

“las formas del hormigón catálogo práctico de diseño”

Francisco Javier Sanchis Sampedro

tutores_ M^a Concepción López González
Javier Benlloch Marco

curso 2010-11

máster en edificación_especialidad en gestión



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

“las formas del hormigón catálogo práctico de diseño”

Francisco Javier Sanchis Sampedro

tutores_ M^a Concepción López González
Javier Benlloch Marco

curso 2010-11

máster en edificación_especialidad en gestión



INDICE

0_Prólogo y objetivos	3
0.1_Prólogo	3
0.2_Objetivos	6
1_Introducción: El hormigón, ideal soñado por los arquitectos.....	7
1.1_Los orígenes del hormigón armado.....	7
1.2_El nuevo sistema constructivo	12
1.3_La expresividad del nuevo material.....	15
1.4_El hormigón, ideal soñado por los arquitectos	20
2_El hormigón armado: Características y comportamiento estructural.....	27
2.1_Descripción y características del hormigón armado	27
2.2_Comportamiento estructural: Estructuras laminares.....	29
3_Aplicaciones en edificación: Análisis de edificios	36
3.1_Mercado de Algeciras.....	37
3.2_Auditorio Kresge – Massachusetts Institute of Technology	40
3.3_Frontón de recoletos.....	43
3.4_Vivienda taller de Joan Miró.....	46
3.5_L'Umbracle - Ciudad de las Artes y la Ciencias.....	49
3.6_Auditorio ciencias químicas.....	52
3.7_Sede de la Unesco	53
3.8_Fábrica Fernández	56
3.9_Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad	59

3.10_Parc Oceanogràfic	62
3.11_Laboratorios Jorba – La Pagoda	65
3.12_Paraguas invertido	68
3.13_Hipódromo de la Zarzuela.....	71
3.14_Depósito de agua en Fedala	74
4_Estudio estructural: las formas geométricas del hormigón	77
4.1_Clasificación de las superficies.....	77
4.2_Acciones, estados de carga y combinaciones.....	79
4.3_Modelización de las estructuras y programa de cálculo	82
4.4_Estudio estructural de las superficies	83
4.5_Conclusiones del estudio	93
5_Catálogo práctico de diseño.....	101
6_Bibliografía	114
7_Índice de imágenes	116

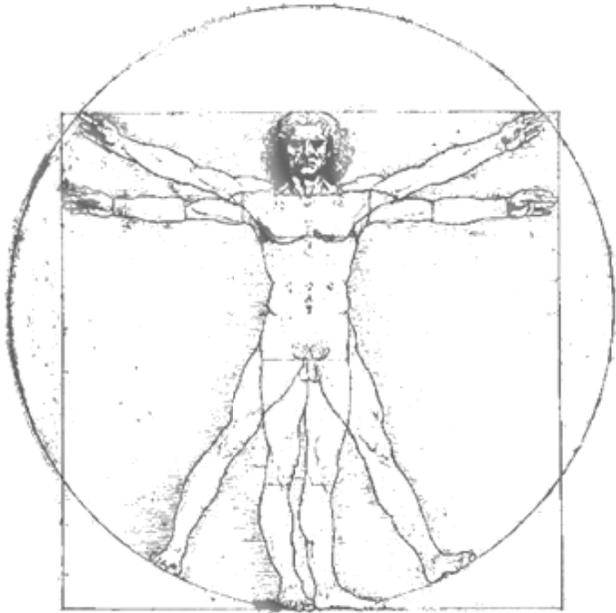


Fig 0.1 - El hombre de Vitruvio, Leonardo da Vinci (1487)



Fig 0.2 - Boceto de la Ópera de Sidney, Jörn Utzon (1957)

0_Prólogo y objetivos

0.1_Prólogo

VENUSTAS, FIRMITAS Y UTILITAS

En el tratado más antiguo que se conserva sobre arquitectura, "De Architectura", de Vitruvio, del S I a.C., se dice que la arquitectura descansa en tres principios: la Belleza (Venustas), la Firmeza (Firmitas) y la Utilidad (Utilitas). La arquitectura se puede definir, entonces, como un equilibrio entre estos tres elementos, sin sobrepasar ninguno a los otros.

La consecuencia de priorizar uno de los tres principios sobre los otros dos nos lleva a casos tan conocidos como el de la Ópera de Sidney. La opinión expuesta en 1964 por Félix Candela sobre la resolución del concurso de este edificio de Jörn Utzon y el desenlace final de la obra, que supuso un elevado sobrecoste sobre el previsto en el inicio, pueden servir para situar el marco y la motivación de la investigación que pretendo desarrollar.

"Los arquitectos, hombres al fin, no pueden escapar de este clima surrealista en el que cualquier desafortunado gesto puede producir mundial, aunque generalmente efímera, notoriedad. ¿Para qué descender a tan prosaicos detalles como el de asegurarse que una estructura tiene posibilidades de ser construida? Qué-dese esta tarea para ayudantes de segunda categoría, sin que haya peligro de que tales consideraciones limiten la capacidad creativa del genio. La ópera de Sidney constituye un trágico ejemplo de las catastróficas consecuencias que esta actitud de desprecio por las más obvias leyes físicas puede acarrear" (Candela, 1968).

Las estructuras definen las construcciones de forma fundamental. El desarrollo de un concepto estructural es parte imprescindible del proyecto arquitectónico. La diferenciación que en la actualidad existe entre el diseño arquitectónico y estructural no está

justificada, y debe desaparecer. El trabajo, por tanto, podríamos fundamentarlo en tres ideas principales:

1. *La estructura ocupa en arquitectura un lugar que le da existencia y aguantata la forma.*
2. *La persona responsable de la arquitectura, de su diseño y de su realización es el arquitecto.*
3. *El arquitecto desarrolla la idea de la estructura para su obra a partir de sus conocimientos profesionales" (Engel, 1967).*



Fig 0.3 - Portada del "The Sidney Morning Herald" que comenta el "controvertido diseño" para la ópera realizado por Utzon

ESTRUCTURA Y MATERIAL: EL HORMIGÓN ARMADO

Como ya he indicado antes, el objetivo general del trabajo es poner de relieve las consecuencias que tiene el descuido de los principios de la física en el diseño y poner de manifiesto la necesidad de aunar idea, estructura y material en la fase de proyecto, de elaboración de la propuesta para un concurso o para cualquier tipo de proyecto de edificación. Los resultados de mi investigación pretenden dar un poco de luz a este complejo proceso de creación y de esta manera llegar a una solución más eficaz y coherente.

La elección del material también es un aspecto fundamental en estas edades tempranas del proyecto, ya que de ella depende en gran medida la estructura a utilizar, la idea desarrollar, la estética exterior de la arquitectura...

"Cada material tiene una personalidad distinta, y cada forma impone un diferente estado tensional".

"La arquitectura, no pueden prescindir de la realidad del fenómeno físico, esto es, de las leyes de la estática. Su belleza se funda esencialmente sobre la verdad, sobre la racionalidad de la estructura".

"La obra mejor es la que se sostiene por su forma" (Torroja, 1957).

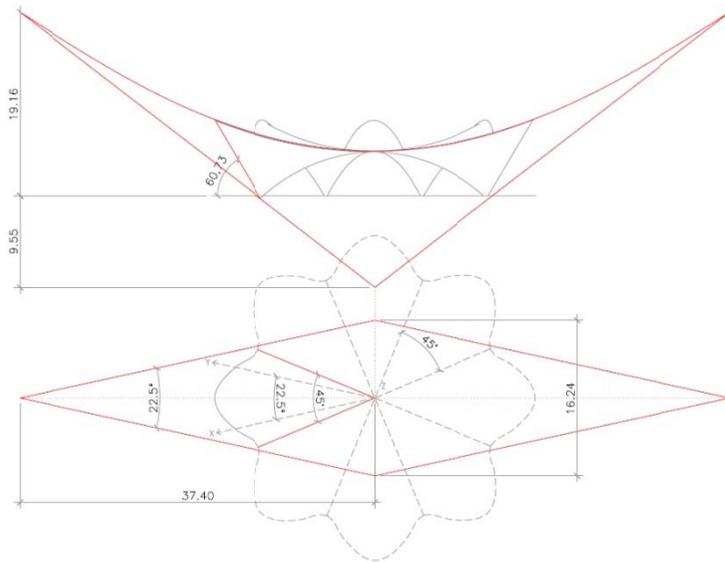


Fig 0.4 - Estudio de la geometría básica de la cubierta del restaurante del Parc Oceanogràfic Universal de Valencia (2006)

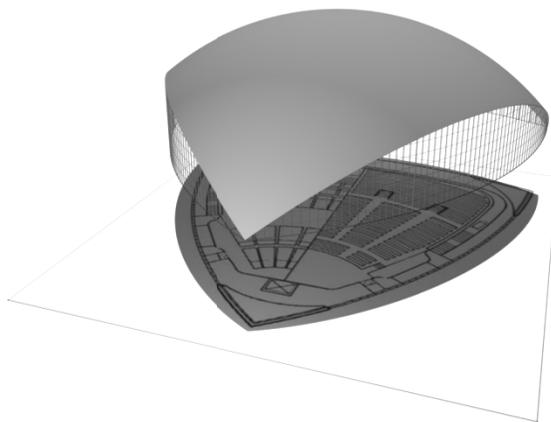


Fig 0.5 - Modelización de la cubierta del auditorio Kresge (1955) del arquitecto Eero Saarinen (Elaboración propia)

El material objeto de mis investigaciones es el hormigón armado. Esto es debido a la libertad formal que nos ofrece, a su eficacia comprobada a lo largo de su historia, a la ligereza que podemos alcanzar con sus mínimos espesores... es el *"ideal soñado"* para los arquitectos, tal y como lo define Eduardo Torroja. Si bien es cierto que las grandes posibilidades formales de este material no son utilizadas habitualmente y de manera correcta por los arquitectos, en muchas ocasiones por desconocimiento o falta de tiempo para trabajar sobre ellas.

ESTUDIO GRÁFICO Y ESTRUCTURAL

La intención del trabajo es tratar en profundidad un tema muy técnico como es el estudio de estructuras arquitectónicas singular de hormigón armado, a través del lenguaje gráfico. En él se abarcarán las tipologías estructurales realizables en hormigón armado y que se definen como *"resistentes por forma"*, tanto de una manera teórica como práctica, con el análisis de edificios construidos, en los que se haya utilizado el hormigón armado en todas sus formas posibles, analizando su geometría, dimensiones y características estructurales y constructivas derivadas de ésta.

Para la realización de estos análisis gráficos, nos ayudaremos de las herramientas de diseño asistido por ordenador (AutoCAD y 3d Studio MAX), mientras que para el análisis estructural utilizaremos un programa de cálculo de estructuras por elementos finitos (SAP 2000).

Las herramientas de dibujo y cálculo por ordenador han abierto en los últimos años un potencial de diseño arquitectónico y estructural enorme que anteriormente no existía. Este nuevo abanico de posibilidades formales y eliminación de barreras matemáticas a la hora del cálculo de estructuras, no siempre se ha utilizado de manera correcta. En muchos casos ha dado lugar a graves errores conceptuales en el diseño

CATÁLOGO PRÁCTICO

Como conclusión al trabajo se ha realizado un catálogo práctico con las diferentes posibilidades formales que ofrecen las estructuras de hormigón armado que puede ayudar en el proceso creativo de manera que el arquitecto proyectista tenga la certeza de que la forma que está introduciendo en su diseño es perfectamente realizable si se adapta a los parámetros que en el citado catálogo se establecen.

0.2_Objetivos

- Analizar las diferentes posibilidades formales que ofrece el hormigón armado valorando de manera cualitativa y cuantitativa su comportamiento estructural.
- Realizar un estudio gráfico geométrico de las diferentes superficies constructivas que se pueden conseguir con el hormigón armado.
- Realizar un análisis de varios edificios donde se haya utilizado el hormigón, aprovechando para ello alguna de sus posibilidades formales geométricas.
- Establecer unos parámetros de diseño geométrico y de comportamiento estructural para las diferentes geometrías de hormigón.

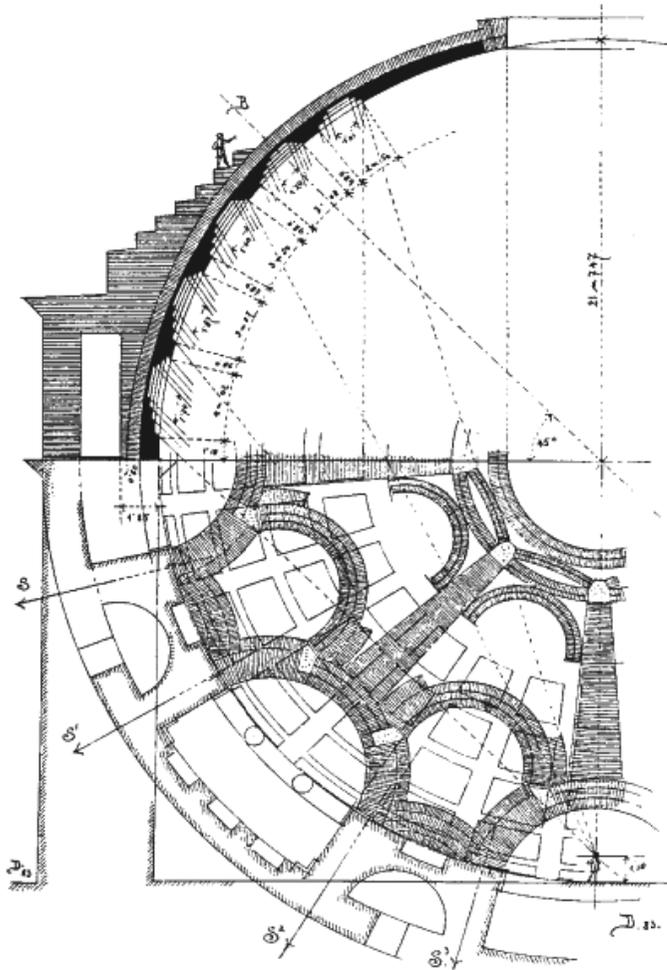


Fig 1.1 - Plano en planta y sección del Panteón de Roma (s I aC)

1_Introducción: El hormigón, ideal soñado por los arquitectos.

En esta primera fase se estudia la bibliografía existente sobre las posibilidades formales que el hormigón armado ofrece y que lo diferencian de otros materiales constructivos. Para ello se han investigado diferentes fuentes como pueden ser las procedentes del ingeniero Eduardo Torroja, los arquitectos Félix Candela, Pier Luigi Nervi... Se ha elaborado una cronología desde la aparición del hormigón hasta las últimas investigaciones de manera muy práctica y enfocada al máximo aprovechamiento formal del material. De esta manera se establece el estado de la cuestión.

1.1_Los orígenes del hormigón armado

DEL OPUS CAEMENTICIUM AL HORMIGÓN ARMADO

Los orígenes del hormigón, entendido como material aglomerante, podemos encontrarlos en Egipto donde para la construcción de ladrillos se empleó mortero de yeso y cal mezclados con paja. Los griegos y babilonios también utilizaron morteros de cal en sus construcciones en el siglo VIII a.C.

Pero fue durante la época del Imperio romano cuando se utilizó un material que se considera el antecedente de hormigón armado, el "*opus caementicium*". Gracias a este material se produjeron grandes avances en la construcción durante esta época, pudiendo de esta manera construirse edificios como el Panteón o el Coliseo. También llamado "*hormigón romano*", era bastante diferente en su composición al hormigón que conocemos hoy en día. En un principio se utilizó como aglomerante el mortero de cal aérea, y más adelante, a mediados del siglo I d.C. se comenzó a utilizar puzolana que es un tipo de ceniza volcánica característica de tierras italianas y que produce un mortero de gran monolitismo y resistencia.

Pero no es hasta mediados del siglo XVIII y XIX cuando el desarrollo de la industria del cemento permite evolucionar el material hasta convertirse en el que conocemos y usamos en la actualidad.

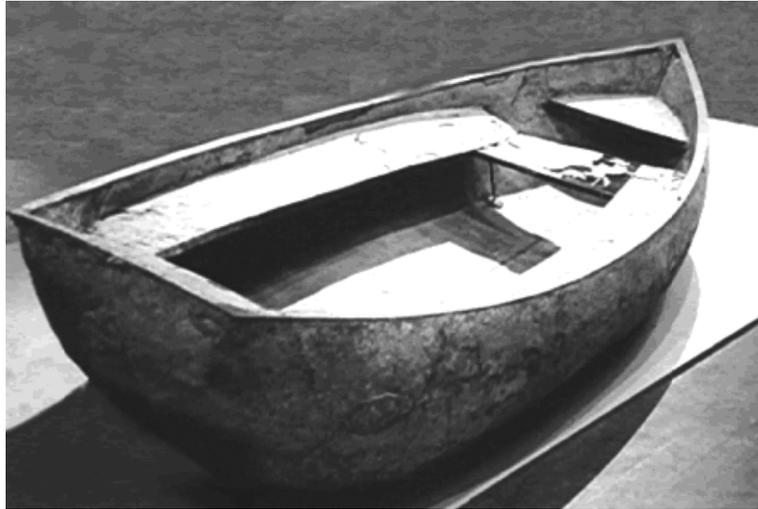


Fig 1.2 - Barca de hormigón de Lambot (1849)

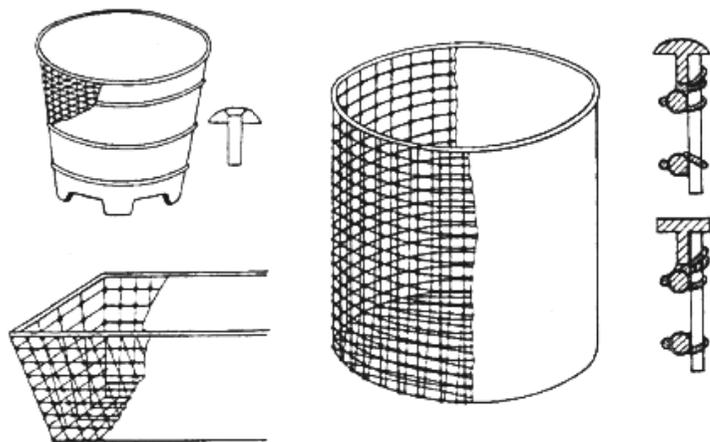


Fig 1.3 - Dibujos de las patentes para jardineras de Monier (1867)

Para que no resulte pesado, vamos a realizar un recorrido cronológico y esquemático por estos primeros años de existencia del hormigón:

El nacimiento del hormigón es paulatino y simultáneo en varios países. Su aparición y posterior desarrollo está unida al desarrollo tecnológico del cemento y su puesta en obra.

Ya en la segunda mitad del siglo XIX el cemento está disponible industrialmente. Es entonces cuando se producen las primeras experiencias con el nuevo material:

1849_Louis Lambot – Diseña y construye una barca de hormigón.

1847/52_François Coignet – Proyecta la primera cubierta de en cemento fraguado con encofrados y armado de perfiles de hierro para una terraza en Saint-Denis.

1867_Joseph Monier – Crea una patente para la construcción de jardineras de hormigón.

Existen otros intentos intermedios, muchos de ellos sin éxito, durante estos años. Entre ellos caben destacar los de Fleuret, R. de Charneville, Smeaton...

Entre 1880/90 – Se llevan a cabo muchas patentes sobre elementos de hormigón y sistemas constructivos complejos basados en el nuevo material: Cottancin, Monier, Mèlan, Ransome, Hyatt, Hennebique, Möller, Wünsch, Matrai...

Vamos a analizar de manera paralela la aparición del hormigón en los diferentes países donde tuvo lugar destacando a los personajes más significativos:

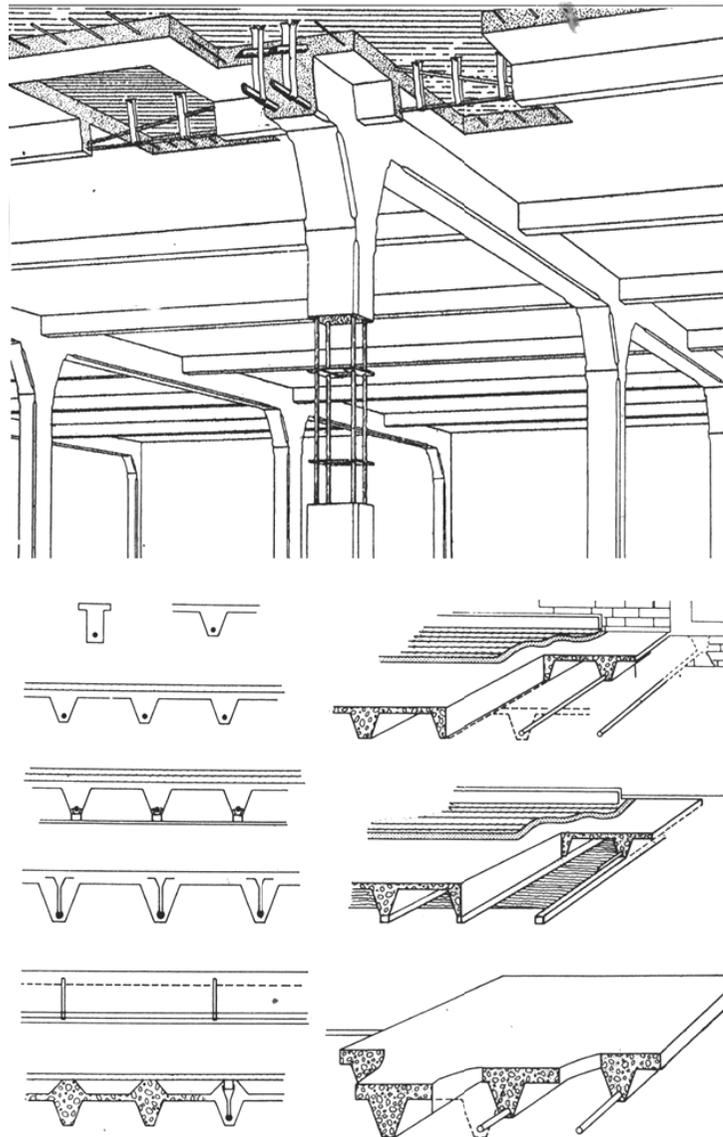


Fig 1.4 - Dibujo del sistema constructivo patentado por Hennebique (1892)

FRANCIA Y BÉLGICA

François Hennebique (1824/1921)

Realiza varias investigaciones llegando a definir un sistema constructivo basado en el hormigón armado

1892_ Realiza varias patentes y crea una organización, originando así un monopolio de explotación

1898_ Crea la revista "*Le béton armé*" como una estrategia comercial. En ella aparecen unos cálculos más prácticos que teóricos y no aparecen novedades tipológicas. Lo que se propone es una sustitución de los materiales tradicionales por elementos de hormigón armado

Lleva a cabo una reducción del edificio al esqueleto portante, produciendo de esta manera una liberación de la fachada. Convierte sus edificios industriales en un conjunto de hormigón más vidrio.

1895_ Hilanderías de Tourcoing

1896_ Hilanderías de Fives

Gobierno Francés crea una comisión dirigida por Considère para regular las condiciones de aplicación, puesta en obra y cálculo del hormigón armado

1906_ Se aprueba una circular reguladora con teorías, herramientas de cálculo y diseño del hormigón armado



Fig 1.5 - Imagen interior de la "Century Hall" (1913) proyectada por Max Berg y construida por Dyckerhoff & Widmann AG

ALEMANIA Y AUSTRIA

Joseph Monier (1823/1906)

1877_Desarrolla una patente de vigas de cemento armado

Gustav Adolf Wayss (1851-1917)

Ingeniero civil alemán

1885_Adquiere los derechos de la patente de Monier para Alemania.

1893_Funda Wayss & Freitag, sociedad para explotar la patente. Ésta se centra más en la ingeniería y en elementos como losas, bóvedas y arcos.

Eugen Dyckerhoff (1844/1924) & Gottlieb Widmann

1880_Crean la empresa Dyckerhoff & Widmann AG (Dywidag) para explotar las patentes de Monier. De esta manera toman la iniciativa en el campo teórico y dan más importancia a la investigación.

Entre otros ingenieros e investigadores que estudiaron el nuevo material en Alemania y Austria cabe destacar los trabajos de:

Mathias Koenen (1849/1924)

Desarrolla una teoría sobre el comportamiento de losa de hormigón.

Emil Morsch (1872/1950) y Johann Bauschinger (1834/93)

Desarrollan y dan la base teórica a los sistemas de Monier.

La principal diferencia que se produce en estos países con los trabajos desarrollados por Hennebique es el interés por lo teórico frente a lo pragmático.



Fig 1.6 - Edificio Ingalls en Cincinnati diseñado por Ransome (1903)

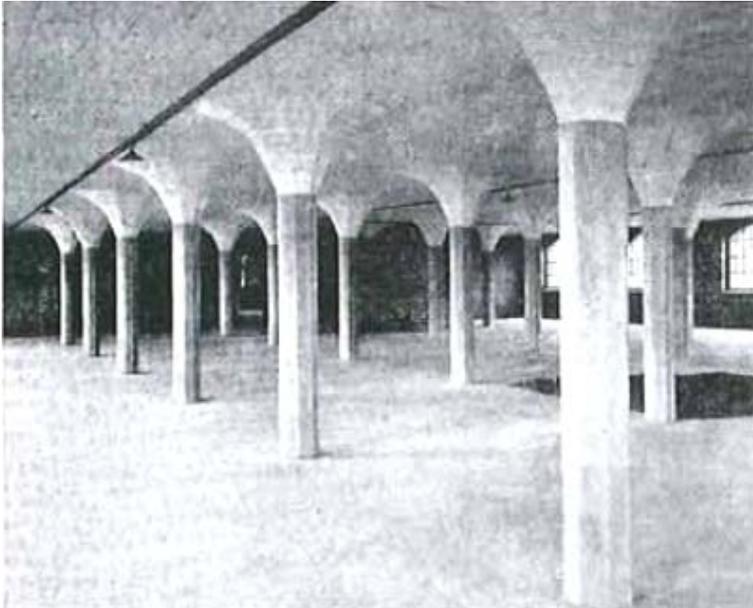


Fig 1.7 - Sistema constructivo desarrollado por Maillart
Imagen del Almacén en Zurich (1910/12)

AMERICA

En Estados Unidos la aparición del hormigón va unida al desarrollo de la naciente industria automovilística.

Ernest Leslie Ransome (1852-1917):

Claro exponente del racionalismo y funcionalismo.

1900/02_Desarrolla su sistema constructivo, el cual se convierte en el paradigma americano de la construcción reticular.

1903_Edificio Ingalls. Construye en Cincinnati este edificio de 15 plantas utilizando hormigón armado y es considerado el primer rascacielos en este material.

Hermanos Albert y Julius Kahn (1869/1942)

1903/17_Cadenas de montaje de la industria del automóvil.

Robert Maillart (1872-1940):

Ingeniero suizo discípulo de Hennebique.

Desarrolla un sistema de losas planas con pilares fungiformes. Su objetivo es alejarse de la reinterpretación de sistemas anteriores. Lleva a cabo una reflexión sobre la naturaleza y las características abstractas del material. Utiliza la intuición estructural.

1909_Patenta un sistema de losas sin vigas.

1910/12_Almacén en Zurich con pilares fungiformes y techos sin vigas

1939_Pabellón del cemento (Expo Nacional Suiza) Experimentación sobre la energía de la flexión mediante bóvedas de cañón parabólico.



Fig 1.8 - Imagen de la fachada del 25 bis de la Rue Franklin de Perret (1903)

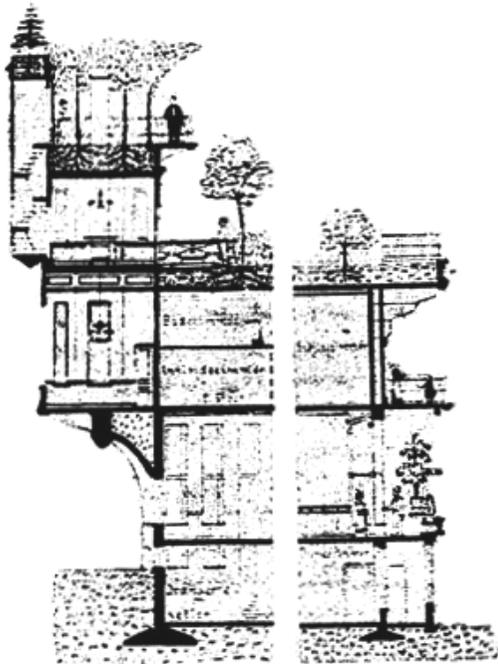


Fig 1.9 - Sección de la Villa Bourge-La-Reine de Hennebique (1902-04)

1.2_El nuevo sistema constructivo

Auguste Perret (1874-1954):

Traslada las experiencias previas a la arquitectura.

Se aleja del debate de principios del siglo XX que intentaba responder a las cuestiones de "cómo decorar el hormigón" y "el problema de las texturas".

Combina la tradición académica francesa con el racionalismo estructural de Violet Le Duc.

Hace la transición de la madera al hormigón similar a la de los templos griegos.

1903_Edificio en el 25 bis de la Rue Franklin. En el utiliza la terraza plana y convierte la estructura en un esqueleto de elementos independientes y articulados entre sí mas o menos como un orden clásico.

1922_Nôtre-Dame en Le Raincy donde realiza una separación entre los pilares redondos y el cerramiento, el cual lo materializa de manera independiente.

François Hennebique (1824/1921)

1902-04_Villa Bourge-La-Reine. En esta villa, Hennebique utiliza muchos de los recursos compositivos nuevos que le brinda el hormigón, entre ellos la terraza plana ajardinada que contiene un jardín, un huerto y un invernadero. La utilizará de manera recurrente como imagen de su empresa.

Anatole de Baudot (1834-1915):

Utiliza el "sistema Cottancin" para grandes espacios públicos, basado en losas de espesor reducido, de alta dosificación, sin grava, rigidizadas por nervaduras del mismo material y con la utilización de encofrados de fábrica de ladrillo armada.

Este sistema se queda obsoleto como sistema comercial tras la guerra

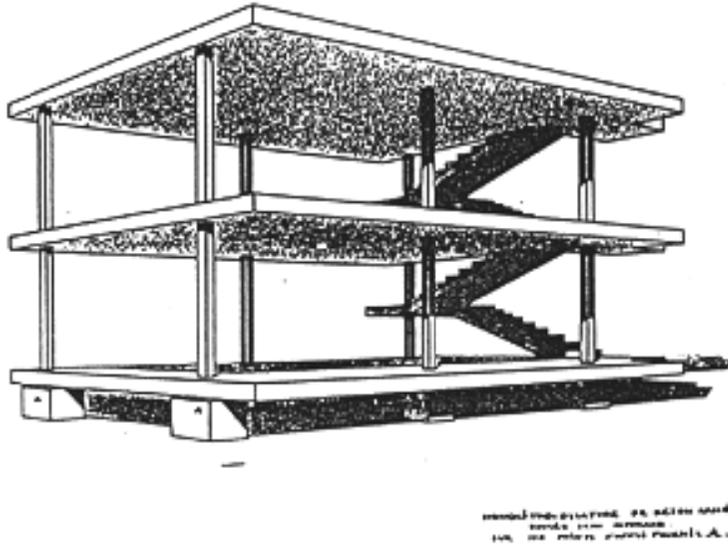


Fig 1.10 - Esquema en perspectiva del sistema Dom-ino desarrollado por Le Corbusier (1914)

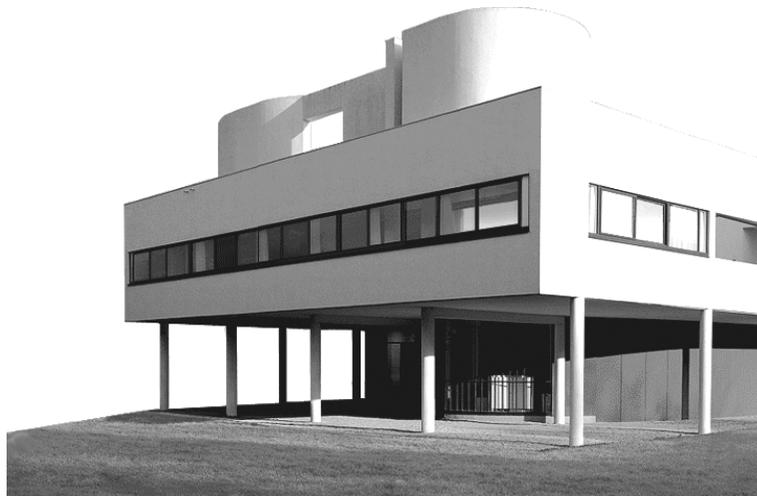


Fig 1.11 - Imagen de la Ville Saboya de Le Corbusier (1929)

1904_Iglesia de Saint-Jean de Montmartre de Paris es un claro ejemplo del sistema empleado por De Baduot.

