie curva.



Croquis y vista de la Torre Einstein de Mendelson en Postdam, Alemania. Vista y detalle de la fachada de la casa Milá (La Pedrera) de A. Gaudí en Barcelona.

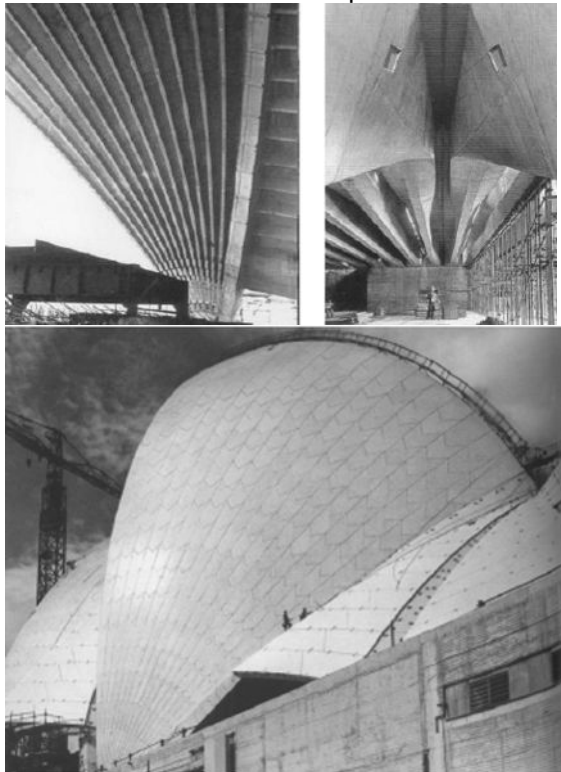
Ninguno de los dos ejemplos se construyó en hormigón pero, en la mente de todos, su forma alude o, más exactamente, “prelude” a esa arquitectura, que será posterior; Como si la forma hubiera sido anterior a la posibilidad de ser así.

Si este tipo de estética arquitectónica hubiera sido construido después de la emancipación del hormigón como protagonista de la arquitectura, se podría suponer que la forma sucede a la novedad técnica, pero estos dos ejemplos hacen pensar que esa secuencia no es así sino que, por lo menos, se produce en el sentido inverso.

Después del deseo de un lenguaje formal se encuentra un medio físico (material y técnica constructiva) que será campo de juego, lugar de trabajo e investigación para un modo de hacer.

3.6. Obras significativas.

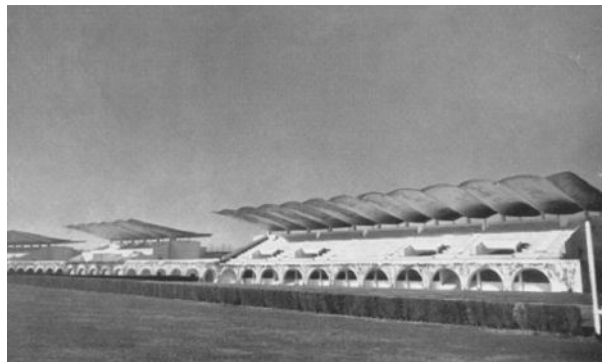
La **Opera House en Sydney de Jørn Utzon**, de 1956 es un caso de uso de la forma geométrica como solución a los problemas de arquitectura. Hay dos elementos en este edificio que son ejemplos de formas de transición: las costillas que forman la estructura de la cubierta y las vigas que forman el forjado de la gran plataforma de acceso al edificio están formadas por elementos de sección variable.



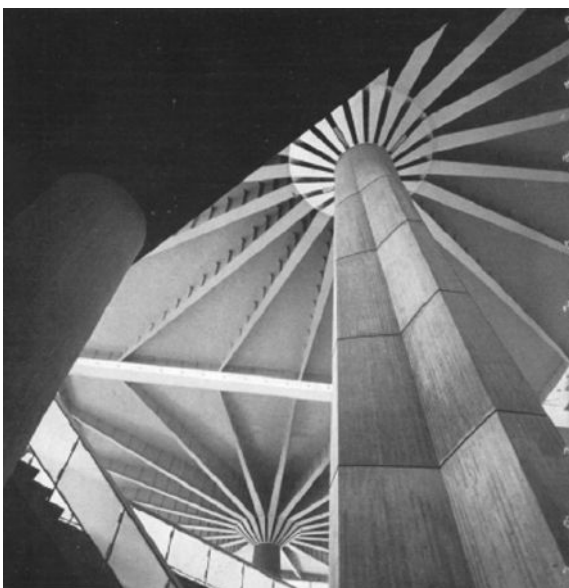
Dos edificios de **Eero Saarinen** pueden ser analizados, desde el punto de vista de la forma, como casos de transición: la cubierta de la **terminal de la compañía Trans World Airlines** en el aeropuerto internacional de Nueva York de 1956 y el **arco monumental** en memoria del presidente de los Estados Unidos Thomas Jefferson de 1947 en Sant Louis. Estos dos casos son muy diferentes en el uso de geometría y en la concepción de su forma (aún siendo obra del mismo arquitecto); sin embargo, ambos resuelven y trabajan el control de la forma por secciones como método de trabajo.



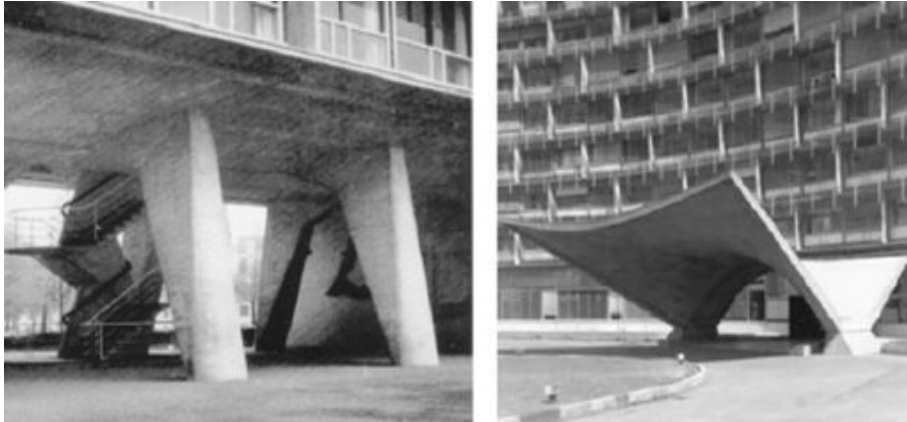
La cubierta de la tribuna del Hipódromo de la Zarzuela de Eduardo Torroja de 1934 en Madrid. Este caso no sería estrictamente de transición puesto que se trata, en principio, de la colocación de una porción de hiperboloide de una hoja. Sin embargo, en el proceso de proyecto, algunas decisiones tomadas por los arquitectos lo convirtieron en un caso claro de superficie entre líneas definidas.



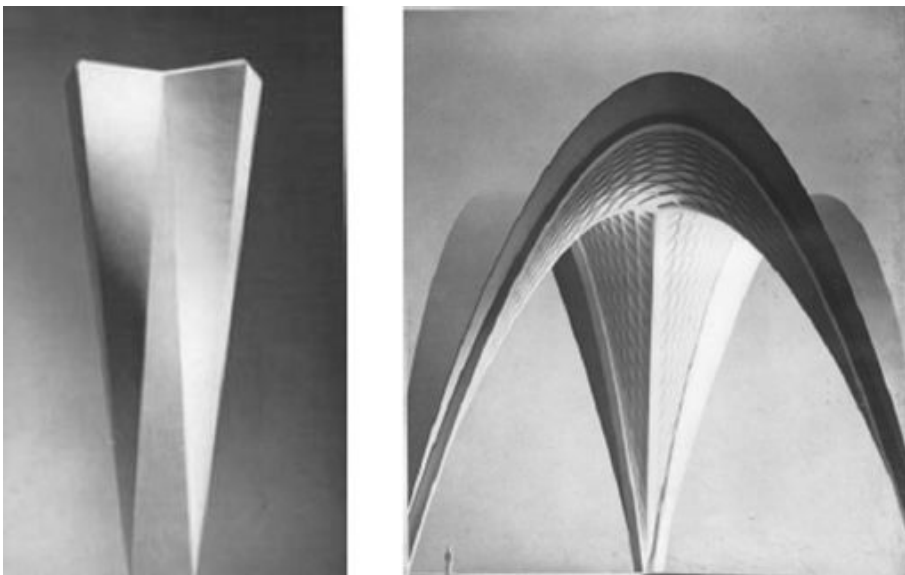
De Pier Luigi Nervi hay muchos casos estudiados que se ajustan a los parámetros que encuadran este estudio. Por ejemplo el gigantesco pilar del Palazzo del Lavoro de la ciudad de Turín que resuelve la transformación de una silueta en cruz a una silueta en círculo.



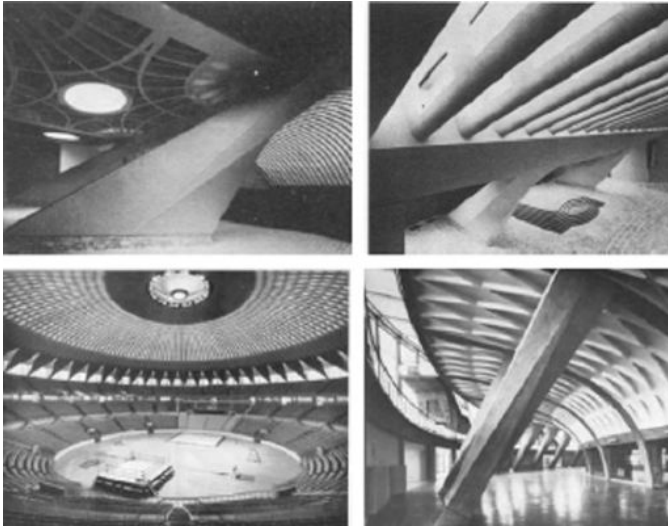
La sede de la UNESCO en París, obra de Marcel Breuer y Bernard Zehruss, en la que también intervino Nervi, tiene ejemplos de transición en los pilares del Secretariado, en la marquesina de la entrada sudoeste y en los pilares interiores de la sala de asambleas.



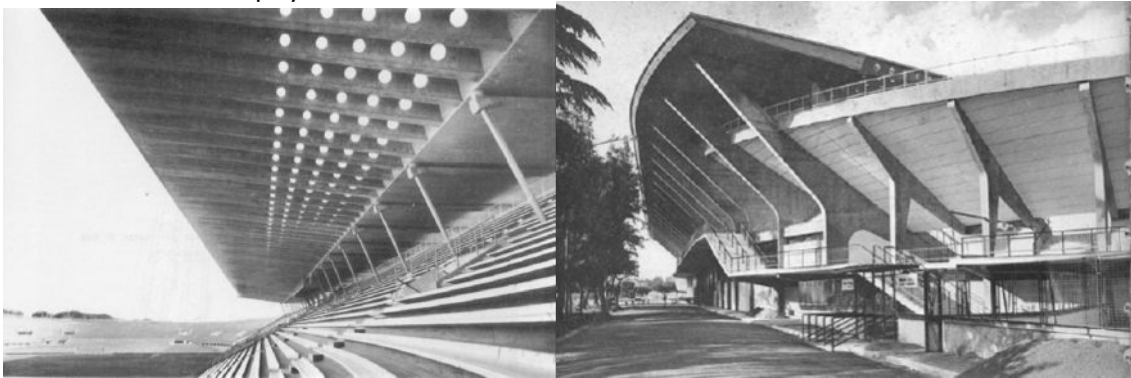
La estación de autobuses de Nueva York se apoya en una hilera central de pilares que tienen una base rectangular y un capitel en forma de lazo. También los pilares y la cubierta del proyecto para la catedral Benedictina de New Norcia (Perth, Australia), son ejemplos de formas que resuelven un cambio de trazado o de sección.



También en Roma se encuentran dos edificios de Nervi como el Aula de Audiencias Pontificias y el Palacio de los Deportes, donde hay casos de formas de transición como en los pilares de caras alabeadas y los elementos que forman las cubiertas que se plantean, en ambos casos, como superficies formadas por la variación de la sección del elemento estructural.



El estadio Flaminio en Roma tiene en su marquesina un ejemplo de superficie alabeada generada por el cambio de una arista de horizontal – en el extremo del vuelo- a vertical -en el extremo del apoyo.



Siguiendo con los casos de la obra de Nervi, el Puente del Risorgimento en Mantua consiste en plantear la sección más adecuada a las solicitaciones en cada tramo y la transformación de una sección en otra genera una forma curva de transición.



También la espectacular cubierta de la catedral de San Francisco, en los Estados Unidos, es un ejemplo de superficie alabeada, y si se mira como la transformación de un perímetro cuadrado a una cruz que mira al cielo, se puede incluir en esta selección de casos. Más claro es el caso del pilar que soporta esta cubierta que transforma un polígono, en la base, en otro distinto en el capitel.



De Eladio Dieste, se han estudiado varios edificios pero se han incluido aquí sólo la cubierta y los muros ondulados de la iglesia en Atlántida, cerca de Montevideo, Uruguay. Los muros constituyen una transición entre la línea recta del suelo y la línea ondulada a nivel de la cubierta. Mientras que ésta, por su parte, resuelve la transición entre las ondas del coronamiento de los dos muros siguiendo un trazado de catenaria. Otra cubierta también singular es la de la nave de control Technisches Überwachungsamt en la ciudad de Darmstadt (Alemania) de Hermann Tuch de 1958 que, aun siendo estrictamente un conoide simple, se ha escogido precisamente por ser la superficie que resuelve la transformación de una línea curva en una recta.



El desaparecido edificio torre de Miguel Fisac para los **Laboratorios Jorba en Madrid** es un caso emblemático de la arquitectura española de los años sesenta. En él se plantea un problema de transición claro: cada planta del edificio gira 45° respecto de la anterior y entre las ventanas de una planta y las de la siguiente se generan superficies alabeadas.



3.7. Búsqueda de la forma con Método de Elementos Finitos.

3.7.1. Estudios de la estructura de la naturaleza.

Estructura y remodelación de huesos

El sistema óseo humano está diseñado para proteger órganos internos y para proporcionar tanto apoyos rígidos al cuerpo como sitios de atadura de músculos facilitando su accionar y de esta forma contribuir a estabilizar y movilizar al cuerpo. Los huesos tienen propiedades mecánicas únicas que le permiten realizar estas funciones, constituye uno de los materiales más rígidos del cuerpo. Entre sus características relevantes se destaca su notable capacidad de autoreparación ante eventuales degradaciones o daños, así como su veloz adaptación a los cambios en el campo de tensiones reinantes.

Se reconocen dos tipos fundamentales de estructuras óseas. Por un lado el hueso cancellous (llamado también trabecular o esponjoso) y por otro el cortical (llamado también compacto). El hueso cortical, cuya sección transversal se presenta en la figura 1, posee 4 veces más masa que el hueso cancellous. El material básico de ambos huesos pareciera ser el mismo y la distinción entre ellos estaría dada por el grado de porosidad y su distribución. El rango de porosidad del hueso cortical es de 5% al 30%, mientras que en el hueso cancellous es del 30% al 90%. La porosidad del hueso no es fija y puede cambiar con el transcurso del tiempo en respuesta a una alteración de cargas, enfermedad y envejecimiento.

El hueso cancellous está siempre rodeado por el hueso cortical. Este tipo de hueso se encuentra típicamente en los huesos alargados formando una especie de cobertura de contención o delimitación del hueso trabecular, constituyendo una cáscara del mismo.

En este trabajo se presenta la faz inicial de un programa de investigación enfocado al análisis microestructural del comportamiento del hueso. En esta línea se han desarrollado diversos ensayos numéricos de compresión sobre muestras de hueso. Sobre estas muestras se realizan estudios de sensibilidad a l efecto tamaño y se analiza la sensibilidad de su comportamiento de respuesta frente a la porosidad del hueso.

El objetivo final del programa de investigación en el que se enmarca este trabajo es desarrollar un modelo constitutivo continuo, no lineal para huesos basado en las propiedades mecánicas relevantes del mismo a nivel microestructural y con capacidad para reproducir la marcada anisotropía de su respuesta mecánica.

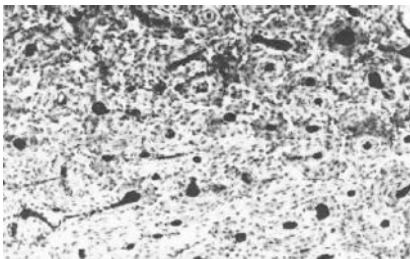


Fig. 1 Sección transversal del hueso cortical o compacto

En las últimas décadas las herramientas de cálculo numérico computacional y en especial el Método de los Elementos Finitos (FEM) se han popularizado en el campo de la biomecánica y la ortopedia. Estas herramientas originalmente desarrolladas en el campo de la ingeniería, permiten crear los medios virtuales para el estudio del aparato músculo-esquelético y de esta manera determinar el comportamiento mecánico de

sistemas hueso-implante sin necesidad de intervención y experimentación en el cuerpo humano. Al mismo tiempo es posible desarrollar y trabajar con modelos individualizados, que consideren las características particulares de cada paciente y que ayuden en la exploración y búsqueda de soluciones a problemas específicos antes de la intervención quirúrgica. La construcción de un modelo de EF necesita definir la geometría del problema (morfología ósea), junto con la información de sus propiedades mecánicas y cargas (fuerzas) aplicadas.

Por su parte, las imágenes médicas procedentes de los estudios de tomografía computarizada (TC) son herramientas usuales para el diagnóstico médico. El reformateo y procesamiento de las imágenes axiales de TC permite obtener reconstrucciones bidimensionales (2D) en los planos sagital, coronal y oblicuo o tridimensionales (3D) mediante la utilización de software específicos (Volume Rendering, Surface Rendering).

En biomecánica, y en el caso particular del modelado de estructuras óseas, las TC suministran la información detallada de la geometría y densidad de las mismas. En la actualidad existen diversas metodologías para modelar estructuras óseas (de mayor o menor precisión), mientras que no se dispone aún de una herramienta exacta para determinar las propiedades (o constantes elásticas) a partir de la densidad del hueso.

La metodología propuesta para obtener la información del modelo de FEM a partir de las imágenes de TC se describe a continuación, al tiempo que se lo ilustra para el caso de la articulación gleno-humeral (GH).

MATERIAL Y MÉTODO

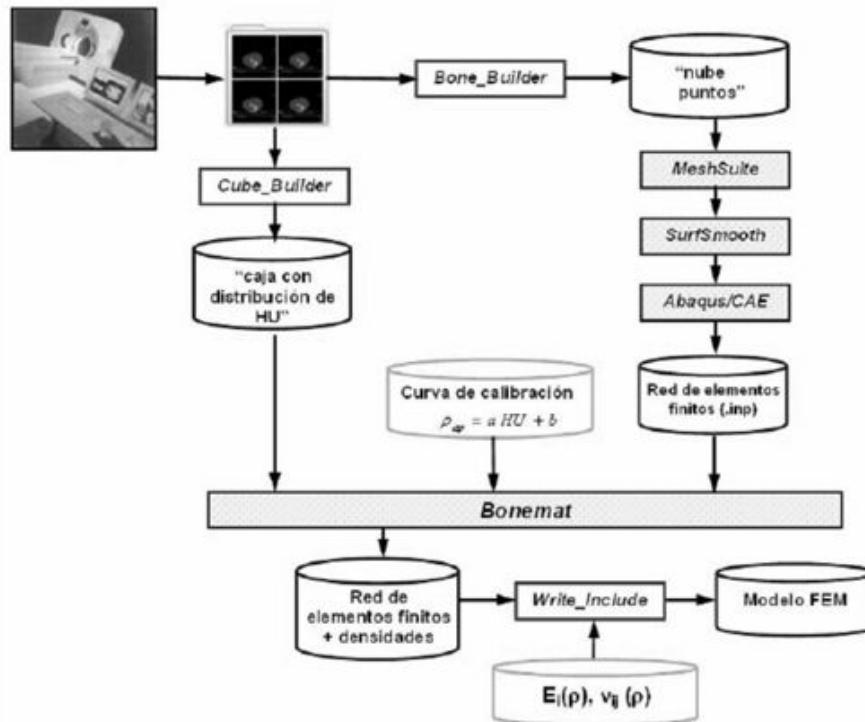
Este FEM es usualmente reconocido como la invención más importante de la ingeniería computacional. Ésta fue desarrollada como una herramienta potente y versátil de diseño ingenieril que sirve para el estudio del comportamiento de componentes y estructuras mecánicas complejas sujetas a estados arbitrarios de carga. En pocas palabras, el FEM consiste en dividir la estructura en pequeñas partes (elementos), cuyo comportamiento se describe en forma simplificada. Los elementos son entonces "reconectados" a través de puntos clave (nodos). El proceso resulta en un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas de cuya solución se obtiene la respuesta del problema (desplazamiento, deformaciones y esfuerzos). Los nodos y elementos en un modelo pueden ser varios cientos o miles, por lo que es mandatorio el empleo de computadoras para la solución del problema.

El modelo de FEM requiere que la información sobre la geometría del problema le sea proporcionada a través de la posición de los nodos (matriz de coordenadas) y cómo estos se encuentran conectados para definir los elementos (matriz de conectividad). Luego se deben especificar para cada elemento las constantes elásticas.

SIMULACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA RED DE ELEMENTOS FINITOS

Diego S. D'Amico, Adrián P. Cisilino, Mario R. Sammartino, y Carlos Capiel

A lo largo de esta investigación se desarrolló la construcción de la red de elementos finitos siguiendo el siguiente esquema, que muestra el paquete computacional desarrollado para la generación de las geometrías óseas a partir de TC, su discretización y la asignación de propiedades mecánicas a la misma:



Se realiza un ensayo por medio de FEM para el análisis de la estabilidad de un implante gleno-humeral.

Se describen brevemente los puntos seguidos:

Las imágenes con los cortes transversales fueron procesadas para obtener los puntos (nodos) en el dominio y la superficie del modelo. Con este propósito se desarrolló la rutina BonesBuilder en MatLab. Esta rutina coloca puntos sobre el contorno y el interior de las siluetas, utilizando una grilla regular que superpone sobre cada una de las imágenes (ver Fig. 2.a). Los puntos en el volumen son aquellos coincidentes con las intersecciones de las líneas horizontales y verticales de las grillas, mientras que los puntos sobre la superficie están dados por las intersecciones de las líneas de las grillas con el borde de la silueta. De esta forma resultaron 33.822 puntos para el húmero y 24.872 puntos para la escápula (ver Fig. 2.b).

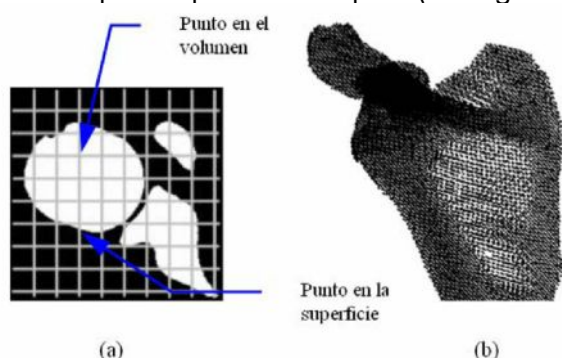


Figura 2: Generación de la nube de puntos: (a) grilla sobre la imagen; (b) nube de puntos correspondiente a la escápula.

La reconstrucción de la superficie de los modelos del húmero y la escápula se realizó por medio del programa MeshSuite, que utiliza la técnica de Extended Delaunay Tessellation. De esta forma la superficie exterior de los modelos queda definida por un conjunto de superficies triangulares (ver Fig. 3.a). Como puede observarse en esta

figura, algunas regiones de los modelos presentan fuertes discontinuidades, las que son consecuencia de transiciones abruptas de su geometría debido al espaciado tomográfico. Para la solución de este defecto se utilizó un algoritmo de relajación de las coordenadas de los nodos (subrutina Surf Smooth), el que posibilita “suavizar” la superficie del modelo. Debido a que este proceso tiende a eliminar detalles geométricos del modelo, el número de veces que se aplica el algoritmo (sucesivas suavizaciones de la geometría) resulta del compromiso entre la mejora de la calidad de la superficie, y la pérdida de precisión en la representación de la geometría. En este trabajo los mejores resultados fueron obtenidos luego de aplicar dos veces el algoritmo (ver Fig. 3.b).

Finalmente, las geometrías resultantes fueron importadas como sólidos en el programa de FEM Abaqus, el que fue utilizado para la discretización de su volumen utilizando elementos tetraédricos cuadráticos. De la discretización de los modelos sólidos se obtuvieron: para la escápula 33.358 elementos tetraédricos cuadráticos y 54.771 nodos, y para el húmero 48.196 elementos tetraédricos cuadráticos y 75.986 nodos.

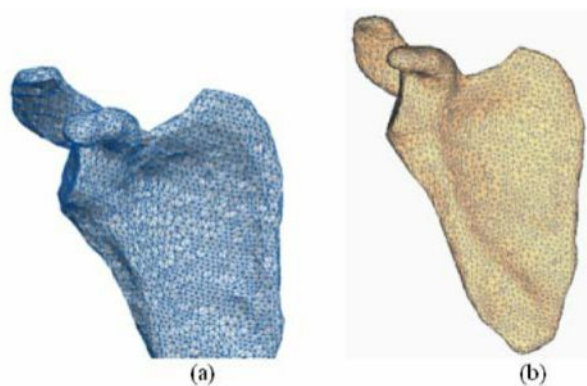


Figura 3: Reconstrucción de la superficie de la escápula: (a) geometría sin suavizar; (b) geometría suavizada.

ASIGNACIÓN DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS

Para modelar el tejido óseo como un sólido continuo se debe implementar un esquema de homogenización de sus propiedades mecánicas utilizando un parámetro que proporcione información sobre su microestructura. Típicamente la densidad es utilizada con este propósito, para lo que se dispone de un importante número de trabajos en los que se proponen correlaciones entre la densidad aparente del tejido óseo y sus constantes elásticas.

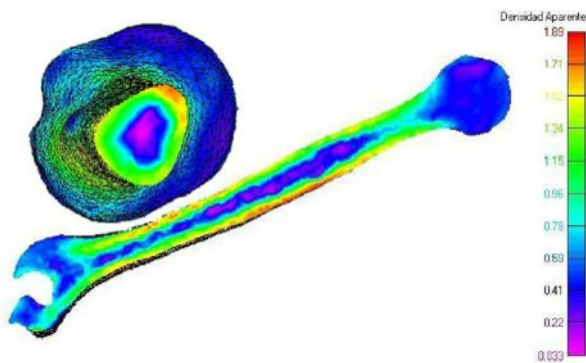


Figura 5: Contornos con la distribución de la densidad aparente en una sección longitudinal del húmero.

Finalmente las constantes elásticas de cada elemento son calculadas en función de su densidad utilizando las correlaciones propuestas por Taylor et. al. 10 para el tejido

cortical y por Yang et al¹¹ para el trabecular. Se utiliza una ley de homogenización de propiedades propuesta por Cowin¹⁴, de donde se obtienen las constantes ingenieriles isotropas efectivas E (módulo de Young) y ν (coeficiente de Poisson) para tejido cortical y trabecular a partir de las constantes ortótropas del tejido óseo (ver Fig. 6 y 7). Con este propósito se desarrollo la rutina de MatLab (WriteIncludes) para asignarle las constantes elásticas a la malla con los valores de densidades. De esta forma el modelo queda completo y listo para su análisis utilizando el paquete de FEM Abaqus/Standard.

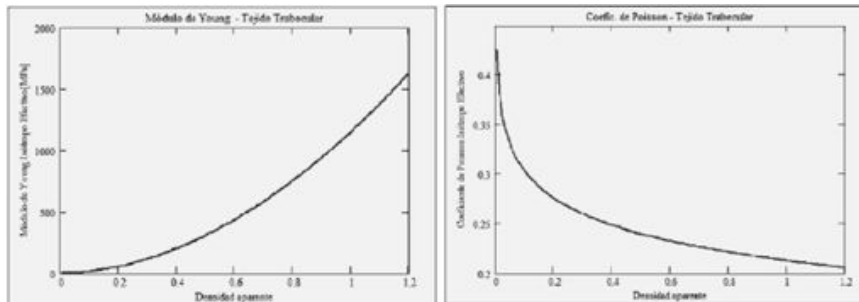


Figura 6: Constantes ingenieriles isotropas efectivas para el tejido trabecular.

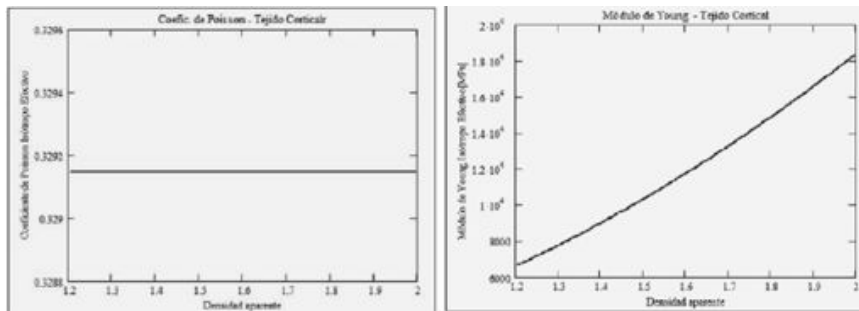


Figura 7: Constantes ingenieriles isotropas efectivas para el tejido cortical.

MODELOS. IMPLANTES

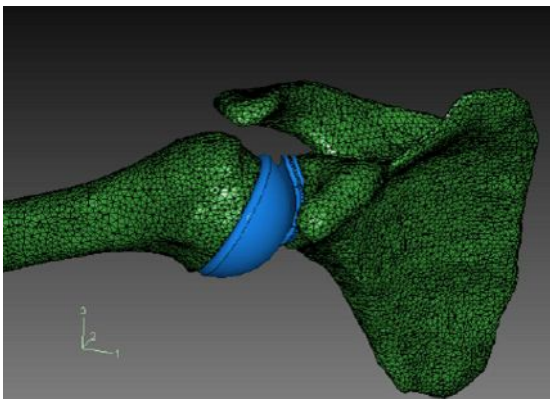


Figura 8: Modelo de huesos con implante

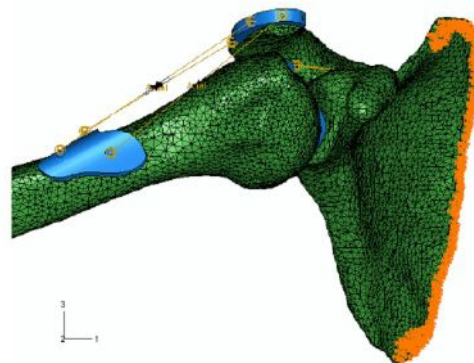


Figura 9: Condiciones de contorno y cargas aplicadas.

Varios investigadores han trabajado en el modelado de tejidos cartilaginosos. En este trabajo se adoptó lo propuesto por Büchler P. et. al., quienes utilizaron el software Abaqus para su simulación, y se asignó al cartílago las propiedades mecánicas de un material hiperelástico con comportamiento Neo-Hookeano e incompresible.

Como se mencionó con anterioridad, los músculos responsables del movimiento de abducción del brazo son el deltoides y supraespinoso, por lo tanto se colocaron para su simulación seis cargas del tipo conectores axiales que representan tres fibras principales para cada uno de ellos: anterior, medio y posterior (ver Fig. 9).

Para no generar tensiones elevadas artificiales en los puntos de inserción de los músculos, se colocaron en estas zonas pequeños suplementos sólidos que copian fielmente la superficie del hueso (sus geometrías fueron construidas a partir de operaciones booleanas entre los sólidos).

Además de la fuerza ejercida por los músculos, se tomó en cuenta el peso del brazo (18N), antebrazo y mano, y una carga de 3Kg. en la mano.

De esta manera se aplicó una carga puntual de 30 N en el extremo de la viga, para simular la carga en la mano, y se le asignó a la viga un valor de densidad para que actuando un campo gravitatorio de 9.81 m/s^2 ejerza un peso de 22 N (peso promedio del antebrazo y la mano).

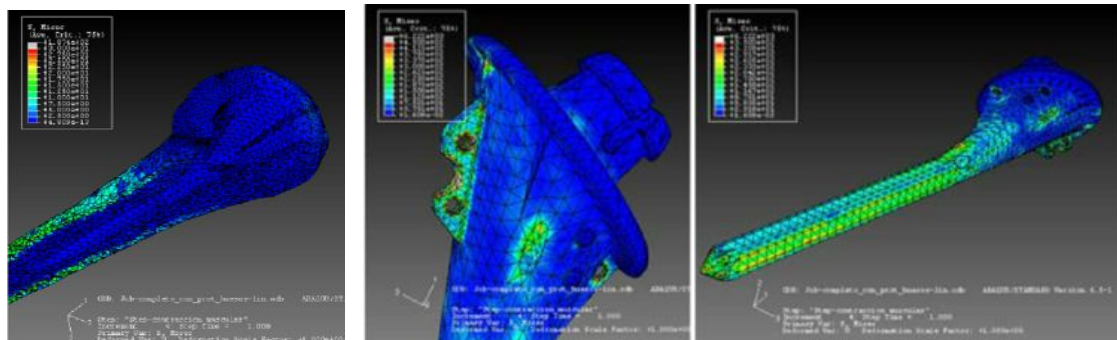


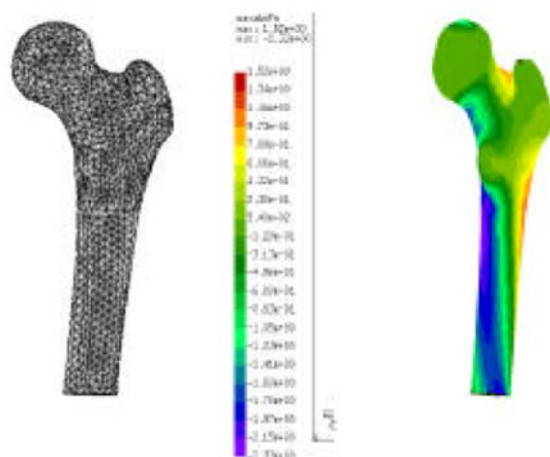
Figura 18: Corte longitudinal del húmero con implante. Figura 21: Distribución de tensiones en el talo del implante.

En este trabajo quedó demostrado que las TC proporcionan la información necesaria para la generación de modelos mecánicos de estructuras óseas. Se desarrolló una metodología que permite construir un modelo computacional de la morfología ósea. Como se pudo comprobar durante el desarrollo del trabajo, este método resulta adecuado para huesos de cualquier tipo de geometría al procesarse con éxito un hueso plano como la escápula y uno largo como el húmero.

Por otro lado, se logró homogeneizar la ley de comportamiento del tejido óseo y modelar su dependencia con su densidad aparente. La ley de comportamiento fue definida elástica lineal e isótropa.

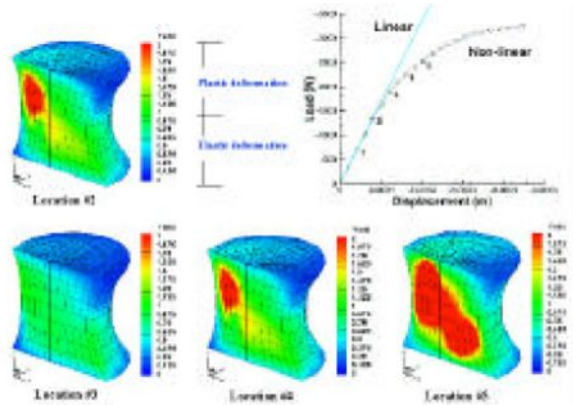
OTROS EJEMPLOS DE MODELADO DE HUESOS POR MEDIO DE FEM

Modelado numérico de la cabeza femoral



Universidad de Paderborn, Alemania.

Modelado numérico de la base trabecular de la vértebra L1



Universidad de Rutgers, Departamento de Mecánica e Ingeniería Aeroespacial.. of Mechanical and Aerospace Engineering

3.7.2. Aplicación al diseño estructural

A lo largo de los estudios realizados para un material vivo y capaz de regenerarse y adaptarse a la evolución como es el hueso, se han ido desarrollando estudios, en un primer lugar en medicina, con la incorporación de prótesis por medio del cálculo escrito con EF. Sin embargo, estos estudios se pueden adaptar a la búsqueda de la optimización del material estructural, llevando a la forma pura del diseño de cada elemento en función del comportamiento de dicho material.

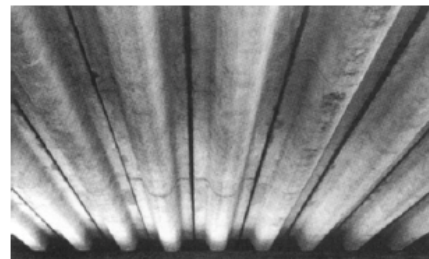
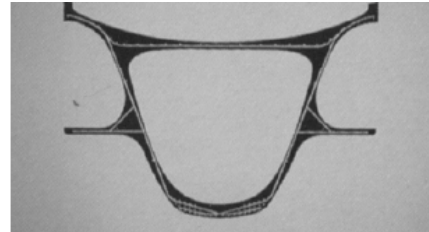
LABORATORIOS JORBA

Miguel Fisac. Madrid 1965-1967



Este edificio fue construido para albergar la producción, el almacenaje y las dependencias administrativas de los laboratorios farmacéuticos Jorba. La organización general del complejo se hizo de tal manera que los recorridos internos se redujeran al mínimo. Una torre exenta, en el extremo más próximo a la calle, reunía las diversas dependencias en dos naves rectangulares de planta libre y de gran luz, cubiertas a dos niveles distintos.

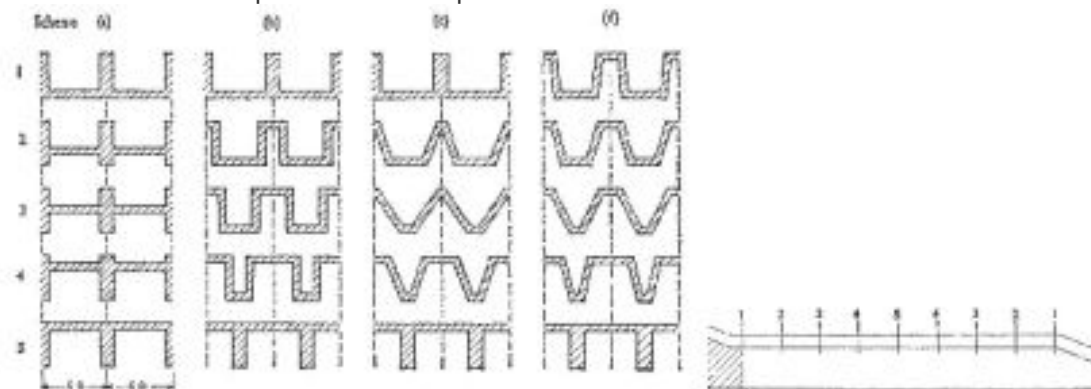
La estructura de las cubiertas de esta parte del edificio consistía en el uso de un modelo de viga patentado por el mismo Miguel Fisac. El diseño de elementos estructurales ocupó a Fisac durante mucho tiempo y de su estudio salieron diferentes patentes de vigas que basaban su solución en los principios estructurales de los huesos largos: láminas formando tubos con unas secciones parecidas a las vértebras. El sistema consistía en piezas de hormigón prefabricadas que se montaban en obra y se tensaban después. La apariencia resultante es la de una losa nervada.