Le Corbusier (1887-1965):

1914_Casa Dom-ino es un sistema para construir casas en serie en la postguerra. Consiste en realizar una estructura de hormigón armado formada por soportes aislados y losas planas creando de esta manera un espacio moderno anisótropo. Una de las ventajas del sistema es que permite la apilación en altura indefinidamente y una libertad ilimitada al arquitecto en distribución interior y en fachada

Después de la I Guerra Mundial, Le Corbusier se hace eco de un artículo publicado por Walter Gropius en el que habla sobre el desarrollo industrial poniendo como las arquitecturas industriales americanas, fábricas diáfanas de geometrías puras y espacios diáfanos. En ellas la imagen del hormigón armado se convierte en la denominada "estética del ingeniero".

1925_Enuncia los "cinco puntos de una arquitectura nueva", los cuales son realizables gracias al nuevo sistema constructivo basado en el hormigón:

- o Edificio levantado sobre pilotis
- o Terraza jardín plana
- o Planta libre con tabiques interiores independientes de la estructura
- o Ventanas longitudinales continuas
- o Fachada libre, separada de la estructura

1929_Ville Saboya. Máximo exponente de sus cinco puntos. Se trata de una vivienda unifamiliar situada en Poissy, en las afueras de París. Es considerada como el paradigma de la Arquitectura Internacional y de la nueva manera de construir edificios de viviendas del siglo XX.

1949_Chandigarh. Proyecto de ciudad que realizó para la nueva capital del Punjab, en la India. En ella se encuentra la mayor concentración de obras de Le Corbusier, en las cuales hace un uso muy expresivo del hormigón armado tanto en las estructuras como en todos los detalles.



Fig 1.12 - Imagen exterior de la Unité d'habitation de Marsella diseñada por Le Corbusier (1952)



Fig 1.13 - Imagen interior de los pilares utilizados por Wright en el edificio de la Johnson Wax (1944)

1952_Unité d'habitation de Marsella. Aplicación de manera casi literal del sistema dominó aplicado a un edificio de viviendas en altura.

1955_Capilla de Notre-Damme du haut en Rondchamp. En ella Le Corbusier utiliza el hormigón armado de una forma muy expresiva, creando nuevas formas.

Frank Lloyd Wright (1867-1959):

1929_St. Mark's Tower. Primer rascacielos en hormigón armado en New York.

1935_Casa de la cascada. Gracias al uso del hormigón armado, Wright diseñó esta vivienda caracterizada por sus grandes voladizos.

1944_Edificio administrativo de la Johnson Wax en Wisconsin. Introduce una estructura a base de pilares fungiformes que permite por un lado liberarla planta con un sistema estructural perfectamente modulado y además introducir luz por medio de lucernarios existentes en la cubierta entre las cabezas de estos.

1959_Museo Guggenheim de Nueva York. Obra maestra del siglo XX con un uso expresivo y geométrico del hormigón armado.

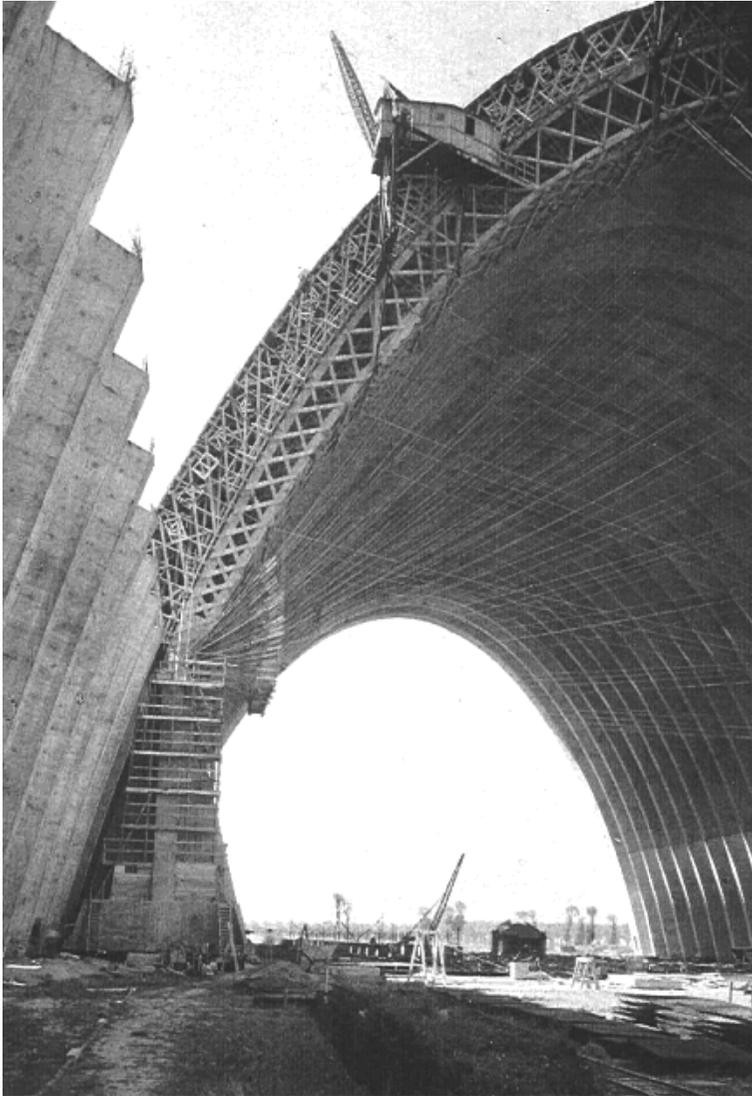


Fig 1.14 - Imagen de la construcción de los hangares de Orly diseñados por Freyssenet (1916-21)

1.3_La expresividad del nuevo material

El hormigón armado progresivamente se va configurando como un nuevo material que favorece el desarrollo y construcción de soluciones geométricas fácilmente descriptibles para abordarlas analíticamente.

Eugène Freyssinet (1879-1962):

Emplea el hormigón en estructuras de grandes luces, configurándolo como una alternativa real a las estructuras metálicas.

Descubridor de: El pretensado, la vibración del hormigón, descimbrado mediante gatos, la variabilidad del módulo elástico del hormigón...

1913_Proyecto de construcción de hangares de hormigón armado

1915-29_Construye para la empresa Limousin una serie de cubiertas de gran luz para hangares y factorías donde experimenta con muchos tipos de bóvedas: de doble curvatura, nervadas, conoidales...

1916-21_Los hangares gemelos para dirigibles en Orly son quizá las cubiertas más conocidas de Freyssinet. Esta estructura, con 88 metros de luz y 50 metros de altura, se puede decir que está resuelta por forma, no por sección ya que consigue darle la rigidez a flexión mediante plegado de la lámina de hormigón.

1928_Publica "Una revolución en el arte de construir" donde establece su teoría sobre el hormigón pretensado.

Dyckerhoff & Widmann:

1922_Cúpula hemisférica en Zeiss. Esta cúpula es una cáscara de hormigón de 6 cm de espesor realizada con un entramado autoportante de barras de acero que servían de soporte al encofrado y posteriormente de armado.

1928_Patente constructiva de superficies de revolución de espesor reducido en hormigón armado.



Fig 1.15 - Imagen de la estructura autoportante de la cúpula Zeiss durante su construcción (1922)



Fig 1.16 - Imagen exterior del mercado de abastos de Algeciras de Eduardo Torroja (1933)

1931_Construyen la primera cáscara cilíndrica de sección elíptica con 1,5 cm de espesor y 6 m de luz.

Walter Bauersfeld (1879-1959):

1922_Planetario en el Deutsches Museum de Munich - Cúpula con un entramado de tiras de hierro formando triángulos, que unidos a otros formarían una esfera de 400 metros cuadrados de superficie con un peso increíblemente bajo de solo 3,5 toneladas.

1923/24_Cúpula Jena - Primera cubierta laminar o Cáscara de hormigón de 40 metros de luz y 6 cm. de espesor con una relación luz/espesor de más de 600 y por consiguiente, superior a la de la cáscara de un huevo.

Eduardo Torroja (1899-1961)

Ingeniero de caminos español que innovó las técnicas del hormigón. Sus obras de hormigón armado están fundamentadas en la racionalidad geométrica, necesaria para el buen comportamiento estructural del hormigón armado.

1957_Publica "Razón y ser de los tipos estructurales", donde todo este pensamiento queda reflejado, como podemos observar en su prólogo:

"El nacimiento de un conjunto estructural, resultado del 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" (Torroja, 1957).

Experimenta con modelos reducidos para asegurar el buen comportamiento de sus estructuras. Entre otras muchas destacan las siguientes obras:

1933_Mercado de abastos de Algeciras. Es un espléndido espacio octogonal cubierto con una atrevida cúpula laminar de 47,80 m de diámetro, 44,10 m de radio de curvatura y sólo 9 cm de espesor, perforada por una claraboya de 10 m de diámetro, que descansa toda ella sobre 8 pilares periféricos ceñidos por un cinturón octogonal con dieciséis redondos de 30 mm

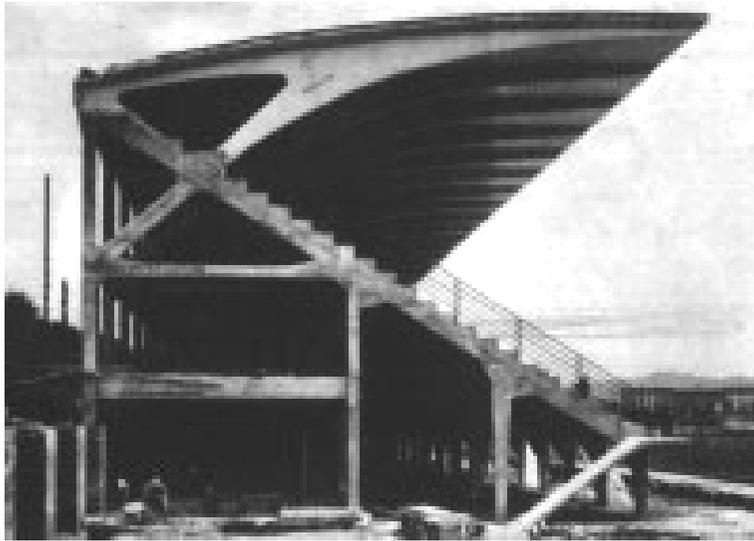


Fig 1.17 - Imagen del graderío del estadio municipal de Florencia diseñado pro Nervi (1929)



Fig 1.18 - Imagen de la marquesina para la sede de la Unesco en Paris que Nervi diseño junto a Marcel Breuer (1959)

1935_Hipódromo de la Zarzuela de Madrid. En este complejo, Torroja resuelve la tribuna con gran sinceridad estructural y eficacia funcional. La cubierta la materializada con hiperboloides de una hoja de eje horizontal y secantes entre sí.

1935_Frontón de Recoletos. Estructura destinada a cubrir el espacio rectangular de la cancha y graderíos. El diseño de la cubierta es el aspecto más innovador de este proyecto y lo que realmente lo hace singular. La solución dada a la cubierta del recinto, consistió en dos bóvedas de cañón, cuya sección estaba formada por dos arcos circulares asimétricos que se cortaban perpendicularmente.

Pier Luigi Nervi (1891-1979):

Entiende la cubierta de hormigón armado como la solución al problema de construcción del espacio monumental moderno

1929_Estadio municipal de Florencia – Estructura de hormigón totalmente vista

1950_Sede Unesco en Paris con Marcel Breuer. En ella realiza muchas superficies utilizando el hormigón armado, entre las que cabe destacar la marquesina de acceso en forma conoidal.

Félix Candela (1910-97):

Arquitecto español exiliado a México tras la guerra civil.

Candela heredó de su maestro Eduardo Torroja algunos de los fundamentos de su obra: la idea de que el ingeniero ha de ser un poeta, la convicción de que la estructura depende de la forma más que del material empleado, y la línea de investigación sobre cubiertas ligeras de hormigón armado. Su mayor aportación en el terreno estructural han sido las estructuras en forma de cascarón generadas a partir de paraboloides hiperbólicos, una forma geométrica de una eficacia extraordinaria que se han convertido en el sello distintivo de su arquitectura.

1950_Funda ya en México la empresa "Cubiertas Ala S.A.", lo que le permitiría experimentar y llevar a cabo una multitud de estructuras de hormigón basadas en el paraboloides hiperbólico.



Fig 1.19 - Imagen interior de la Iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa diseñada por Candela (1953)

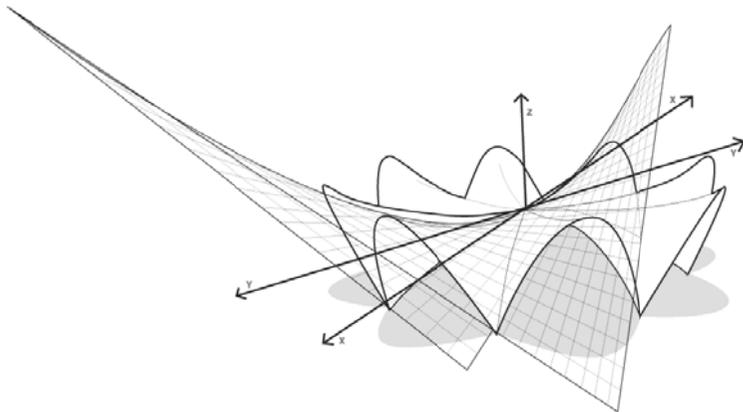


Fig 1.20 - Esquema geométrico del paraboloides hiperbólico Utilizado en el diseño de la cubierta del restaurante los Manantiales de Candela (1957)

1951_Publica "Hacia una nueva filosofía de estructuras"

1952_Pabellón de los rayos cósmicos, primero de sus proyectos significativos donde el hábil uso de la geometría del hormigón le permite construir una cubierta de tan solo 15 mm de espesor, condición de proyecto.

De la extensa cantidad de edificios que construyó y donde utilizó la geometría y el hormigón de manera totalmente expresiva a la vez que funcional, caben destacar los siguientes edificios:

1953_Iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa, donde a partir de una distribución en planta "convencional", realiza un gran trabajo de composición de paraboloides hiperbólicos que hace que el interior tenga una gran riqueza estética y geométrica.

1955_Capilla de Nuestra Señora de la Soledad, conocida también como "el Altílllo". En este edificio Candela utiliza un paraboloides hiperbólico apoyado en un cuadrilátero alabeado para cubrir todo el espacio.

1957_Cubierta restaurante Los Manantiales en Xochimilco. Mediante un hábil juego de secciones y repeticiones de un paraboloides hiperbólico, consigue crear una cubierta compuesta por 8 lóbulos que se convertirá en la imagen más representativa de su arquitectura.

1960_Planta embotelladora de Bacardi. Uno de los múltiples ejemplos de arquitectura industrial que realizó Candela.

También cabe destacar sus estudios acerca de lo que él denominaba "paraguas invertido", que no es más que una composición de cuatro paraboloides hiperbólicos apoyados en cuadriláteros alabeados con un único pilar de apoyo y capaz de cubrir una superficie de 200 metros cuadrados.

Eero Saarinen (1910-61):

Arquitecto finlandés, que emigró a Estados Unidos con tan sólo 13 años, se hizo famoso por sus diseños de líneas curvadas, especialmente en las cubiertas de sus edificios, con las que conseguía imprimirles una gran ligereza



Fig 1.21 - Imagen exterior de la terminal de TWA del aeropuerto de Nueva York diseñado por Saarinen (1956/62)

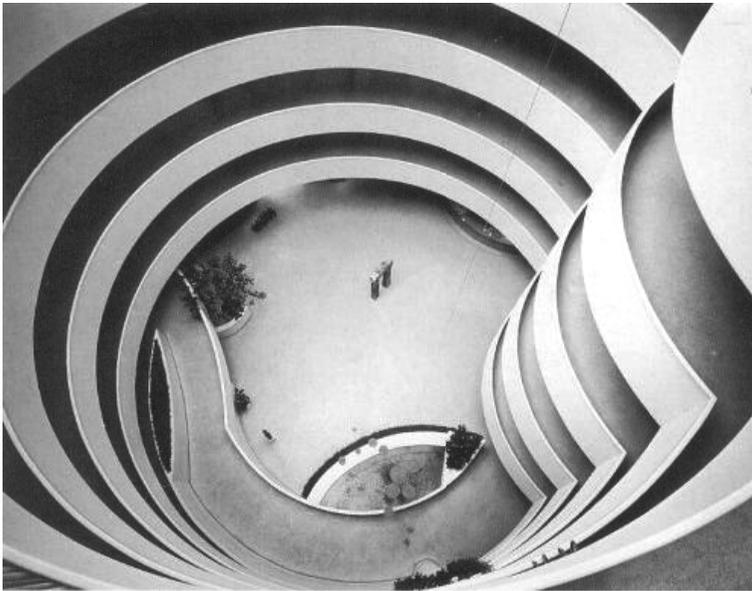


Fig 1.22 - Imagen interior del museo Guggenheim de Nueva York obra de Frank Lloyd Wright (1959)

1956/62_Terminal de TWA en el Aeropuerto Internacional de Idlewild, Nueva York. Construida en hormigón armado y con unas formas muy expresivas, fue diseñado como un símbolo abstracto de la aviación. Es probablemente uno de los mejores ejemplos de la capacidad expresiva del hormigón.

Por supuesto no están todos los que son. Muchos arquitectos en el siglo XX han utilizado este nuevo material, exprimiendo al máximo sus características estructurales y expresivas. Desde Erich Mendelsohn con su torre Einstein (1921), pasando por Mies van der Rohe y Walter Gropius, principales exponentes de la Bauhaus y del "estilo internacional", Louis I. Kahn, Tadao Ando... y tantos otros que han realizado sus diseños y construcciones con hormigón armado.

La nueva arquitectura, por tanto, demandaba nuevos materiales que se adaptaran a los movimientos arquitectónicos que iban surgiendo. El hormigón armado y el vidrio eran esos nuevos materiales con garantía de modernidad.

El hormigón armado se identifica con el ideal estético de esta nueva arquitectura. Es un material tecnológico, moldeable, capaz de crear grandes espacios diáfanos, modulados... El problema consistió en que este ideal progresivamente fue relegando a un segundo plano los fundamentos técnicos y constructivos del material.

"Las posibilidades formales de la utilización de láminas de hormigón para cubrir grandes luces, la correspondencia entre el espacio interior y volumetría exterior, y lo económico del material, solucionaron el problema de la construcción del espacio monumental moderno" (Grinda, 1995).

1.4_El hormigón, ideal soñado por los arquitectos

POSTULADOS ESTÉTICOS vs REQUISITOS RESISTENTES Y ECONÓMICOS

Como ya he indicado en el prólogo, Vitruvio en su tratado "De Architectura" indicaba que la arquitectura se basaba en tres principios: la Belleza (Venustas), la Firmeza (Firmitas) y la Utilidad (Utilitas), de manera que la arquitectura se puede definir, entonces, como un equilibrio entre estos tres elementos, sin sobrepasar ninguno a los otros.

Ya desde la antigüedad, el hombre siempre ha tenido un sentido innato de la belleza, realizando una serie de postulados estéticos que marcaron las construcciones en cada una de las épocas. Estos principios se aplicaron incluso a la estructura, imponiéndose en la mayoría de las ocasiones a otras exigencias como la resistencia y la economía. Lo importante era que las estructuras cumplieran los mencionados postulados estéticos, construyendo de esta manera edificios magníficos, pero con una notable despreocupación por la corrección de la estructura. En la actualidad, esto sigue sucediendo.

Es cierto que existe una corriente desde hace ya algún tiempo, sostenida por ingenieros expertos en estructuras y algunos historiadores, que defiende que una honda preocupación por la estructura y sus requisitos resistentes y económicos, conduciría a las construcciones inevitablemente a la belleza. Esto es debido a que las personas, aunque no estén formadas técnicamente, entienden cuando una estructura es "correcta", mientras que una estructura que no está diseñada teniendo en cuenta los principios resistentes, y que podríamos considerar "incorrecta", ofende desde el punto de vista estético hasta el más profano.

En muchas ocasiones, el mal uso de las estructuras viene dado por una reinterpretación de los sistemas constructivos empleados con un material y que se siguen utilizando al cambiar de material, sin tener en cuenta las diferentes características físicas entre ambos. Esto es lo que pasó en época griega cuando se pasó de la construcción de templos de madera a utilizar la piedra como material de construcción. La madera es un material que soporta razonablemente bien las flexiones, incluso tracciones, debido a su carácter anisótropo. Sin embargo, la piedra tan sólo se comporta bien ante compresiones, necesitando de un gran canto para poder soportar flexiones y no resistiendo prácticamente nada frente a esfuerzos de tracción. Es por esto que la estructura tradi-



Fig 1.23 - Imagen exterior del museo Guggenheim de Bilbao diseñado por Frank Gehry (1997)

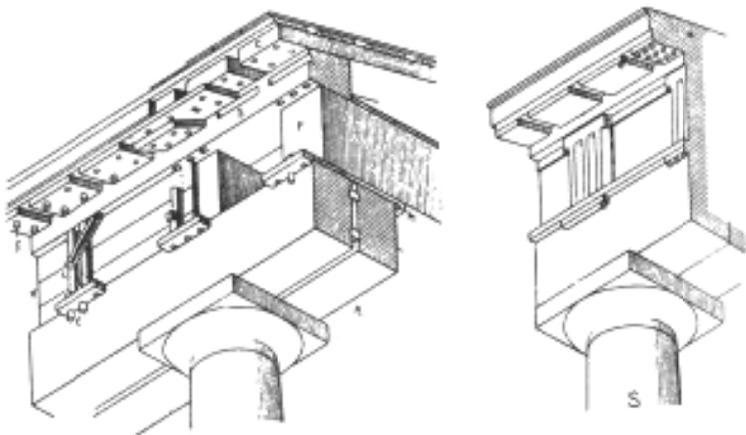


Fig 1.24 - Reinterpretación en piedra de los elementos de madera del orden dórico En los templos griegos



Fig 1.25 - Imagen exterior de la capilla de Notre Dame en Ronchamp obra de Le Corbusier (1955)



Fig 1.26 - Imagen exterior de la estación de autobuses en Cáceres diseñada por Justo García Rubio (2004)

cional de templo griego, que recuerda en todos sus elementos (triglifos, metopas y gotas) los detalles de los antiguos templos de adobe y madera, no es la más adecuada para construirlos con piedra, pero que, por el contrario, si responde a los postulados estéticos de la época.

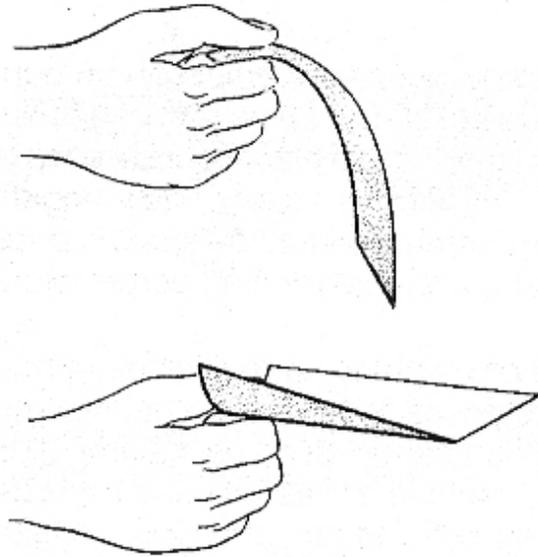
Ya en el siglo XX con la aparición de nuevos materiales, entre los que se encuentra el hormigón armado, y la multiplicidad de movimientos arquitectónicos, cada uno de ellos con sus postulados estéticos correspondientes, se abre un gran abanico de posibilidades de diseño arquitectónico. Bajo mi punto de vista, esto supone un grave problema ya que hoy en día es posible construir casi cualquier estructura, siendo muy pocas las limitaciones técnicas que se encuentra el arquitecto en el proceso de diseño. Esto le puede llevar a una despreocupación por los más básicos principios estructurales y a diseñar construcciones que no respeten ni las exigencias resistentes ni económicas.

ESTRUCTURAS E INTUICIÓN

El proceso de diseño y dimensionado de una estructura en la actualidad se ha separado en dos partes, la mayoría de las veces, independientes entre sí, llegando incluso a ser realizadas por personas totalmente desconocidas, y lo que es más grave, que desconocen completamente el trabajo y los criterios de trabajo del otro.

Cierto es que hoy en día el proceso de dimensionado suele realizarse mediante programas informáticos que hacen más sencillo el cálculo. El problema viene cuando la estructura diseñada sufre sustanciales modificaciones durante el cálculo, y éstas afectan de manera notable en su estética, funcionalidad y coste.

Es por esto que durante el proceso de invención de la estructura debería utilizarse la intuición para diseñarla y proporcionarla. Todos tenemos en nuestra memoria soluciones estructurales y materiales con ciertas propiedades físicas que funcionan en la naturaleza. Y si además de esto tenemos una formación técnica como arquitectos o ingenieros, sabemos perfectamente cómo funciona una determinada estructura o que propiedades tiene cierto material. Es por esto que tenemos que buscar la solución más natural al problema, o en palabras de Eduardo Torroja:



“La solución natural de un problema (arte sin artificio) de impuestos previos que la originaron, impresiona con su mensaje, satisfaciendo, al mismo tiempo, las exigencias del técnico y del artista” (Torroja, 1957).

Aunque parece evidente que el estudio de las estructuras y de su cálculo permite el diseño y dimensionado de una estructura con el grado de perfeccionamiento requerido hoy en día, la intuición y la aplicación de las experiencias previas pueden ayudarnos a hacer la técnica más humana.

“Para inventar una estructura y darle proporciones exactas, se debe seguir tanto el camino intuitivo como el matemático” (Nervi, 1986).

ESTRUCTURA E IDEA

“Antes y por encima de todo cálculo está la idea, moldeadora del material en forma resistente, para cumplir su misión” (Torroja, 1957).

Fig 1.27 - Influencia de la curvatura en la resistencia de una hoja de papel Mario Salvadori “Estructuras para arquitectos” (1986)

Con estas rotundas palabras transmite Eduardo Torroja en el prólogo de su libro “Razón y Ser de los tipos estructurales” una de las ideas fundamentales de toda su obra. El cálculo nos sirve para dimensionar un determinado perfil metálico, para armar una sección de hormigón, para detallar un encuentro en una estructura de cualquier tipo... es decir, nos ayuda a que una estructura sea viable técnicamente, a que cumpla su función resistente. Pero antes de este cálculo existe un paso previo, el diseño, o como lo llama Torroja, “la idea”. Muchas veces el cálculo de un mal diseño condiciona la imagen final de nuestra estructura haciendo que la idea primitiva pierda su sentido y no se pueda apreciar en el resultado final.

El acto de diseñar una estructura debe unir técnica y arte. Por un lado, la técnica la aporta el arquitecto o ingeniero debido a su formación en estructuras y materiales, sus experiencias previas,... Mientras que la otra parte del binomio técnica-arte en muchas ocasiones se descuida y se deja de la mano de la sinceridad estructural mal entendida. El conocimiento de las estructuras por parte de un arquitecto ha de ir más allá de la técnica. El arquitecto o ingeniero ha de utilizar las estructuras en su favor, consi-

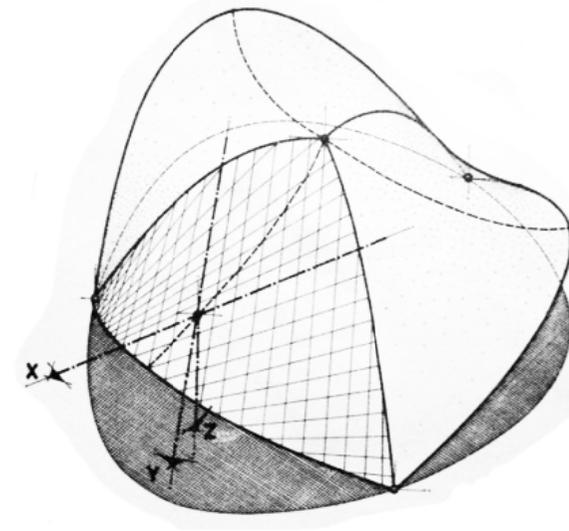


Fig 1.28 - Esquema geométrico de la cubierta del club nocturno “La Jacaranda” (1957) de Félix Candela

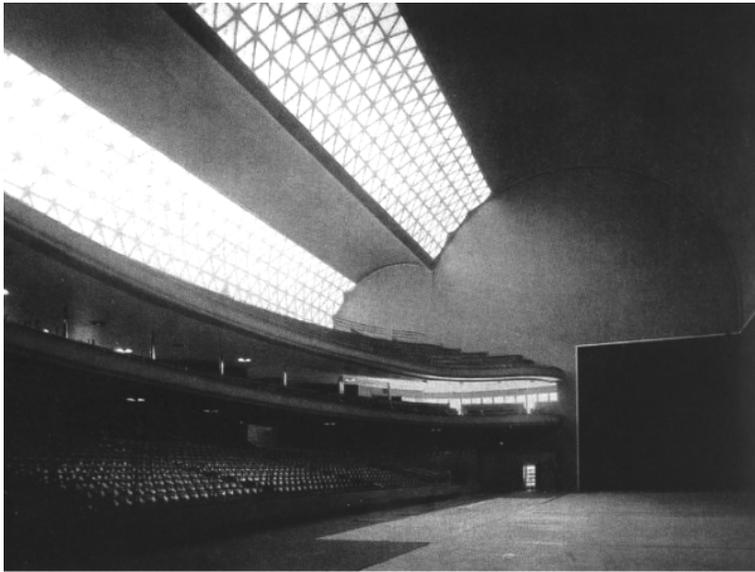


Fig 1.29 - Imagen interior del "Frontón de Recoletos" (1935) de Torroja



Fig 1.30 - Imagen interior del "Palacio de los deportes" de Roma obra de Pier Luigi Nervi (1957)

guiendo que ellas respondan a la idea que está desarrollando en el diseño, haciendo este técnicamente viable, y no al revés. Como indica el propio Eduardo Torroja:

"El conocimiento de las estructuras por parte del arquitecto es, al menos, altamente deseable, y que la corrección en la estructura no puede sino contribuir a la belleza de la arquitectura" (Torroja, 1957).

Por tanto, la fase de diseño de una estructura ha de conjugar un profundo conocimiento de las estructuras que ayuden a desarrollar la idea de diseño y la hagan posible. En esta fase se ha de unir técnica y arte. El cálculo simplemente se configurará como una aproximación real al problema de la estructura, detallándola y terminando de hacerla viable técnicamente.

BELLEZA Y EFICACIA DE LA FORMA

La belleza de la arquitectura está basada en la verdad, en la sinceridad. La realidad es que cualquier construcción no puede dar la espalda al fenómeno físico, sino que ha de darle una respuesta lo más racional posible. La racionalidad de la estructura, la sinceridad resistente de su forma, eliminando ornamentaciones y adiciones innecesarias, la directa respuesta a las leyes de la estática... es lo que hace bella una construcción.

"La obra mejor es la que se sostiene por su forma" (Torroja, 1957).

"Cuando las formas son más perfectas exigen menos ornamentación" (Gaudí, 1900).

Por tanto, la forma no es arbitraria ni superflua. La forma es el resultado de un estudio de las necesidades, de las propiedades del material, de los requisitos resistentes del edificio... La forma no puede ser arbitraria, sino que ha de satisfacer una serie innumerable de requisitos. La forma entendida desde este punto de vista, otorga belleza a una obra arquitectónica, y a su vez, esta belleza da estabilidad a la obra arquitectónica.

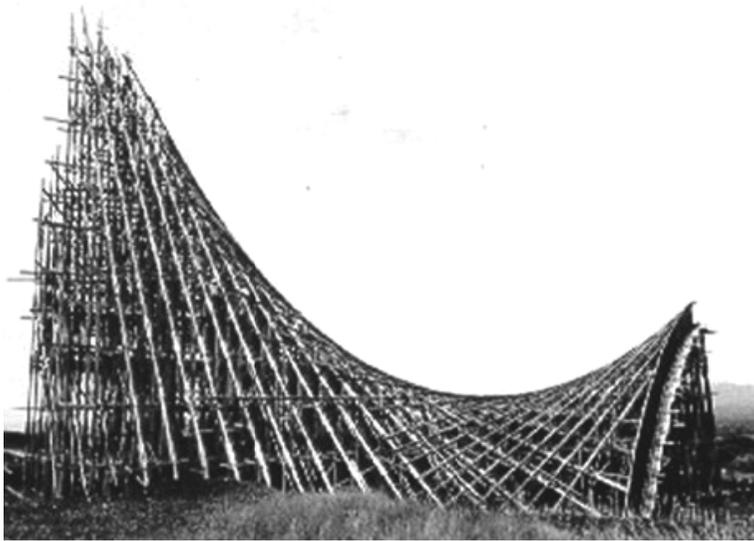


Fig 1.31 - Imagen de la cimbra durante la construcción de la "Capilla de Palmira" (1959) edificio de Félix Candela



Fig 1.32 - Imagen exterior de la "Capilla de Palmira" con el edificio finalizado

Para trabajar la forma se puede utilizar dos tipos de geometrías, la geometría orgánica o la geometría definida. La primera consistiría en diseñar los edificios como si de una escultura se tratase, modelando la forma de manera irregular y según las sensaciones del diseñador. Las formas que se consiguen de esta manera son formas indefinidas, difíciles de representar, de modelizar... en definitiva, de trabajar con ellas fuera del ámbito de la propia "escultura". Sin embargo, la geometría definida responde a formas controlables, representables de manera, no digamos que sencilla, pero si al alcance de cualquier técnico. Además, al utilizar este tipo de geometría, se pueden prever problemas futuros de las construcciones y solucionarlos ya en la etapa de diseño. Y me refiero fundamentalmente al problema estructural. Un estudio previo de las diferentes geometrías definidas que se pueden conseguir con un material, nos da una idea del comportamiento estructural que va a tener sea cual sea la escala de la construcción.

Las láminas, también llamadas cascarones (aclararemos estos términos en el apartado 3), rinden su eficacia debido a su propia geometría. Estas geometrías son las que formarán parte del posterior estudio estructural.

Y la pregunta que surge de este planteamiento es la siguiente: Y teniendo una serie de ventajas el hecho de utilizar una geometría definida frente a una orgánica ¿Por qué los arquitectos o ingenieros, no se decantan por ellas en su diseño y optan por utilizar geometrías orgánicas? La respuesta no es sencilla. Tal vez las corrientes arquitectónicas tengan mucho que ver en el hecho de que se elijan geometrías orgánicas. El expresionismo, la arquitectura orgánica, el modernismo... son corrientes a las que les acopla muy bien este tipo de formas. Pero bajo mi punto de vista no es esta la principal causa. Una prueba de ella la tenemos en Antoni Gaudí, arquitecto modernista de principios de siglo XX y gran experto en componer sus edificios a partir de geometrías definidas. Me inclino más a pensar en que el hecho de no utilizar las formas geométricas definidas en los diseños tal vez se deba a la falta de habilidad de los diseñadores, ya que resulta mucho más complejo llegar a una solución de este tipo que no a una solución orgánica en la fase de diseño.

Eduardo Torroja lo expresaba con las siguientes palabras, hablando de la racionalidad de las estructuras y de llegar a una geometría que satisficiera las necesidades de esta,

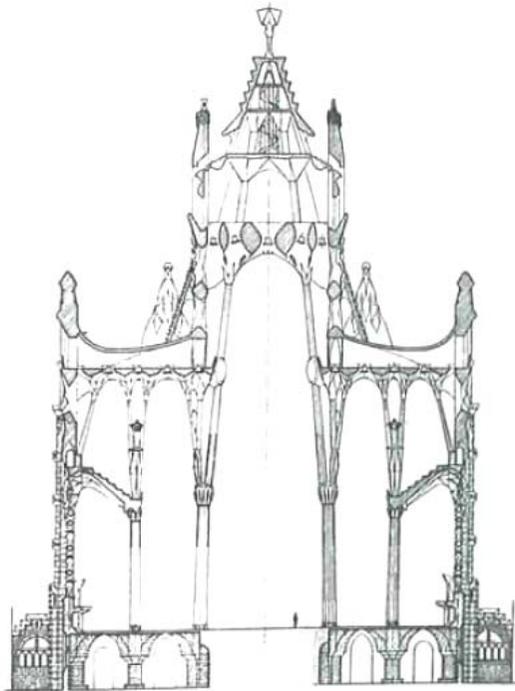


Fig 1.33 - Sección del templo de la Sagrada Familia de Antoni Gaudí



Fig 1.34 - Imagen exterior del edificio del secretariado en la ciudad de Chandigarh (1951-65), obra de Le Corbusier

“Pero, para obtenerla, es necesario un esfuerzo largo y tenaz en el sentido de las íntimas razones de resistencia de las formas. El resultado genial de un momento de inspiración es siempre el epílogo de un drama, que frecuentemente está constituido por toda una vida de trabajo” (Torroja, 1957)

“Existen evidentes ventajas para una sociedad civilizada en usar geometría definida. Esto se debe a que la civilización utiliza extensas líneas de comunicación y es más fácil de comunicar una geometría definida que una geometría orgánica. La mayoría de las estructuras de los edificios utilizados en las civilizaciones están basadas en formas rectas y existen razones prácticas y económicas para construirlas así. Debido a la falta de habilidad de los diseñadores, se utiliza muy poco el vasto repertorio de formas que no son rectas pero que sí tienen base matemática. De nuevo, como el análisis de las estructuras no rectas, es difícil, y por tanto laborioso y caro, los calculistas prefieren estructuras rectilíneas.

Se han hecho muchos intentos de construir edificios modernos con geometría orgánica, como el proyecto inicial de la Ópera de Sidney. Sin embargo estos intentos parecen forzados más que naturales” (Millais, 1996).

EL HORMIGÓN ARMADO, IDEAL SOÑADO POR LOS ARQUITECTOS

En toda esta exposición sobre la forma hemos dejado de lado, de manera intencionada, el material con el que se lleva a cabo esa forma. La elección de éste no es un aspecto poco importante en la fase de diseño de un edificio, sino todo lo contrario. Tener en cuenta el material con el que se va a materializar nuestro diseño es fundamental, ya que cada material tiene unas características y un comportamiento diferentes.

Hasta la llegada del hormigón, se había intentado materializar la forma con multitud de materiales. Desde el adobe, pasando por la madera, los materiales pétreos... hasta llegar a los materiales cerámicos, que permitían ciertas formas como las bóvedas tabicadas, que daban cierto grado de libertad en el diseño al arquitecto. Pero es el hor-



Fig 1.35 - Imagen exterior del club nocturno "La Jacaranda" (1957) en Acapulco, obra de Félix Candela

migón armado el que otorga esa libertad requerida por los diseñadores. Ofrece la posibilidad de conseguir casi cualquier forma, funcionando de manera eficaz estructuralmente, consiguiendo una economía de material con sus mínimos espesores... en palabras de Eduardo Torroja, el hormigón es " *el ideal soñado por los arquitectos*".

"Cada material tiene una personalidad distinta, y cada forma impone un diferente estado tensional".

"Ningún material se acerca como el hormigón armado al ideal soñado, ninguno puede tomar tanta libertad y eficacia, formas variadas y resistentes, con espesores mínimos (de pocos centímetros) y ligerezas que no hace más que algunos decenios habían sido consideradas utópicas. Por primera vez en la historia de la arquitectura, el material se convierte en manos del arquitecto tan maleable y plástico como la porcelana en las del artista de la cerámica" (Torroja, 1957).

2_El hormigón armado: Características y comportamiento estructural.

Una vez establecida la necesidad de estudiar el hormigón como material que permite una variedad formal muy amplia, procederé a estudiar sus características. Sobre este apartado existe una vasta bibliografía. El objetivo es sintetizar las ideas más importantes y centrarme en los conceptos estructurales que voy a necesitar posteriormente.

2.1_Descripción y características del hormigón armado

HORMIGÓN: CONCEPTOS BÁSICOS

Hormigón = Piedra artificial realizada a base de cemento, áridos gruesos y finos y agua. Se obtiene por endurecimiento, tanto en el aire como sumergido, del cemento mezclado con el agua. Además de los componentes básicos citados puede contener también adiciones y aditivos

Cemento – Debe cumplir la Instrucción para la Recepción de Cemento RC-97. Existen diferentes clases de cemento. Por un lado está el cemento Portland puro (CEM I), y luego tenemos cementos que dependen de las adiciones que contengan (p.e. CEM II/A-S es un cemento Portland con escoria y un contenido en clinker del 65 al 94%). Existen otros tipos, de uso más limitado.

Áridos – Su tamaño está comprendido entre los 8 y los 32 mm

Adiciones - “Son aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos al hormigón con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle propiedades especiales” (art. 29.2, EHE).

Aditivos - “Son aquellas sustancias o productos que incorporados al hormigón antes de, o durante, el amasado (...) en una proporción no superior al 5% de peso del cemento, producen la modificación deseada en estado fresco y/o

endurecido de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento” (art. 29.1, EHE).

El hormigón en masa es un material moldeable y con buenas propiedades mecánicas y de durabilidad. Una propiedad que diferencia al hormigón de otros materiales de construcción es la **isotropía**.

El hormigón como la mayoría de los materiales pétreos, tienen una considerable resistencia a la compresión, sin embargo, posee una muy baja resistencia a la tracción. En el caso del hormigón, la resistencia a la tracción es del orden de la décima parte de la resistencia a compresión. Por eso se usa combinado con acero, que cumple la misión de soportar las tensiones de tracción que aparecen en la estructura.

HORMIGÓN ARMADO

La técnica constructiva del hormigón armado consiste en la utilización de hormigón reforzado con barras o mallas de acero, llamadas armaduras.

ARMADURA PRINCIPAL (O LONGITUDINAL) - Es aquella requerida para absorber los esfuerzos de tracción en la cara inferior de en vigas solicitadas a flexión compuesta, o bien la armadura longitudinal en columnas.

ARMADURA SECUNDARIA (O TRANSVERSAL) - Es toda armadura transversal al eje de la barra. En vigas toma esfuerzos de corte, mantiene las posiciones de la armadura longitudinal cuando el hormigón se encuentra en estado fresco y reduce la longitud efectiva de pandeo de las mismas.

El acero confiere a las piezas mayor ductilidad, permitiendo que las mismas se deformen apreciablemente antes del colapso de la estructura.

También es posible armarlo con fibras, tales como fibras plásticas, fibra de vidrio, fibras de acero o combinaciones de barras de acero con fibras dependiendo de los requerimientos a los que estará sometido.

Por tanto, el hormigón armado se compone de dos materiales sumamente diferenciados, el hormigón y las barras de acero. Esto implica que es un material **heterogéneo**.



Fig 2.1 - Imagen exterior de la "Torre Einstein" diseñada mediante geometría orgánica por Erich Mendelsohn en 1924

2.2_Comportamiento estructural: Estructuras laminares.

INTRODUCCIÓN

"El hormigón armado constituye un nuevo material con características, totalmente diferentes del hormigón y del acero, aún cuando, dentro de él, estos elementos mantengan, de por sí, sus propias cualidades; o precisamente por ello" (Torroja, 1957)

GEOMETRÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Estructura = Ensamblaje de elementos de una, dos o tres dimensiones cuya función es desviar las cargas incidentes en ellas y resistir los esfuerzos que éstas acciones generan en ella. Cada elemento del que está formada una estructura tiene un comportamiento estructural distinto.

El comportamiento estructural de cualquier estructura o elemento depende de una serie de factores:

- La forma de la estructura
- El tipo de carga que soporta
- La esbeltez de la estructura

Vamos a centrarnos en el primero de los factores. La forma no solo hace referencia a la estructura como un todo, sino a que cada uno de los elementos que la componen ha de tener su forma, su geometría. Podemos diferenciar dos conceptos:

"Geometría definida – Aquella cuya forma se puede expresar matemáticamente. Serían geometrías definidas los cuadrados, círculos, elipses, parábolas, cilindros, esferas, paraboloides..."

Geometría orgánica – Aquella que no tiene base matemática. Habitualmente provienen de formas de la naturaleza. Se pueden crear dibujando o modelando" (Millais, 1996).

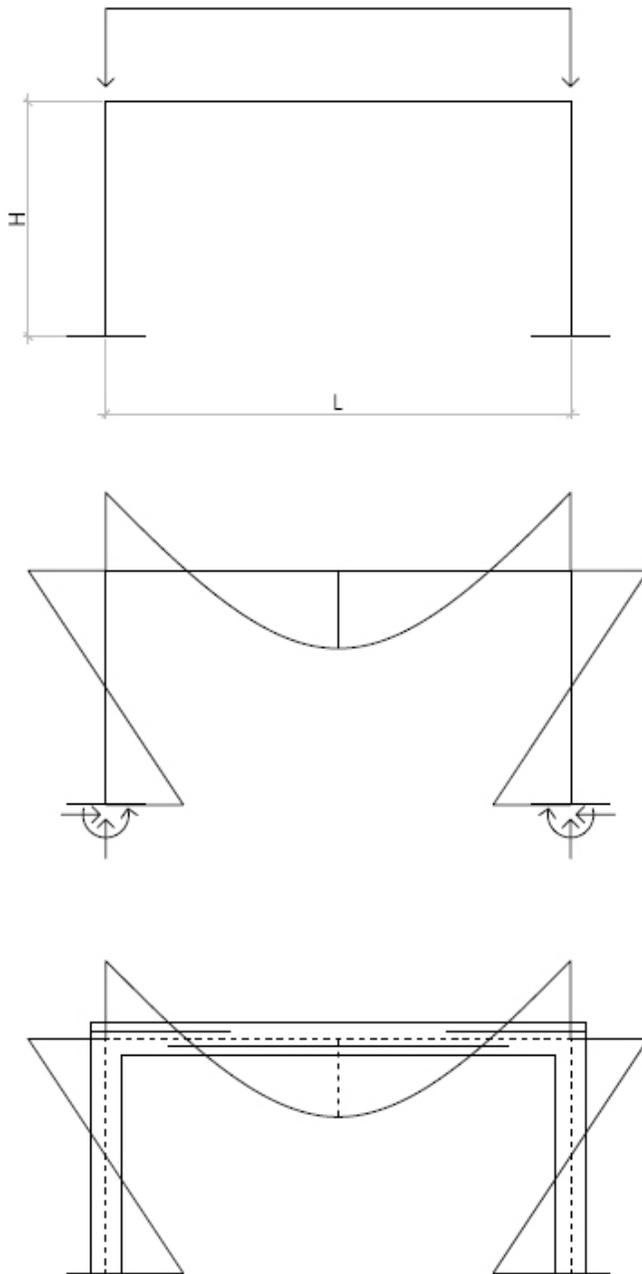


Fig 2.2 - Solución A – Pórtico de hormigón

Una de las ventajas del hormigón armado es que permite las dos posibilidades, ya que es un material que se puede moldear con la forma deseada. Ahora bien, existen evidentes ventajas si se utilizan geometrías definidas.

La mayoría de las estructuras actuales están basadas en formas rectas por motivos prácticos y económicos. Pero el repertorio de geometrías definidas no se limita a éstas. Existen gran cantidad de formas y geometrías definidas que utilizadas con habilidad resolverían muchos de los problemas de las estructuras rectas de hormigón armado.

Vamos a poner un ejemplo ilustrativo de lo indicado. Supongamos que necesitamos cubrir un espacio, con una luz L y una altura H , mediante un elemento de hormigón armado.

Siguiendo las tipologías actuales más utilizadas de estructuras de hormigón, pórticos de vigas y pilares, llegaríamos a la solución A. En este primer caso tendríamos un comportamiento tipo viga. A estas estructuras también se les llama "Estructuras de sección activa" (Engel, 1967) como más adelante detallaremos. Después de analizar el comportamiento de ésta estructura frente a una carga repartida a lo largo de toda la viga, observamos que existen tres tipos de esfuerzos: tracciones, compresiones y flexiones. Éstas últimas se producen fundamentalmente en la unión entre los diferentes elementos que componen la estructura, entre la viga y los pilares. El hormigón armado funciona de manera natural a tracción y compresión, pero no a flexión. Es por esto que se hace necesario un refuerzo en el armado en esta zona tal y como muestra el esquema. Este problema se vería incrementado al aumentar alguno de los parámetros de partida, la luz o la altura a cubrir, o al incrementarse la carga. Podríamos afirmar que la estructura tiene una geometría definida, sencilla de ejecutar, ya que se trata de formas rectas, pero que no está trabajando de una manera coherente con las capacidades resistentes del material.

"El concreto armado no está hecho para trabajar a flexión en secciones de gran masa; concretamente en secciones rectangulares, a pesar de ser esta la manera habitual de utilizarlo... aproximadamente dos tercios de la sección pétrea se convierte en un peso muerto que no efectúa ninguna función resistente, pero que si contribuye a aumentar la sección que es necesario dar a la propia viga (o losa, que para el caso es lo

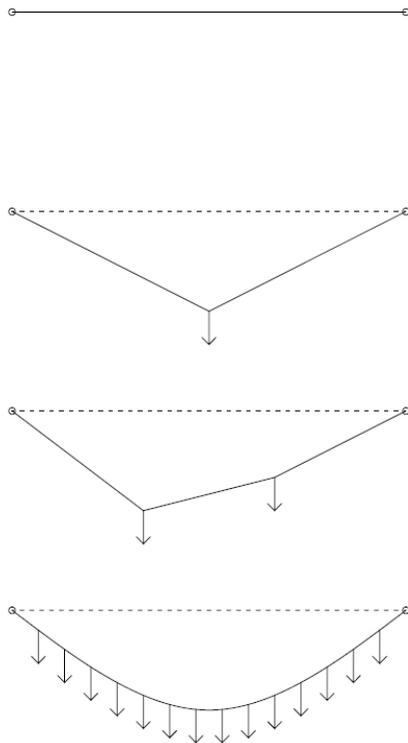


Fig 2.3 - Concepto de funicular y catenaria de fuerzas

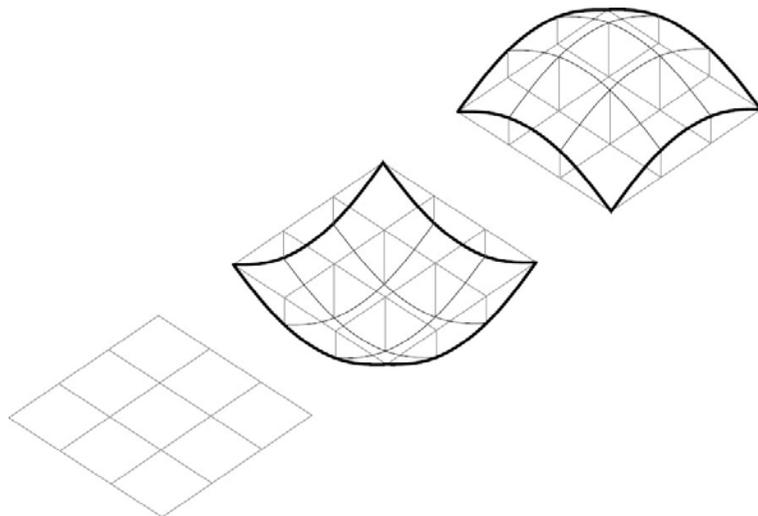


Fig 2.4 - Superficie catenaria en 3d

mismo, y por supuesto de los elementos que la soportan), columnas y cimentación” (Candela, 1950).

Para resolver este mismo problema podríamos haberlo planteado de una manera diferente, utilizando el concepto de funicular o catenaria.

Una FUNICULAR es la curva que describe un cable, sujeto por sus dos extremos, al aplicarle unas cargas. Si estas cargas a las que está sometido son una carga uniformemente repartida a lo largo de su longitud, a la curva se le denomina CATENARIA. Esto ocurre porque el cable es flexible y sólo puede tener esfuerzos normales internos. El cable se deformaría y estaría únicamente trabajando a tracción. Si esta misma curva se invirtiera, podríamos afirmar que está sometida tan solo a compresiones. El cable no podría soportarlas por su falta de rigidez, pero otros materiales como el hormigón, el ladrillo, la piedra... sí que son capaces de resistir estos esfuerzos. Ésta operación es la que tradicionalmente se ha realizado para la configuración de arcos y puentes desde la época romana. En la práctica estas curvas funiculares se simplifican mediante parábolas, ya que estas curvas coinciden prácticamente con las anteriores.

Por tanto, la solución B consistiría en realizar la estructura de hormigón siguiendo la curva catenaria que resultaría de la aplicación de una carga repartida igual a la de la anterior solución. Toda la estructura estaría trabajando a compresión. Además, si articularáramos los apoyos conseguiríamos eliminar cualquier tipo de flexión en la estructura, cosa que no sucedería con la solución A. Esta propuesta, aparte de trabajar de una manera más coherente con las propiedades y capacidades mecánicas del material ya que no necesita de refuerzos adicionales, puede llegar a alcanzar espesores mínimos. Tan sólo tienen un problema, en el momento varía el estado de las cargas, varía la forma de la curva. Es por esto que lo que se ha de procurar es que para diferentes estados de cargas, el funicular se mantenga dentro del tercio medio de la sección.

El concepto de catenaria va a ser importante en el desarrollo posterior de las estructuras que se van a estudiar. El comportamiento funicular sigue siendo aplicable en tres dimensiones.

Como ejemplo podemos ver el esquema de la red de cables que cubre un cuadrado y está únicamente apoyado en las esquinas de este. Al aplicarle una carga uniforme-

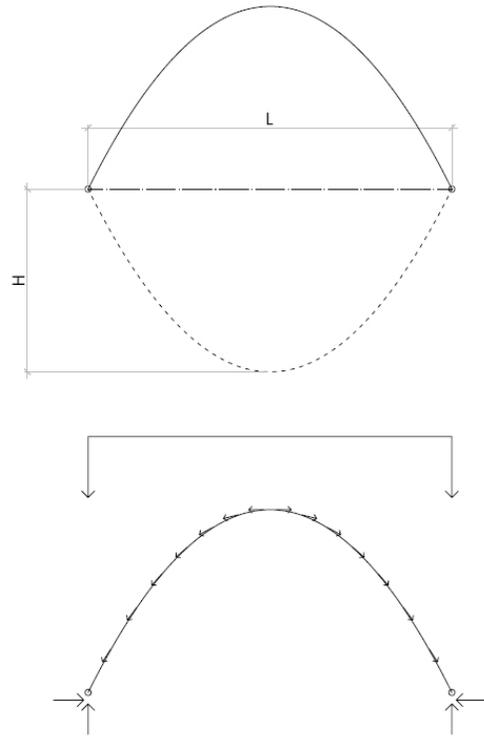


Fig 2.5 - Solución B – Arco con curva catenaria

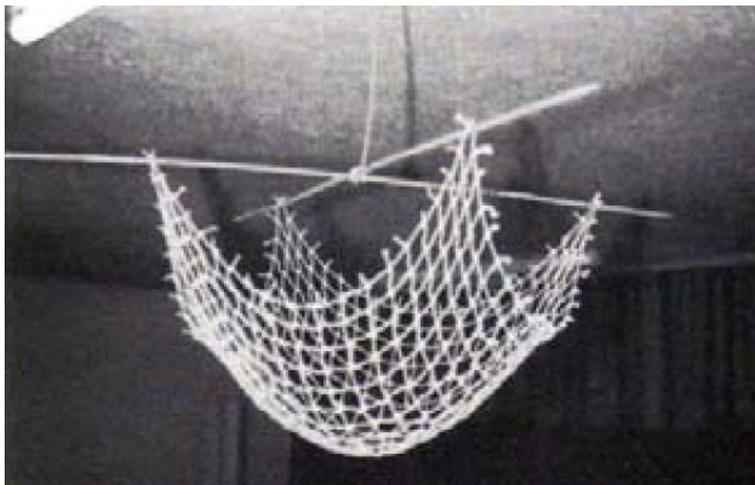


Fig 2.6 - Modelo de malla colgante desarrollado por Heinz Isler

mente repartida se deforma hasta conformar una funicular tridimensional trabajando a tracción. Si invertimos esta red funicular nos da lugar a lo que conocemos por lámina o estructura laminar, que si coincide con la funicular, y que trabajará sólo a compresión. Igual que en las catenarias, los apoyos tendrán que ser capaces de soportar reacciones verticales y horizontales.

ESTRUCTURAS LAMINARES

Estructuras laminares = Aquellas cuyo espesor es muy pequeño en comparación con sus otras dos dimensiones

Estructuras de cáscara = Aquellas estructuras laminares que son capaces de trabajar únicamente con esfuerzos de membrana, sin que se produzcan flexiones en la lámina.

“En la naturaleza y en la técnica existen cuatro mecanismos típicos para contrarrestar las fuerzas incidentes o acciones:

Estructuras de forma activa = Adaptan su forma física a los esfuerzos producidos por las acciones. Sometidas a tracción o compresión.

Estructuras de vector activo = Dividen los esfuerzos producidos por las tensiones combinando barras a tracción y a compresión.

Estructuras de sección activa = Encajonan los esfuerzos haciendo trabajar a toda la sección. Están sometidas a tracción, compresión y flexión.

Estructuras de superficie activa = Superficies resistentes por forma. Sometidas a las denominadas fuerzas o esfuerzos de membrana” (Engel, 1967).

Por tanto, las estructuras de cáscara se podrían denominar también estructuras de superficie activa y como consecuencia, su forma será un factor determinante para conseguir la resistencia necesaria para su correcto funcionamiento.

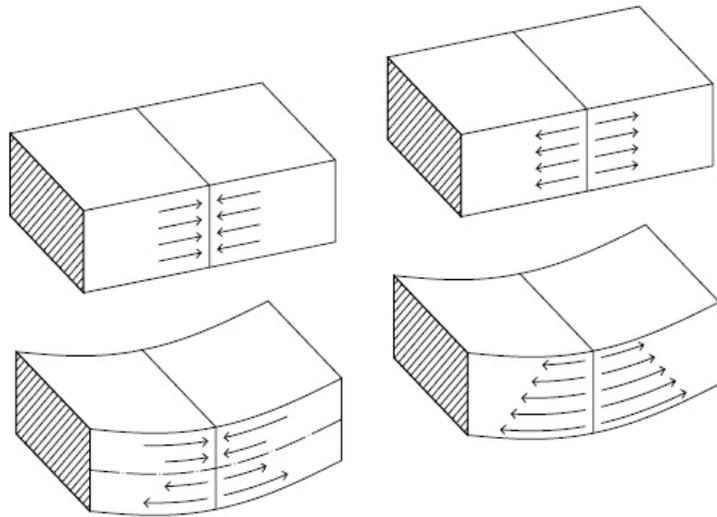


Fig 2.7 - Esfuerzos de membrana

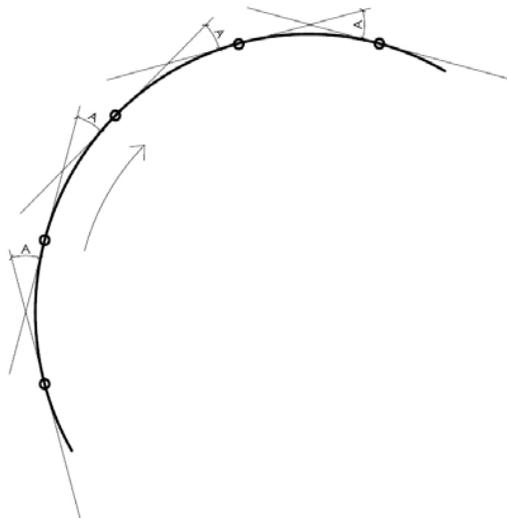


Fig 2.8 - Concepto de curvatura

ESFUERZOS DE MEMBRANA: SUPERFICIES RESISTENTES POR FORMA

Esfuerzos de membrana = Aquellos que se reparten de manera uniforme en el espesor de la lámina y actúan paralelamente al plano tangente a la superficie de la lámina en cada punto.

A continuación se van a realizar unas definiciones estrictamente geométricas para poder llegar a una clasificación de las superficies a estudiar.

Curva = Límite al que tiende una poligonal de infinito número de lados infinitamente pequeños. El paso de un punto al siguiente se realiza por la tangente al tiempo que esta gira alrededor del punto.

Curvatura = Variación del ángulo de giro de la tangente respecto de un incremento de longitud de la curva. Definido un criterio de signos, según el sentido del giro esta puede ser negativa o positiva.

Superficie = Lugar geométrico de puntos en el espacio que cumplen una serie de condiciones. También se puede definir como la trayectoria que describen rectas o curvas al moverse en el espacio siguiendo alguna condición: traslación, rotación, movimiento helicoidal, apoyándose en alguna otra recta o curva...

Al seccionar cualquier superficie con un plano nos dará como solución una curva. Esta puede tener curvatura positiva, negativa o cero. En este último caso lo que se obtendrá como sección es una recta.

Una primera clasificación que se puede realizar a partir de estos conceptos es la siguiente:

- Superficies de curvatura sencilla: Tienen curvatura únicamente en una dirección, siendo nula la curvatura en la otra. Son superficies de este tipo las bóvedas cilíndricas, cónicas y superficies desarrollables en general. Trabajan bajo un régimen mixto de esfuerzos de membrana y de flexión, con tendencia al predominio de los primeros (depende de las vinculaciones exteriores).

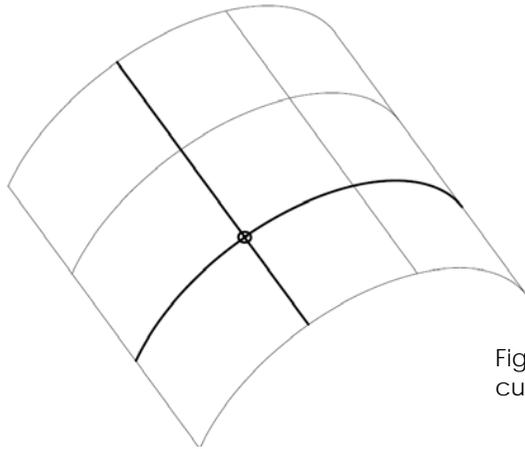


Fig 2.9 - Superficie de curvatura sencilla

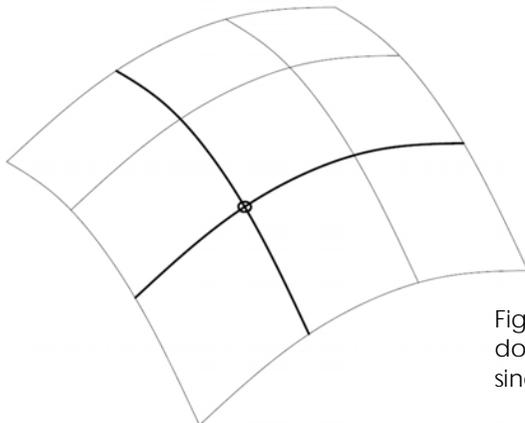


Fig 2.10 - Superficie de doble curvatura sinclástica

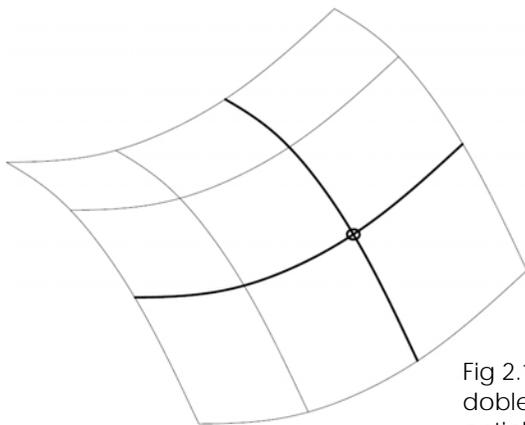


Fig 2.11 - Superficie de doble curvatura anticlástica

- Superficies de doble curvatura: Esfuerzos de membrana solamente, siempre que la disposición de la estructura y de sus apoyos sea la correcta, y los valores de los esfuerzos no excedan los límites admisibles.

Las superficies de doble curvatura son las que dan lugar al nombre de cascarón propiamente dichas y se clasifican de acuerdo con su forma en dos grandes grupos:

“Superficies sinclásticas = superficies cuya curvatura cambia de valor alrededor de un punto, pero muestra siempre la misma dirección.

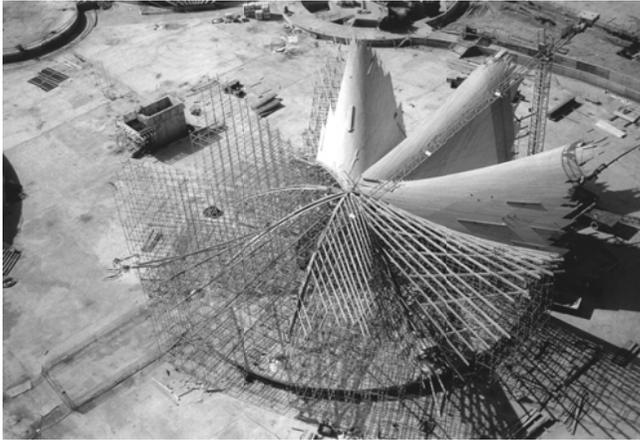
Superficies anticlásticas = superficies cuya curvatura cambia de valor alrededor de un punto y que cambia de signo. Además tienen dos direcciones de curvatura nula, es decir, dos direcciones según las cuales las superficies coinciden con dos rectas” (Faber, 1981).

Ambos grupos de superficies comparten la propiedad de ser capaces de trabajar en régimen de membrana exclusivamente, lo cual las hace muy apropiadas para cubrir grandes espacios con un mínimo de material y por lo tanto de peso.

El material apropiado para la construcción de cascarones es el hormigón armado, por su bajo coste, porque sus materiales básicos pueden encontrarse fácilmente en cualquier lugar y porque puede moldearse para darle la forma deseada. Esta forma se consigue mediante la construcción previa de moldes de madera.