ÓPERA DE HOUSE EN SYDNEY JORN UTZON 1956-1973

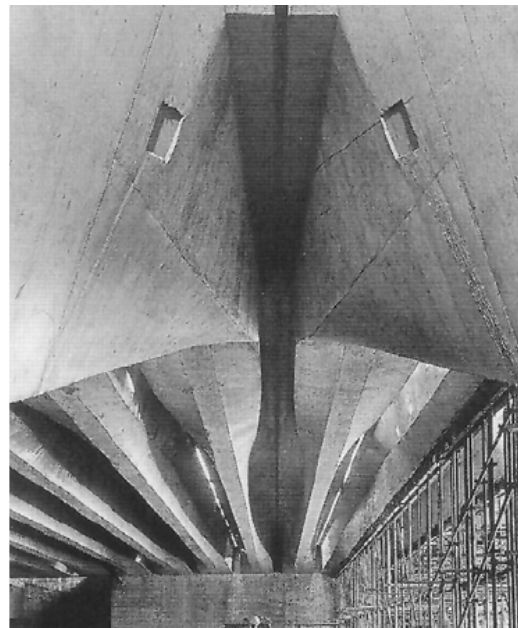
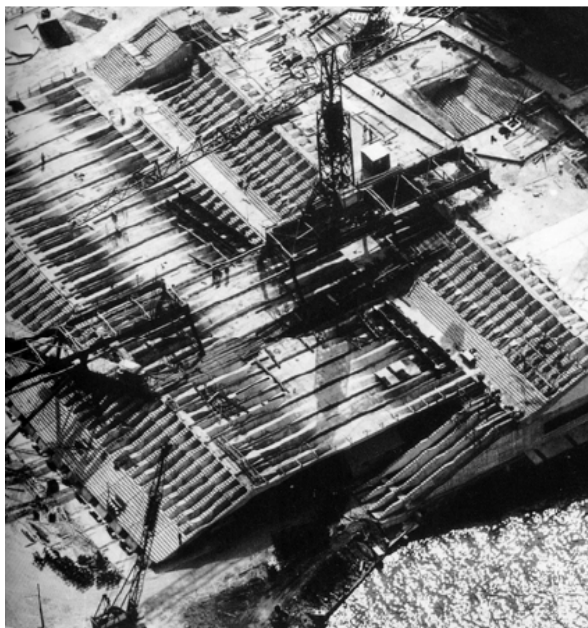
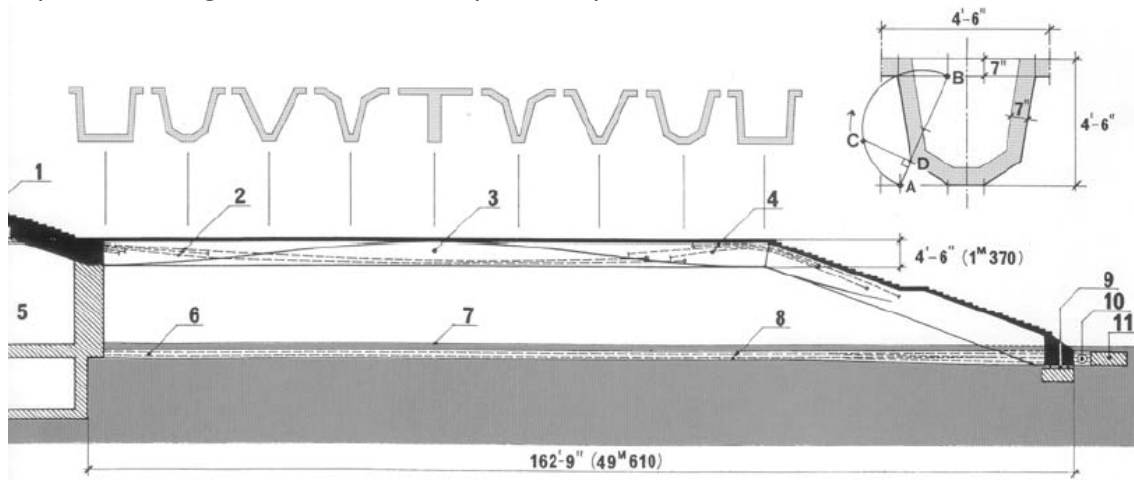
Extremos de vigas

Los criterios que determinan la forma de las vigas en la explanada de la Ópera House en Sydney son también de índole técnica. La evacuación del agua de lluvia y la necesidad de disponer de un plano perfectamente horizontal eran las dos premisas, aparentemente contradictorias, que llevaron al punto de fijar las dos secciones clave, como inicio del diseño de estas piezas. Entre estas dos secciones, una en los apoyos extremos y otra en el centro del vano, se desarrollaría una superficie formada por generatrices rectas, porque este tipo de superficies se podría adaptar mejor que otra a la técnica constructiva del hormigón. A partir de esta decisión se definió la primera versión formada de paraboloides hiperbólicos.



La tercera versión de este esquema corresponde a la primera propuesta con superficies alabeadas que son paraboloides hiperbólicos.

Sin embargo, las sucesivas versiones estuvieron gobernadas por criterios más estéticos que técnicos y siempre apoyadas en la geometría. La solución escogida por Utzon resultó ser la formación de una curva senoide que da una imagen voluptuosa de aspecto casi orgánico al techo visto por debajo.



Este forjado resulta ser, por repetición de la viga, una losa plegada. Este principio es un recurso muy utilizado en arquitectura para multiplicar la rigidez de elementos superficiales sin aumentar su grosor. Y será tema recurrente cuando se hable de forma y estructura. Este mismo principio ha sido utilizado para dar una rigidez y cuerpo a materiales originalmente flexibles como el papel o el cartón y encontramos muestras de su uso en multitud de envases de cosas frágiles, o en formación a los golpes y a la presión.

AULAS DE AUDIENCIAS PONTIFICIAS. CIUDAD DEL VATICANO, 1966-1971 PIER LUIGI NERVI

El edificio es un gran teatro para acoger un público numeroso pero con una maquinaria de escenario prácticamente nula. Se ha cuidado el acondicionamiento del local integrando en el diseño los elementos de climatización y de iluminación natural. Las dependencias auxiliares son mínimas y todo está pensado para favorecer el movimiento de una gran cantidad de personas en momentos puntuales.

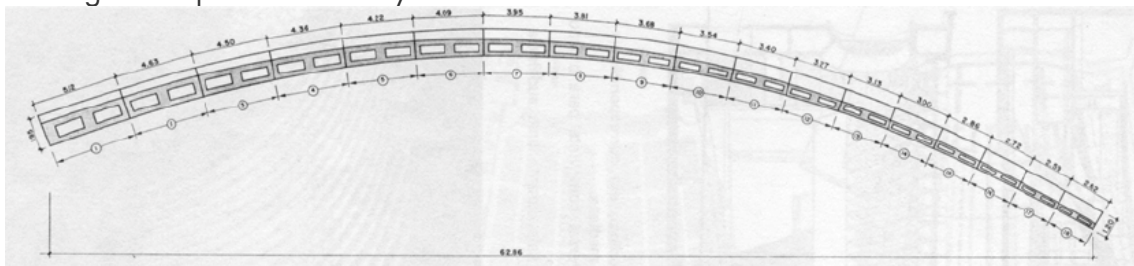
La planta del edificio es trapezoidal; en el lado estrecho del trapecio se sitúa el escenario y en el lado ancho un gran vestíbulo al cual se accede por un extremo, a través de una amplia puerta, casi directamente desde la Plaza de San Pedro. Los servicios públicos están en conexión directa con la sala: por cuatro escaleras que bajan a la planta sótano.

El forjado de la platea sigue un perfil curvado adecuado a los ángulos de visión óptimos para cada fila de butacas. La cubierta sigue, a su vez, un trazado parabólico suave.

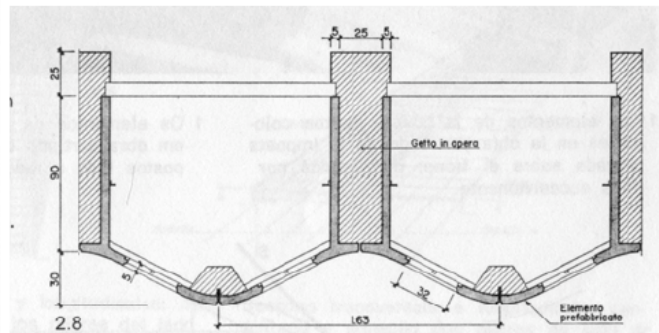
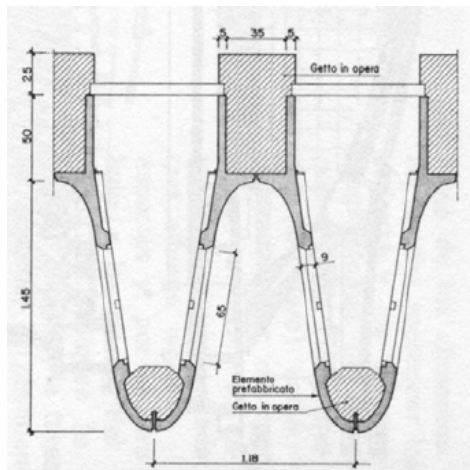
Todo el hormigón utilizado es blanco y se deja a la vista, con lo que se mantiene una imagen acorde con el color emblemático de la máxima autoridad de la institución eclesíástica.

La estructura de la cubierta se planteó arqueada y en sentido longitudinal, formando una bóveda nervada. Los 41 nervios, que son de sección ondulada, están perforados por aberturas que se permiten una iluminación natural de todo el interior y se disponen en abanico para cubrir la planta trapezoidal de la sala. En el lado del escenario, los nervios quedan recogidos por una gran viga cajón que se apoya a su vez en dos grandes pilares inclinados, de caras alabeadas. Por el otro lado, donde se sitúa el vestíbulo de acceso, los nervios se apoyan en un pórtico de diez pilares más pequeños, también inclinados pero de caras planas.

Cada una de las 41 vigas de la cubierta está formada por 18 piezas que se construyeron a parte y se montaron en obra. La sección de la viga ondulada y la inferior, que es la parte vista desde la sala, sigue unas ondas de trazado parabólico con tramos rectos acordados. Las ondas del extremo del escenario son más pronunciadas y estrechas, y las del extremo del atrio son más suaves y anchas. En los tramos planos del nervio, que son tangentes a las curvas, se practican unas aberturas rectangulares que van disminuyendo con la onda.



Sección longitudinal de uno de los nervios de la cubierta. En este dibujo se determina la disminución del canto del nervio.



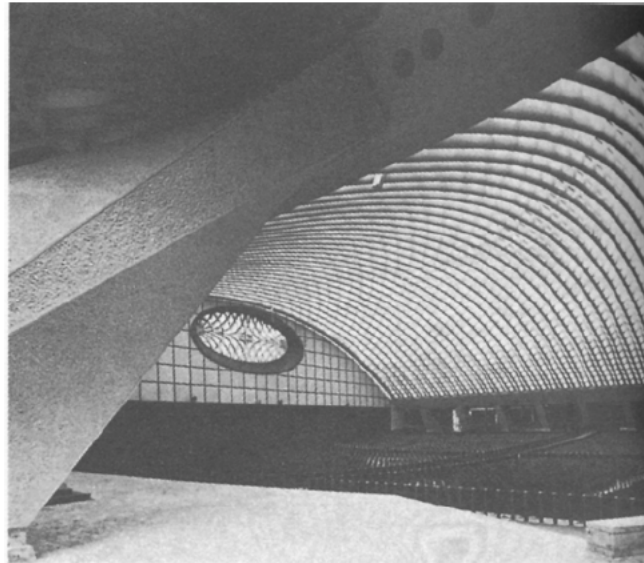
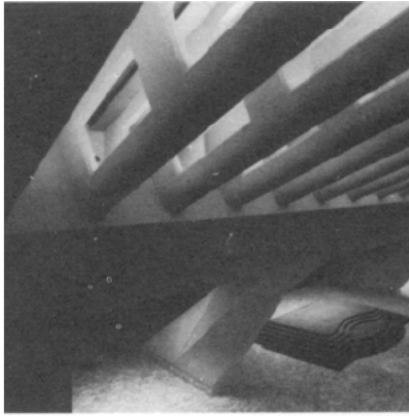
Secciones transversales de dos ondas contiguas. Las primeras por el extremo del escenario y las segundas por el extremo del atrio. La parte gris corresponde a la pieza prefabricada y la parte rayada al hormigón vertido in situ.

La parte superior de los nervios que queda oculta desde la sala queda formada por unos tabiquillos de 5cm de espesor y de altura variable, que constituyen un encofrado perdido para el vertido in situ con el cual se dota al nervio de una mayor rigidez. Las ondas convexas, a su vez sirven de encofrado perdido a unos cordones, de hormigón, vertido también in situ, que dan cuerpo a la losa en este punto, que es de sólo 5cm de espesor.

Las ondas pronunciadas de un extremo ofrecen un momento de inercia mayor por aumentar su dimensión vertical. Pero en el otro extremo, en que las ondas son más suaves, la inercia se consigue por la formación del nervio de hormigón vertido in situ.

Esta combinación de partes prefabricadas y partes construidas en obra sugiere una imagen de ingravidez acentuada por la gran proporción de aberturas que dejan pasar la luz. De hecho se trata de una losa muy delgada cuya forma le permite ser estable y actuar como lámina porque la trayectoria de los esfuerzos se dirige por el propio grosor del material. Pero su robustez está disimulada gracias a esta solución mixta entre la aparente losa nervada de ondas troqueladas y la cubierta oculta de vigas curvas de sección rectangular de hormigón.

De hecho, el diseño de sección variable contribuye a criterios de expresión formal. Hay un interés expreso en direccionar toda la sala hacia el escenario en una decidida voluntad de enfatizar ese punto. El techo parece ser una única pieza laminar que en la parte estrecha se ha ondulado más y en la parte ancha se ha estirado, casi como lo haría un elemento textil, el drapeado de una cortina fruncida. Se consigue una imagen unitaria de la comunidad acogida bajo el manto de la iglesia.



ANTONI GAUDÍ

Dos de los elementos arquitectónicos más usados por Gaudí en sus obras fueron los arcos y las columnas. Gaudí aportó grandes novedades a estas estructuras; fue el primero en utilizar el arco catenario en arquitectura al descubrir su mayor estabilidad frente a los arcos parabólicos, y sus columnas inclinadas fueron una gran novedad en su época.

Gaudí era de la opinión de que la nueva arquitectura que le inspiraba la observación de la naturaleza debía tener las características de la vida, que puede mostrarse con el color y el movimiento. Quería llegar a conseguir la continuidad que está muy presente en las figuras arboriformes y en el cuerpo humano (por ejemplo, los huesos son cilindros que se transforman en hiperboloides en las articulaciones). Gaudí, siguiendo su inspiración naturista, inició una búsqueda para conseguir imitar las formas de las ramas de los árboles al dividirse progresivamente al crecer.

De este modo obtuvo las columnas de la Sagrada Familia.



La fractalidad entendida como forma de crecimiento por autosemejanza, como el crecimiento de las ramas de los árboles. Gaudí aplicó el dicho popular: “Divide y vencerás” en las cubiertas del Templo de la Sagrada Familia tienen que soportar un enorme peso, que queda repartido en las columnas – ramas, que transmiten las cargas a sus columnas – tronco. Así, conseguía distribuir las cargas superiores a partir de los nudos elipsoidales.

Movimiento helicoidal. Se trata de crear formas arquitectónicas combinando translaciones con rotaciones. Lo encontramos en las escaleras de caracol de la Sagrada Familia, las chimeneas imaginativas del Palacio Güell o las columnas helicoidales del Park Güell.



Escalera de caracol de la Sagrada Familia y la columnas del Park Güell, respectivamente

Los arcos son estructuras arquitectónicas que, mediante el uso de formas curvas, sirven para cubrir un espacio. Gaudí utilizaba 3 tipos de arcos principalmente: el arco parabólico, el arco catenario y el arco funicular.

Arco parabólico

En las obras de Gaudí están presentes en las puertas de entrada del Palacio Güell, i también en su interior.



Arcos parabólicos de la entrada del Palau Güell, vistos desde el exterior



Puerta vista desde el interior del Palau

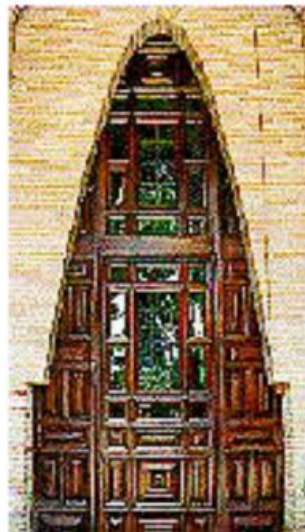


Arcos parabólicos del interior

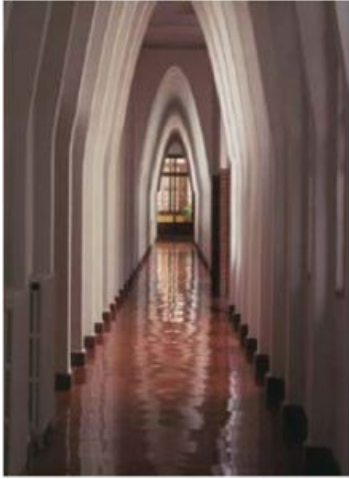
Arco catenario

A pesar de la óptima calidad del arco funicular o catenario en cuanto a resistencia, durante mucho tiempo se consideró que tenía una forma poco elegante y de difícil carga en los pilares, y no se utilizó en la arquitectura tradicional, para la cual se consideraban mejores las formas de arcos circulares, elípticos, etcétera. Gaudí rompió con toda esta mentalidad y usó este tipo de arco en muchas de sus obras.

En las obras de Gaudí podemos encontrar arcos catenarios en el colegio de las teresianas, sobretodo en el interior del convento, pero también en algunos ventanales del exterior.

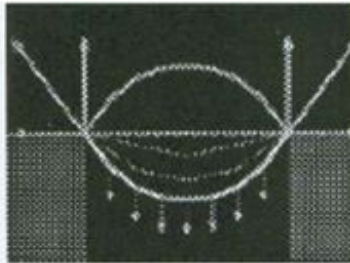
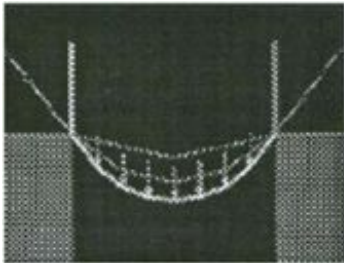
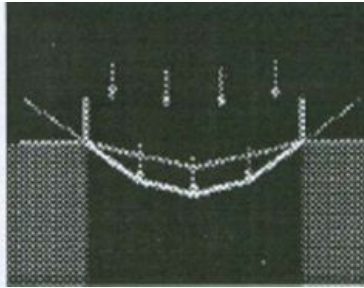
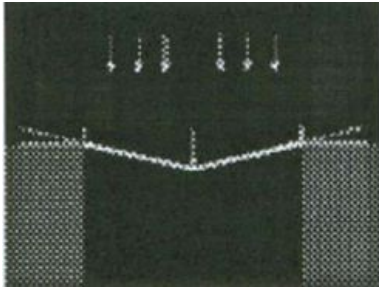


Arcos catenarios en un ventanal y en una puerta del colegio de las Teresianas, en el exterior



En los pasillos del colegio de las Teresianas se van encontrando más ejemplos de arcos catenarios.

Arcos funiculares



Secuencia de pasos para la formación de un arco funicular



Cuando hablamos de su formación, el arco catenario es la forma que adopta una cadena cuando se cuelga de dos puntos y sólo soporta su propio peso. Si la carga que soporta es horizontalmente uniforme, al colgarla de dos puntos adopta la forma de parábola. Si soporta diferentes cargas puntuales, la cadena o cable adopta la forma denominada arco funicular.

En cuanto al nivel de estabilidad, como ya hemos mencionado, los arcos catenarios son mucho más estables al no tender sus costados a infinito, sino a un punto concreto (asíntota). Además, Gaudí calculó que para arcos catenarios de igual longitud, cuanto más alta es la altura más pequeño es el empuje horizontal en los puntos de arranque y en la clave del arco, es decir, los arcos permiten gran altura sin empujes laterales.

4. Arquitectura textil

Ya hablamos en un punto anterior de la arquitectura vernacular, una arquitectura de lo mínimo, de mirar a la tradición en la búsqueda de la forma. Y en este punto hacemos una parada, miramos atrás y reconocemos en nuestra arquitectura contemporánea parte de esa tradición.

4.1. antiguas NUEVAS tiendas

Las tiendas, asociadas a una construcción arquitectónica más primitiva y natural, han acompañado al ser humano en la historia y continúan teniendo un papel importante hoy día. La construcción de las tiendas se hacía de forma rápida con elementos naturales y normalmente se ha asociado a la cultura nómada. En estas construcciones tanto su estructura, construcción, materiales y pieza de mobiliario están ligados a los recursos del paisaje circundante.



No obstante, la evolución en las técnicas de construcción, los tipos de tejidos y las fibras empleadas en las últimas décadas han generado las más diversas aplicaciones en proyectos contemporáneos de arquitectura y diseño de interior.

Para establecer una secuencia de la evolución de las mismas y su reinterpretación se hace un breve recorrido paralelo en el que tanto ejemplos tradicionales de arquitectura textil como proyectos de arquitectos y diseñadores contemporáneos se entremezclan evidenciando la estrecha interrelación entre ambas manifestaciones.

De La tienda Tuareg a proyectos contemporáneos

La tienda Tuareg

Los materiales predominantes son el cuero, la madera y el metal. En la cultura Tuareg, así como la cultura Gabra (Kenia, Somalia, Etiopía), la palabra tienda (mina o mana) está relacionada con el concepto de matrimonio (mini funda) y el establecimiento de un nuevo hogar.



Estación de metro, Bruselas, Samyn and Partners, 1999

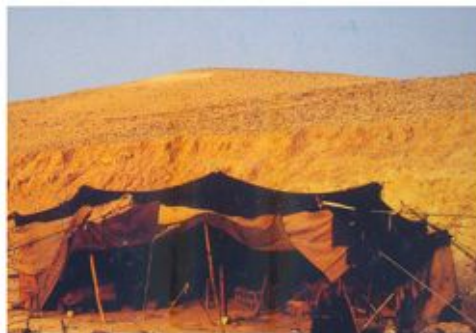
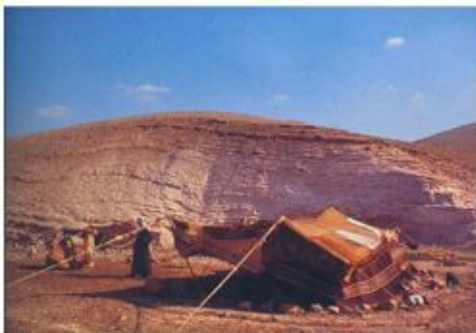
Destaca por la ligereza y luminosidad de su cubierta de tela tensada. Sucesión de módulos en forma de silla de montar.



De La tienda Beduina a proyectos contemporáneos

La tienda beduina

Formada por mástiles de madera, tensores de cuerda y grandes piedras que emplean como cimentación.



La suposición de los tensores y las piedras con respecto a la ubicación de la tienda es fundamental para que la estructura soporte los fuertes vientos. Tejido de cobertura realizado a partir de pelo de camello o cabra.

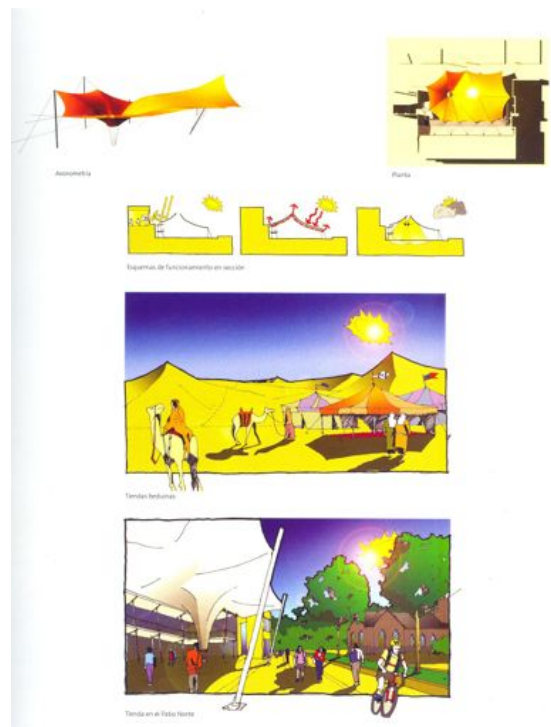
Taquilla del Palacio de Buckingham, Londres , Hopkins Architects, 1994

Construcciones ligeras de carácter temporal, con una cubierta ligera de grandes mástiles para proteger del sol. Los mástiles de madera se unen entre sí y están anclados al suelo mediante nudos metálicos que articulan todo el sistema.



Patio norte, Universidad de Melbourne, John Wardle Architects, 2000

Al igual que las construcciones beduinas, esta estructura se ha convertido en un símbolo social de reunión, lugar de comida, comercio y entretenimiento. La estructura cubre una superficie de 70 m², sujeta desde las zonas más elevadas de los edificios circundantes y por 2 mástiles en la cara abierta del patio. La tela es tensada hasta un punto localizado en el suelo, descentrado con respecto al eje del espacio



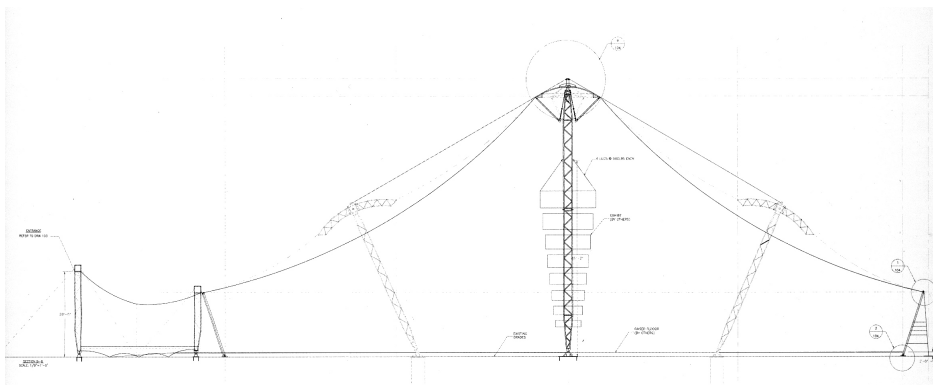
De las Yurts Kazajas-Tienda asiática a proyectos contemporáneos

Las tiendas son algo más complejas que las de otras culturas, para soportar las bajas temperaturas. De planta circular, están compuestas de una estructura robusta de madera, construida con 60 mástiles entrelazados. El revestimiento de fieltro, de lana y otros materiales vegetales aísla el interior.



Machine Tent, Móvil, FTL Design Engineering Studio, 2002

Solución de estructura móvil, de reducido tiempo de construcción que planteó un reto a los diseñadores. Cubre un espacio circular, dominado por un gran mástil central que recibe el mayor peso y seis mástiles secundarios.



4.2. nuevas FIBRAS textiles

Desde las técnicas textiles más primitivas, los tejidos han formado parte fundamental del hombre. Los primeros tejidos, como hemos comentado, realizados en materiales naturales.

Hacia finales del siglo XIX con la invención del rayón, igual que la seda pero obtenido mediante una fibra artificial, los tejidos se van haciendo más sofisticados. Pero es en el siglo XX cuando realmente comienza a estudiarse los tejidos sintéticos. En 1935 se descubre el nailon del que se hacen filamentos elásticos muy resistentes.

Las fibras sintéticas son polímeros, largas cadenas de átomos de carbón, junto a átomos incorporados generalmente de hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. A diferencia de las fibras naturales que se destruirían, los polímeros se pueden disolver o fundir para darles forma de hilo.

Uno de los primeros tejidos de alta tecnología es el kevlar, pertenece a un grupo de fibras de carbono denominadas aramid. Es más resistente que el acero, empleado para fabricar chalecos antibalas, cordones para unir a los astronautas con las naves espaciales, etc. Otras fibras de alta tecnología como el nomex o nailon resistentes a altas temperaturas. También destacan como se verá a continuación materiales como el poliéster protegido con PVC y la fibra de vidrio protegido con PTFE.

Las últimas investigaciones están encaminadas a crear una nueva generación de tejidos que no sólo otorguen protección y cumplan una función, sino que realmente tenga un papel activo y dinámico. Por ejemplo, telas que incorporan fibras conductoras que alimentan un pequeño transmisor capaz de monitorizar funciones vitales así como un sistema de señal GPS.

4.3. Guía Europea de Diseño de Estructuras Superficiales Tensadas. Tensinet

La Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas es resultado de 30 años de trabajo de los miembros de Tensinet, financiada por la Comisión Europea en el Quinto Programa Marco, dentro del apartado "Crecimiento Competitivo y Sostenible".

La necesidad de esta guía surge porque hasta ahora en Europa no había un documento con asesoramiento y recomendaciones técnicas sobre temas como el diseño, las especificaciones, los ensayos y la construcción de estructuras de superficie tensada.

El sector de las estructuras tensadas ha crecido considerablemente en los últimos años, las cuales se están haciendo mayores y más sofisticadas. Como su diseño y construcción está limitado, relativamente hablando, a unos pocos diseñadores y fabricantes especializados, su potencial como integrantes de la edificación aun ha de explotarse.

Cualidades de la arquitectura textil

- Ligereza
- Translucidez
- Flexibilidad
- Escultural
- Seguridad
- Adecuadas a determinadas funciones
- Formas arquitectónicas expresivas
- Protección de los agentes atmosféricos
- Transportables y temporales
- Convertibles y adaptables

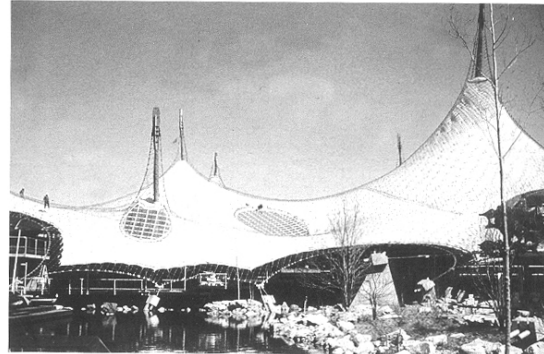
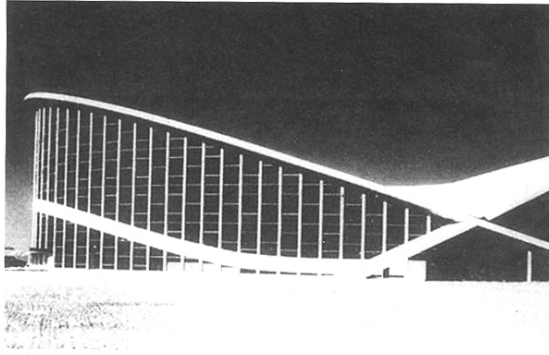
Tecnología

Desde un punto de vista de la ingeniería, las estructuras textiles son membranas de espesor constante, en virtud de su forma superficial y de la gran deformabilidad, son capaces de soportar las cargas que requieren los Códigos de la Edificación.

Aun cuando las tiendas cuentan con un gran historial, el origen de la tecnología de estructuras textiles se encuentra en el siglo XIX. Por ejemplo, el mecanizado del hilado y el tejido de las telas, como en las grandes carpas de circos.

Aunque son estructuras transportables, su diseño incorpora dos de las principales características de las modernas estructuras textiles:

- Tienen forma superficial indeformable.
- Tienen pretensión.



Izqda. Raleigh Livestock Arena. Drcha. Pabellón Expo de Montreal

En los años 50 destacan la construcción de grandes cubiertas con forma de silla de montar. Destaca la Raleigh Livestock Arena de Carolina del Norte del ingeniero Freud Severud y el arquitecto Matthew Nowicki. Se trataba de una malla bidireccional de cables que salvan una luz de 95 m entre un par de arcos, con una inclinación uno respecto del otro de 20° sobre la horizontal. Destaca este edificio por incorporar dos nuevas características:

- El perímetro del arco actúa conjuntamente para contener los esfuerzos procedentes de la malla de cables
- La configuración de los arcos permite formar una cubierta con doble curvatura de tipo anticlástico.

Fue un referente para cubiertas de cables que se construyeron por toda Europa, Rusia, China y en el norte y sur de América. Posteriormente, un inteligente uso alternados de cables de cumbrera y limahoya, sirvió para crear una envoltura continua formada por planos combados, tanto en la cubierta como en los muros. Era un sistema pretensado con intensidad y distribución monitorizadas mediante ultrasonidos.

A los 10 años de la Raleigh, Frei Otto desarrolló en cubiertas sus conocimientos junto al fabricante Peter Stromeyer. Fabricaron cubiertas de forma libre y doble curvatura, experimentando en cada una de ellas sobre formas, montaje y técnicas para introducir tensiones, experimentando con distintos tipos de telas y métodos de uniones.

Destaca el pabellón Alemán para la Expo de Montreal en 1967. De planta irregular, la red se colgó de mástiles de distintas alturas e inclinaciones. Eran 10.000 m^2 de tela de poliéster recubierta de PVC. Su método de trabajo se basó en exploración con sucesión de maquetas, cada vez más refinadas y exactas. El comportamiento de las estructuras superficiales está condicionada por su geometría, por lo que este enfoque le permitió combinar las perspectivas arquitectónicas con los conocimientos estructurales.

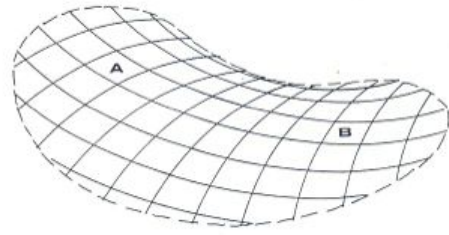
Los materiales más empleados consisten en un tejido protegido por una capa polimérica. Hay distintas elaboraciones de tejido, distintas técnicas de tejer que influye en el control de la rectitud y la tensión, y que afectan a la deformación del producto final.

Forma y comportamiento

Difiere mucho de las convencionales estructuras de pórticos, rígidas y elástico-lineales usadas mayormente en edificación.

Se tienen en cuenta 3 factores fundamentales:

- la elección de la forma
- los niveles de pretensión
- deformabilidad de la superficie



También se consideran el ambiente interior de los espacios con cerramientos de membranas textiles, elección del tipo de hormigón y la transparencia de la membrana.

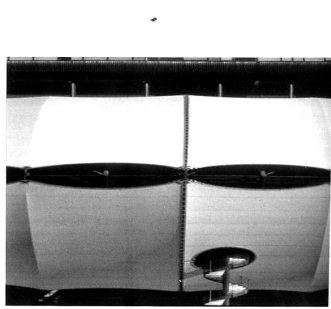
Drcha. Superficie anticlástica

La mayoría de estructuras textiles tienen como base una geometría de superficie anticlástica. Es un conjunto de elementos a tracción en arco que actúa en oposición a un conjunto similar de elementos colgados. Físicamente, estos dos conjuntos de elementos representan las dos direcciones del hilado del textil (la trama y la urdimbre) en el interior de la membrana.

Posee también líneas de cargas definidas y separadas, tanto para la presión interna como para la externa. La presión descendente de la nieve se transmite por los hilos de curvatura colgante y la succión hacia el exterior de la corriente del viento se transmite por los hilos de la curvatura en arco.

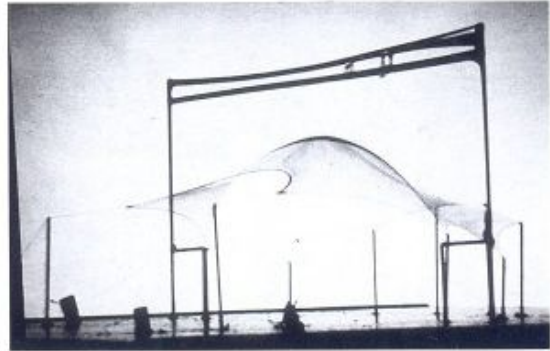
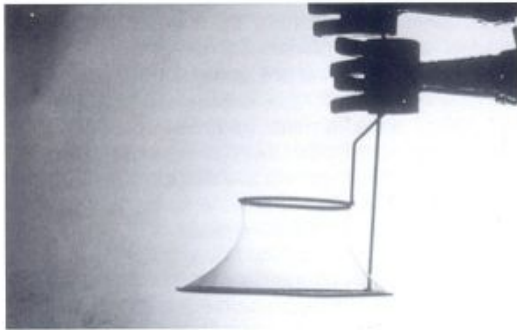
Hay 4 tipos genéricos de superficies anticlásticas:

- el cono (arriba. Izquierda)
- la silla de montar (arriba. derecha)
- el paraboloide hiperbólico (abajo. Izquierda)
- el de valles paralelos (abajo. derecha)

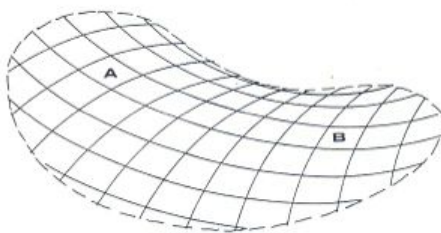


En esencia cada una de ellas está constituida por 4 elementos alabeados, en los que el grado de alabeo depende de la elección de las condiciones perimetrales. El equilibrio ha de determinarse mediante el equilibrio de pretensión interno dentro de un determinado sistema perimetral de soporte. Se puede hacer una analogía con la película de jabón, en que la película se puede transformar únicamente dentro del perímetro de un sistema cuya geometría permite que haya equilibrio de tensiones entre las moléculas de la película.

Por tanto, corresponde al proyectista determinar las “condiciones de borde” en el proceso de definición de la forma de la membrana. El proceso para determinarla se denomina búsqueda de la forma de equilibrio. Por ejemplo, la geometría de la superficie de una película de jabón es única para un borde dado, por lo que si cambia el borde parcial o totalmente, esto hará que cambie la superficie de aquella. (modelos con película de jabón de Frei Otto).



La **pretensión** contribuye a la rigidez de la membrana porque las componentes de la curvatura interaccionan para retener lo que de otro modo serían deformaciones importantes, típicas de superficies planas o cilíndricas.



Zona A forzada por tensiones en arco de la zona B

La deformabilidad se considera una característica útil e importante en estructuras textiles. De hecho, debido a su rigidez superficial relativamente baja los cambios de forma son una respuesta primordial a las cargas aplicadas externamente del textil, en unión a los cambios de distribución de la tensión en toda la superficie.

Ambiente interior

Las membranas textiles más empleadas son:

- Poliéster protegido con PVC
- Vidrio protegido con PTFE

Éstos reflejan el 75% de la energía solar incidente, absorben el 17% y transmiten el 13% de la luz solar, lo cual hace que sean muy eficaces como toldos en zonas templadas tropicales y áridas.

En otras zonas, la estrategia puede consistir en atrapar el aire entre capas múltiples de membrana, como en el Cargolifter Airship Hangar, son 4 capas que forman dos volúmenes de aire herméticos, reduciendo su transmisión térmica al orden de $0.95 \text{ W/m}^2\text{K}$.

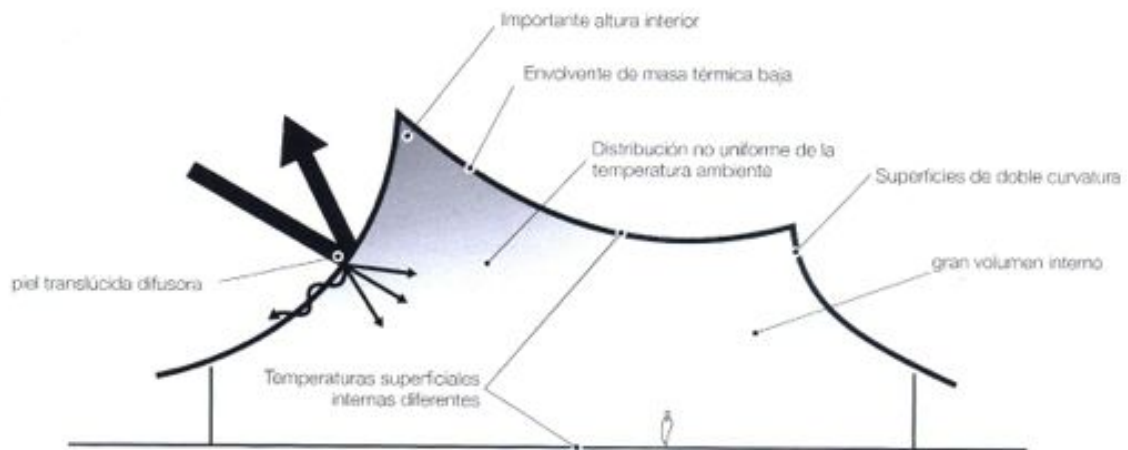


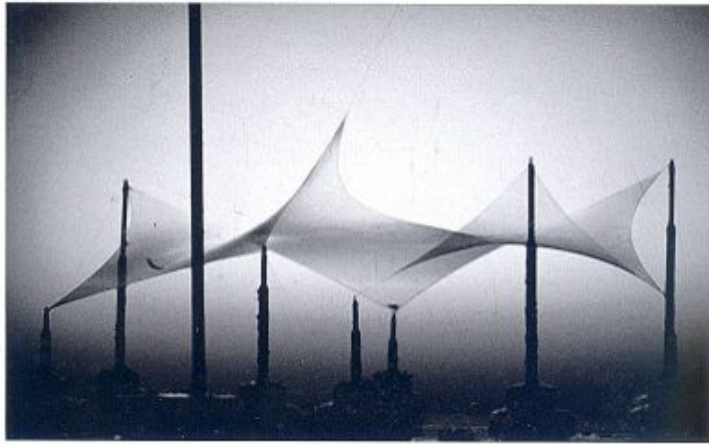
Fig. 4.1. Características de los cerramientos de membrana tensada.