Entre las superficies anticlásticas de definición geométrica sencilla, existe un grupo de superficies llamadas regladas que presentan la propiedad de estar engendradas por rectas que se mueven a lo largo de la superficie. Esta propiedad puede utilizarse ventajosamente en el montaje de la cimbra y del encofrado, colocando las piezas de madera en las direcciones de las generatrices rectas.

Los casos donde la superficie tiene dos sistemas de generatrices rectas son los más adecuados, porque de este modo tanto las duelas como los largueros que las sustentan pueden ser rectos.



El ejemplo más claro de esto lo tenemos en los paraboloides e hiperboloides hiperbólicos. En apariencia son superficies curvas, pero analizándolas geoméricamente se puede observar cómo están engendradas por dos familias de rectas en direcciones diferentes.

Se adjuntan una fotos de ejemplo correspondientes al encofrado de la cubierta del restaurante del "Parc Oceanogràfic" de Valencia (2006), obra atribuida a Félix Candela el cual realizó el diseño previo pero que no pudo ejecutar debido a su fallecimiento. En ellas se pueden apreciar las familias de rectas materializadas por los largueros de madera en una dirección y por los tablones del encofrado en la otra.

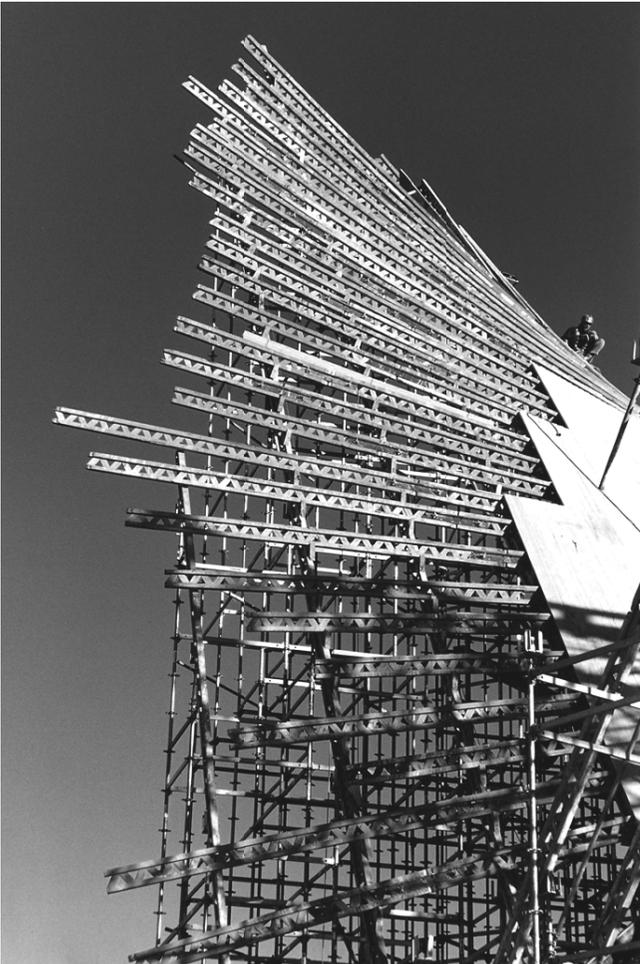


Fig 2.12 y 2.13 - Imágenes del encofrado durante la construcción de la cubierta del restaurante

3_Aplicaciones en edificación: Análisis de edificios

Para una mejor comprensión del alcance del trabajo, analizaré una serie de edificios donde se hayan utilizado estas formas geométricas construidas con hormigón.

SUPERFICIE	EDIFICIO	ARQUITECTO	AÑO
Esfera	Mercado de Algeciras	Eduardo Torroja	1933
	Auditorio Kresge - MIT	Eero Saarinen	1955
Cilindro	Frontón de recoletos	Eduardo Torroja	1935
	Vivienda taller Joan Miró	Josep Lluís Sert	1959
Cono	L'Umbracle Ciudad de las Artes y las Ciencias	Santiago Calatrava	2000
	Auditorio de ciencias químicas	Félix Candela	1952
Conoide	Sede Unesco	Marcel Breuer Pier Luigi Nervi	1953-58
	Fábrica Fernández	Félix Candela	1950
Paraboloide Hiperbólico	Iglesia Ntra Señora de la Soledad	Félix Candela	1951
	Parc Ocenográfico de Valencia	Félix Candela	2006
	Laboratorios Jorba - La Pagoda	Miguel Fisac	1967
	Paraguas invertido	Félix Candela	1952
Hiperboloide Hiperbólico	Hipódromo de la Zarzuela	Eduardo Torroja	1935
	Depósito de agua en Fedala	Eduardo Torroja	1956

3.1_Mercado de Algeciras



Fig 3.1 - Imagen aérea del mercado



Fig 3.2 - Imagen del mercado en los años 50

Ingeniero / Arquitecto	Eduardo Torroja Miret / Manuel Sanchez Arcas
Fecha de construcción	1933
Localización	Algeciras, Cádiz (España)
Elemento analizado	Cubierta y viseras
Tipo de superficie	Esfera - Cilindros de base circular

El Mercado de abastos de Algeciras, también conocido como el “Mercado Ingeniero Torroja”, constituye en planta un espacio octogonal de lado 18,30 m y cubierto con una cúpula laminar esférica de 44,10 m de radio que descansa sobre una circunferencia de 47,80 m de diámetro. El espesor mínimo de esta lámina es de tan solo 9 cm y aumenta gradualmente hasta valores de 50 cm cerca de los soportes. En su parte superior está perforada por un lucernario de 10 m de diámetro elevado sobre unos pequeños tabiquillos. La cubierta está apoyada en los 8 pilares periféricos que se sitúan en los vértices del octógono.

En su perímetro, y coincidiendo con los lados del octógono, se sitúan unas viseras en forma de bóveda cilíndrica que se apoyan sobre dos de los soportes adyacentes. En su parte interior estas bóvedas intersectan con la cúpula otorgándole rigidez, ayudándola a recoger y transmitir las tensiones principales hacia los soportes. En su parte exterior se prolongan en voladizo y se intersectan con dos planos correspondientes a los lados de un polígono de 16 lados que inscribe al octógono de planta, cubriendo de esta manera las entradas al mercado.

Los ocho pilares de la estructura se encuentran unidos por un zuncho periférico constituido con 16 redondos de 30 mm que ayuda a contrarrestar la componente horizontal que transmite la cubierta, trabajando a tracción.

Ésta cúpula fue la más grande de la historia durante 30 años (1935-1965), hasta que se construyó el Astrodome de Houston (Texas, Estados Unidos). El edificio fue declarado Bien de Interés Cultural por la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía el 25 de octubre de 2001 como el mejor ejemplo del Movimiento Moderno en la región.

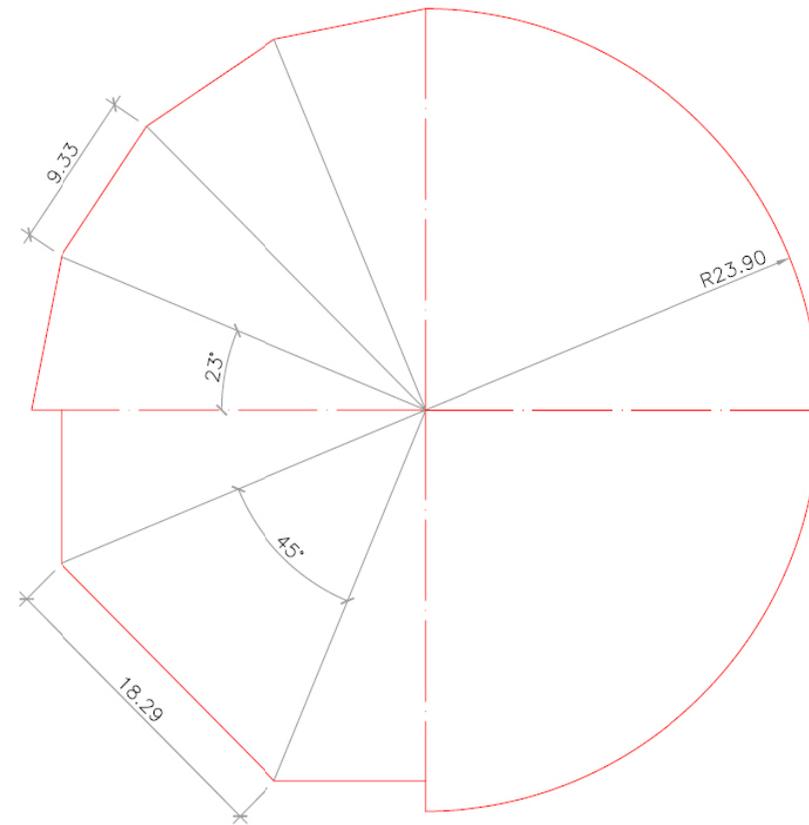
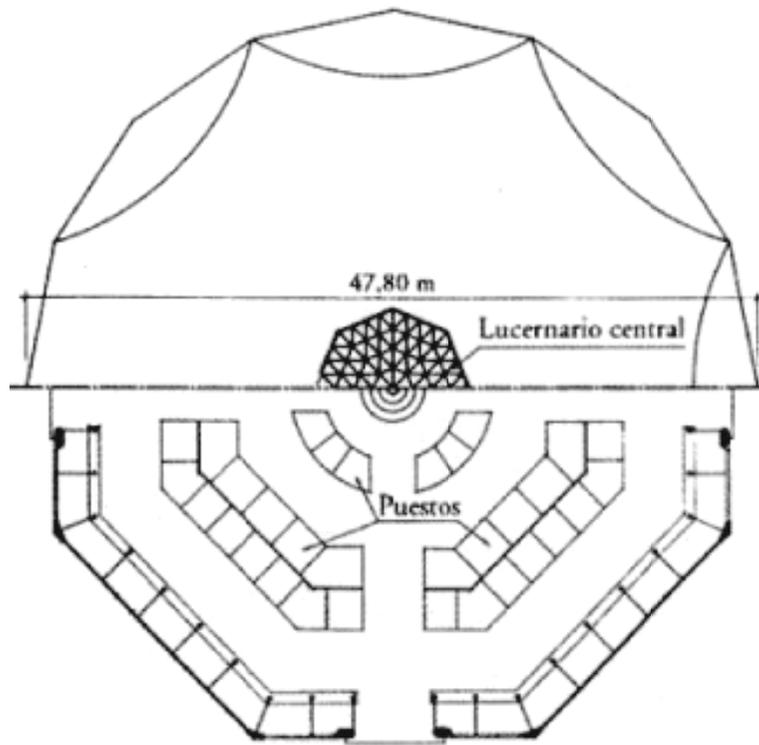
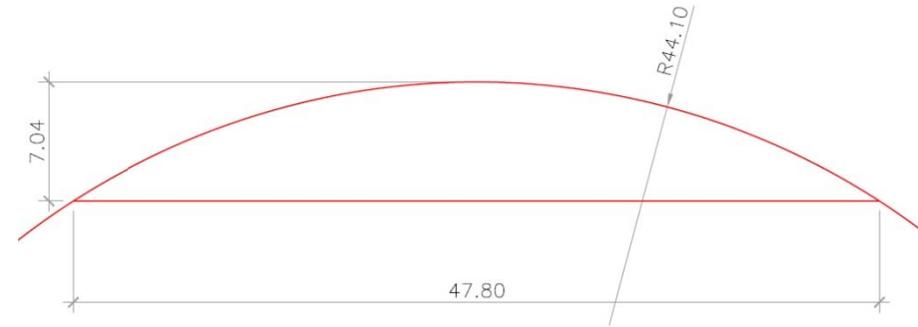
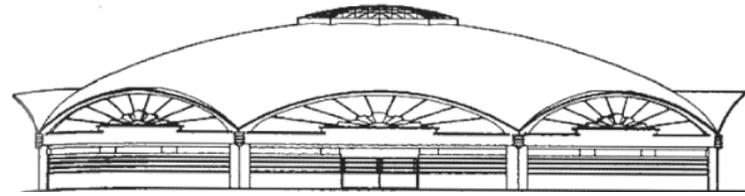
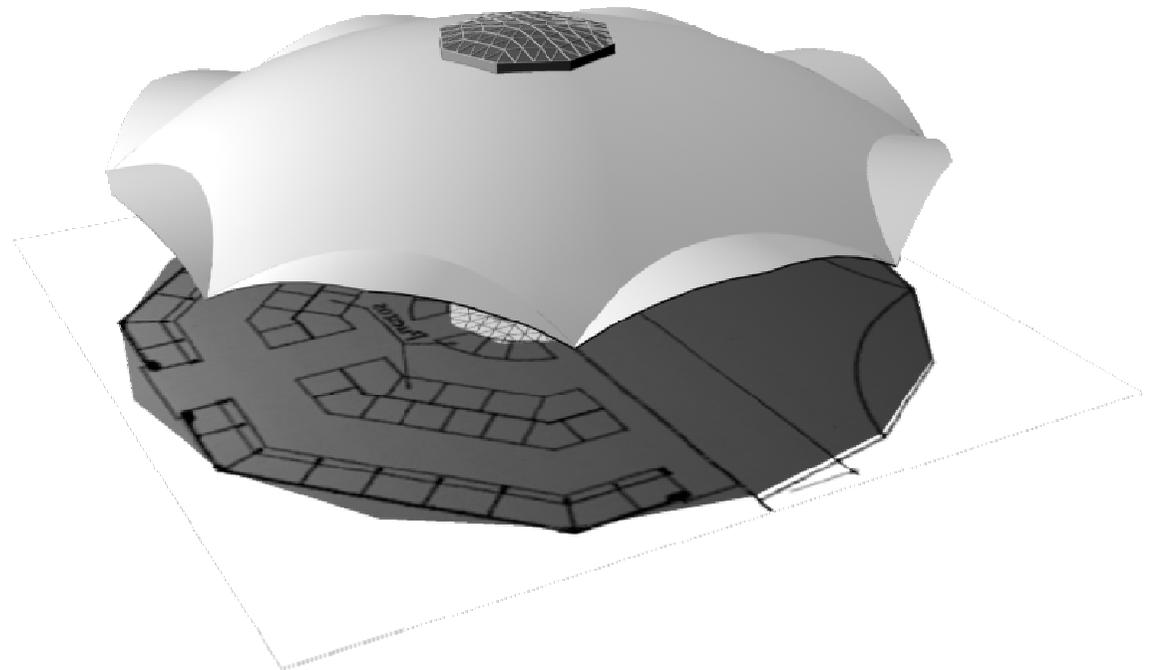
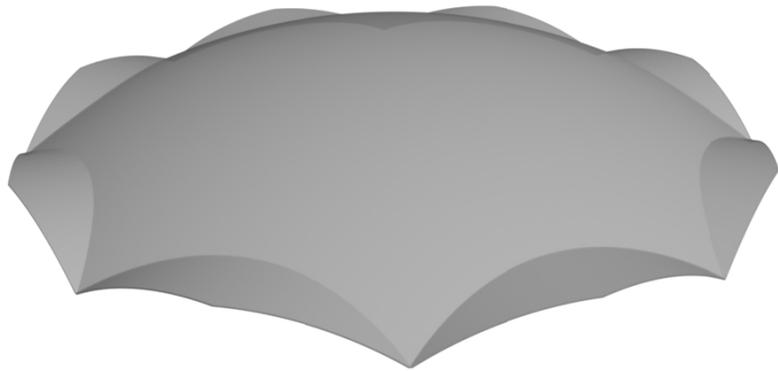
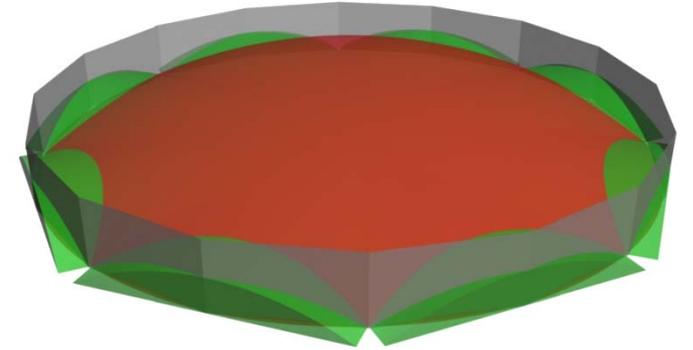
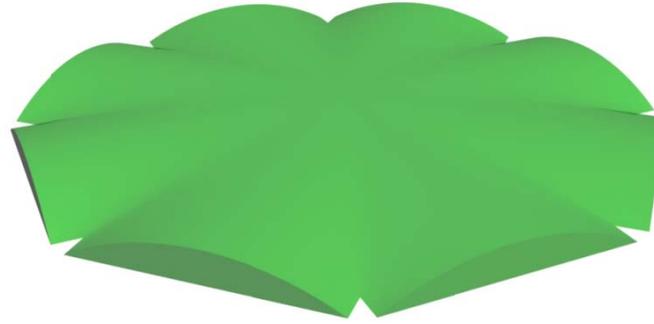


Fig 3.3 - Planos en planta y alzado del mercado

Fig 3.4 - Trazados geométricos básicos del mercado



3.2_Auditorio Kresge – Massachusetts Institute of Technology

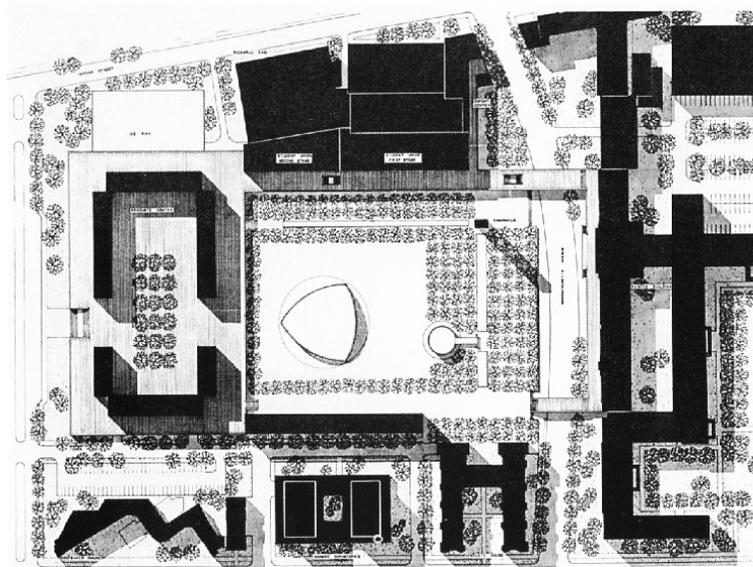


Fig 3.5 - Plano de situación del auditorio y la capilla



Fig 3.6 - Imagen del conjunto auditorio - capilla

Arquitecto	Eero Saarinen
Fecha de construcción	1955
Localización	Cambridge, Massachusetts (EEUU)
Elemento analizado	Cubierta y cerramientos
Tipo de superficie	Esfera – Cilindros de base circular

El auditorio está definido por una elegante lámina esférica de hormigón armado de radio 36,15 m, alcanzando una altura libre máxima de 16,65 m. La cúpula esférica se apoya en 3 puntos, vértices de un triángulo equilátero de 52,75 m de lado.

La esfera que genera la cúpula está limitada por el corte de tres planos que pasan por su centro y por los tres puntos de apoyo (cogidos dos a dos), y que por tanto le generan circunferencias máximas del mismo radio que el de la propia esfera. Para mejor comprensión de la generación geométrica de esta cúpula puede entenderse la esfera como la esfera tangente a las caras de un octaedro regular, de manera que estaría seccionada por los planos que pasan por su centro y contienen a dos 4 aristas del poliedro.

Los muros cortina que configuran el cerramiento están generados cilindros de base circular de 71 m de radio, siendo las generatrices de dichos cilindros los montantes verticales.

Saarinen diseñó este edificio para el MIT junto con una capilla situada al otro extremo de la gran lámina de césped donde se ubica este edificio.

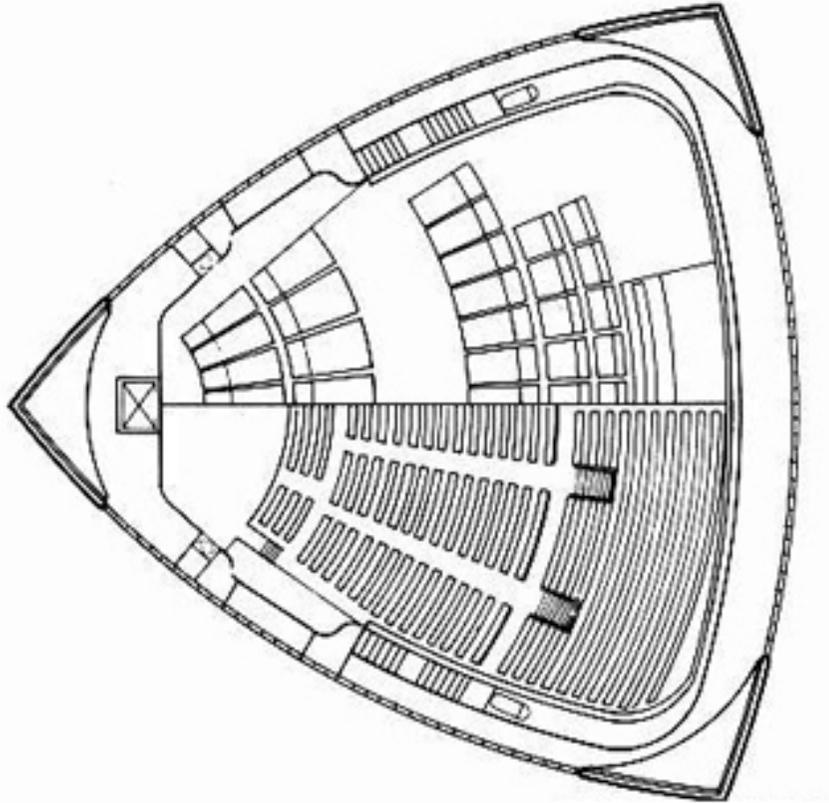
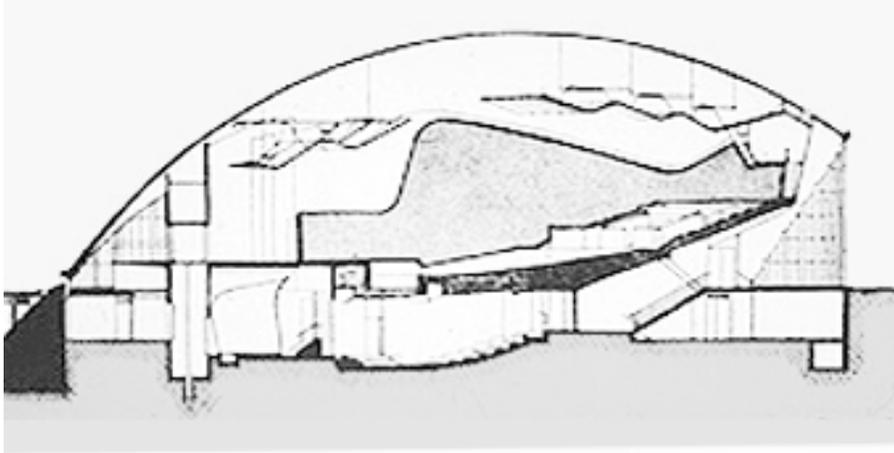


Fig 3.7 - Planos en planta y sección del auditorio

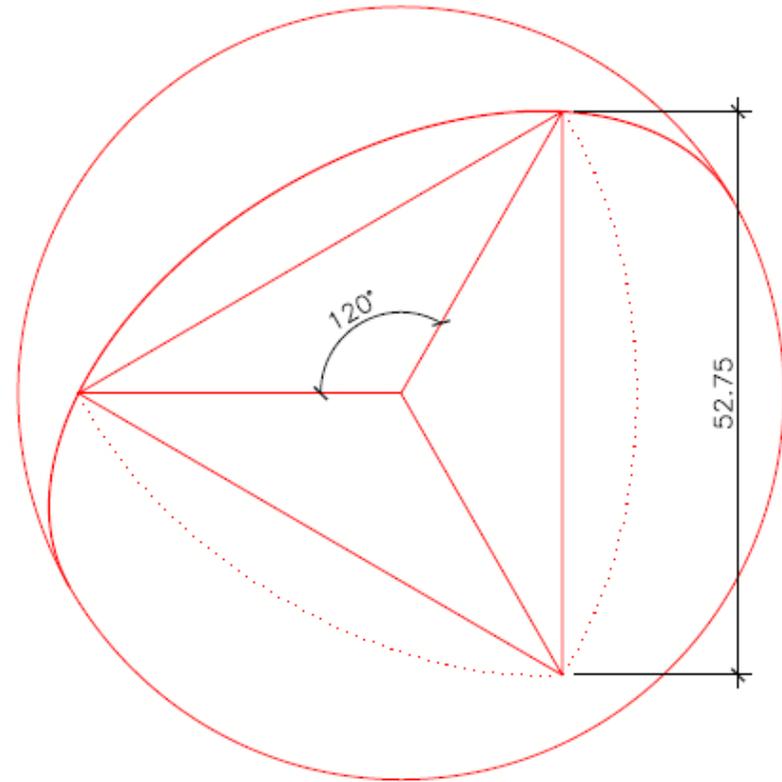
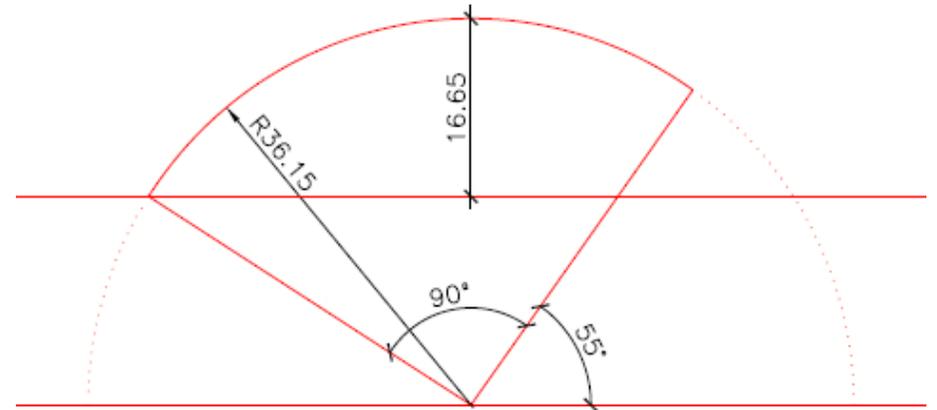
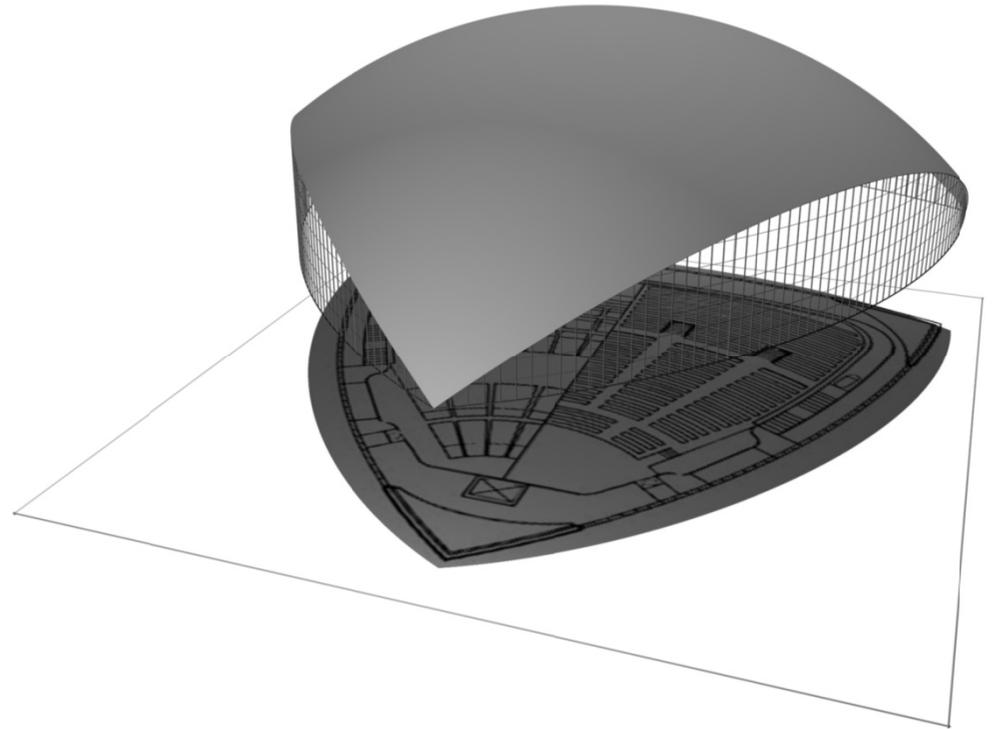
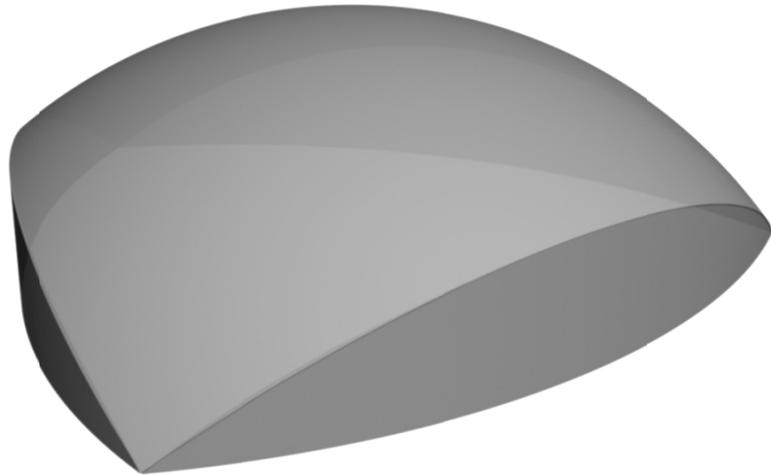
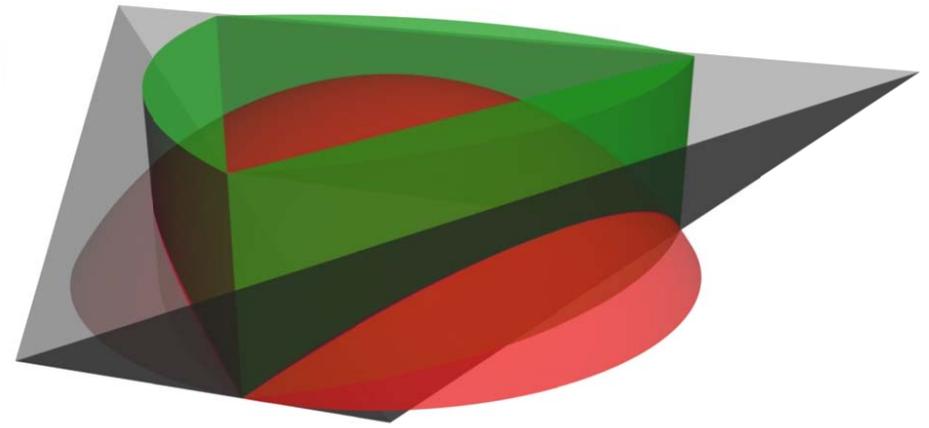
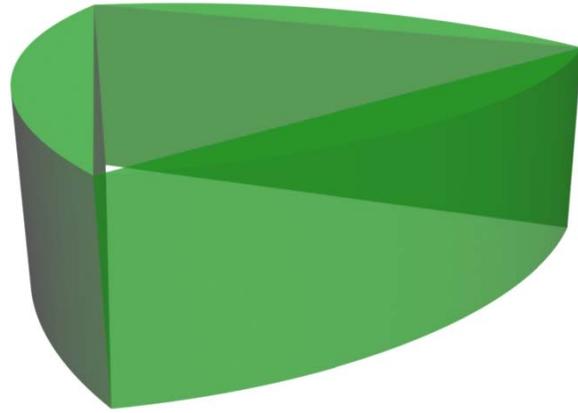
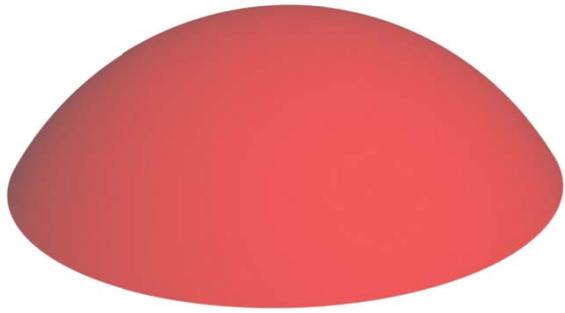


Fig 3.8 - Trazados geométricos básicos del auditorio



3.3_Frontón de recoletos



Fig 3.9 - Imagen exterior del frontón



Fig 3.10 - Imagen interior del frontón

Ingeniero / Arquitecto	Eduardo Torroja Miret / Secundino Zuazo
Fecha de construcción	1935
Localización	Madrid (España)
Elemento analizado	Cubierta
Tipo de superficie	Cilindros de base circular

La estructura diseñada por Torroja estaba destinada a cubrir el espacio rectangular, correspondiente al frontón o zona de juego y los graderíos, con unas dimensiones de 55 m de largo por 32,5 m de ancho. El diseño de la cubierta es el aspecto más innovador de este proyecto y lo que realmente lo hace singular. La solución dada a la cubierta del recinto, consistió en dos bóvedas de cañón, cuya sección estaba formada por dos arcos circulares asimétricos que se cortaban perpendicularmente. La bóveda de mayor radio, 12,20 m, cubría la zona de juego y parte del graderío bajo y la más pequeña, con un radio de 6,40 m, el graderío alto.