Forma

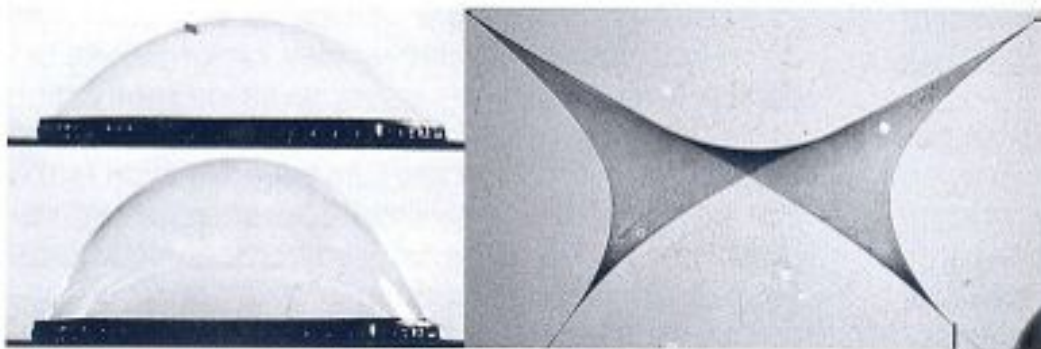
Las estructuras de membrana tienen formas generadas por equilibrio tensado, y por ello pueden considerarse como estructuras naturales. Las láminas siguen líneas de compresión que evitan en gran medida el pandeo.

Estas estructuradas, generadas por sistemas de esfuerzos lineales de tracción y compresión, similar a los árboles, se rigen también por los principios estructurales hallados en la naturaleza.

La base de la ingeniería para conseguir un arquitectura de membranas ligeras es conseguir la superficie mínima como resultado de procesos auto-generados.

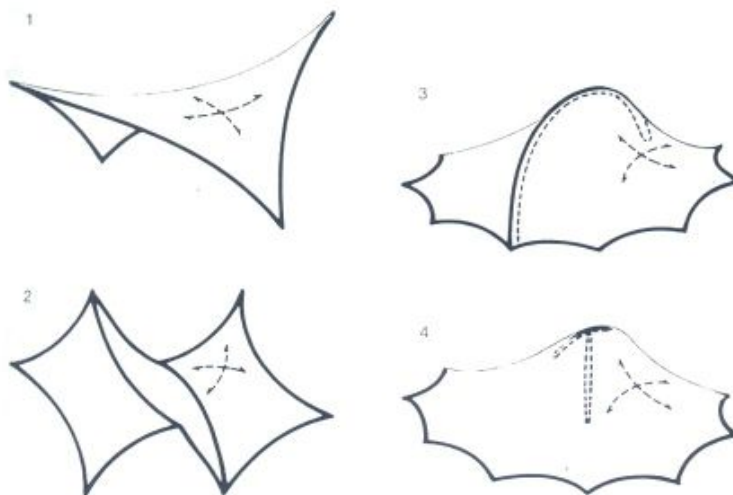


Película de jabón de forma libre como estudio para "Superficies Mínimas", dirigido por Frei Otto.



Modelos de película de jabón que representan "Superficies Mínimas", forma sinclástica(izquierda), forma anticlástica (derecha).

En configuraciones de bordes planos las superficies generadas también son planas. En el momento en el que algún punto de la superficie o del borde está fuera del plano, se produce una doble curvatura de las superficies mínimas en cada punto de la superficie. Las superficies de doble curvatura pueden ser sinclásticas (cuando son estructuras hinchadas con el aire) o anticlásticas (membranas pretensadas mecánicamente).



Esquema de superficies anticlásticas, arriba, de izquierda a derecha: silla de montar, soporte en arco, soporte con deformación en arco cono de vértice romo y solución con forma de cresta/valles. Dibujos de Frei Otto

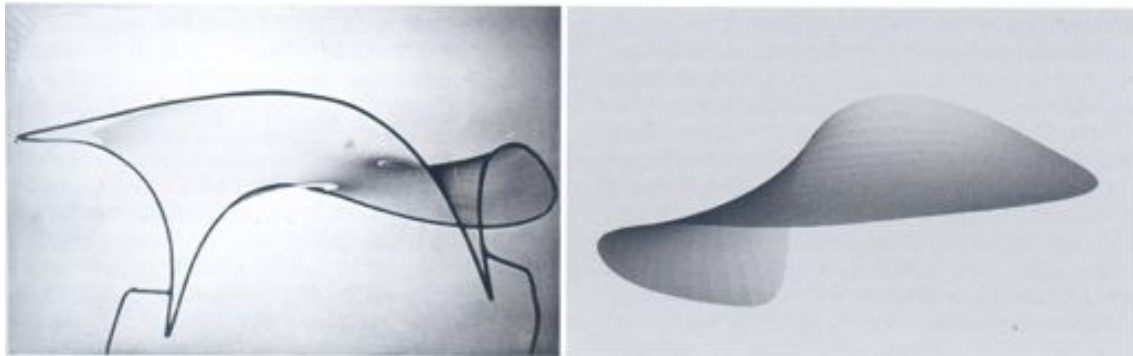
El proceso de búsqueda de la forma comienza con:

- La definición del trazado de área en planta que hay que cubrir.
- La disposición de los soportes externos e internos.
- Las condiciones de borde dentro de los cuales se supone que va a tener equilibrio la superficie de la membrana.

El número de formas posibles es tan variable como el número de las distintas disposiciones de los límites y las condiciones de soporte internas. La curvatura en la forma proporciona estabilidad estructural y rigidez de las membranas tensadas. A mayor curvatura, menor esfuerzo se desarrollará por resultado de las cargas aplicadas. Con menos esfuerzos, estructuras más ligeras.

Además han de evitarse grandes superficies planas, para evitar el flameo producido por el viento, y también grandes deformaciones debido al viento y a la nieve.

Formas superficiales anticlásticas mínimas de bordes libres. Izquierda modelo con película de



jabón; derecha, modelo por ordenador generado con PAM Lisa por Architekturbüro Rasch + Bradatsch.

Su continuidad tridimensionalidad hace que sea imposible su diseño simplemente con lápiz y papel. Para estudiar y controlar su forma, es necesario crear patrones tridimensionales por ordenador para crear estas formas. Tanto modelos físicos como numéricos, así como la creación de maquetas.



Forma y análisis estructural

Características

Las características principales de las membranas textiles revestidas y pretensadas que determinan los métodos de obtención de la forma, el análisis estructural y la realización de los patrones son los siguientes:

- a. Tienen poca rigidez superficial y las direcciones portantes principales están condicionadas por las ortogonales del tejido.
- b. A diferencia de las tiendas tradicionales, su superficie tiene doble curvatura. Su curvatura suele ser anticlástica y sus direcciones portantes principales (trama y urdimbre) siguen preferentemente las líneas de curvatura. La organización habitual de los patrones de la tela (patronaje) se hace a modo que las cargas a largo plazo, como la nieve, puedan ser absorbidas sobre todo, por la urdimbre dispuesta en la dirección de cuelgue de la superficie, mientras que las cargas dinámicas de viento a corto plazo (que causan succión) puedan ser absorbidas por la trama, dispuesta en la dirección abovedada.
- c. El pretensado de la superficie incrementa de forma significativa su rigidez. El trabajo causado por las cargas aplicadas que provocan deformación, se contrarresta con el cambio de energía de eformación de la superficie. Esta deformación es función del incremento de las tensiones en la dirección portante como de la disminución de las tensiones en la dirección opuesta y ortogonal al tejido.
- d. A pesar de la ligereza, la frecuencia apropiada de las estructuras tensadas es baja en comparación con la de las estructuras convencionales de dimensiones similares. Se deb a su poca rigidez y al efecto añadido de la masa de aire circundante.
- e. El elevado amortiguamiento visco-elástico del material de revestimiento tiene un efecto favorable al reducir la respuesta dinámica a las ráfagas de viento.
- f. El determinante principal de la forma de las estructuras tensadas es la elección de los soportes perimetrales e interiores, tales como mástiles o cables. A demás, a partir de un perímetro determinado, la forma de las estructuras ligeras tensadas y anticlásticas dependen de las relaciones de pretensado en las direcciones principales de curvatura (y de los hilos).
- g. Una vez pretensadas, las membranas textiles se suelen calcular de modo que las tensiones sean uniformes y con poca variación en la superficie.
- h. Para que los modelos numéricos de cualquier programa tengan suficiente precisión, es necesario procedimientos de generación automáticas de mallas así como su ajuste.
- i. En los modelos numéricos utilizados para el cálculo y la forma hay que tener en cuenta de manera explícita los patrones para la confección. La superficie de doble curvatura ha de obtenerse a partir de las piezas planas de tela sin tensión, con uniones soldadas. Para evitar arrugas y por economía los ejes de los patrones han de seguir las trayectorias geodésicas sobre la superficie.



Comparación d la generación de patrones mediante líneas no geodésicas y líneas geodésicas.

- j. Las direcciones del tejido son dictadas por el patronaje, aunque la forma final de la superficie la determina el pretensado específico de las direcciones. Por tanto para la obtención de la forma ha de tenerse en cuenta la dirección del tejido.

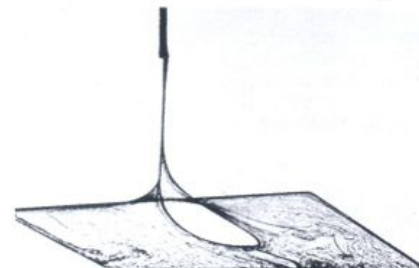
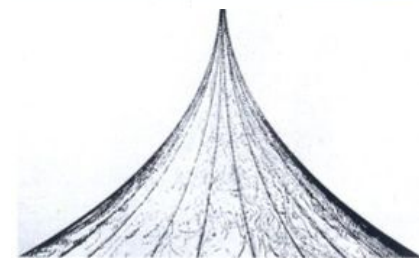
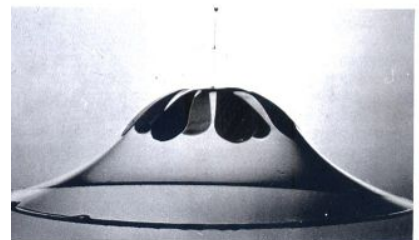
Forma y maquetas

En todo caso, en la obtención de la forma, será necesario un equilibrio entre lo que se desea y lo que estructuralmente sea posible.

Por otro lado, antes de la llegada de los ordenadores y programas avanzados de cálculo, el proyecto de las estructuras superficiales de membranas tensadas tenía que llevarse a cabo con maquetas (excepto los casos con soluciones analíticas).

Destacan dos métodos de construcción de maquetas:

- Se forma una película de jabón entre los hilos o los alambres. Tiene una vida muy corta, pero con las fotografías adecuadas, se puede deducir un número importante de datos geométricos.
- Maquetas con tejidos o membranas de gran elasticidad, controlando mejor la curvatura.



Métodos numéricos y análisis estructural

La base fundamental de la mayoría de programas utilizados para el cálculo de estructuras superficiales es el MEF, planteando las condiciones de equilibrio. Discretiza la estructura formando una malla de elementos finitos con topología fija, en los que a excepción de los puntos fijos, hay sólo coordenadas aproximadas de los nudos.

Los métodos más comprobados y utilizados para la obtención de la forma y el análisis no lineal de las estructuras tensadas son:

- método de densidad de fuerzas
- métodos de elementos finitos no lineales
- relajación dinámica

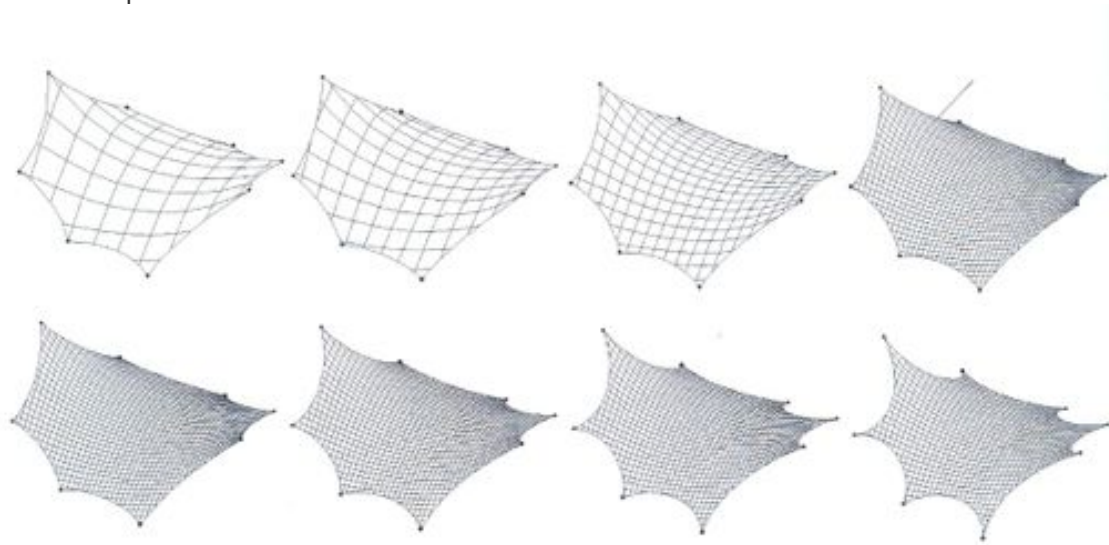


Fig. 8.1. Ventajas del ajuste automático de la malla y su borde

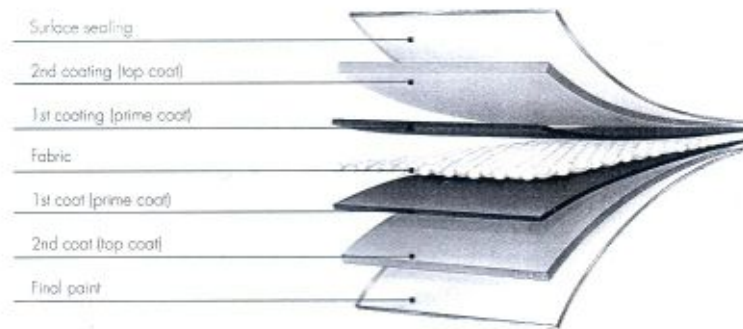
Ventajas del ajuste automático de la malla y su borde

Todos estos métodos idealizan la superficie como una red de elementos lineales y/o como una malla de elementos finitos ortotrópicos continuos en la que se tiene en cuenta la rigidez del esfuerzo cortante del tejido y su revestimiento. Permiten introducir también otros datos como mástiles, vigas, cables de borde y elementos deslizantes.

Materiales

Los materiales empleados en membranas arquitectónicas consisten normalmente en un tejido con revestimiento de una resina polimérica. Su resistencia viene determinada principalmente por la resistencia de los hilos. El revestimiento consigue:

- Proteger los hilos frente a daños
- Impermeabilizar la membrana contra lluvia y humedad
- Estabilizar lo que de otro modo sería un tejido de geometría inestable.
- Proporcionar material para las uniones selladas por calor.



Son por tanto distintas capas combinadas con el tejido, una capa de protección principal, otra exterior, y un tratamiento de la superficie para el sellado o la impresión.

Los dos materiales más comunes son:

- Tejidos de poliéster con revestimiento PVC
- Tejidos de fibra de vidrio con revestimiento de PTFE

También destacan:

- tejidos de fibra de vidrio revestidos con silicona
- Tejidos de PTFE revestidos con PTFE
- Láminas de ETFE

También pueden usarse otras fibras y el LCP (polímeros de cristal líquido).

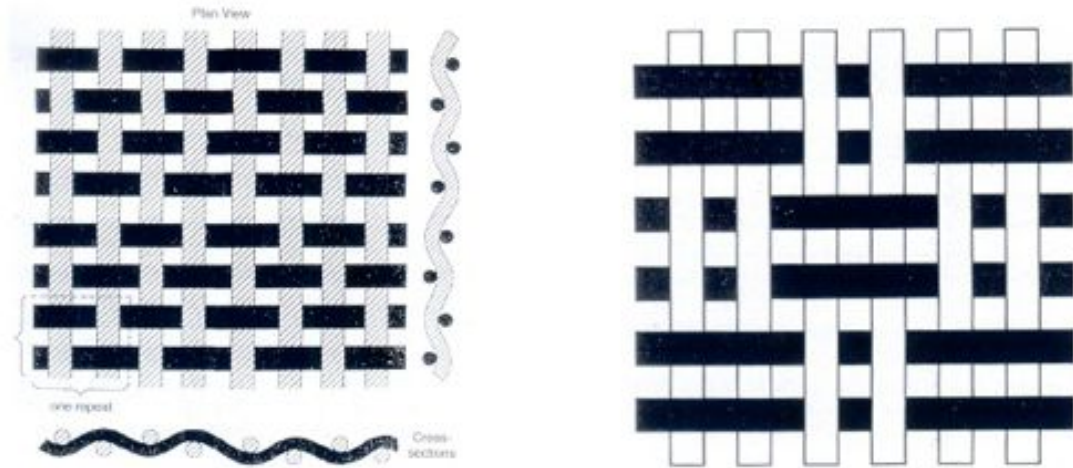
Textil de Fibra de Vidrio

La fibra de vidrio se suministra en varios diámetros, del cual depende su resistencia principal por la distribución de la tensión en las mismas, la fibra de vidrio se obtiene por fundición, por lo que las capas exteriores se enfrían más rápido que el núcleo, lo cual provoca una pretensión.

Aparecen deformaciones en la capa exterior por compresión en la dirección axial, y tensiones de tracción en el centro. Las tensiones de tracción por cargas externas se suman a la pretensión.

Muestra un comportamiento lineal hasta la rotura. La fibra de vidrio es sensible a los efectos de humedad y a daños en la zona exterior sometida a tensión. Es resistente a elevadas temperaturas.

Los tejidos base se obtienen entrelazando hilos de la trama entre dos capas de hilos de la urdimbre a 90° de los mismos. Los principales tejidos empleados son lisos o tejidos 2-2. Su ondulación es menor en los tejidos 2-2.(o Panamá).



Izquierda. Entrelazado normal; Derecha, entrelazado 2-2 (o Panamá)

También se pueden obtener tejidos sin entrelazar, como la urdimbre superpuesta. La malla de hilos de la trama y la urdimbre se superponen una sobre otra, y se cosen entre sí con un hilo muy fino. El grosor y alargamiento aumenta en hilados muy ondulados, a baja tensión, y también en modelos de tejidos lisos. Se obtienen tejidos más estables aplicando tensión a la trama y a la urdimbre.(rigideces más equilibradas).

Una vez tejido, se aplica el acabado especial. Consigue que aumenten las compatibilidades químicas y físicas entre el tejido y el primer revestimiento. (buena adhesión fibra y resina). En la fibra de vidrio se aplica una capa base que proporciona una unión sólida al revestimiento de PTFE y también determina la flexibilidad de los productos de acabado del revestimiento.

La protección se consigue en general aplicando un revestimiento de resina en forma de pasta. La resina consigue que se desarrolle y aumente los niveles de eficacia de las características especiales, como la resistencia al fuego, resistencia a hongos y el color de pigmentación. El proceso para revestimiento depende del tipo de resina empleada:

- Protecciones de PVC
- Protecciones con PTFE
- Protecciones de silicona
- Capa externa

Características mecánicas

Crear una superficie curvada a partir de una plana. La rigidez a la deformación de un material es importante es la fabricación de una superficie curvada, por ello este parámetro ha de ser lo más bajo posible.