Para cubrir los requerimientos de iluminación natural se recurrió a dos grandes lucernarios longitudinales orientados hacia el Norte y con una inclinación tal que impidiese la entrada directa del sol al recinto, para que no se pudieran deslumbrar los jugadores. Estos lucernarios, formados por celosías constituidas por triángulos equiláteros de hormigón armado, de 140 cm de lado y 17 x 30 cm de sección, uno en la unión de ambas bóvedas, para iluminar la zona de juego y el otro, para iluminar la zona de público, en el apoyo lateral de la bóveda pequeña.

El Frontón Recoletos era la mayor estructura de este tipo construida en Europa hasta esa fecha, por lo que una publicación de Torroja sobre la misma obtuvo un premio en el concurso convocado en 1936 por la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Desgraciadamente, debido a los impactos recibidos durante la guerra civil, el edificio tuvo que ser demolido en 1973.

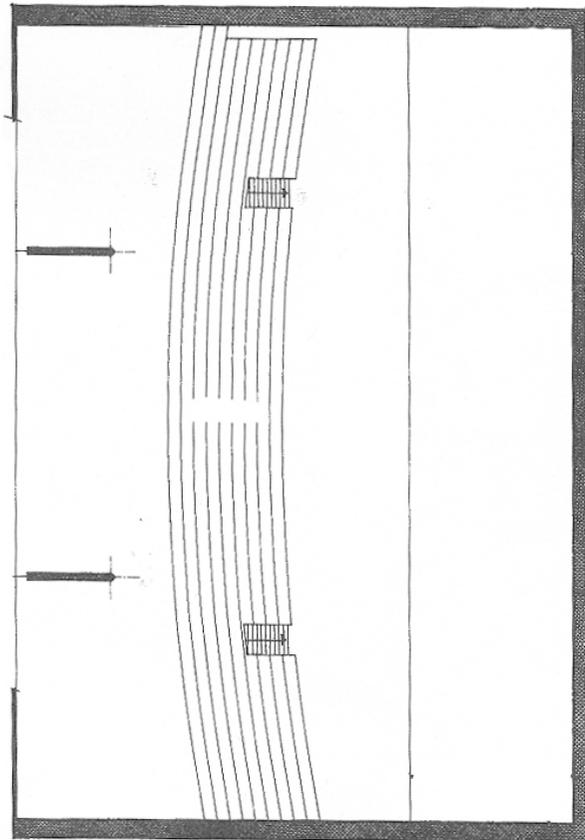
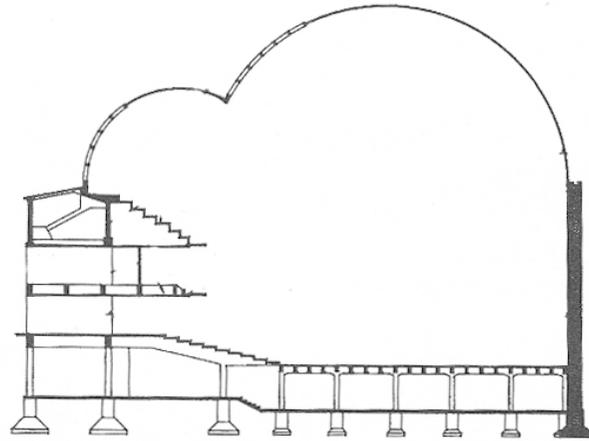


Fig 3.11 - Planos en planta y sección del frontón

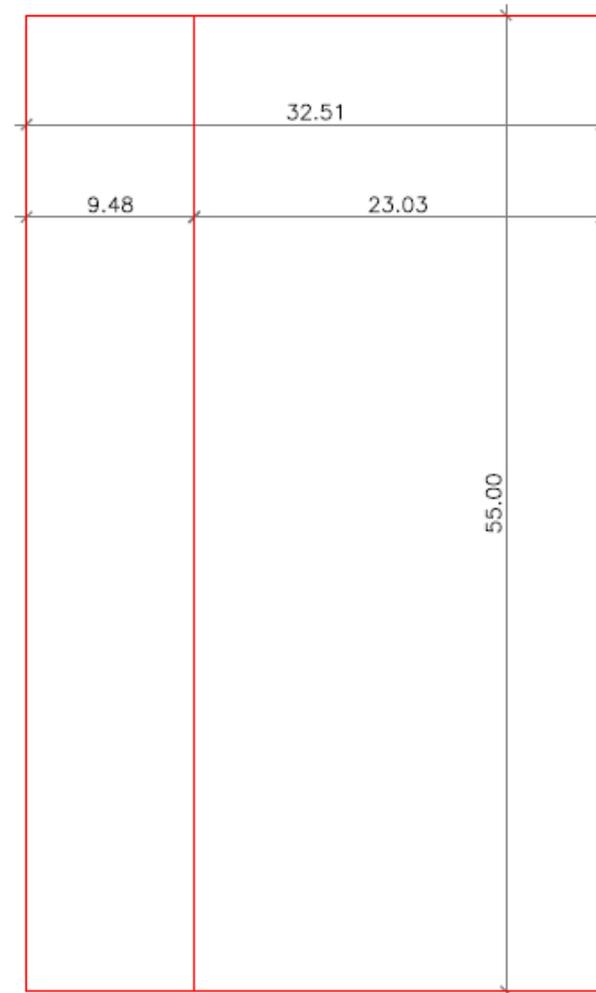
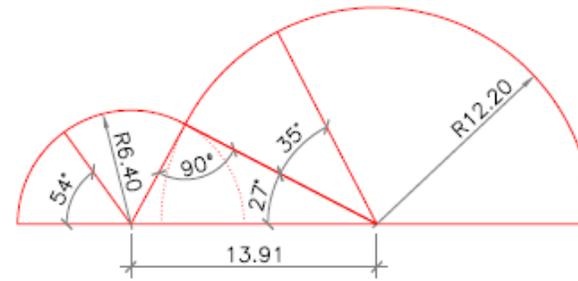


Fig 3.12 - Trazados geométricos básicos del frontón

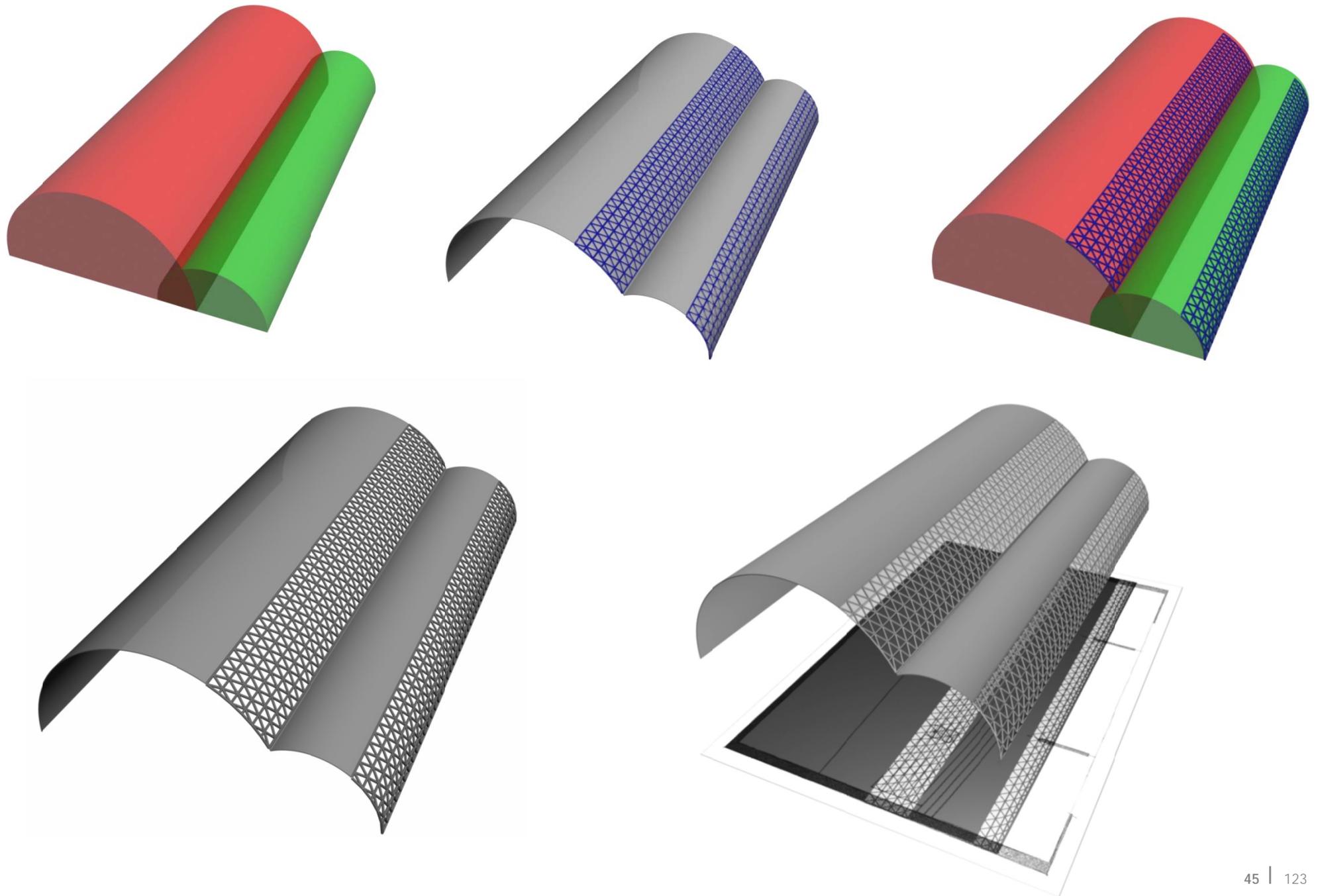




Fig 3.13 - Imagen exterior de la vivienda taller



Fig 3.14 - Imagen interior de las bóvedas cilíndricas

3.4_Vivienda taller de Joan Miró

Arquitecto	Josep Lluís Sert
Fecha de construcción	1955
Localización	Mallorca (España)
Elemento analizado	Cubierta
Tipo de superficie	Cilindros de base circular

En la cubierta que Josep Lluís Sert realizó para la vivienda taller de Joan Miró en Mallorca, nos encontramos con un hábil juego compositivo mediante láminas cilíndricas.

Esta cubierta busca fundamentalmente 2 objetivos: cubrir una luz mayor de lo normal en un edificio de viviendas, en este caso 12 m; y por otro lado permitir la entrada de luz imprescindible para la actividad del artista, lo que consigue con la composición de la cubierta, dejando una aberturas longitudinales entre cilindros.

La luz es un elemento muy importante de esta cubierta. Para evitar la luz directa mallorquina, que sobre todo a determinadas horas del día puede ser demasiado potente, Sert la matiza mediante dos procedimientos: un sistema de lamas horizontales, de manera que estas actúen en las peores horas de luz pero permitan su entrada el resto del tiempo; y por medio de la entrada de luz tangencial al interior de las bóvedas cilíndricas, haciendo que esta resbale por superficie y se convierta en luz reflejada, creando una atmósfera agradable para el trabajo de Joan Miró. Este recurso es similar al que ya utilizó en el edificio de la fundación Miró y que le dio buenos resultados.

Por tanto, aquí tenemos un ejemplo de la utilización de estas superficies de hormigón aplicadas a una construcción más cotidiana, pero que no por ello deja de ser menos interesante.

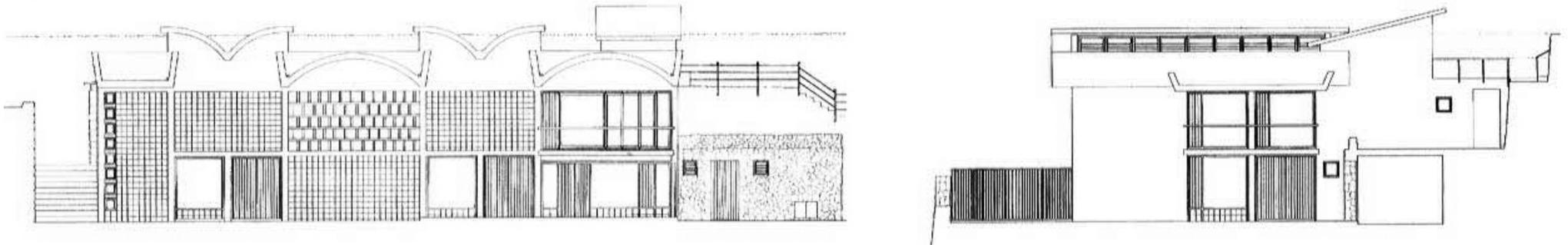


Fig 3.15 - Planos en alzado y perfil de la vivienda

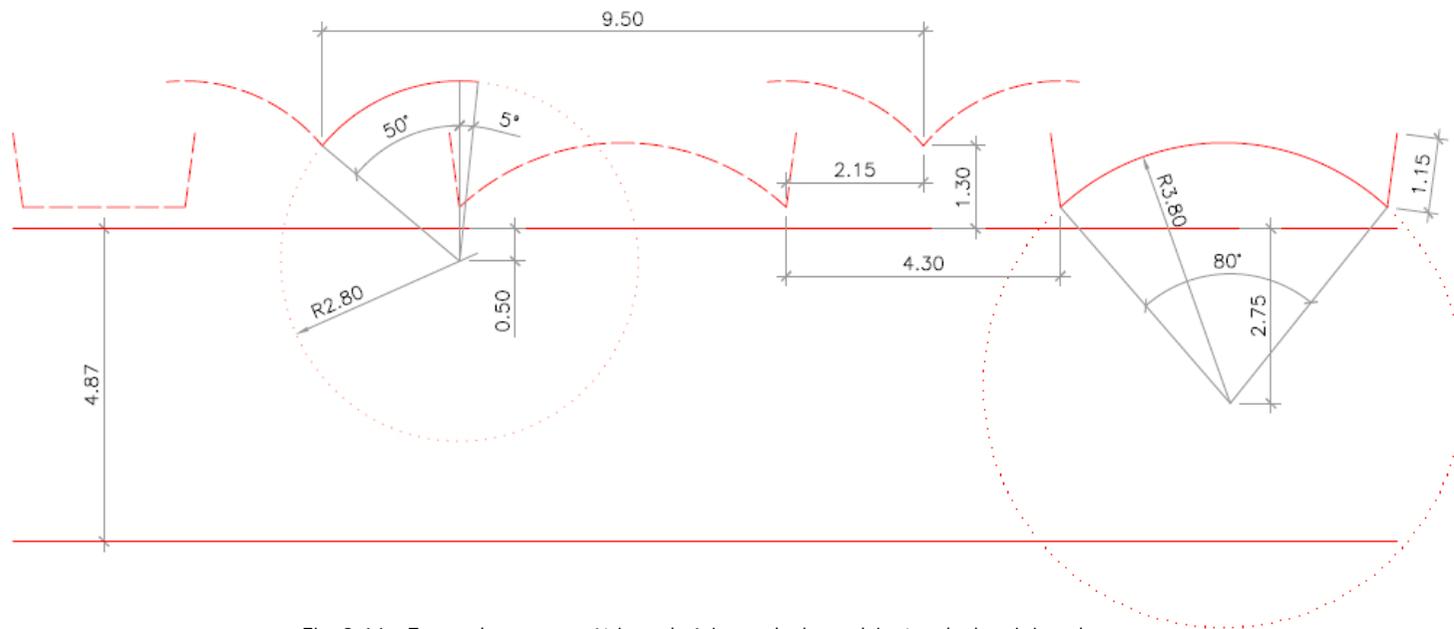


Fig 3.16 - Trazados geométricos básicos de la cubierta de la vivienda

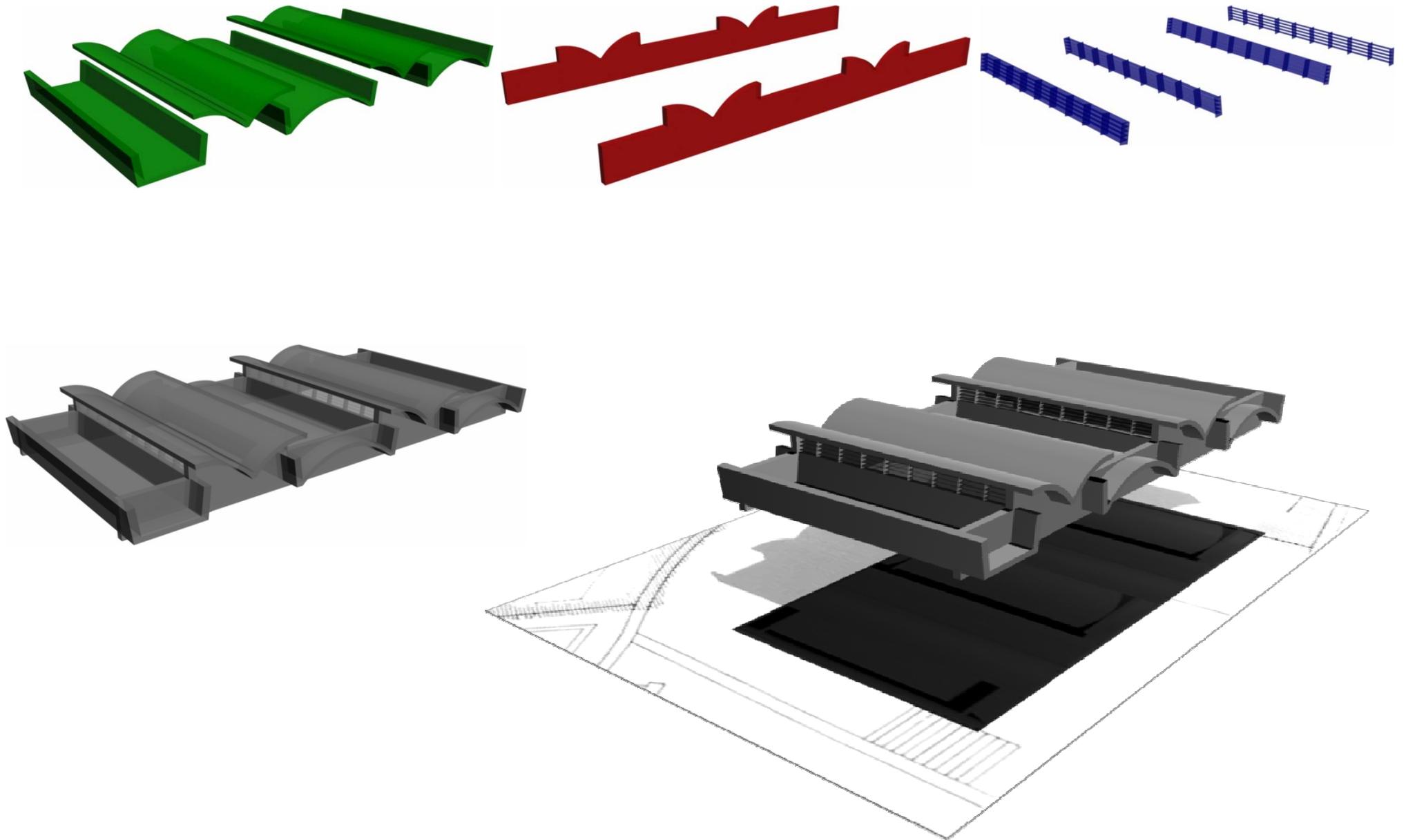




Fig 3.17 - Imagen exterior del conjunto en su entorno



Fig 3.18 - Imagen de detalle de la escalera

3.5_L'Umbracle - Ciudad de las Artes y la Ciencias

Arquitecto	Santiago Calatrava Valls
Fecha de construcción	2000
Localización	Valencia (España)
Elemento analizado	Cubierta ascensor, escaleras y muro perimetral
Tipo de superficie	Cono y cilindro de base circular y helicoide axial recto

L'Umbracle es uno de los edificios que conforman el complejo de la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia. Santiago Calatrava lo definió como “un balcón hacia el futuro”, ya que desde su paseo mirador se tiene unas vistas espectaculares sobre todo el complejo. El edificio consta de una zona ajardinada en su parte superior, a modo de umbráculo destinado a ser cubierto por una vegetación autóctona y de esta manera proporcionar sombra al visitante, un paseo mirador como ya hemos indicado antes, una zona de aparcamiento en la parte inferior y los accesos peatonales al complejo desde esta zona sur. El análisis se va a centrar en estos últimos.

Los accesos están diseñados como un conjunto de formas geométricas, y constan de un cono de base circular de 5,90 m de radio en la base y una altura de 21,84 m que alberga el ascensor, dos escaleras en forma helicoidal que descienden apoyándose en este cono, y por lo tanto describiendo una hélice cónica, y un cilindro que cierra el conjunto por su parte exterior de radio 8,41 m. Calatrava consigue de esta manera una composición casi escultórica para un elemento puramente funcional.

Todos estos elementos están realizados con hormigón armado y cabe destacar que el cono tiene un espesor de unos 15 cm. El recubrimiento del cono es de trencadís, mientras que el cilindro se ha dejado con el hormigón visto.

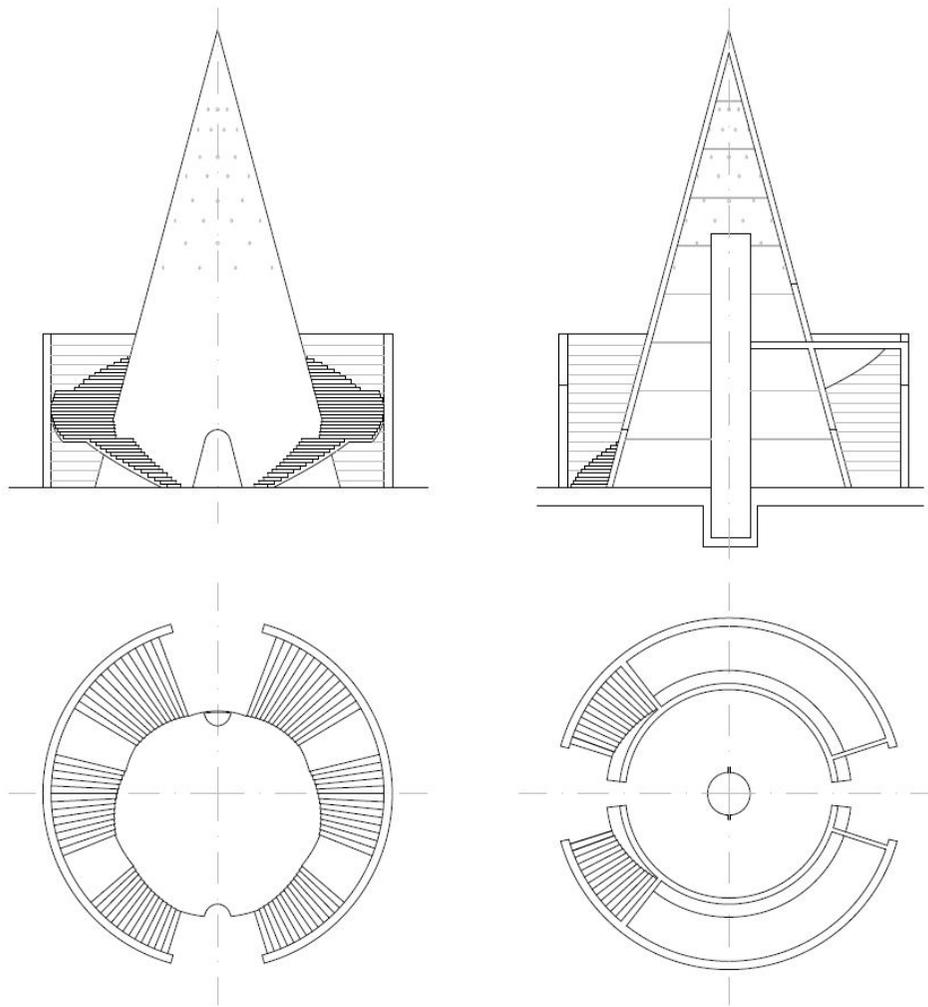


Fig 3.19 - Planos en planta, alzado y sección del conjunto escalera ascensor

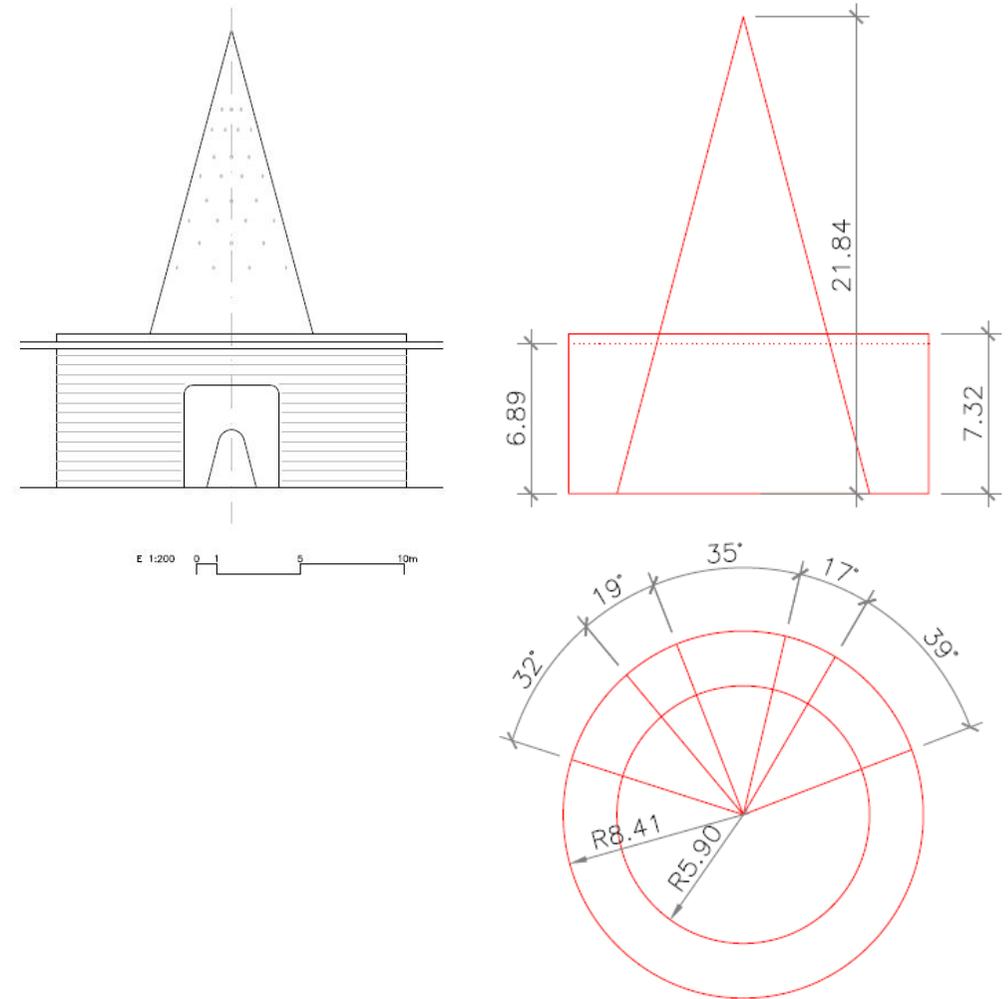


Fig 3.20 - Trazados geométricos básicos del conjunto

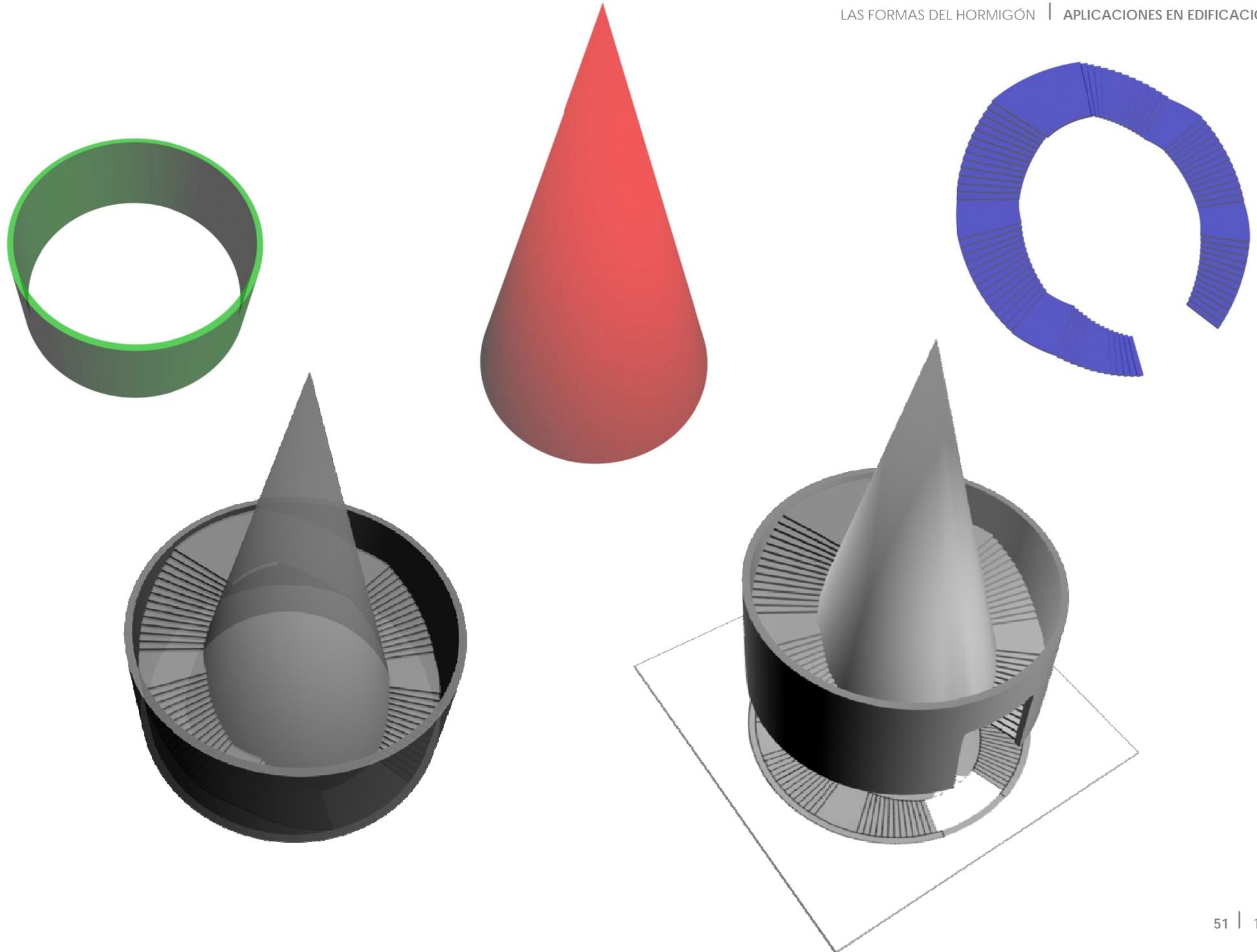




Fig 3.21 - Imagen exterior del auditorio

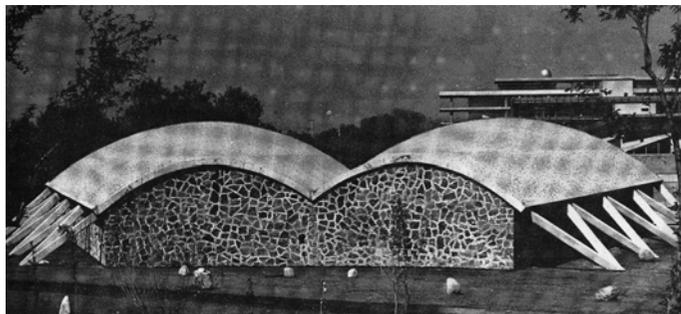


Fig 3.22 - Vista posterior del auditorio

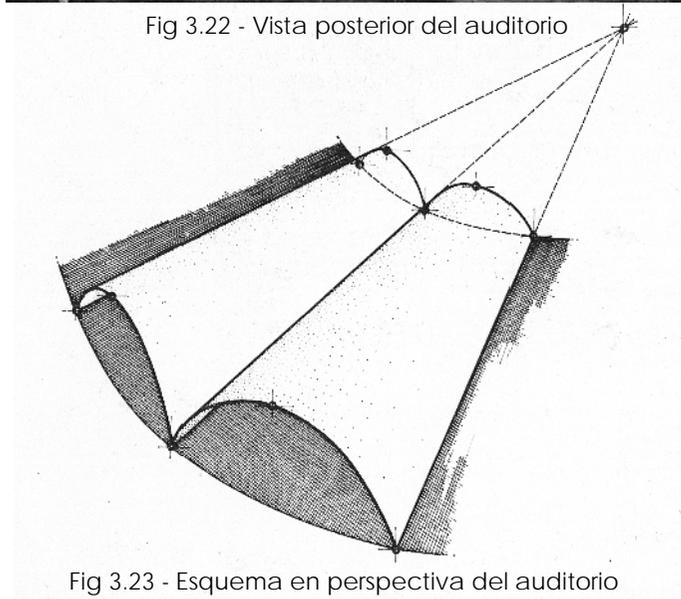


Fig 3.23 - Esquema en perspectiva del auditorio

3.6_Auditorio ciencias químicas

Arquitecto	Félix Candela
Fecha de construcción	1952
Localización	México DF (México)
Elemento analizado	Cubierta
Tipo de superficie	Conos de base circular

Este es uno de los pocos ejemplos que se pueden encontrar de cubiertas en forma de cono. De hecho es el único caso en que Félix Candela utilizó esta geometría.