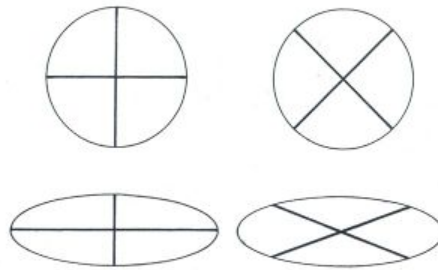
Los tejidos recubiertos tienen una rigidez a la deformación relativamente baja en contraste con su rigidez en la dirección de los hilos. Por ello, un tejido protegido es adecuado para la fabricación de superficies curvadas.

1. Conocer la rigidez a deformación del tejido recubierto. Esto se consigue por una interpolación matemática-física para determinar la rigidez a deformación de una forma significativa.
2. Los módulos. La rigidez depende del coeficiente entre el tensor de tensión y el tensor de deformación. El caso más sencillo comienza por postular un coeficiente lineal entre las dos variables.

Debido a las dos direcciones principales del tejido, los tejidos con revestimiento tienen una estructura simétrica.

Las figuras siguientes muestran un elemento circular que se corta del material.

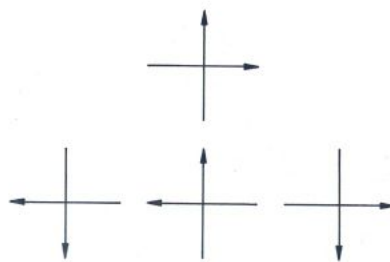
Llamemos a este elemento inicial figura unidad.



La primera figura surge aplicando una tensión a lo largo del eje horizontal, mostrando la deformación. La deformación muestra las dos direcciones principales que se entrecruzan.

La segunda figura muestra el círculo original girado un ángulo arbitrario. Aplicando ahora el mismo estado tensional paralelo al eje principal, la elipse que se obtiene difiere de la primera, puesto que la posición de la trama y urdimbre le ha conferido una estructura. En el caso de un material isotrópico las figuras de deformación serían iguales.

Suponemos ahora el material anisotrópico. La anisotropía como el grupo de simetría del material. Las rotaciones del grupo inicial, bajo el que se obtiene la misma figura de la deformación, se llama grupo de simetría. Un grupo de simetría consiste en todas las rotaciones de 180° , pues otras rotaciones no darían la misma deformación.



Cuando el sistema coordinado es paralelo al eje del círculo inicial, se pueden describir las figuras siguientes giradas de la siguiente forma: junto con la figura unidad estos movimientos forman un grupo anisotrópico ortogonal. En las matrices de transformación del grupo anisotrópico ortogonal sólo aparecen dos componentes +1 y -1, que se desvían de 0.

El tensor de deformación y el tensor de tensión son simétricos y se puede escribir:

$$n_{11} = E_{1111} \mathbf{e}_{11} + E_{1122} \mathbf{e}_{22}$$

$$n_{22} = E_{1122} \mathbf{e}_{11} + E_{2222} \mathbf{e}_{22}$$

$$n_{12} = 2 E_{1212} \mathbf{e}_{12}$$

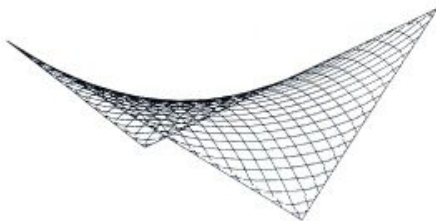
Donde:

E_{1111} , rigidez en la dirección de la urdimbre

E_{2222} , rigidez en la dirección de la trama

E_{1122} , alargamiento transversal

E_{1212} , módulo de deformación.



Si el comportamiento del tejido no es lineal, estas consideraciones son válidas para el tensor de rigidez tangencial.

El módulo de alargamiento transversal y el módulo de deformación no influyen de forma significativa en la distribución de tensiones en membranas pretensadas hechas con tejidos protegidos. Si bien, en algunos casos es cierto que despreciar estas variables puede tener consecuencias serias, en general, según muestran las siguientes figuras, hay poca influencia.

Ej. Distribución de tensión en un hiperboloide bajo carga de nieve sin tener en cuenta E_{1122} y E_{1212} . Se ve el cruce de tensiones principales y se puede observar una distribución uniforme.

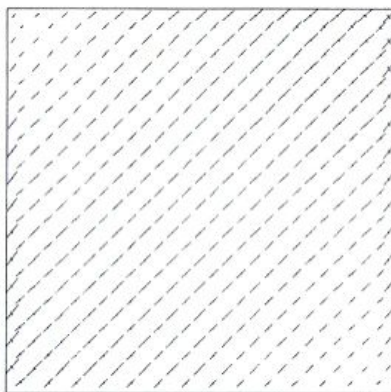
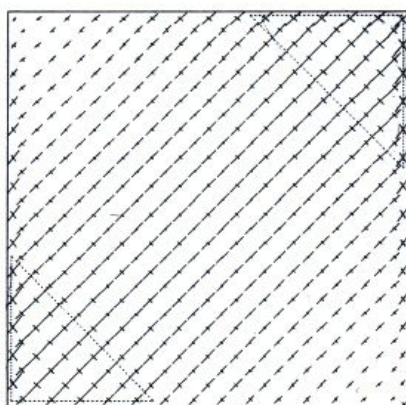


Figura 1. Arriba. Hiperboloide

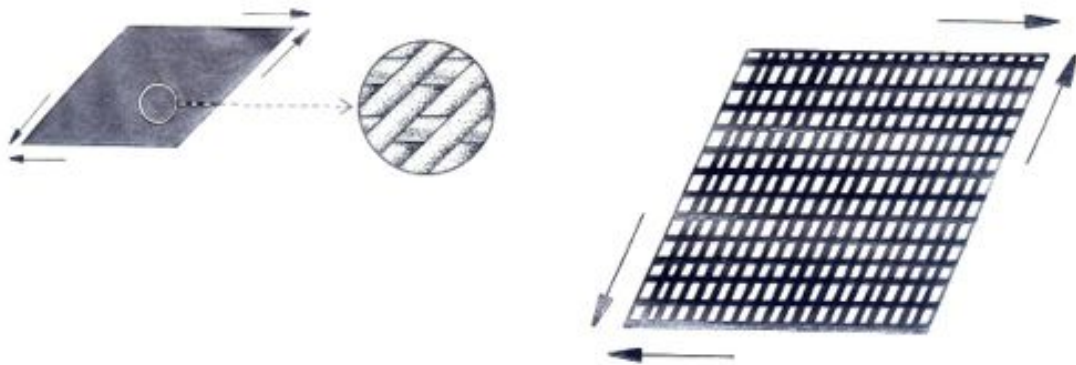
Figura 2. Centro. Distribución de tensiones bajo carga sin tener en cuenta E_{1122} y E_{1212}

Figura 3. Abajo. Distribución de tensiones bajo carga de nieve teniendo en cuenta E_{1122} y E_{1212}



Ensayo biaxial

Para determinar la rigidez a la deformación se realiza el ensayo biaxial, el cual causa deformaciones. se corta una muestra, donde la trama y la urdimbre se orientan a 45° del perímetro. Se aplican tensiones a lo largo de un borde n_{11} y n_{22} en la dirección perpendicular ésta. Si estas tensiones paralelas a los bordes no son iguales, hay tensiones angulares. Estas tensiones angulares también se miden. Se miden las deformaciones paralelas a la dirección de la trama, luego las paralelas a la urdimbre y las que están a 45° de la trama y urdimbre. De esta manera se obtiene las componentes del tensor deformación.



Deformación angular en un tejido.

Mientras que los hilos de trama y urdimbre no se obstaculicen mutuamente, la resistencia a un desplazamiento lateral lo proporciona únicamente el revestimiento. Continúa así hasta que la trama y la urdimbre se amontonan. En este momento, la resistencia frente a más deformaciones aumenta drásticamente, se denomina condición de amontonamiento. El espaciado de los hilos para una curvatura fijada la limita el ángulo crítico donde comienza esta resistencia.

Resistencia

La resistencia del tejido protegido la determina únicamente la resistencia de los hilos. No es importante la resistencia de un hilo individual, sino de una unidad de anchura del tejido.

Es importante conocer que durante el proceso de fabricación y aplicación del revestimiento los hilos experimentan una reducción de la resistencia.

Resistencia tejido < R hilado individual $\times n$ (número de hilos por unidad de anchura)

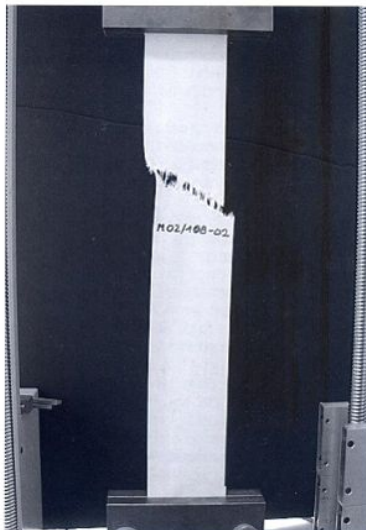
La explicación está en la onda de los hilos en cada cruce, debido a la fuerza que introduce el hilo que lo cruza. Esta flecha reduce la resistencia del hilo. Este efecto no ocurre en tejidos superpuestos.

Normas de ensayo

En el documento consultado se presenta una propuesta de ensayos de aceptación. Los seis documentos de base en las Directrices para Productos de la Construcción son:

1. Resistencia mecánica y estabilidad
2. Protección contra el fuego
3. Higiene, salud y protección medioambiental
4. Seguridad operativa
5. Protección acústica
6. Ahorro energético y aislamiento térmico

MÉTODOS Y NORMAS DE ENSAYO	
A. ENSAYOS PARA ACEPTACIÓN GENERAL	
Resistencia y estabilidad del material	Comportamiento a corto plazo
	Comportamiento a largo plazo
Resistencia del sistema de unión	Uniones soldadas
	Uniones prensadas
	Bordes con bolsillos: bordes con bolsillo y cable
Comportamiento a deformación	Ensayos biaxiales en paralelo a los hilos
	Comportamiento ante la deformación angular
	Comportamiento a relajación
	Fluencia
B. PROPUESTA PARA APROBACIÓN GENERAL DE MATERIALES TEXTILES	
C. FICHAS DE DATOS CON LAS NORMAS DE USO HABITUAL	
D. REACCIÓN AL FUEGO DE LOS PRODUCTOS PARA EDIFICACIÓN	



Ejemplo de ensayos realizados en fibras textiles.
Ensayo de tracción

5. Conceptos básicos de elementos compuestos. Propiedades

Si existe un desarrollo de conceptos estructurales con materiales usables y tecnologías aplicables, se hace necesario para nosotros desarrollar un nuevo concepto estructural (o conceptos) convenientes para los nuevos materiales.

Un material compuesto es la combinación de materiales unidos formando un elemento completo creado para un propósito específico. La madera se puede considerar como un material compuesto. Esto es muestra desde la ejecución de las primeras construcciones.

Otros materiales compuestos se han desarrollado a lo largo de cientos de años, el hormigón armado es un ejemplo claro. Desde los materiales plásticos reforzados con fibra de vidrio se ha avanzado hasta la resina epoxi reforzado con fibra de carbono de formas muy diversas. La composición exacta de algunos materiales compuestos tales como metal-metal y carbón-carbón es tema de seguridad nacional. Varios tipos de compuestos tales como la aramida reforzada se pueden encontrar en aplicaciones automovilísticas, etc. Los composite están hechos de un refuerzo y otro material que enlaza este refuerzo. Este elemento se denomina matriz. Desde el poliéster hasta metales como titanio o magnesio las matrices tienen hoy usos muy diversos. En todo caso, las matrices solamente se encargan de unir el refuerzo y todas las características mecánicas del composite en la dirección longitudinal son aportadas por las fibras de refuerzo. Sin embargo, el control de la matriz determina la mayoría de las propiedades en dirección transversal. Comparado con un metal el material compuesto soporta fuerzas específicas mayores y tiene un módulo específico mayor. Genéricamente hablando los materiales compuestos son menos corrosivos. Muchos profesionales ingenieros de la industria aeroespacial, construcción de barcos e incluso construcciones automovilísticas, han usado estos materiales durante muchas décadas. Ingenieros civiles y arquitectos, sin embargo, han avanzado lentamente en su uso y tienen todavía, en cierto grado, prejuicios contra él. En estructuras civiles y arquitectura a gran escala los materiales usados principalmente son acero, hormigón y aluminio. El avance en la tecnología estructural ha hecho posibles grandes estructuras, pero el peso y la corrosión del material ha llegado a ser una preocupación importante. Por ello, es natural que los ingenieros quieran tener nuevos materiales los cuales reduzcan el peso y mejoren la vida de las estructuras al tiempo que reducen de forma importante el coste. Es necesario que los ingenieros y proyectistas presten atención a materiales compuestos como la fibra de carbono, con alta resistencia a tracción y peso ligero (1/4 del peso del acero).

Además de las ventajas enunciadas, se añaden las siguientes:

- Dureza
- Propiedades térmicas superiores
- Mayores propiedades electromagnéticas
- Excelente comportamiento frente a la humedad
- Reducción del número de piezas en la composición estructural final
- Posibilidad de reforzar en cualquier dirección
- Posibilidad de consolidar los miembros sin refuerzo tales como rigidizadores
- Posibilidad de producir una relación óptima estructura-miembros dependiendo de sus requerimientos

Aplicación de los materiales compuestos en el campo de las grandes estructuras está todavía en sus comienzos. Sin embargo, la ciencia y tecnología moderna están avanzando rápido por el tiempo de estudio y la práctica ingenieril. Encontrarán que el conocimiento final y la capacidad de diseño con materiales compuestos son muy importantes.

En materiales compuestos el material secundario añadido consigue un alto rendimiento de las propiedades no disponible en el material inicial. El abanico de materiales compuestos es ampliamente diversificado y la lista de diferentes materiales es infinita. Carbono, vidrio, aramida u otras fibras son colocadas en el interior de resinas poliméricas termoplásticas o termofijo obteniendo mayor rigidez y fuerza. Casi todos los materiales utilizados en ingeniería se pueden utilizar como materiales y refuerzos.

Los materiales compuestos se hacen por una distribución controlada de uno a uno de sus materiales, el refuerzo, primera fase; la matriz, segunda fase. El límite entre la matriz del refuerzo, la interfaz (tercera fase), se controla para obtener las propiedades deseadas desde el par de materiales dados. Esta interfaz puede hacerse intencionadamente débil para minimizar la adhesión química del refuerzo a la matriz como algunos casos de compuestos cerámicos y cuando se requiere disipación del impacto de energía. Sin embargo, es más común intentar maximizar la adhesión entre las dos fases. Este acople de interfases permite dispersar a través de la matriz para ser transferidas a los refuerzos. El acople es proporcionado por la adherencia de soldadura entre refuerzo y matriz en un fundido o bajo estado de viscosidad. La adherencia por soldadura se puede hacer de varias formas dependiendo del método de fabricación.

Los compuestos en bruto llegan de distintas formas. Algunos de ellos con fibras continuas y cintas. La principal forma de fabricación es la extrusión por estirado.

El moldeo de un material compuesto consta de tres fases (simultáneas o separadas):

- Impregnación del refuerzo por la resina
- Adaptación de dicho material compuesto a las formas y dimensiones deseadas con la ayuda de un molde
- Endurecimiento del material y desmolde de la pieza final.

5.1. Matriz

Las resinas que normalmente se utilizan en materiales compuestos son polímeros. A su vez, estos se dividen en dos tipos: termoplásticos y termofijos.

Los termoplásticos a temperatura ambiente son rígidos pero con elevadas temperaturas se vuelven blandos y moldeables. Sus propiedades no cambian si se funden y se pueden moldear varias veces.

Los termofijos se forman a través de una reacción en cadena, donde resina y catalizadores se mezclan produciéndose una reacción química no reversible, formando un producto infusible e insoluble.

Un ejemplo de polímero termofijo es la resina fenólica, el poliéster y la resina epoxi. Una vez curados, estos productos no serán moldeables por efecto de la temperatura a diferencia de los termoplásticos.

Añadido al refuerzo, la matriz juega un papel vital en las características del material compuesto. En general los refuerzos tienen elevada resistencia y rigidez pero son frágiles.

Es la matriz la que protege al refuerzo contra la corrosión y abrasión que pueden iniciar la fractura. La carga transmitida por los refuerzos longitudinales es distribuida por la matriz.

Propiedades

Se desarrollan las principales propiedades que influyen en el comportamiento de las matrices de polímeros en estructuras civiles y de edificación:

Propiedades térmicas

La estabilidad dimensional es la más importante propiedad térmica de los polímeros porque los polímeros no pueden ser usados por encima de la temperatura que le hace perder su estabilidad dimensional. Esta temperatura se denomina glass transition temperature del polímero, por encima de la cual se deforma y el polímero cristaliza parcialmente pudiendo llegar a cristalizar. El valor de la temperatura para cada polímero es distinto. En general, los termofijos tienen una mayor temperatura (T_g) que los termoplásticos. En el punto de fusión termodinámico los polímeros cristalinos repentinamente se vuelven líquidos perdiendo todas las propiedades mecánicas. Si la cristalización de un polímero es alta, el área aceptable de estabilidad dimensional del valor de T_g puede ampliarse.

Los polímeros generalmente tienen elevados coeficientes de expansión térmica (CTE) en comparación con materiales habituales como el metal y el hormigón. Esta característica es una consideración importante en el diseño de una estructura.

La conductividad térmica de los polímeros es más baja que los metales.

Propiedades mecánicas

Rigidez. Como con la expansión térmica el grado de la unión y sobre todo de la flexibilidad de un polímero termofijo es importante para la rigidez. En el caso de un termoplástico la cristalización y la fuerza secundaria determinan la rigidez.

Fuerza. Este concepto es algo más complejo. La tracción, la compresión y la flexión son generalmente unas distintas de otras. Los tipos de fuerzas son diversas, corta y larga duración, estática y dinámica, y fuerzas de impacto. Algunas características de la fuerza se comentan a continuación en la dureza.

Dureza. Representa la capacidad del material de absorber energía y se define como el trabajo necesario para la ruptura en una unidad de volumen del material. Es proporcional al área bajo el que la carga curva origina el punto de rotura.

Propiedades químicas

Solubilidad. Un polímero se puede disolver en varias soluciones. Se debería estudiar si alguna característica química de los elementos posibles de contacto es similar a la de la matriz del polímero.

Permeabilidad. Puede ser permeable a gases o moléculas más pequeñas.

Resistencia química. La capacidad de un polímero para resistir ataques químicos, medio ambientales o ambientales y radiaciones depende de la forma de las uniones del polímero.

Propiedades eléctricas.

Cuando una resistividad eléctrica es importante en el diseño de una estructura, la elección de una matriz de polímeros es conveniente.

Las propiedades eléctricas de los polímeros que pueden interesar al diseño de la estructura son:

Propiedades dieléctricas

Conductividad

Propiedades ópticas

La mayoría de los polímeros pueden colorearse o decolorarse en todas las opciones posibles. Desde un punto de vista arquitectónico posibilita el diseño e integración de este material.

Propiedades de un polímero en estado líquido.

Degradación. Se produce debido a la oxidación, radiación de longitudes de ondas más bajas de 30nm (por ejemplo, ultravioleta), fotooxidación e ionización, reacciones mecanoquímicas, microorganismos.

5.2. Refuerzos (fibra)

Los refuerzos se pueden clasificar en tres categorías:

Fibras

Escamas

Esferas o partículas

Una fibra es un largo y fino filamento de un material que tiene normalmente un diámetro del orden de 10 μ m. La relación longitud-diámetro es muy elevada. Los refuerzos se pueden denominar de forma muy diferente según su tamaño

Patillas: <0.025mm

Fibra: 0.025-0.8mm

Cable: 0.8-6.4mm

Varilla: 6.4-50mm

Barra: >50mm

Los refuerzos son los que aportan las propiedades mecánicas al compuesto además de incrementar las propiedades físicas de la resina.

Los principales factores que determinan la contribución del refuerzo son:

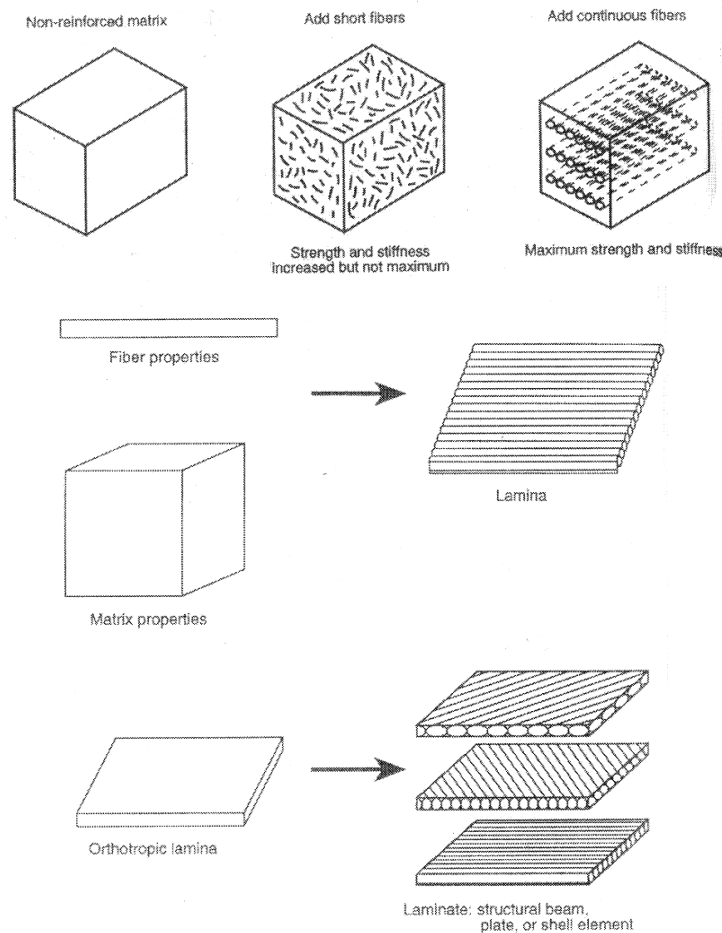
- Propiedades mecánicas de la resina
- Las superficies de interacción de la fibra con la resina. Depende del grado de unión que exista entre las dos, en concreto con el tratamiento dado a la superficie del refuerzo.
- La cantidad de refuerzo que hay en el material compuesto, que se determina en el proceso de fabricación. Es importante el diámetro del refuerzo debido a que a menor espesor el coste es mayor.
- La orientación de las fibras. Determina las propiedades en una dirección concreta del material compuesto, pues las fibras funcionan a lo largo de su longitud.

5.3. Tipos de filamentos de materiales compuestos

En la mayoría de los diferentes tipos de refuerzo es el tipo de filamento lo más importante desde un punto de vista estructural. En general, los filamentos continuos de los materiales compuestos reforzados manifiestan alta resistencia específica y rigidez.

Las matrices y los refuerzos usados en este tipo de materiales compuestos son numerosos y diversos.

Como punto de partida para explicar los tipos de filamentos en materiales compuestos consideramos la cara de una lámina. Cuando los refuerzos son discontinuos, las fibras pueden ser orientar sin orden o en una orientación determinada. La cara de la hoja con una orientación sin orden de fibras discontinuas tales como las fibras trabadas puede considerarse con un comportamiento isotrópico en el plano de la lámina. La máxima fuerza, así como la rigidez del material compuesto, puede obtenerse cuando los refuerzos se presentan en forma de fibra continua.



Estas fibras pueden ser ordenadas en una sola dirección (unidireccional) o en ciertos ángulos dados. La mayoría de las partes de una estructura necesitan un espesor concreto con varias capas de láminas. Se llama laminado híbrido. Debería tenerse en cuenta que el laminado de fibras puede ser de distinto tipo. Se tiene que tener en cuenta:

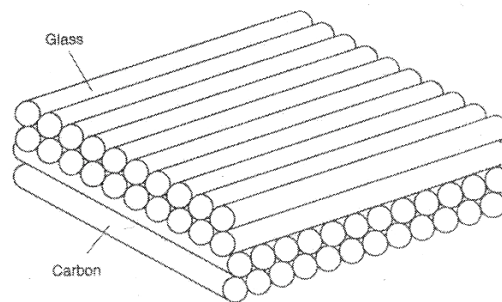
1. el alargamiento de la fibra en un material compuesto debe ser menor que la mayor rigidez de la matriz obtenida en el material compuesto
2. las propiedades mecánicas de un laminado están determinados por la cantidad y la forma, por ejemplo, longitud y orientación, es decir, por el tipo de refuerzo

3. la fuerza de una parte de la estructura de material compuesto se incrementa de forma proporcional al contenido en fibra. El contenido más alto es la parte más fuerte.
4. la mayor longitud de la parte recta de la fibra a lo largo de una dirección dada es la que determina la capacidad de transmitir la carga en esa dirección
5. la orientación de las fibras determinan la dirección de la fuerza, tanto como el contenido en fibra determina el nivel de fuerza alcanzado:

Unidireccional: la alineación de la fibra mayor y se obtiene el máximo contenido en fibra teniendo en cuenta que la fuerza máxima es aplicada en la dirección de la fibra.

Bidireccional: las fibras continuas están dispuestas de forma perpendicular entre ellas. Las fuerzas son mayores en estas dos direcciones.

Multidireccional: como hemos comentado anteriormente, la fibra trabada puede ser colocada arbitrariamente para obtener fuerzas isotrópicas, es decir, la misma transmisión de fuerzas en todas las direcciones.



Con lo que hemos expuesto, vemos cómo con la incorporación de láminas colocadas a 90° de la lámina previa, aumenta la fuerza en estas dos direcciones (0 y 90°), pero seguirá débil a 45° . Si la fibra es colocada a 120° en un laminado triple, el material compuesto tendrá una distribución moderada de fuerzas en todas las direcciones. Si las fibras empleadas son discontinuas, la fuerza del material compuesto se puede reducir en un determinado orden de magnitud.

5.4. Refuerzo con fibra de vidrio (GFRP)

Considerando una fuerza específica, por ejemplo, el peso, la fibra de vidrio es uno de los más fuertes y comunes materiales compuestos empleados en estructura. Hay dos procesos básicos de fabricación de la fibra de vidrio. El primero es el proceso de mármol fundido en el cual una mezcla apropiada de materiales en bruto es mezclada con mármol vidriado con diámetros de $2^{\circ}10\text{cm}$, y estos mármoles son remezclados formando el producto de la fibra de vidrio. El segundo método es el proceso directo de fundido en el que los materiales en bruto se deforman y forman el producto de la fibra. Para minimizar el proceso de abrasión en la fibra de vidrio se tratan las superficies. Las presentaciones de la fibra de vidrio son:

Tejido. Empleado para conseguir resistencia en la dos direcciones.

Mat. Es un fieltro de hilos continuos o discontinuos unidos por un adhesivo

Roving. Son hilos continuos formados en la técnica de enrollamiento filamental.

Hay varios tipos de fibra de vidrio con diferentes composiciones químicas, mejorando las propiedades físicas y químicas específicas:

- E-glass
- S-glass
- C-glass
- N-VARG
- T-glass
- R-glass
- glass
- ECR-glass
- AR-glass

También hay algunas fibras de vidrio no comercializadas que tienen elevados módulos por encima de la habitual basados en óxido de berilio, fibra de vidrio avanzada tratada para protección para la radiación, D-glass de baja constante dieléctrica, y fibra de vidrio basada en óxido de litio para transparencia de rayos X.

5.5. Refuerzo con fibra de carbono (CFRP)

Aunque la fibra de vidrio tiene un comportamiento excelente ante cargas elevadas con un bajo coste y mejora el aplastamiento de los materiales compuestos de estructura, las estructuras especiales requieren debido a la limitación bajo deformación de cargas repetidas, conseguir un módulo elástico mayor y una mayor resistencia a la fatiga que no proporciona la fibra de vidrio. Debido a esto, las fibras de alto desarrollo pueden usarse, sin embargo, admitiendo un incremento de coste.

Fibra de carbono

La fibra de carbono está elaborada con fibras de hilo carbonizadas y más tarde bambú se usó como el primer filamento para las lámparas eléctricas incandescentes de Edison. Muchas fibras se pueden convertir a fibras de carbono en el momento en que la fibra inicial se carboniza antes de fundirse cuando son calentadas.

Hay tres materiales precursores en la actualidad para la fabricación de fibra de carbono:

Rayón. Derivado de material de celulosa. Fue la primera fibra precursora empleada para fabricar CFRP

Poliacrilonitrilo (PAN). Es el más empleado para la fabricación de CFRP porque consigue una mayor resistencia a tracción que con cualquier otra fibra precursora.

Pitch precursor. Basado en derivados del petróleo y PVC para la fabricación del CFRP. Tienen un bajo coste y un alto contenido en carbón.

De la fibra de carbono se pueden obtener dos tipos de fibra:

Fibras de alta resistencia (HR)

Fibras de alto módulo (HM)

5.6. Otros tipos de fibra

Fibra de aramida. Fue introducida en 1972 por Du Pont bajo el nombre de Kevlar. Recientemente, esta fibra se ha empleado para otras fabricaciones. La estructura de la fibra de aramida es anisotrópica y da la mayor resistencia y módulo en la dirección principal de la fibra.

También es resistente a la fatiga tanto estática como dinámica. La fibra de aramida responde elásticamente a tracción pero muestra un comportamiento dúctil y no lineal bajo presión, por tanto, mostrar especial atención cuando se aplica en casos donde aparezcan fuerzas de compresión o flexión.

Fibras lineales orgánicas. Quizás lleguen a ser uno de los mayores refuerzos para estructuras civiles y de edificación en el futuro. Su alta resistencia y su alto módulo se producen por la organización de su estructura molecular durante el proceso de fabricación.

Fibras de carbonato de boro y silicio.

Fibras de carbonato de silicio reforzado con vidrio.

Fibras cerámicas

Fibras de óxidos

Fibras orgánicas

6. Aplicaciones actuales e investigaciones realizadas sobre elementos de fibra de carbono

6.1. Usos actuales de la CFRP

A mediados de los 80's en el EMPA (Laboratorio Suizo de Materiales) en Zurich (Suiza) se empezaron a hacer pruebas para la utilización de los materiales compuestos como refuerzo exterior de elementos de hormigón armado, hasta que en 1991 se ejecutó la primera obra real, reforzando el puente Ibach en Lucerna, y en 1995 se empezó a utilizar este tipo de sistemas de una manera sistemática, iniciando su comercialización.

A nivel internacional es en Estados Unidos donde más se ha investigado y más avanzadas se encuentran las aplicaciones en la construcción de CFRP. El Infraestructura Composite Report 2001 (Julio 2001) pronosticó un crecimiento de un 525% en el uso de materiales compuestos en construcción en todo el mundo desde el año 2001 hasta el 2010.

A nivel estructural, la aplicación de materiales compuestos ha abierto un mercado importante en la construcción de puentes, y es precisamente en este campo en Estados Unidos donde se encuentran los mayores avances en la investigación del uso de materiales compuestos en la construcción. Así, generalmente los utilizados para rehabilitar estructuras de ingeniería civil tienen los siguientes propósitos:

- Incrementar la fuerza a la flexión y la rigidez

- Incrementar la capacidad de carga axial

- Incrementar la fuerza a la torsión y/o a la deformación, e

- Incrementar la ductilidad y la capacidad de desplazamiento

Los tableros comercialmente disponibles a la fecha pueden ser clasificados en dos: los de tipo sándwich y las placas pultruidas unidas; en ambos casos el control de calidad del producto es posible por los procesos de fabricación estandarizados.

Las estructuras de sándwich han sido ampliamente utilizadas para la aplicación en la industria aeroespacial, marina y automotriz especializada, donde los requerimientos de rigidez y fuerza se deben lograr con un mínimo de peso (Vinson 1999). La construcción de estos sándwich implica el uso de placas rígidas de baja densidad en las caras que

soporten la fuerza a flexión unidas al material del núcleo que separa las caras y asegura la acción de los tableros.

Debido a que se pueden intercambiar las caras y el núcleo en el proceso de manufactura, las estructuras de sándwich presentan una gran flexibilidad en el diseño.

En la actualidad, existen diversos sistemas de construcción (o combinación) para elementos estructurales de puentes con materiales compuestos. Se enuncian a continuación los más destacados:

Tableros Duraspan

Tableros Hardcore

Tableros Superdeck

Tableros Viga Cajón

Tableros Tech-Deck

CSS (composite Shell System)

Sistema de Tubo Híbrido (HTS)

Vigas Multicelulares

Concepto Maunsell

En cuanto a refuerzos en el ámbito ingenieril el más destacado es el refuerzo en pilares y pilas, envolviéndolos con placas de fibra preimpregnadas. En 1981 se modificó la normativa de los Estados Unidos respecto al proyecto antisísmico de puentes, multiplicando por 8 el rango de seguridad para el refuerzo transversal necesario; por lo que se han utilizado este tipo de refuerzos en puentes de California con objeto de mejorar la ductilidad de las pilas ante la acción sísmica.

Construcciones destacadas



En el año 2000 se construyó en la autopista interestatal 86, cerca de San Diego (California), el puente llamado "The King Stormwater Bridge". Está realizado a base de materiales compuestos, concretamente 12 estructuras cilíndricas de carbono CSS de 355mm de diámetro y 9.5mm de espesor rellenos de hormigón, que constituyen el sistema de refuerzo longitudinal del puente.

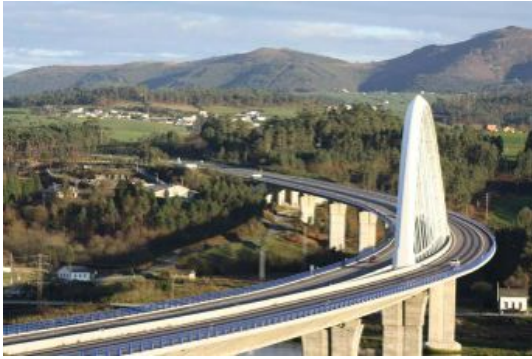
La luz es de 20 metros con un ancho de 12.8m. El tablero está formado por 6 paneles de tipo "Duraspan" de 12.8m de ancho y 3.3m de longitud. No es el puente más largo construido pero sí el más transitado y el que más carga tiene que soportar.

A raíz del éxito de "The King Stormwater Bridge", las autoridades de California han promovido el "I-5/Gilman Project". Éste consiste en un puente de materiales compuestos con unas dimensiones de 137m de longitud, 46m de altura y 3.7m de ancho. Las columnas y las vigas longitudinales están proyectadas en CSS y los travesaños en vigas de pultrusión híbridas vidrio/carbono y acero.

Construcciones relevantes en España

En 2003 se construyó un puente del A.V.E. en Lérida con materiales compuestos desarrollado y construido por la empresa Fiberline. Este puente, es el más largo de

Europa dentro de sus características. Sus dimensiones son 38m de longitud, 3m de ancho y 16m de altura. Sus elementos estructurales, a excepción de los pilares principales y la cimentación, están formados por perfiles íntegramente en el suelo, siendo posteriormente elevada al completo y colocada de una pieza sobre la estructura principal. Su construcción fue muy rápida, teniéndose que interrumpir la circulación de trenes sólo durante 2 horas.



El puente de la autovía del Cantábrico es una obra pionera debido a la utilización masiva de materiales compuestos en las vigas (fibra de carbono) y en los conectores tablero-vigas (fibra de vidrio AR)

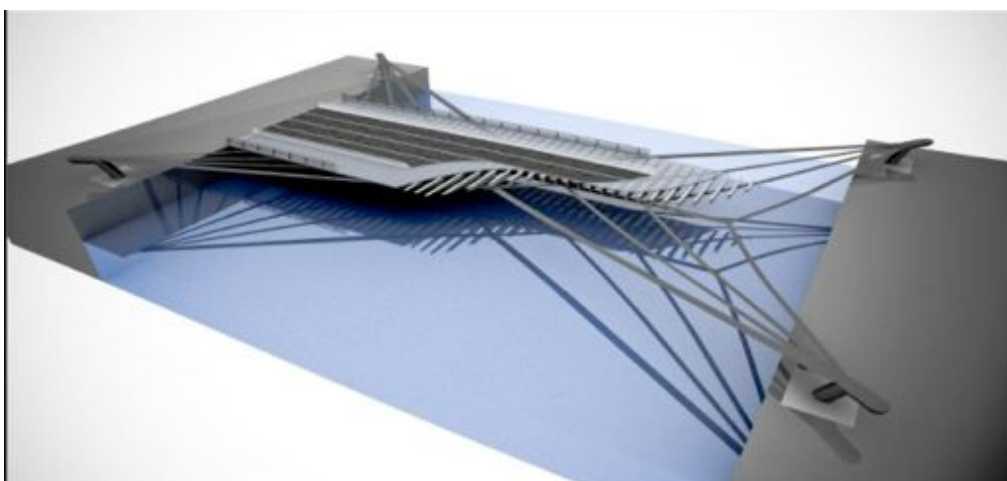
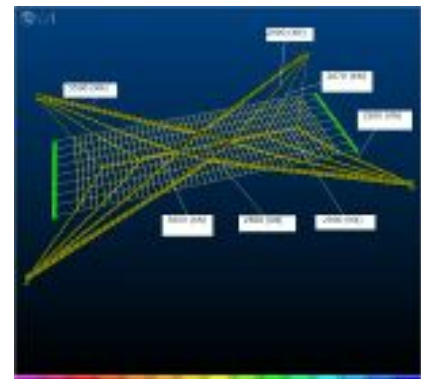
6.2. Investigaciones

6.2.1. Aplicación de CFRP como elemento estructural en ingeniería

Destaca en innovación tecnológica la aplicación directa realizada de la CFRP en el concurso de diseño y cálculo estructural del puente sobre el río Urumea.

El equipo investigador desarrolló una propuesta atractiva y con aplicación directa de la CFRP mostrando las claras ventajas que presentaba este material respecto a soluciones con materiales convencionales. (Universidad de Granada. Laboratorio de Evaluación No Destructiva)

Axil en tirantes [kN]



7. Posibles aplicaciones en la Edificación

7.1. Usos actuales de la CFRP

Además de la aplicación a puentes antes descrita, los materiales compuestos también se utilizan para otras finalidades en las estructuras de Edificación:

Sustitución del armado corroído y el hormigón que le rodea. Las reparaciones consisten en sustituir las armaduras corroídas junto con el hormigón circundante por una nueva capa de hormigón a la que se le une una lámina de material compuesto, generalmente de matriz termofija.

Refuerzos a una estructura existente. Con objeto de mejorar la capacidad a flexión, a cortante o la ductilidad del elemento reforzado. Junto con el pretensado exterior de una estructura, utilizándose cables, barras o elementos especialmente diseñados para el pretensado con sistemas habituales.

Cables "activos". La última generación de ascensores de Schindler, uno de sus modelos, presenta cables de aramida, con la mitad de peso, el doble de resistencia y capacidad de monitorización de deformaciones.

Sistemas de unión "activos". Materiales con memoria de forma. Enfriando cambian la forma y al volver a temperatura ambiente recuperan la forma inicial. Por ejemplo remaches.

Cimentaciones "activas". Formadas por materiales compuestos electroreológicos, materiales normalmente líquidos pero que con el paso de la corriente eléctrica se vuelven sólidos. En caso de sismo deja de pasar corriente a través del material con lo que algunas cimentaciones se vuelven líquidas y consiguen un conjunto más flexible.

Reparaciones de elementos dañados por la corrosión en ambientes marinos que requieren que se remueva todo el hormigón contaminado con cloruro, y usualmente esto no es posible en una columna reparada. El recubrimiento con CFRP puede ser viable al ser capaces de restaurar la capacidad perdida y resistir las fuerzas transversales debido a la expansión. Por otro lado, es adecuado por su resistencia a la corrosión.

Refuerzos de materiales compuestos para productos de hormigón (especialmente en postensado y pretensado). Así, las antiguas estructuras y los nuevos materiales adheridos crean un nuevo elemento estructural que tiene una fuerza y rigidez más altas que el original.