La solución de la cubierta consiste en un par de conos truncados con anchuras que van desde los 9 a los 18 m de luz y una altura máxima de unos 9 m. Ambos comparten una generatriz de apoyo.

La estructura fue calculada como si de bóvedas cilíndricas se tratara, utilizando el concepto de catenaria. Posteriormente al diseño original se le añadieron unos soportes inclinados que estructuralmente no eran necesarios, pero que mejoraban la apariencia del edificio.

Por no disponer de planos de este edificio, no se analizará la geometría por no poder precisar las dimensiones.



Fig 3.24 - Plano de planta general de la sede



Fig 3.25 - Imagen de detalle de la marquesina

3.7_Sede de la Unesco

Arquitectos	Marcel Breuer y Pier Luigi Nervi
Fecha de construcción	1953-58
Localización	Paris (Francia)
Elemento analizado	Marquesina de acceso al edificio
Tipo de superficie	Conoide

Conjunto de edificios formado por dos construcciones principales, una serie de construcciones anexas y las conexiones entre ellas. Destinado a albergar la sede de la Unesco, el edificio de oficinas en forma de Y tiene en su acceso principal una marquesina que es la que va a ser objeto de nuestro análisis.

Esta marquesina situada en el lado sudoeste del edificio, está construida con una lámina de hormigón de 12 cm de espesor en su parte central, llegando a los 6 cm en su parte extrema. Es un elemento independiente del edificio con un carácter simbólico muy marcado, a modo de elemento escultórico.

El diseño geométrico de la marquesina es el que otorga resistencia estructural al conjunto, compuesto por la composición de dos conoides, uno de ellos recto y otro de plano director. La curvatura de ambos hace posible el vuelo y una luz de casi 10 m en ambos casos.

Este es un claro ejemplo de cómo la geometría definida y bien trabajada puede dar resultados eficientes y bellos estéticamente.

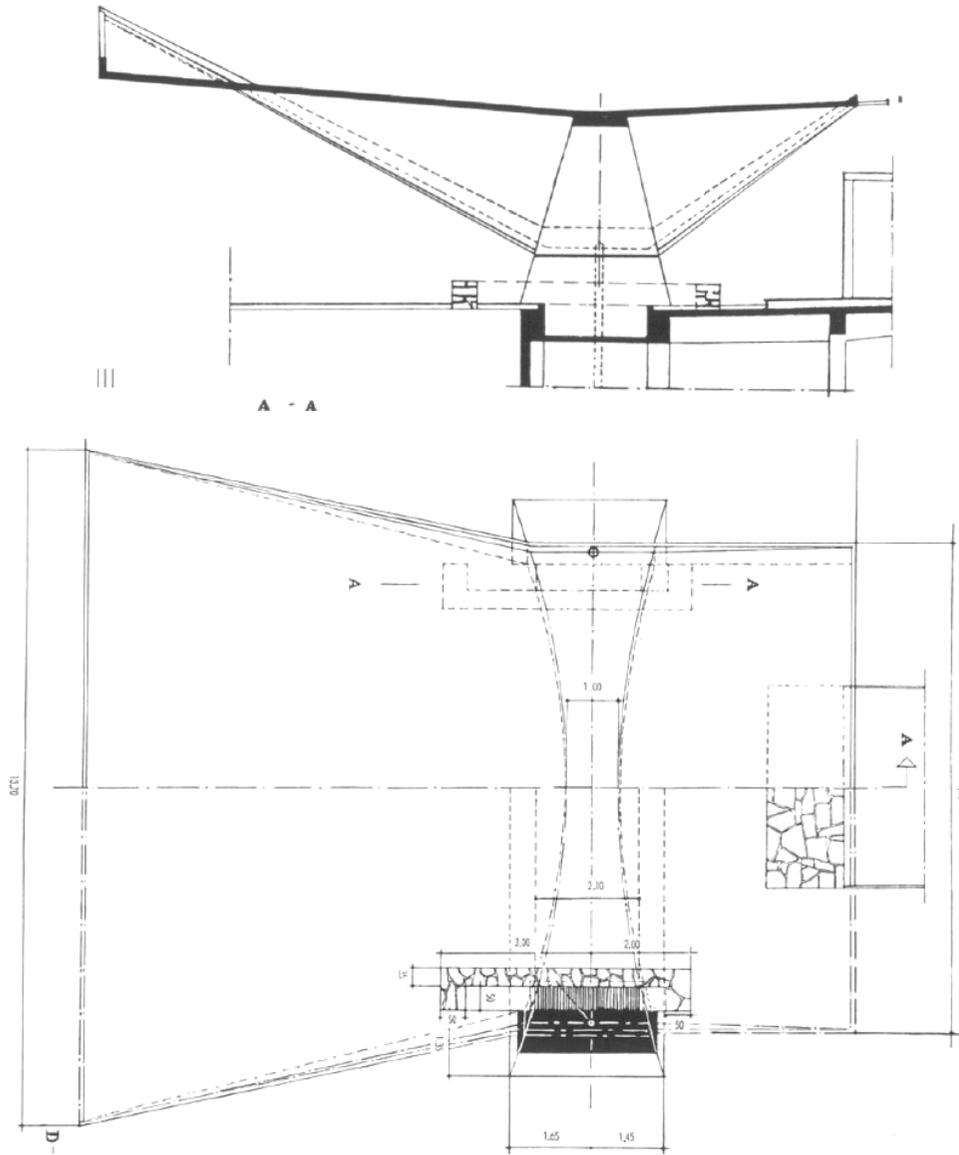


Fig 3.26 - Planos en planta y sección de la marquesina

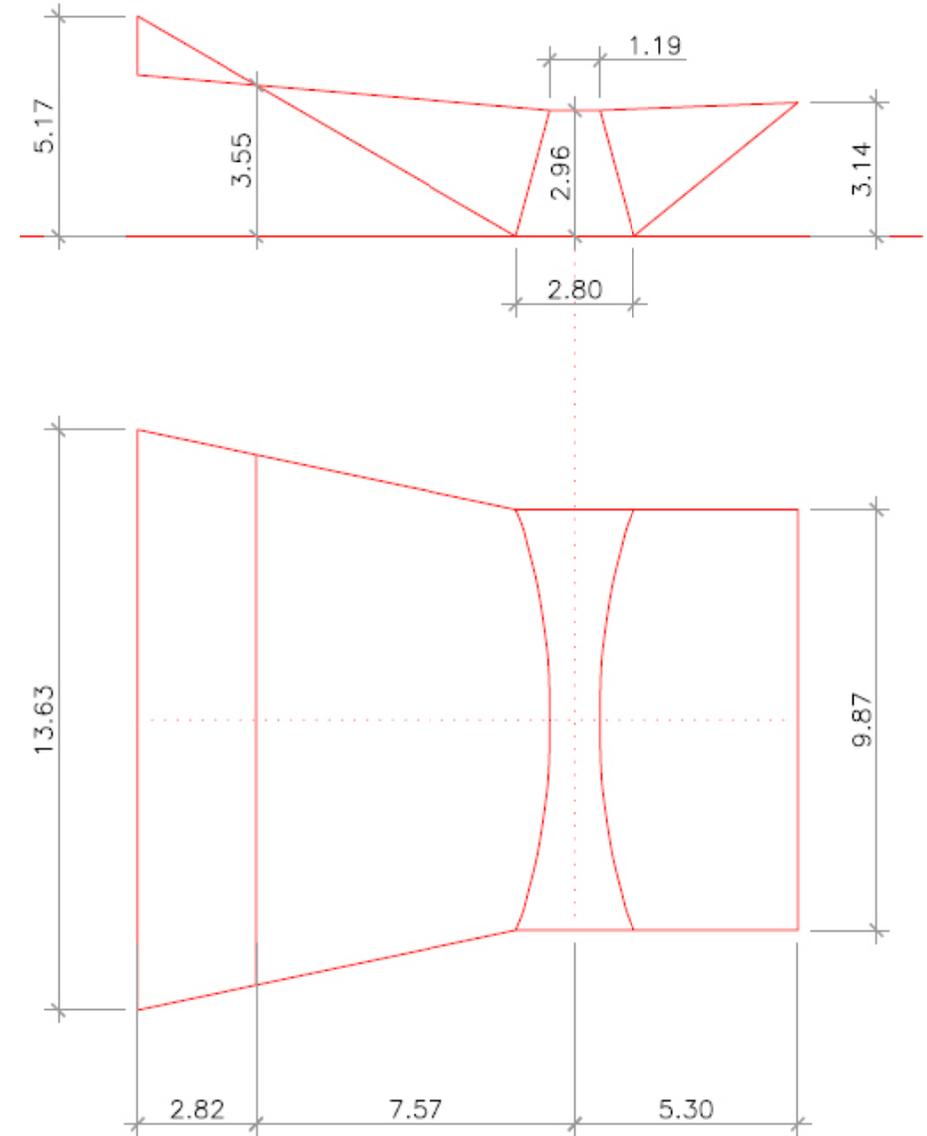
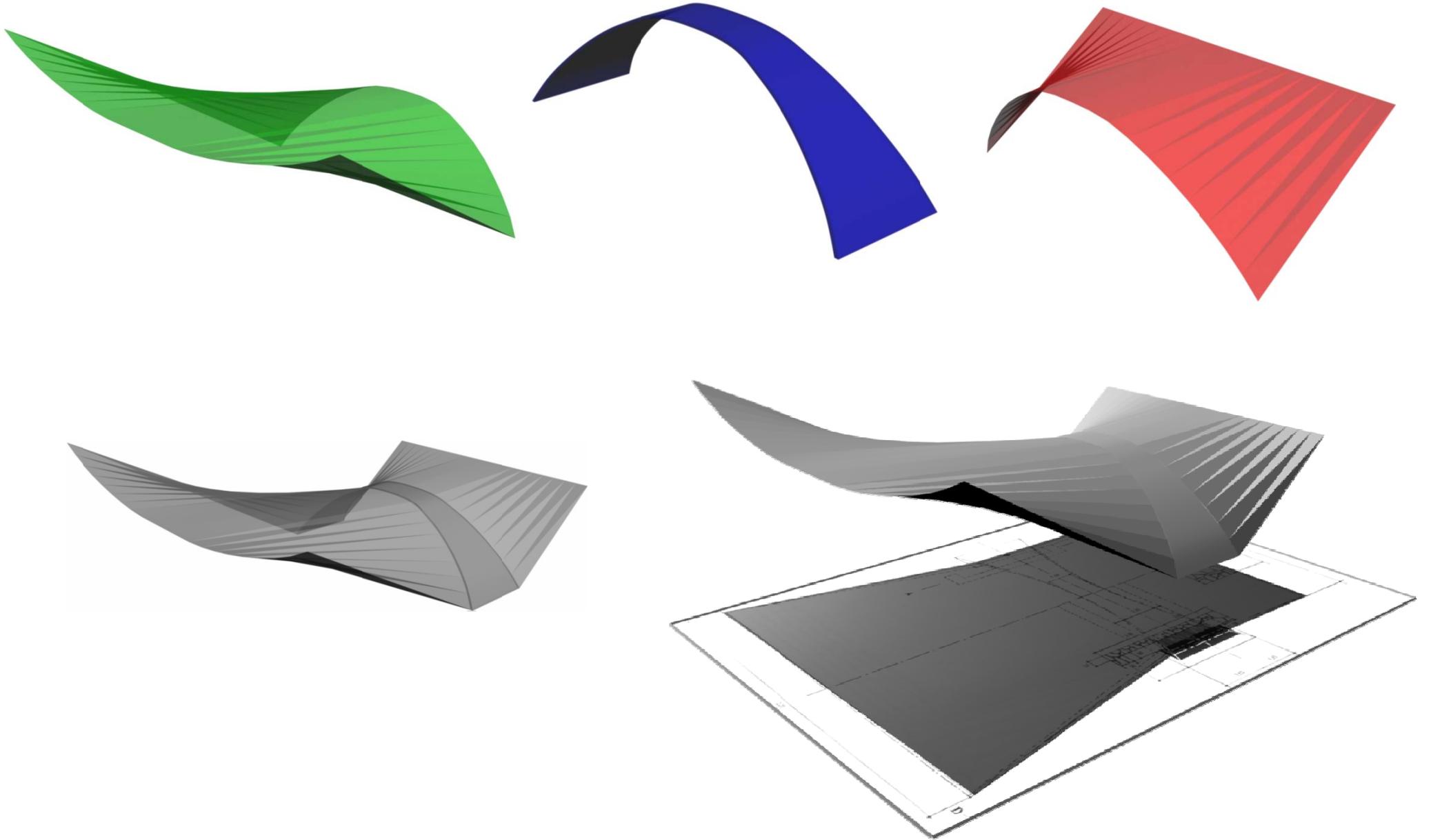


Fig 3.27 - Trazados geométricos básicos de la marquesina



3.8_Fábrica Fernández

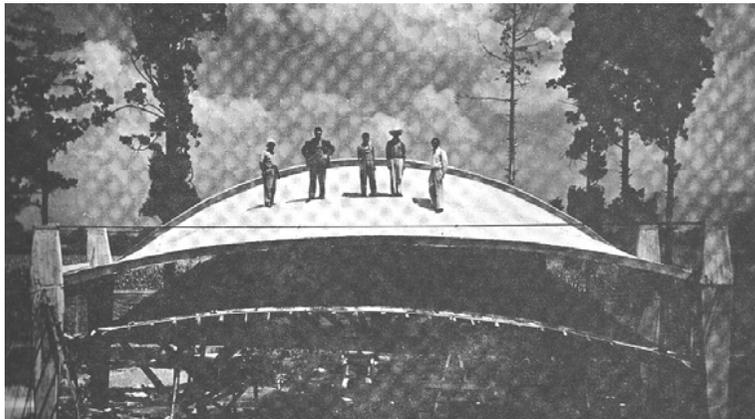


Fig 3.28 - Imagen de Candela y algunos trabajadores sobre la bóveda de la fábrica



Fig 3.29 - Perspectiva del propios Candela del diseño

Arquitecto	Félix Candela
Fecha de construcción	1950
Localización	San Bartolo (México)
Elemento analizado	Cubierta
Tipo de superficie	Conoide

En 1950 y junto a su socio de la empresa "Cubiertas Ala S.A.", Fernando Fernández, Candela construyó una bóveda experimental en forma de conoide. El espacio cubierto por esta bóveda era de 15 x 6 m, con un espesor constante de 3 cm. Para soportar los empujes laterales, colocó unos tirantes a tracción en la zona inferior de la bóveda, uniendo de esta manera los pilares entre sí.

Salvo por algunos problemas en la dosificación del hormigón, que Candela realizó con una mezcla demasiado seca, y en el descimbrado, el resultado obtenido fue satisfactorio, creando de esta manera un sistema de fabricación de bóvedas conoidales modulares que Candela utilizaría en algunas de sus construcciones.

Este tipo de soluciones son las que dan importancia a las superficies laminares de hormigón. Probablemente hoy en día y con la normativa actual, no podríamos realizar bóvedas de tan sólo 3 centímetros, pero si que podríamos conseguir espesores muy reducidos en comparación con los que se consiguen con otros sistemas estructurales.

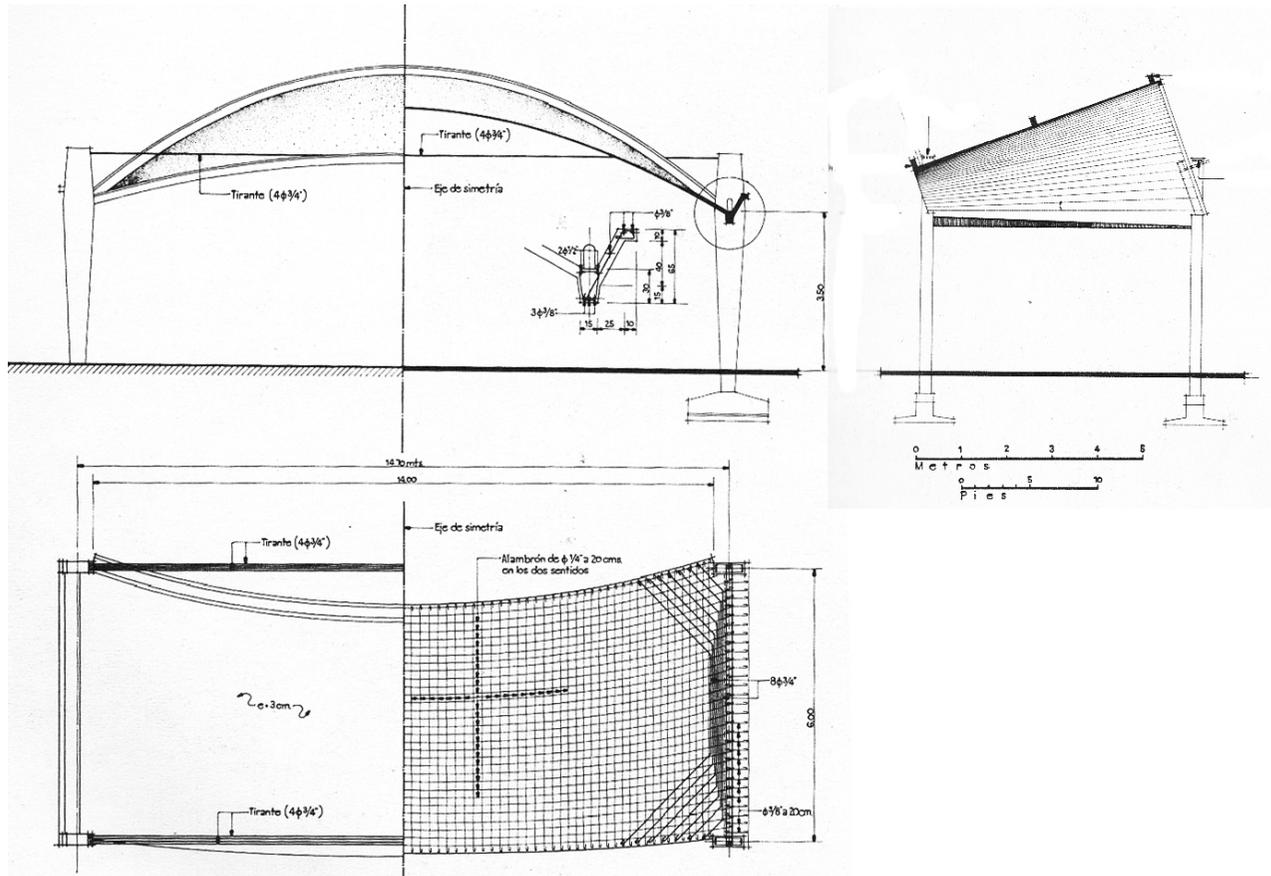


Fig 3.30 - Planos en planta, alzado y sección de un módulo de la fábrica

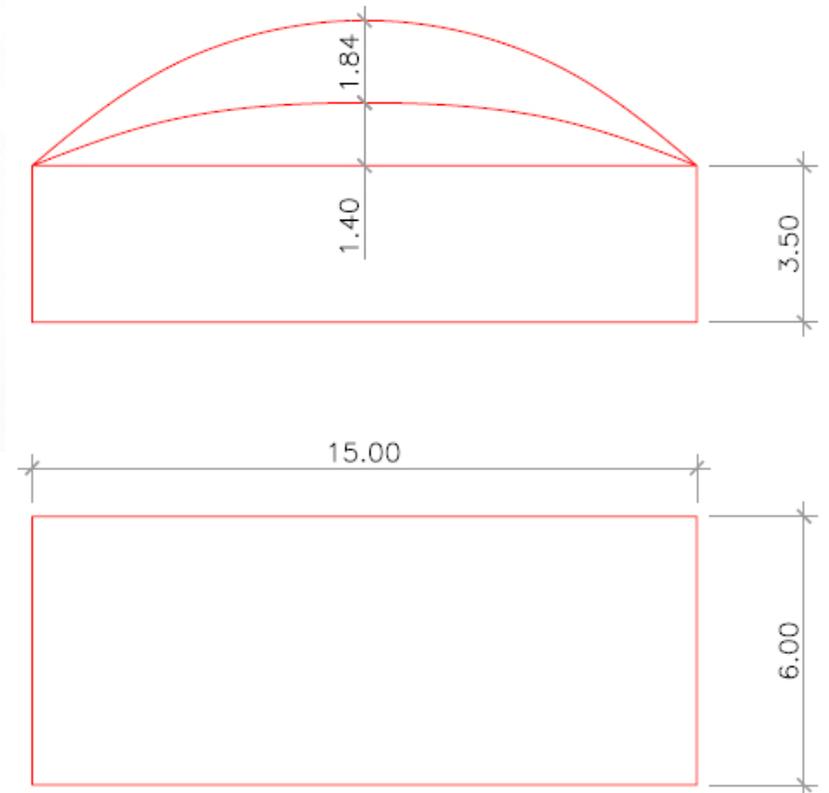
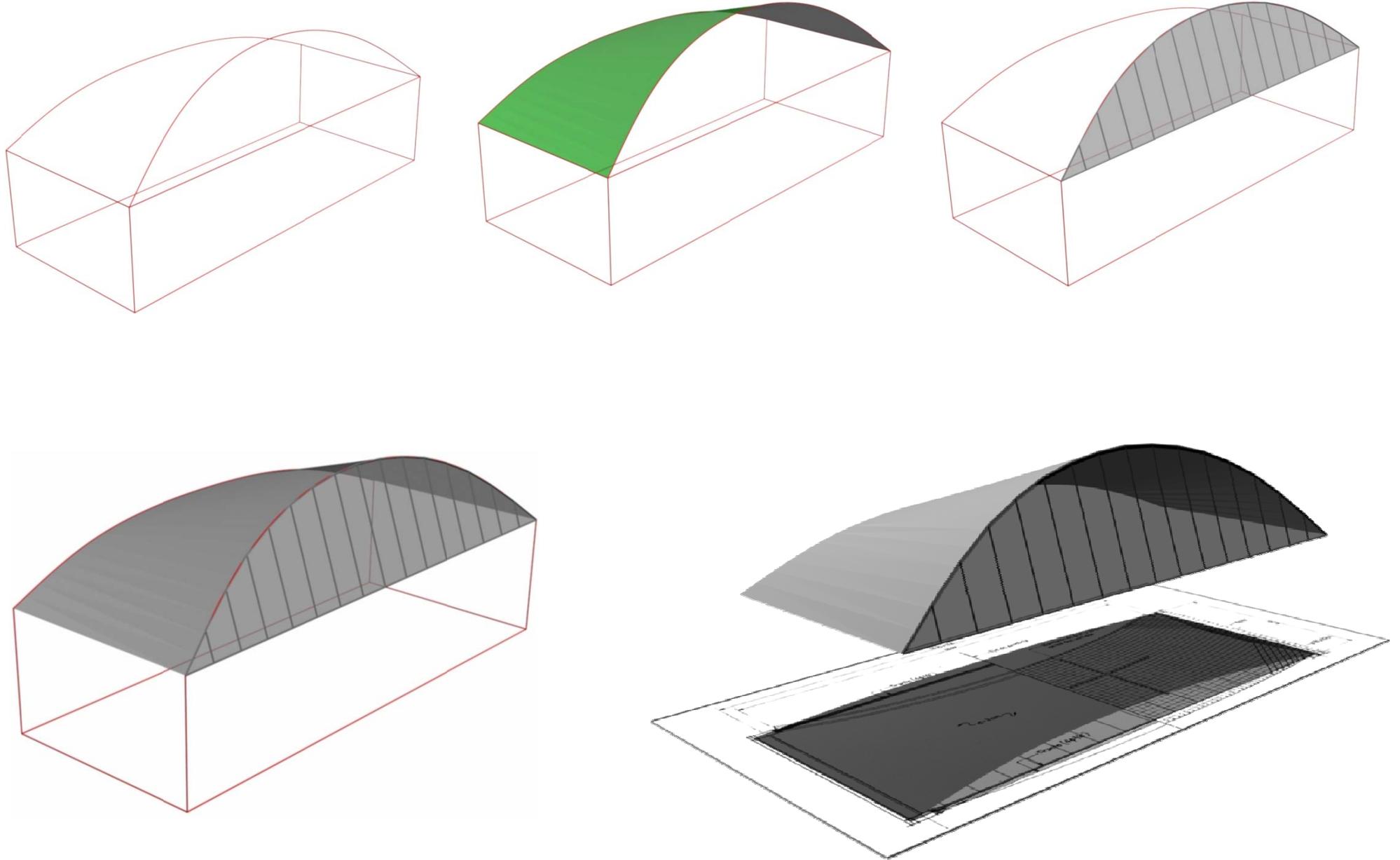


Fig 3.31 - Trazados geométricos básicos del módulo



3.9_Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad

Arquitecto	Félix Candela
Fecha de construcción	1951
Localización	Coyoacán, México DF (México)
Elemento analizado	Cubierta
Tipo de superficie	Paraboloide hiperbólico

La Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad, también conocida como “la Capilla del Attilio”, es probablemente uno de los edificios más emblemáticos de Félix Candela. Esto puede ser debido a la sencillez geométrica con la que resolvió la cubierta, utilizando para ello un paraboloide hiperbólico apoyado en un cuadrilátero alabeado.

La proyección en planta de este cuadrilátero es un romboide cuyas diagonales miden 35,77 y 29,00 m. El eje del paraboloide no es vertical por lo que las proyecciones de sus generatrices no son paralelas. Además, a pesar de ser simétrico en una de las direcciones, tiene una notable simetría en la dirección longitudinal, lo que solucionó estructuralmente Candela colocando un tirante en su ala más corta y que camufló hábilmente con la cruz de la entrada. De esta manera todas las generatrices están trabajando como tensores.

Esta cubierta con tal solo XX cm de espesor fue la precursora de otras como la cubierta del restaurante Los Manantiales en Xoximilco, en las que Candela desarrollo su teoría del “borde libre”.