La principal diferencia entre los refuerzos pretensados y no pretensados es el nivel de estrés y, correspondientemente, el tipo de materiales constructivos elegidos. Los de GFRP de bajo coste se utilizan generalmente para aplicaciones no pretensadas.

Un tipo de refuerzo habitual es el de flexión, colocando bandas preimpregnadas o rígidas en las zonas de tracción. En Europa un amplio número de puentes deteriorados se han reforzado utilizando materiales compuestos en lugar de las convencionales láminas de acero debido a que estas presentan claras desventajas, como su limitada longitud, transporte, manejo y peso.

Las ventajas del confinamiento en hormigón reforzado deficiente en regiones de actividad sísmica han probado ser una de las más significativas de las aplicaciones recientes de los FRP. El confinamiento adecuado, ya sea con cubiertas prefabricadas o placas curadas que se aplican in situ, en las que la dirección principal de las fibras incrementan la capacidad de rotación (y de ductilidad) e las zonas de articulación, además de que previene el despegue de los refuerzos internos, contiene la expansión lateral del hormigón.

Construcciones destacadas:

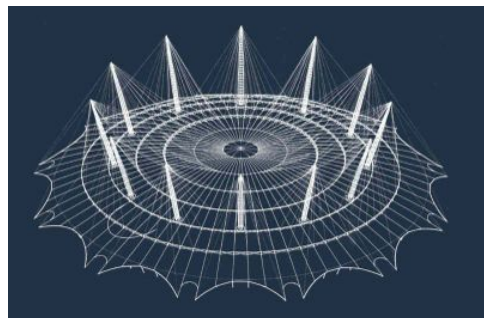


El Museo de Arte de Milwaukee (2001) diseñado por Santiago Calatrava. Posee unas alas móviles de 32m de longitud para dejar pasar la luz a la galería del museo. Estas alas están formadas por 72 timones de 0.6m de espesor y de longitudes variables entre 32 y 8m. Estos timones estaban proyectados en carbono /epoxi mediante enrollamiento por filamentos pero se fabricaron en acero por cuestiones económicas.



La Glasgow Science Toser (Escocia, 1992). Es una torre de 120m de altura, cuya parte superior gira libremente con el viento. La parte superior está fabricada en fibra de vidrio y el mástil y sus refuerzos en fibra de carbono.

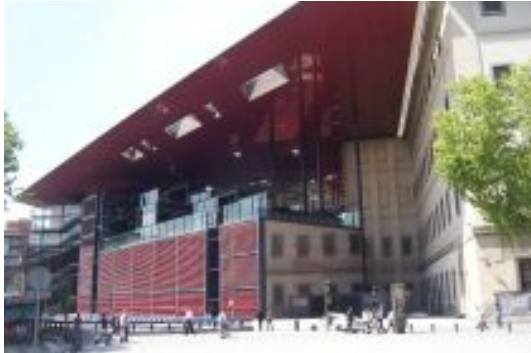
El Millennium Dome (Londres, 2000). Es la mayor cúpula del mundo con una superficie de 80000m² y 50m de altura. La membrana está realizada en tejido de fibra de vidrio y matriz de teflón.



Un ejemplo de edificio realizado íntegramente con materiales compuestos es “The Eyecatcher Building”, que es el edificio de viviendas y oficinas con estructura composite más alto realizado hasta el momento. Fue construido en Swissbau, para su presentación, y posteriormente desmontado y vuelto a construir en Basel, donde actualmente se utiliza como edificio de oficinas. Sus dimensiones son 15m de altura con una planta de 10x12m.

Construcciones relevantes en España

Destacan los tirantes realizados de materiales compuestos de la Torre de Collserola (Barcelona, 1992) diseñada por Norman Foster. Los tres cables superiores están fabricados en aramida/epoxi.



La fachada del Museo Reina Sofía de Madrid, fabricada por la empresa ICOSA, es una muestra de la combinación de los materiales compuestos con el acabado, a la estética y la libertad de formas. Hay que subrayar que no es una aplicación estructural, aunque debe soportar los esfuerzos característicos de una obra de fachada.

7.2. Investigaciones

7.2.1. Aplicación de CFRP como elemento estructural.

Como hemos visto a lo largo del apartado de la evolución de la forma, los diseños de arquitectura pueden ir muy ligados a la forma de la estructura, jugando con los diferentes parámetros de cada material, las tensiones de éste pueden llevarnos a formas muy sugerentes. En este caso, el funcionamiento a tracción en la dirección principal de la CFRP, puede aportar un nuevo entendimiento de las cubiertas en edificación. Hasta ahora se conseguían grandes luces gracias a la composición de elementos metálicos a modos de cerchas o estructuras espaciales. Con la fibra de carbono surge una nueva sección, de forma cóncava, permitiéndonos ir a luces más grandes.





En la memoria del proyecto del Palacio de los Deportes de Huelva, el arquitecto Enric Miralles comenta:

"... En la propuesta original, la estructura se teje entre la geometría del proyecto hasta que el doble abanico de cables frece luces transversales muy cortas para apoyar elementos secundarios. Así aparece una estructura uniforme –intentando no distinguir entre elementos secundarios, primarios- en la que su dimensión aparente no está unívocamente definida por la luz que debe cubrir... La dimensión del vacío de la sala queda definida a través de otros intereses. La sala es el vacío excavado comprendido entre el límite del bosque y los mástiles exteriores.

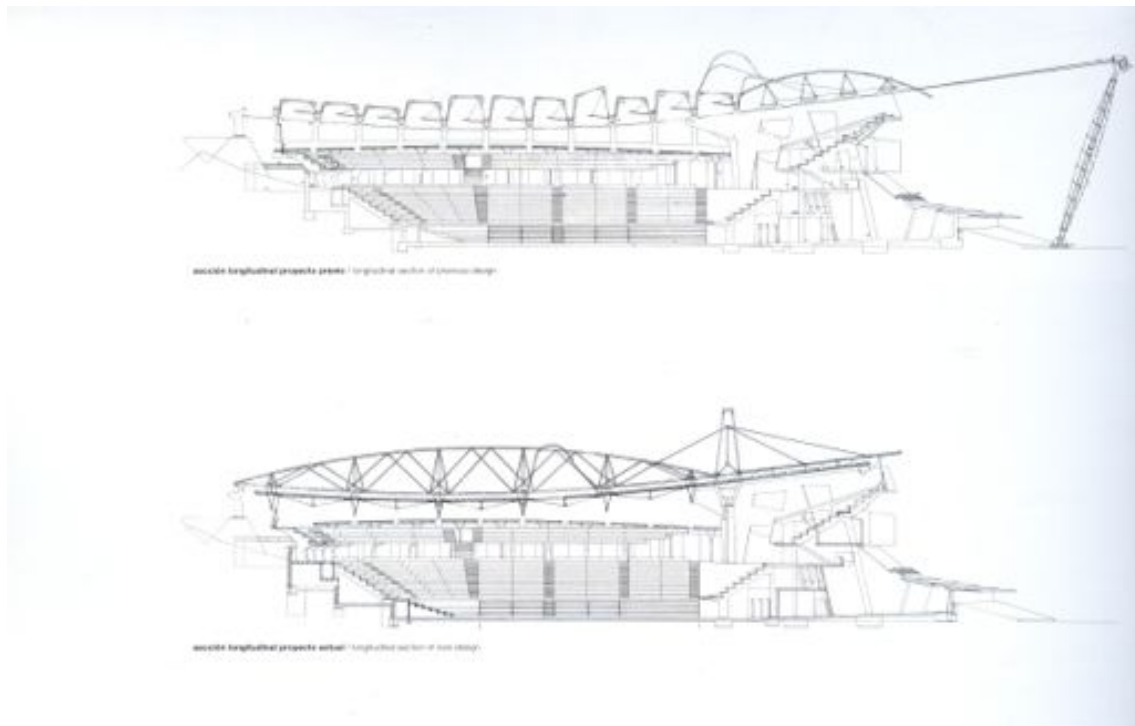
La estructura repite la dimensión del bosque... Y se modifica hasta llegar a ser unos pequeños porches de entrada.

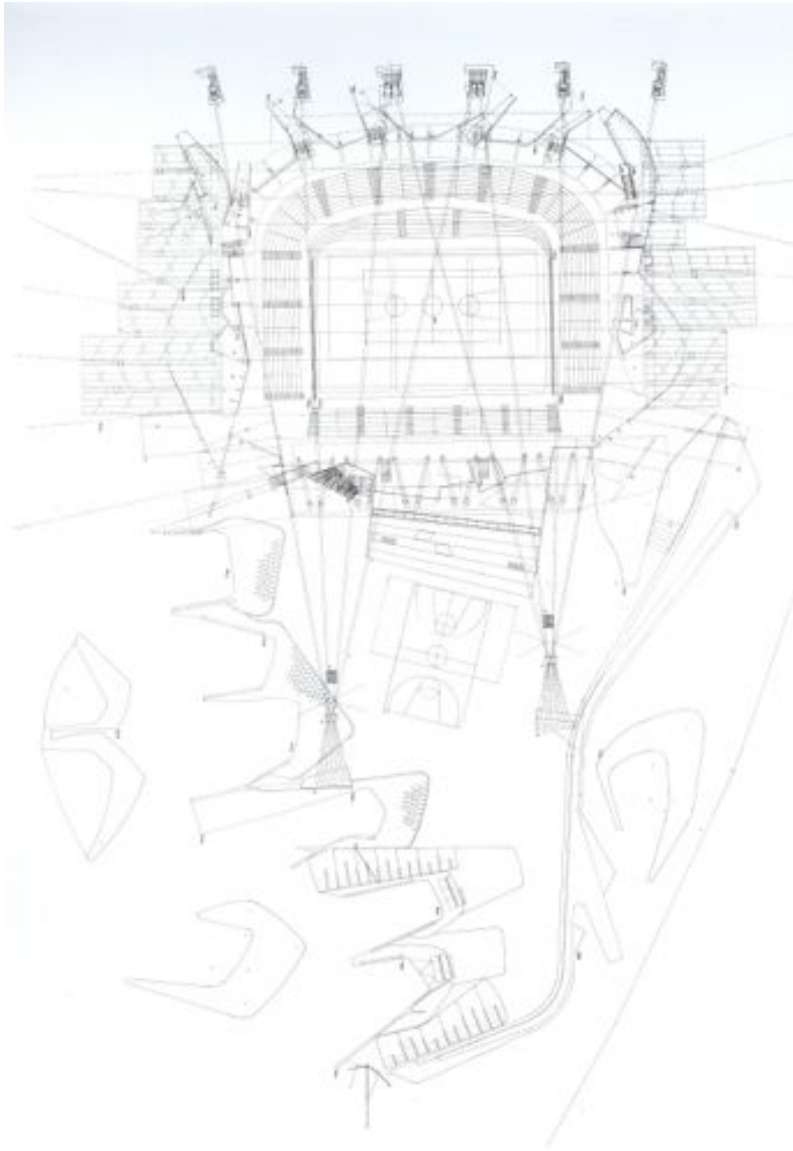
Al agruparse los cables en ambos mástiles, todo cambiará. Este recogerse fuerza y equilibrio lateral en ambos lados de la cubierta, en la que es protagonista la estructura secundaria.

Luego, el protagonismo a los mástiles en sí mismos, que resumen la construcción y se fijan en los muros, prolongación de las gradas en el exterior. Los mástiles resumen el carácter público de la construcción. Ocupan el vacío exterior y definen afuera el lugar público de juego, equivalente a la pista reglamentaria. Me ayudaron a entender el papel que cariátides y atlantes tuvieron en la descripción de la arquitectura clásica.

A través de los mástiles –que conducen en su interior las cargas de la lejana cubierta al suelo-, la topografía excavada de los asientos deja de cumplir su función y se modifica, al recoger las cargas transmitidas desde la cubierta, llevando la construcción como un lugar público e indefinido hacia las edificaciones urbanas próximas...”

A lo largo de este fragmento Miralles logra integrar la sutileza de la forma a través de la construcción y, en este caso, sobre todo, de la estructura. Elementos principales e imponentes como son los mástiles o pilonos son en su diseño anclajes de lo público y privado, del deporte y la actividad cotidiana, son elementos hitos en un paisaje marcado por la línea de una cubierta que encierra un tesoro excavado, la función final del proyecto.





Otro proyecto de especial relevancia en cuanto a la definición de la forma y que se podría adecuar a las características de cubiertas realizadas con fibra de carbono es el Pabellón de Portugal de Álvaro Siza. La esbeltez buscada se efectúa por medio de una catenaria con hormigón pretensado, consiguiendo un efecto de ingravidez.



7.2.2. Aplicación de CFRP como elemento constructivo. Paneles compuestos-revestimientos.

En la actualidad se están realizando nuevos estudios sobre la aplicación de CFRP en paneles destinados al revestimiento en construcción. Según lo indicado, por ejemplo, en el proyecto ejecutado correspondiente al Museo Reina Sofía en Madrid, vemos cómo las características estructurales estudiadas sobre la fibra de carbono pueden seguir siendo incorporadas en materiales de revestimiento en fachadas. El disponer de dicho material, colaborará a los esfuerzos necesarios en la verticalidad de la fachada.

Los estudios realizados sobre paneles compuestos comienzan con Hyer et al. en 1989, que modeló las trayectorias de la fibra por el método finito del elemento (FE). Éstos eran por trozos continuos y orientados en las direcciones de la tensión principal. Debido a la tosquedad del acoplamiento usado en el análisis, las disposiciones producidas no eran fácilmente fabricables debido a los altos cambios del ángulo de la fibra a través de los bordes del elemento. En un trabajo de carta recordativa de Hyer y de Lee (1991) las orientaciones de la fibra fueron obligadas de forma que solamente las pequeñas variaciones en el ángulo de la orientación podrían ocurrir entre los elementos adyacentes. De tal manera, era posible aumentar resistencia a pandeo mientras que presentaba los diseños que podrían ser fabricados. Además, combinando la fibra recta y curvilínea da formato dentro de un laminado, el mejor que abrocha y los resultados de la falta fueron alcanzados.

El primer método de modelado de trayectorias completas de fibras fue realizado por Nagendra et. Al. (1995), en el que se buscaba un sistema de optimización de trayectorias de las fibras. Variando la influencia de la curva base, podrían ser creadas diferentes trayectorias de fibras. Después de cinco iteraciones, la carga de pandeo fue incrementada un 85% sobre el diseño inicial de fibra recta.

Un segundo método de modelar las trayectorias completas tow fue desarrollado por Gürdal y Olmedo (1992, 1993) en los años 90 tempranos en la tecnología de Virginia (los E.E.U.U.). La idea original era que la respuesta de laminados de fibra reforzados podría ser alterada perceptiblemente permitiendo que el ángulo de la orientación de la fibra varíe espacialmente a través de la estructura. Puesto que la orientación de la fibra define las características de la rigidez (y fuerza) de un laminado, los paneles compuestos con las variaciones del in-plano del ángulo de la fibra fueron llamados los

variable-stiffness panels. Según la definición desarrollada, los ángulos de la orientación de la fibra varían linealmente a lo largo de un eje geométrico del laminado del compuesto produciendo las trayectorias curvilíneas de la fibra. Las trayectorias subsecuentes de la fibra son obtenidas cambiando de puesto la trayectoria de la referencia en la dirección perpendicular a su eje de la variación de la orientación de la fibra, por lo tanto la dirección de fibra se asume para variar solamente en una dirección espacial. Se alcanzaron resultados prometedores en términos de rigidez y pandeo generados por la investigación analítica y numérica (Olmedo y Gürdal, 1993; Waldhart et al., 1996). Varios paneles fueron fabricados por Wu y Gürdal (2001) para validar la fabricación de laminados tow-steered. Los estudios continuados por Wu et al. (2002) confirmaron la capacidad portante creciente de los variable-stiffness panels sobre los paneles de fibra recta tradicionales. La razón de los logros notables fue atribuida a la redistribución de la carga del centro de los paneles a las regiones más rígidas del borde.

En 2003-2005 se fueron realizadas pruebas a compresión y torsión por Jegley et al. en los paneles dirigidos y no-dirigidos de la fibra con los agujeros centrales. En estas pruebas los paneles fueron cargados hasta rotura. Además, los autores intentaron simular estos experimentos con análisis del FE. No sólo el daño y la falta no fueron considerados, sino que los modelos tampoco pudieron predecir cargas de pandeo con exactitud aceptable. Wu et al. (2002) también realizó simulaciones numéricas de las pruebas de compresión en los paneles tow-steered sin éxito. En esta operación no se consideraron las variables correspondientes a las imperfecciones anticlastic grandes, atribuidas al esquema de la fabricación, que están presentes en la variable curada los paneles de la rigidez (Wu y Gürdal, 2001). Éste es un método incómodo que implica la medida de las imperfecciones físicas del panel antes y después del accesorio de los accesorios de ayuda. En este trabajo, la predicción correcta de las cargas de pandeo del panel es intentada simplemente explicando las tensiones térmicas residuales como resultado del proceso de curado.

Hasta ahora Tatting y Gürdal (2001, 2002) han estado considerando el fallo en el diseño de laminados tow-stiffness usando los criterios basados en técnicas de la curva-guarnición, con el único propósito de garantizar que el fallo en la primera capa o lámina ocurre bien después del primer modo de pandeo. Lopes et al. (2007) realizaron análisis del fallo de la capa primera en paneles variable-stiffness, optimizados para pandeo, usando el sistema de los criterios de fallo fenomenológicos LaRC04 desarrollados en el centro de investigación de la NASA Langley por Pinho et al. (2005). Según las diversas soluciones, los paneles tow-steered demostraron mejoras en un 34% en comparación con el clásico laminados de la fibra recta.

8. Bibliografía

ARTÍCULOS Y TESIS

Lopes C.S., Camanho P.P., Gürdal Z., Tatting B.F., 2007. Progressive failure analysis of tow-placed, variable-stiffness composite panels.

Maimí, P., Camanho, P., Mayugo, J., Dávila, C., 2007a. A continuum damage model for composite laminates: Part I. Constitutive model.

Mechanics of Materials 39, 897–908.

Maimí, P., Camanho, P., Mayugo, J., Dávila, C., 2007b. A continuum damage model for composite laminates: Part II. Computational implementation and validation. Mechanics of Materials 39, 909–919.

Camanho, P., Dávila, C., Pinho, S., Iannucci, L., Robinson, P., 2006. Prediction of in situ strengths and matrix cracking in composites under transverse tension and in-plane shear. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37, 165–176.

Auyer J., Simmons J., Spena M., Mary Todd Hofner M.T. Design of a Femoral Canal Sizing Device Using ABAQUS

Tak-Man Cheung J., Ming Zhang M. Finite Element Modeling of the Human Foot and Footwear

D'Amico D.S., Adrián P. Cisilino A. P., Sammartino M. R., Capiel C., 2005. Modelado computacional de estructuras óseas utilizando el método de los elementos finitos y tomografías computarizadas: análisis de la estabilidad de un implante gleno-humeral

Lalegname A., Sfer D., Etse G., 2002. Análisis micromecánico de huesos

Isabel Crespo Cabillo. Control gráfico de formas y superficies de transición. Tesis doctoral

Emmanuel Carballo Gutiérrez. "Viabilidad de materiales compuestos en estructuras". Dpto. de Mecánica de Sólidos e Ingeniería Hidráulica. Universidad de Granada.

REVISTAS

El Croquis 30+49-50+72(II)+100-101. Enric Miralles 1983-2000

LIBROS

Kim D.-H., "Composite Structures for Civil and Architectural Engineering". Ed. E&F Spon, 1995. ISBN 0-419-19170-4

Margarit J., "Las mallas espaciales en arquitectura", Ed. Gustavo Gili, 1972.

Nerdinger W., "Frei Otto complete works. Lightweight construction natural design". Ed. Birkhäuser Architekturmuseum tu München"

Botey J. M. "Oscar Niemeyer. Obras y proyectos". Ed. Gustavo Gili, 1996. ISBN: 84-252-1576-5

Forster B., Mollaert M., "Arquitectura textil. Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas". Ed. Munilla-Lería, 2009. ISBN: 978-84-89150-82-9

Behling S., "Sol Power. La evolución de la arquitectura sostenible". Ed. Gustavo Gili, 1996. ISBN: 968-887-396-9.