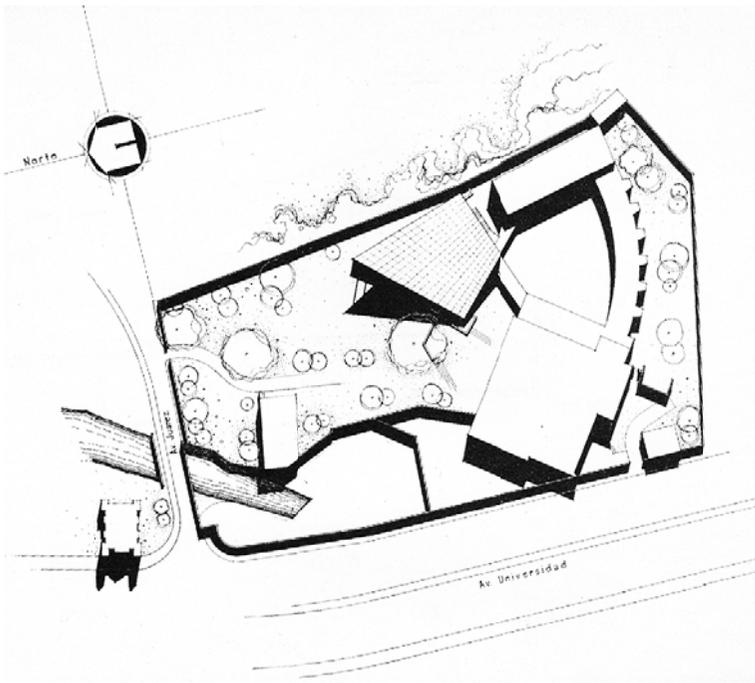


Fig 3.32 - Plano de situación de la capilla

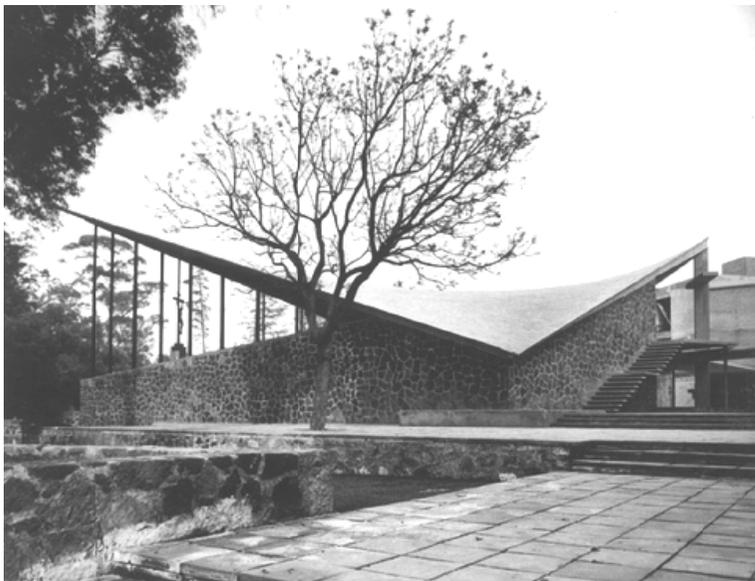


Fig 3.33 - Imagen exterior de la capilla

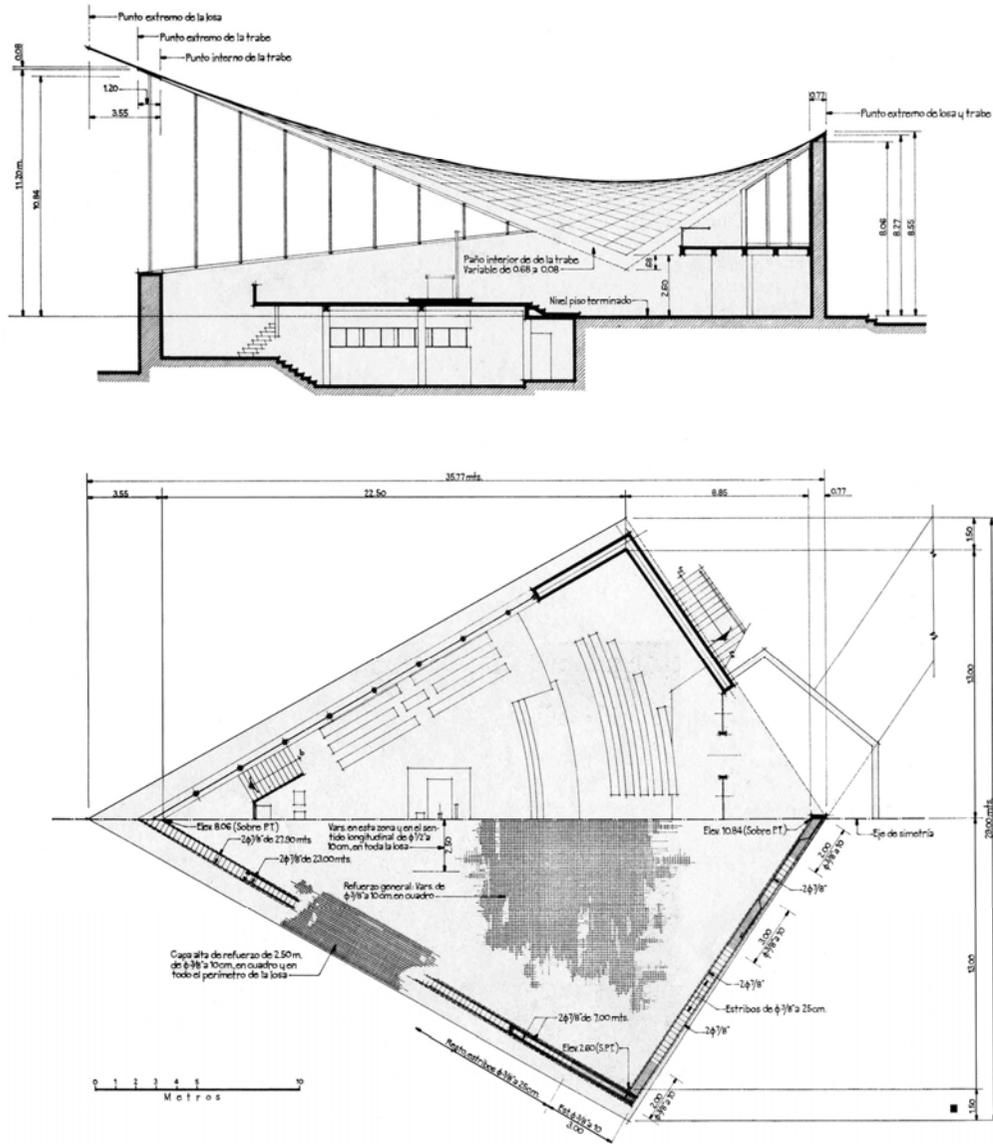


Fig 3.34 - Planos de planta y sección de la capilla

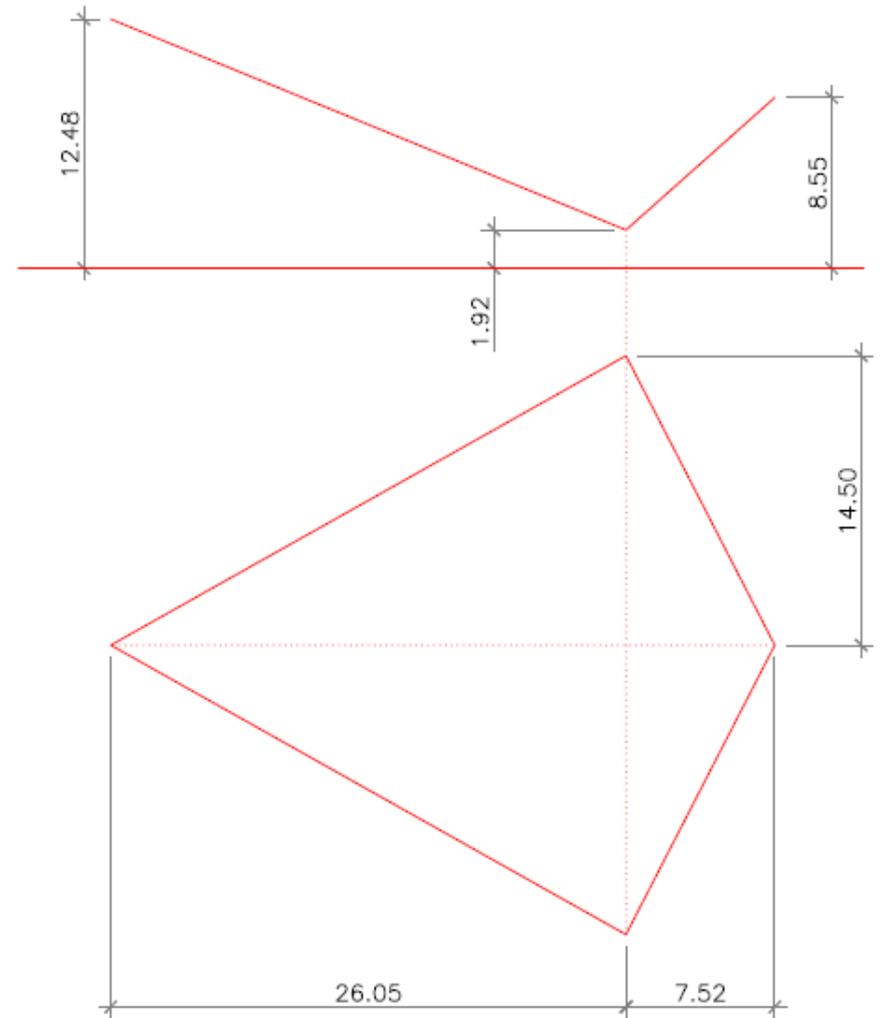
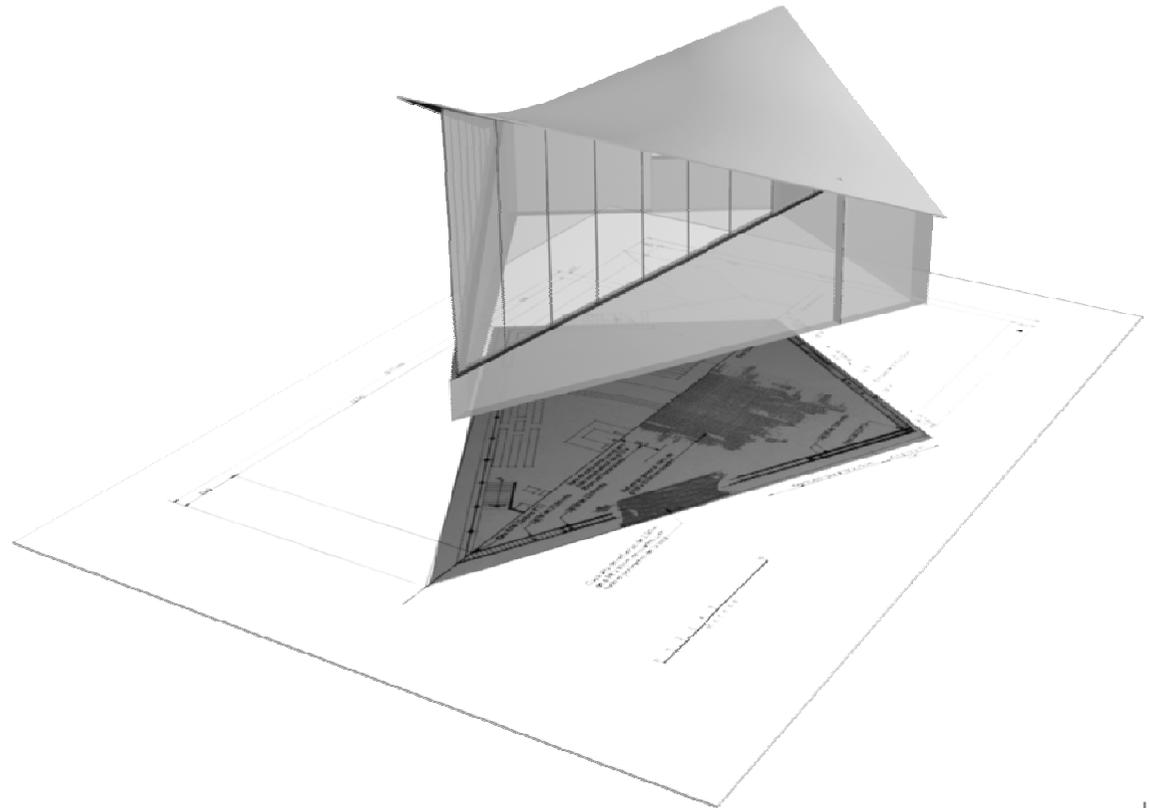
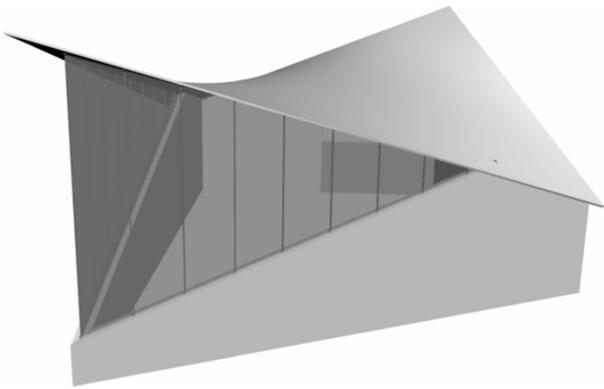
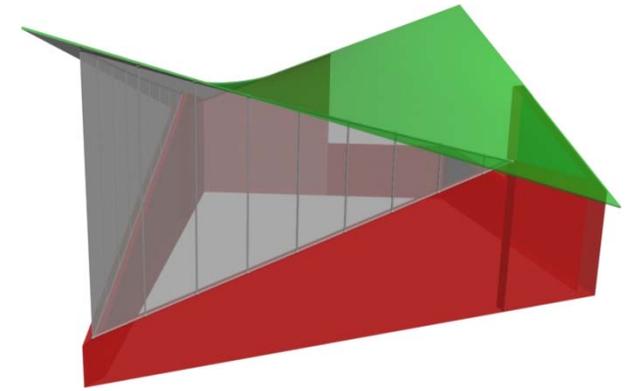
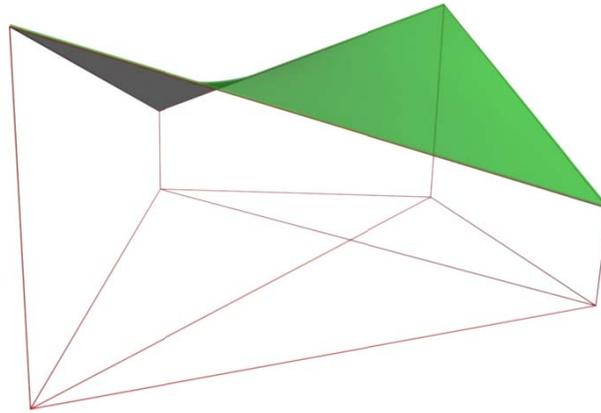
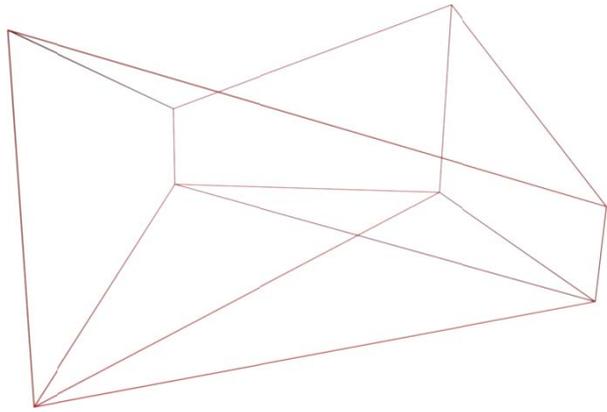


Fig 3.35 - Trazados geométricos básicos de la capilla



3.10_Parc Oceanográfico

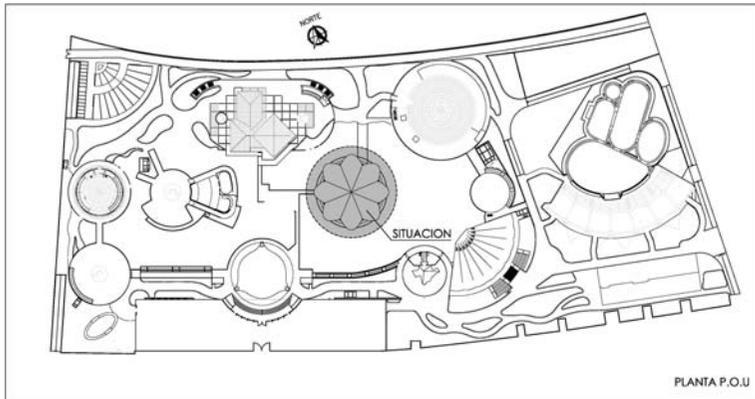


Fig 3.36 - Plano de situación de la cubierta del restaurante

Arquitecto / Ingenieros	Félix Candela / Carlos Lázaro y Alberto Domingo
Fecha de construcción	2003
Localización	Valencia (España)
Elemento analizado	Cubierta
Tipo de superficie	Paraboloides hiperbólicos

El Parc Oceanogràfic Universal de Valencia, es considerada la obra póstuma de Félix Candela. Lo cierto es que éste participó del diseño inicial pero falleció antes de que dieran comienzo las obras y de que el proyecto estuviera finalizado. Es por esto que se encargan proyectos parciales a diferentes oficinas técnicas, siendo los redactores del proyecto del restaurante los ingenieros de caminos, y profesores de la UPV, Carlos Lázaro y Alberto Domingo.

La cubierta es el elemento que va a ser objeto de nuestro análisis. Se diseñó como homenaje a Candela, repitiendo el diseño que él mismo realizó para el restaurante "Los Manantiales" de Xoximilco, solo que con ligeras, pero importantes, diferencias.

El diseño consta de 8 lóbulos de paraboloides hiperbólicos, con 8 apoyos articulados (una de las novedades de esta estructura) salvando una luz de 35,5 m y con unos espesores de entre 12 y 6 cm en la mayor parte de la superficie. La altura libre en la zona central es de 8,12m y en el extremo de los voladizos llega hasta los 12,75 m.

Para su construcción se utilizó el hormigón proyectado con refuerzo de fibras de acero. Se reforzaron los nervios y la clave central (de 20 cm de canto), ya que como indica Lázaro, después de someter en cálculo a la estructura a la acción del viento, existían flexiones cerca de estos que era necesario contrarrestar ampliando la sección y el armado de la cubierta.

Es uno de los ejemplos más elegantes de la historia de la construcción de cascarones de hormigón armado.



Fig 3.37 - Imagen exterior de la cubierta del restaurante

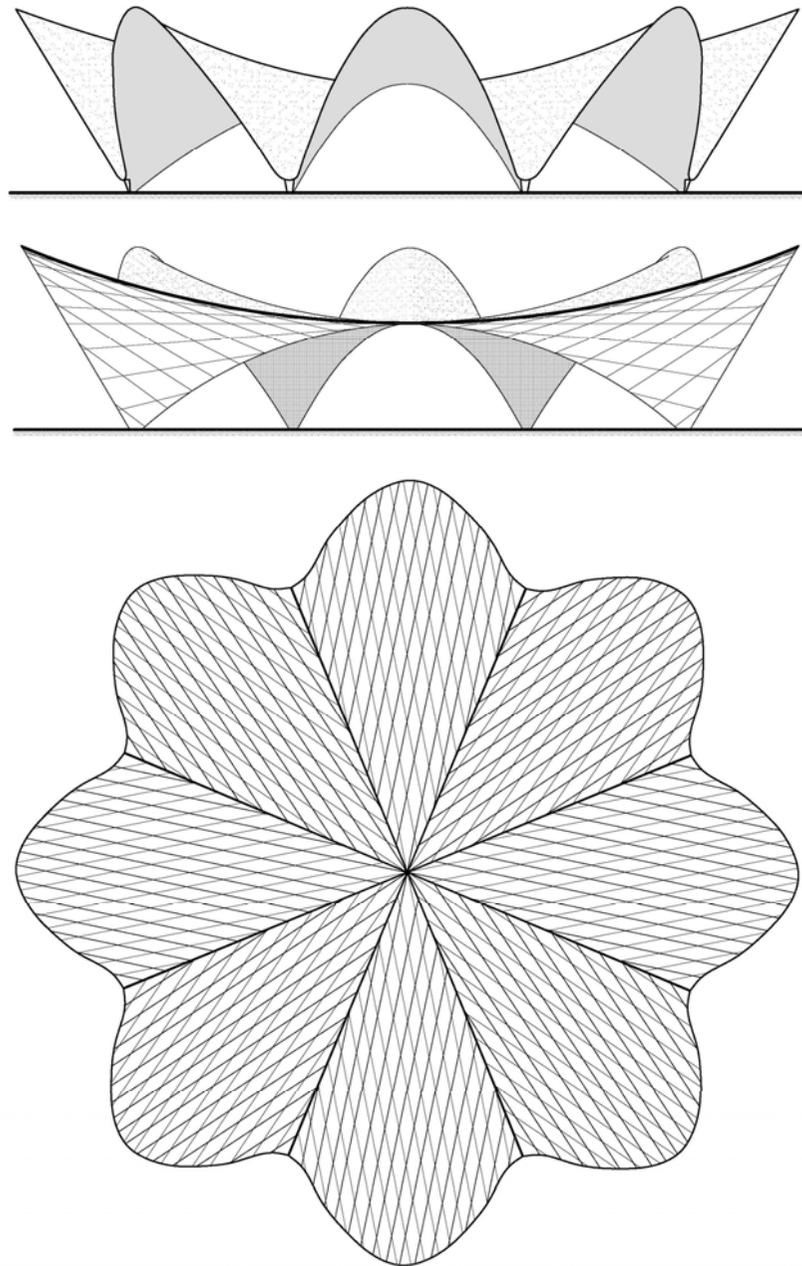


Fig 3.38 - Planos en planta, alzado y sección de la cubierta del restaurante

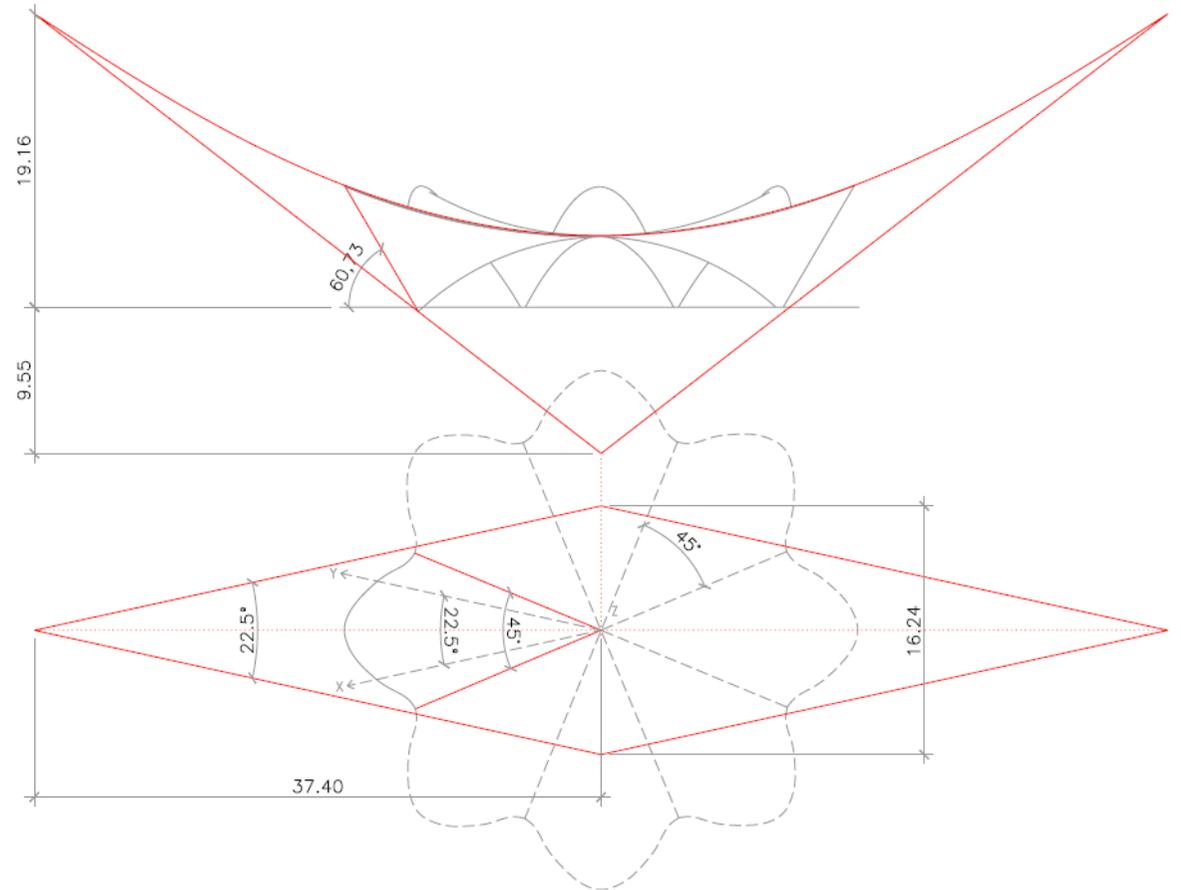


Fig 3.39 - Trazados geométricos básicos de la cubierta del restaurante

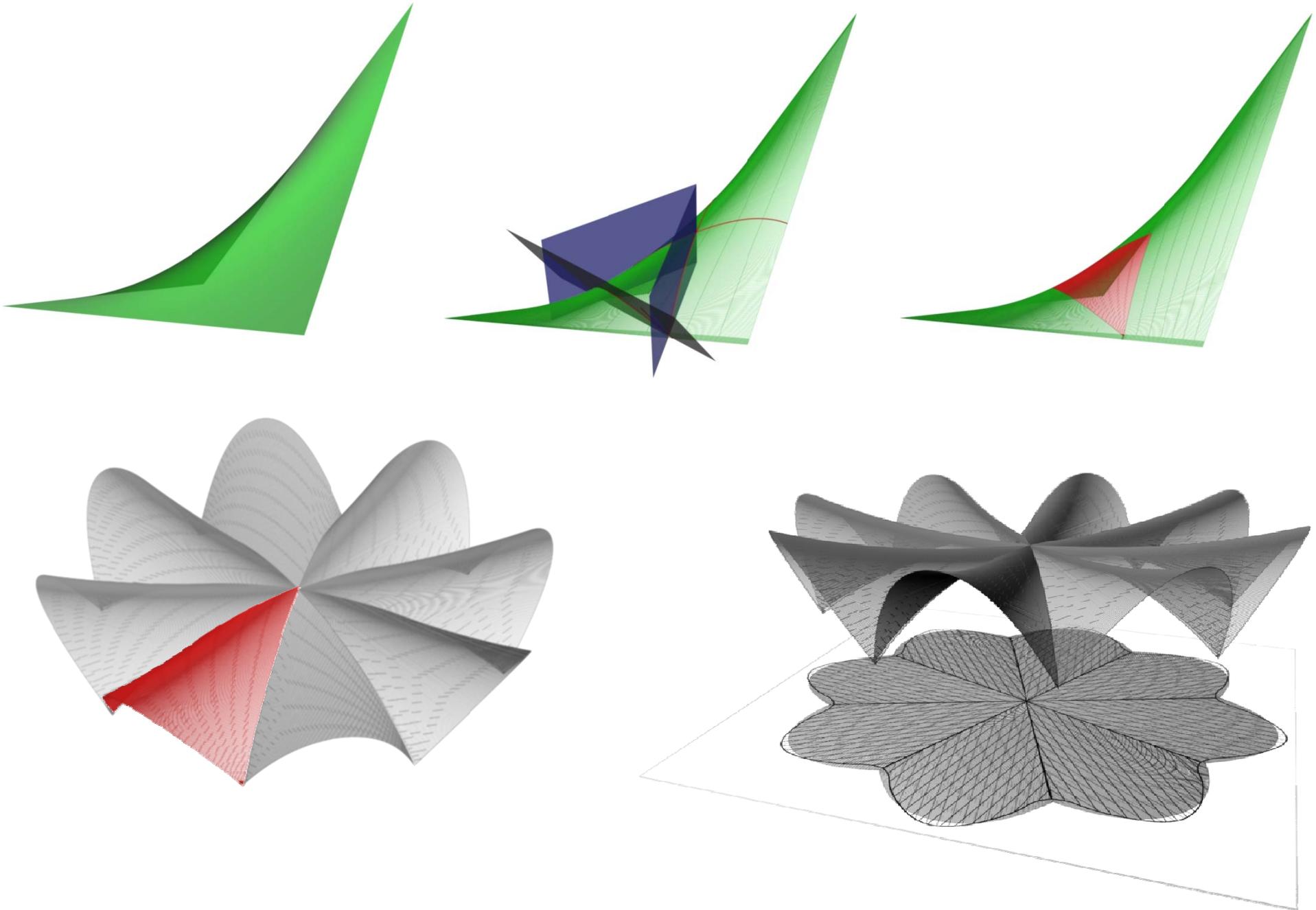




Fig 3.40 - Imagen de conjunto de los laboratorios Jorba

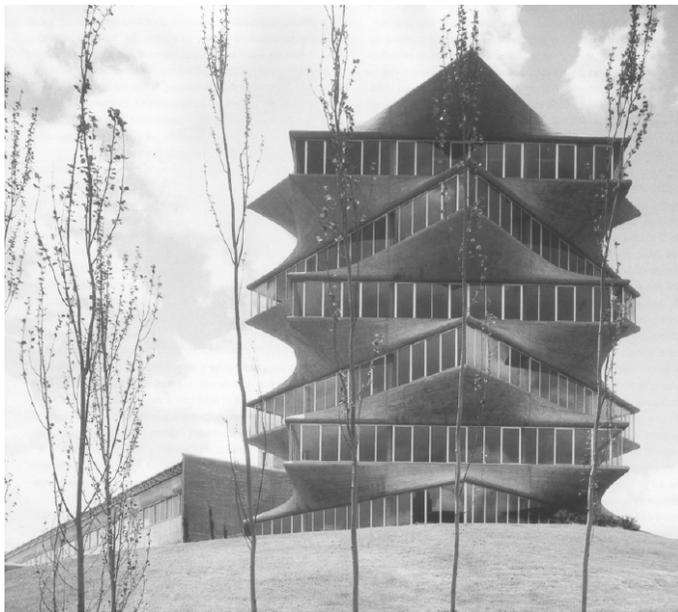


Fig 3.41 - Imagen exterior de la pagoda

3.11_Laboratorios Jorba – La Pagoda

Arquitecto	Miguel Fisac Serna
Fecha de construcción	1967
Localización	Madrid (España)
Elemento analizado	Cerramiento
Tipo de superficie	Paraboloides hiperbólicos

Miguel Fisac diseñó y ejecutó una gran cantidad de edificios, pero sin duda el que más popular le hizo fue el conocido como “La Pagoda”. El edificio era la sede de los Laboratorios Jorba y se construyó el 1967.

Entre las construcciones que este complejo albergaba, nos vamos a detener a estudiar la torre exenta, en el extremo más próximo a la calle, que reunía las diversas dependencias de administración y una biblioteca.

Esta torre tiene una planta cuadrada de 12 m de lado con un giro de 45° entre plantas. En ella Fisac resuelve el cerramiento resultante del giro mediante unos paraboloides hiperbólicos de hormigón que se apoyan en el dintel de la ventana inferior y en el alfeizar de la superior. Para ello utilizó un encofrado reutilizable que le sirvió para todas las plantas del edificio.

El diseño consiguió su objetivo configurando un símbolo de la empresa reconocido por todo el mundo. La polémica y el horror llegaron en 1999 cuando los nuevos propietarios del edificio, en connivencia con el Ayuntamiento de Madrid determinaron derribándolo.

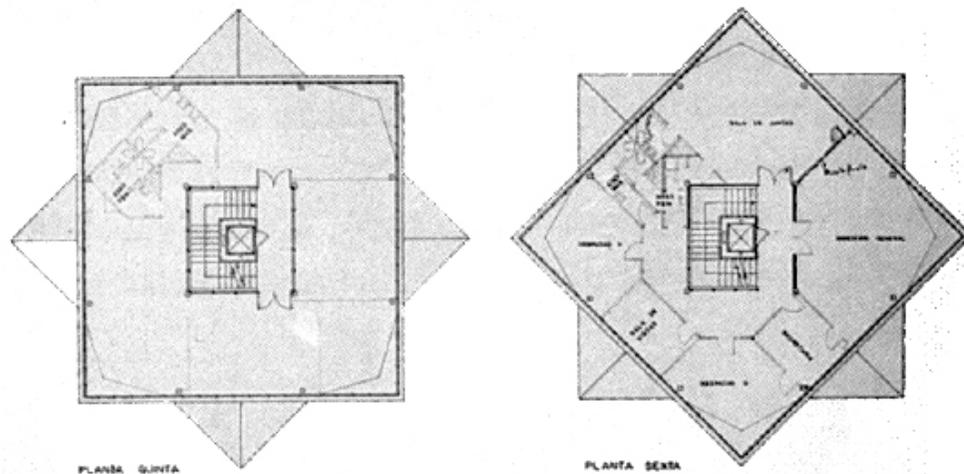
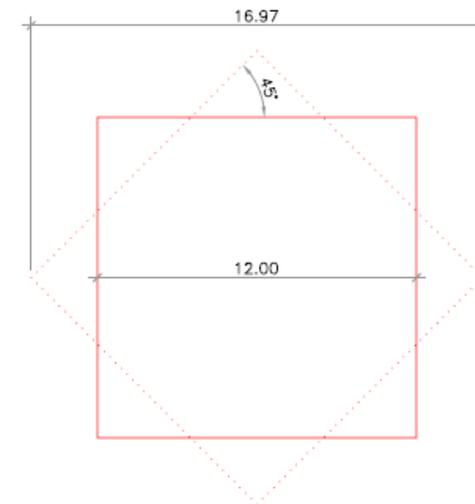
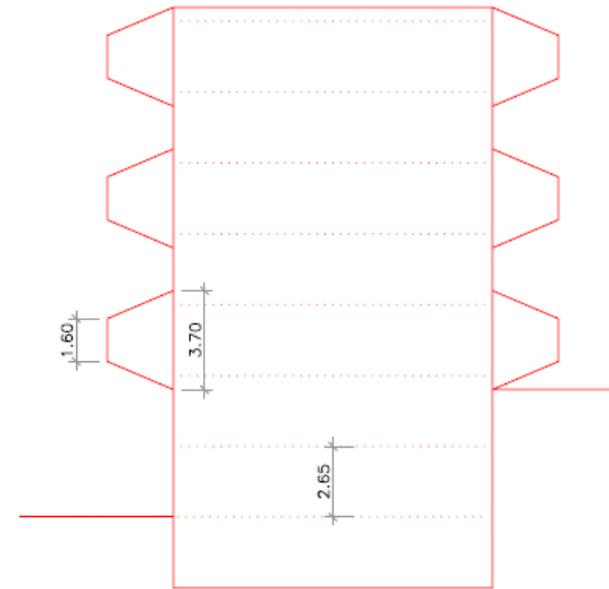
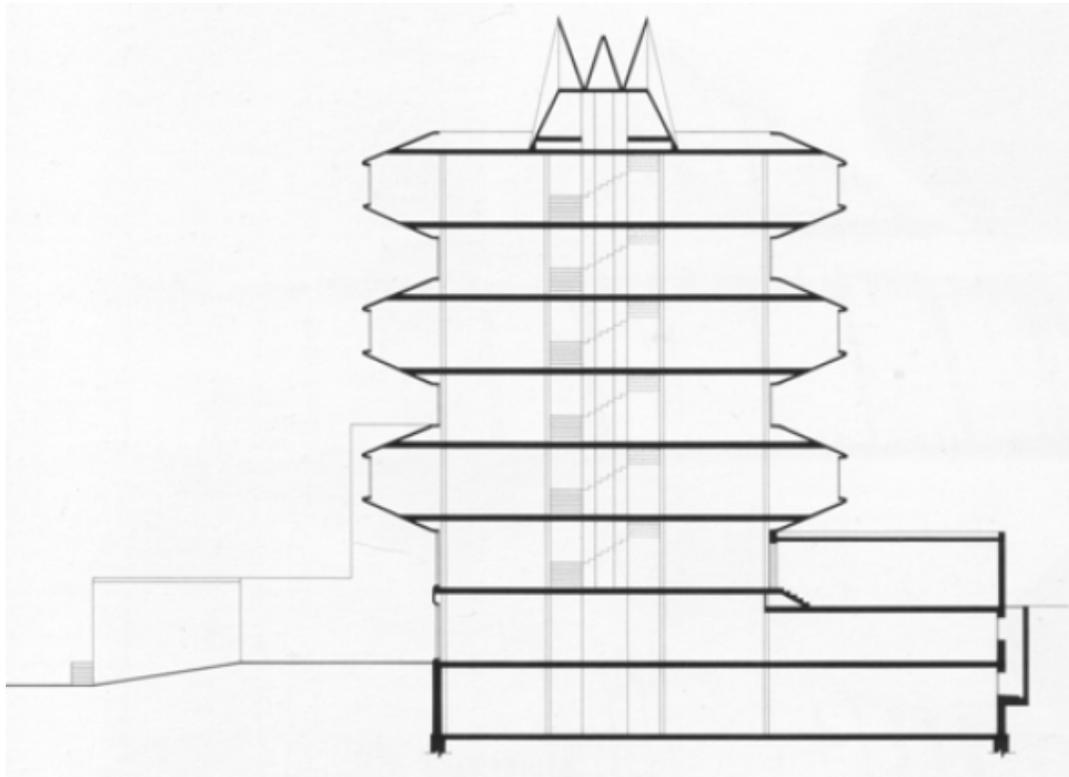
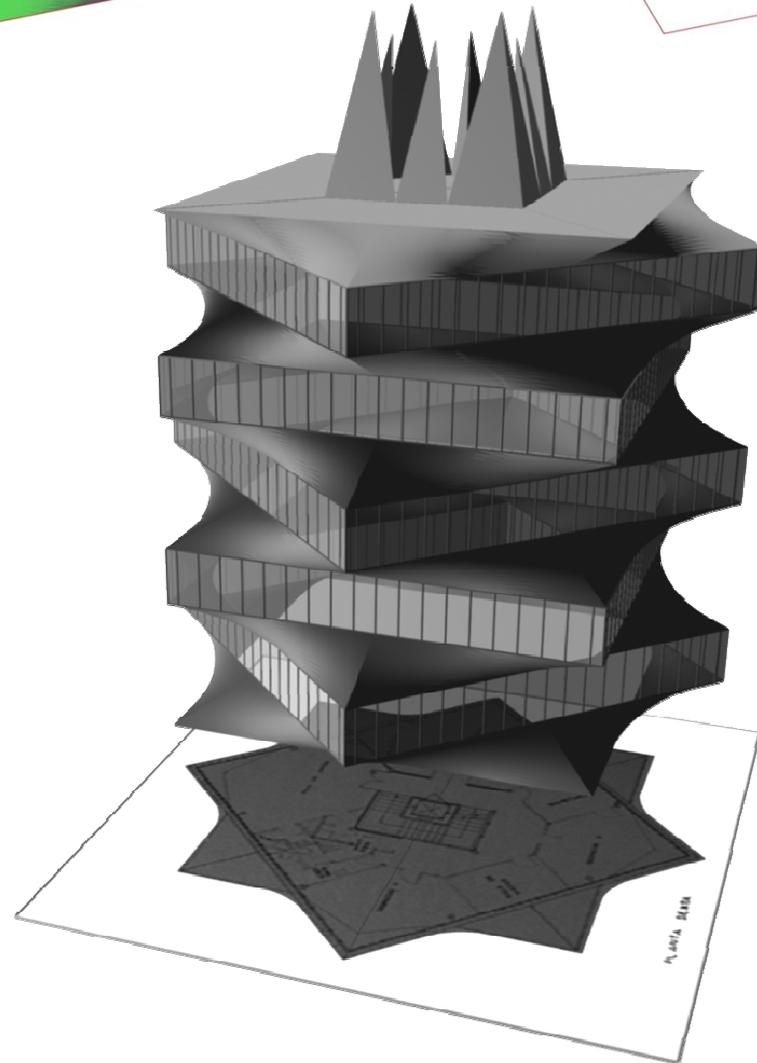
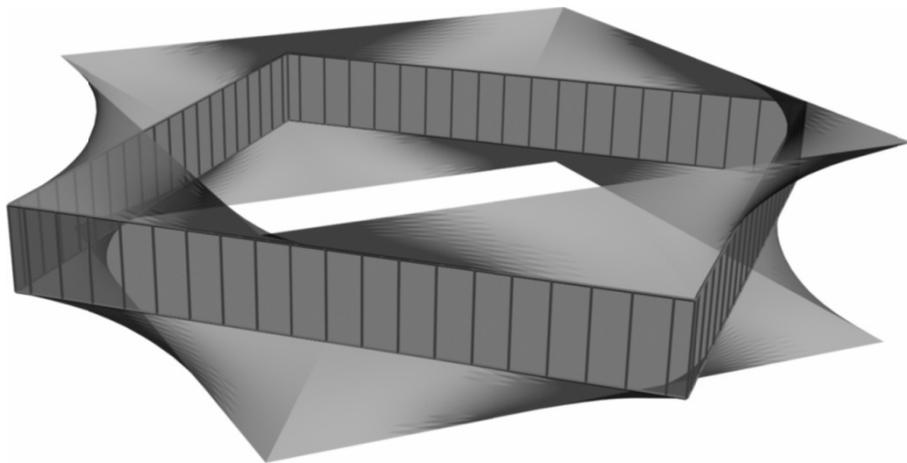
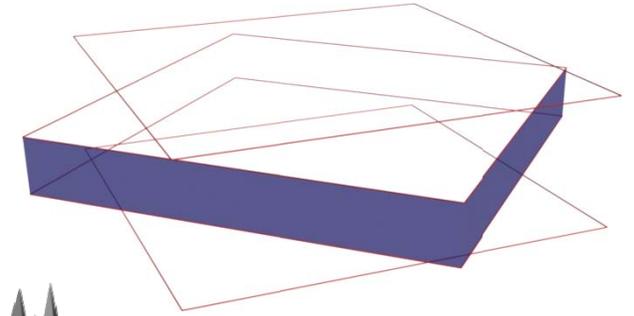
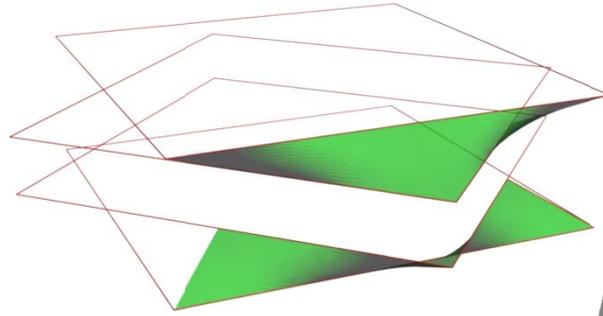
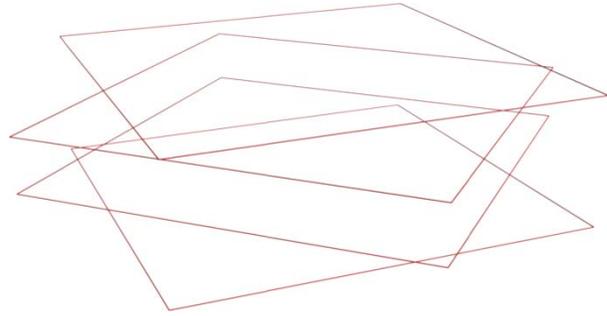


Fig 3.42 – Plantas y sección de la torre de los laboratorios Jorba

Fig 3.43 – Geometría básica de la torre de los laboratorios Jorba



3.12_Paraguas invertido

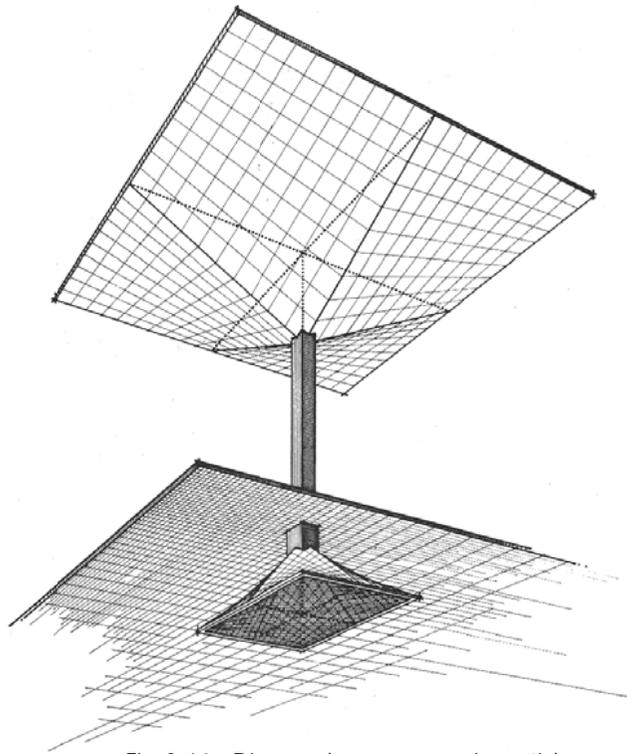


Fig 3.44 - Diseño de paraguas invertido



Fig 3.45 - Imagen del prototipo de paraguas invertido

Arquitecto	Félix Candela
Fecha de construcción	1952
Localización	México DF (México)
Elemento analizado	Cubierta
Tipo de superficie	Paraboloides hiperbólicos

En sus investigaciones sobre superficies alabeadas, Félix Candela diseñó y construyó el primer paraguas invertido de hormigón formado por cuatro timpanos de paraboloides hiperbólicos. Éstos tenían unas dimensiones de 10 x 10 m, un peralte de 1 m y un espesor de 4 cm.

A partir de este primer prototipo, Candela desarrolló un portafolio donde describe paraguas de muchos tipos y tamaños. Las aplicaciones que da a estos paraguas también son diversas, desde cubiertas para estacionamientos de vehículos, pasando por naves industriales, incluso los llega a plantear para la construcción de viviendas.

Estas estructuras presentan de entrada una deformación inicial en las cuatro esquinas del orden de 5 cm. Éstas no se ven incrementadas cuando se realiza la prueba de carga por lo que, en palabras de Colin Faber, "...esto hizo suponer que son inevitables en un paraguas de este tipo, a menos que se aumente la flecha del mismo". Por otro lado la estructura también mostró tendencia a vibrar con el viento.

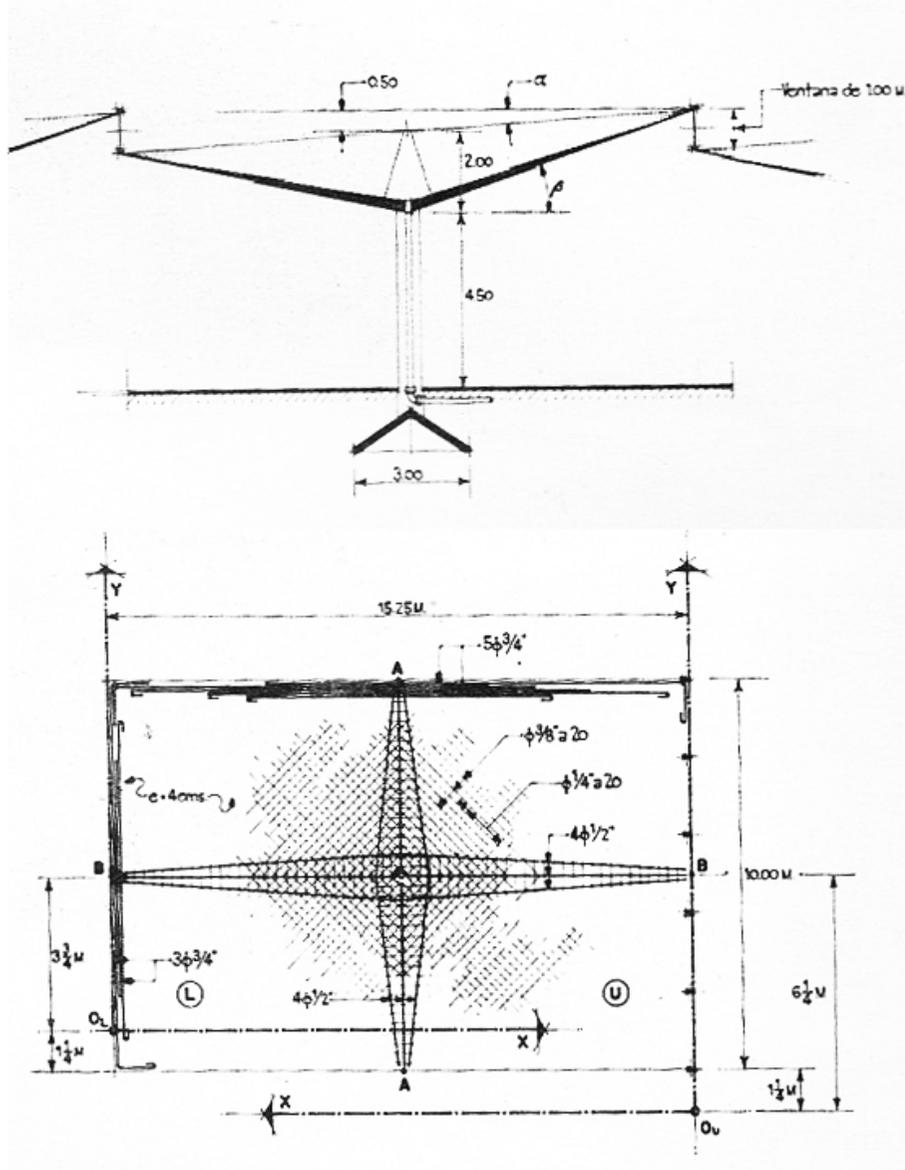


Fig 3.46 - Planos en planta y sección de un paraguas invertido

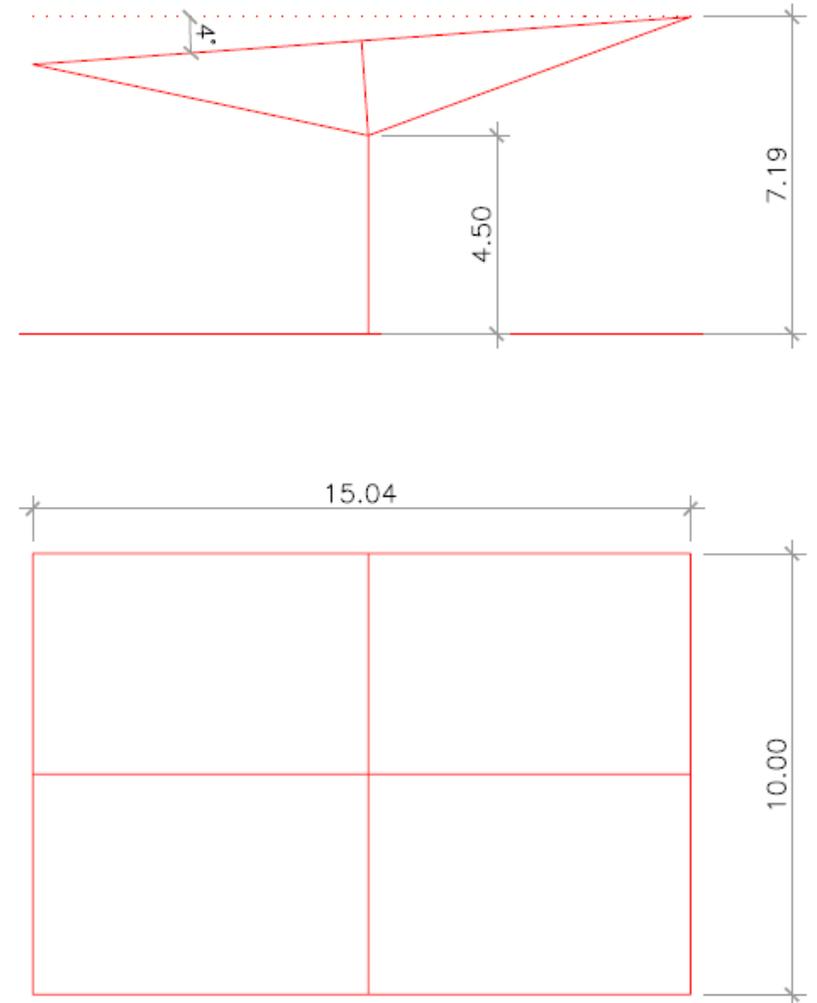


Fig 3.47 - Trazados geométricos básicos de un paraguas invertido

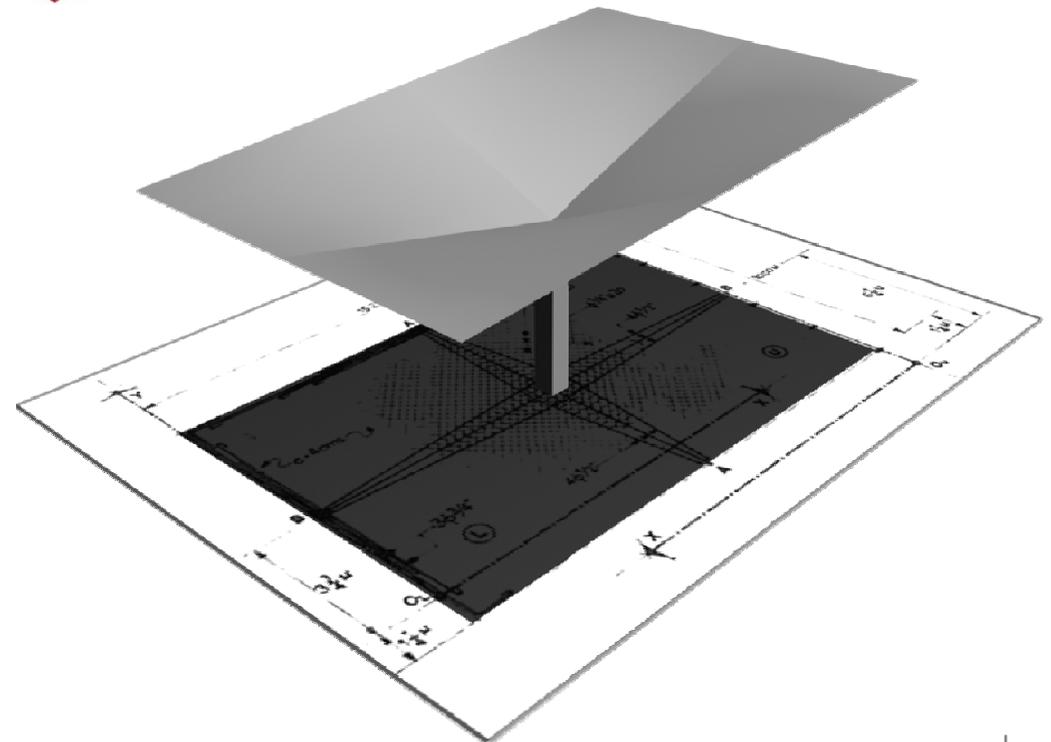
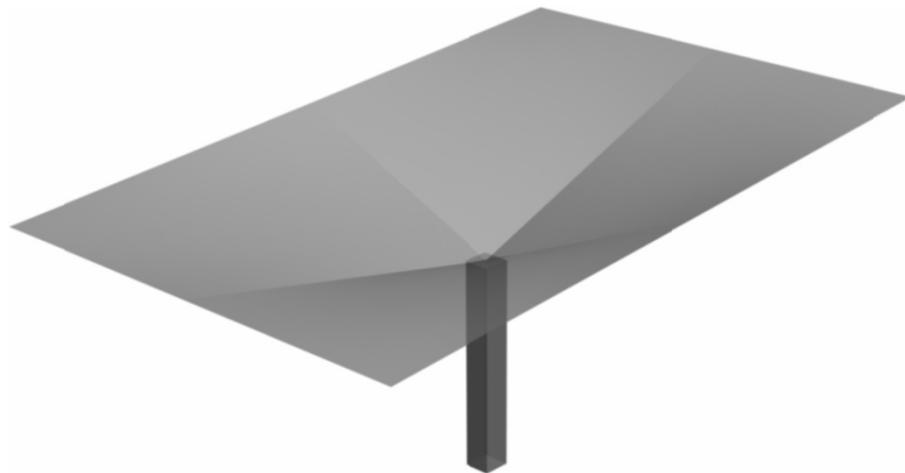
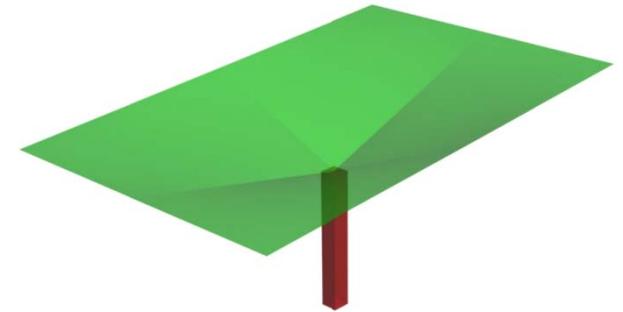
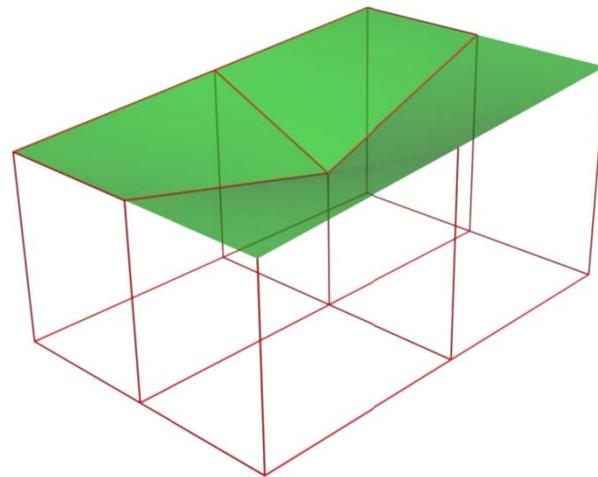
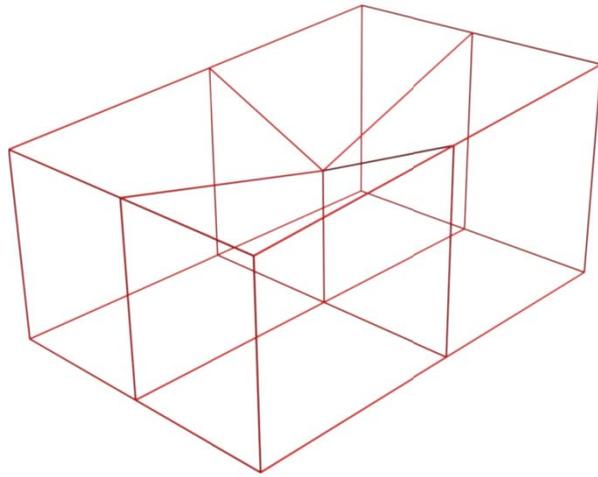




Fig 3.48 - Imagen del graderío del hipódromo

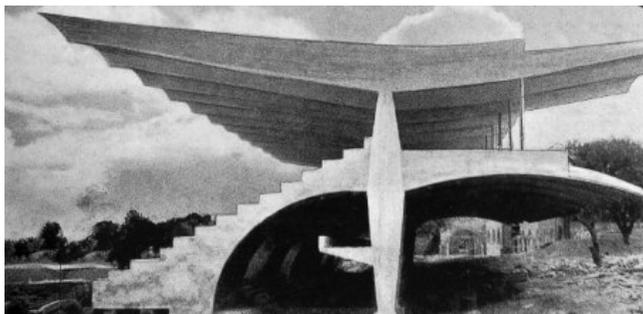


Fig 3.49 - Imagen del perfil del graderío del hipódromo

3.13_Hipódromo de la Zarzuela

Ingeniero / Arquitectos	Eduardo Torroja Miret / C. Arniches y L. Domínguez
Fecha de construcción	1935
Localización	Madrid (España)
Elemento analizado	Cubierta
Tipo de superficie	Hiperboloide hiperbólico

La cubierta del graderío del hipódromo de la Zarzuela es uno de los mejores ejemplos de la influencia de la curvatura en un elemento de hormigón de espesor mínimo.

En este complejo, Torroja resuelve la tribuna con gran sinceridad estructural y eficacia funcional. La cubierta está diseñada a partir de hiperboloides de una hoja de eje horizontal y secantes entre sí.

Tiene alcanza 12 metros de vuelo y 5 cm de espesor en los extremos, se apoya en pilares separados a 5 metros y retrotraídos para no restar visibilidad. Para soportar el gran vuelo, se encuentra contrapesada por el voladizo del hall posterior donde se ancla.

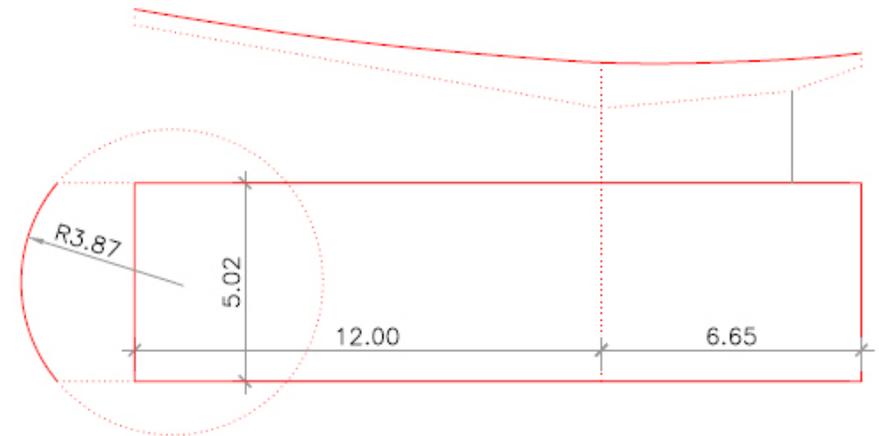
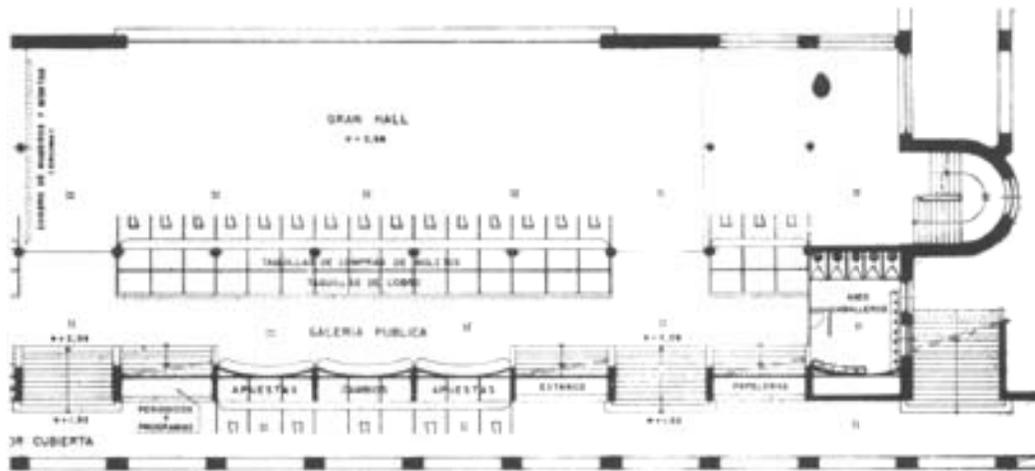
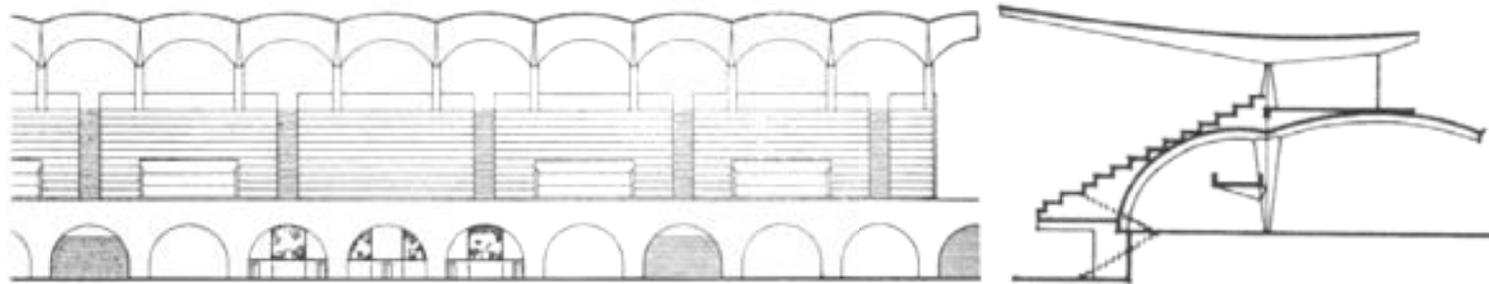


Fig 3.50 - Planos en planta, alzado y sección del graderío del hipódromo

Fig 3.51 - Esquema de la geometría básica del hipódromo

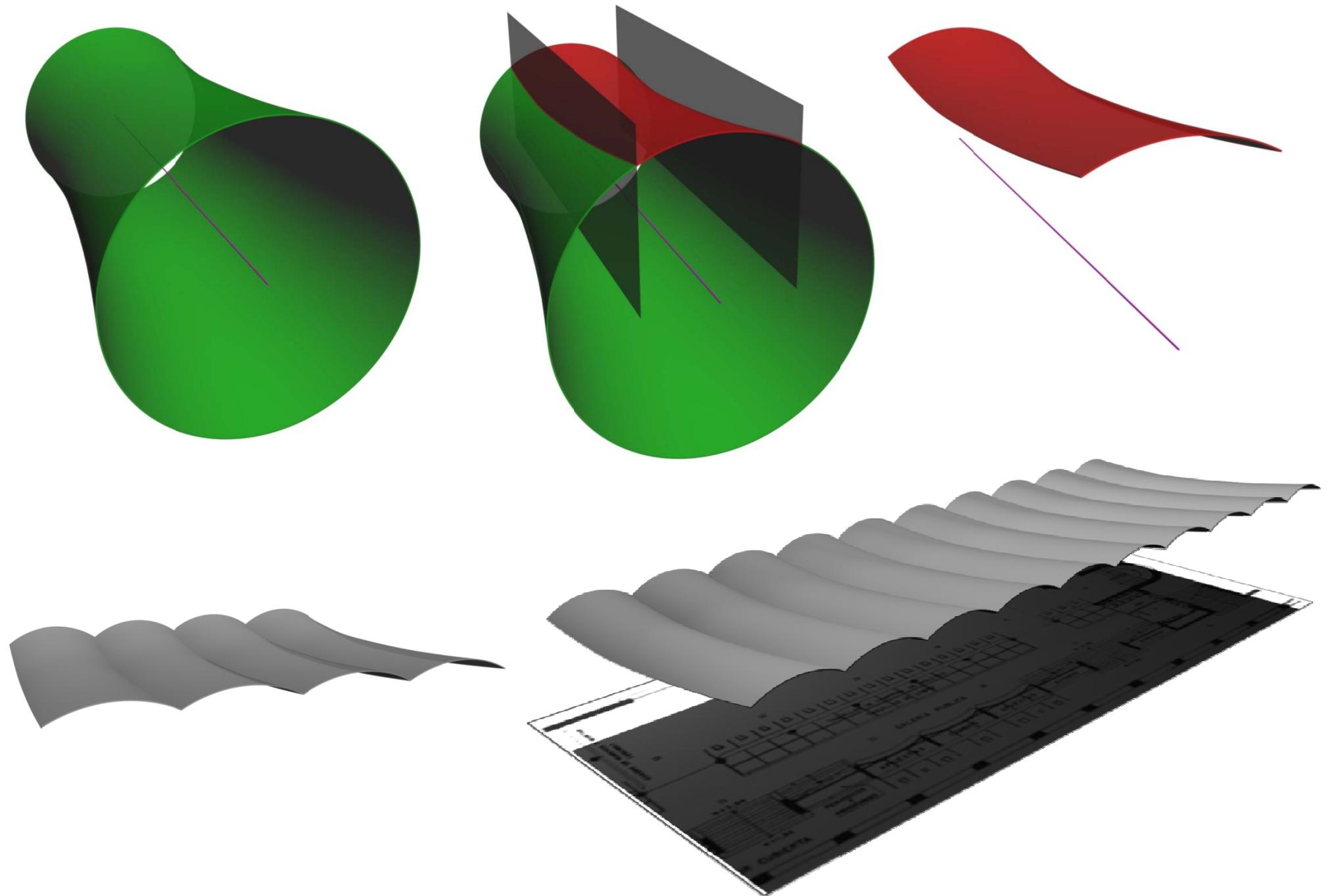




Fig 3.52 - Imagen exterior del depósito

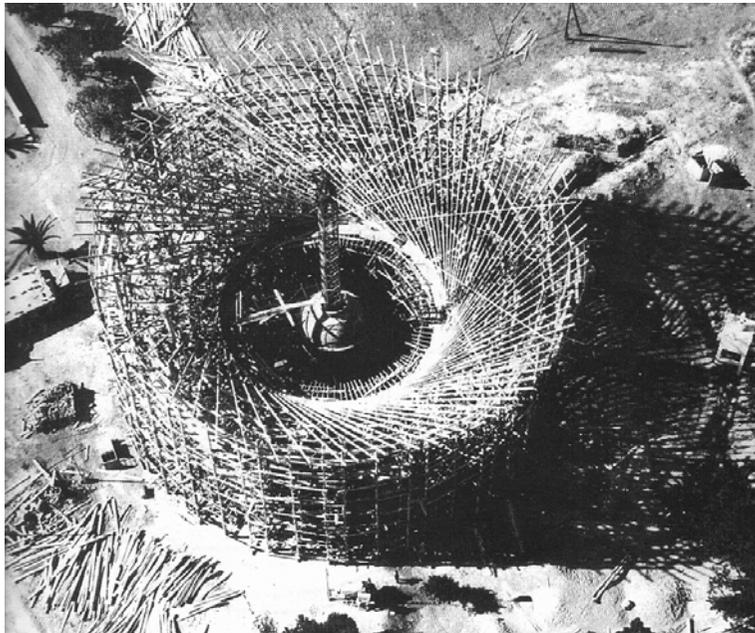


Fig 3.53 - Imagen de las cimbras durante la construcción

3.14_Depósito de agua en Fedala

Ingeniero	Eduardo Torroja Miret
Fecha de construcción	1956
Localización	Fedala (Marruecos)
Elemento analizado	Superficie exterior del cilindro
Tipo de superficie	Hiperboloides hiperbólicos

Esta construcción de Eduardo Torroja es un depósito de agua de hormigón armado de 3.500.000 m³ de capacidad. Esta impresionante obra tiene una altura de unos 24,00 m aproximadamente, un radio inferior de 17,74 m y un diámetro superior de 40,00 m.

El depósito está diseñado a partir de una composición de dos láminas de hiperboloide hiperbólico de hormigón armado pretensado, un cilindro interior también de hormigón que alberga la escalera y unas bóvedas tóricas de directriz parabólica de ladrillo apoyadas en las superficies anteriores y que definen la base y el cierre superior del depósito.

El motivo de la elección de esta superficie fue funcional y estructural. Por un lado el depósito ha de cumplir su función de almacenar agua a gran altura. Por otra parte, el problema más importante de este tipo de construcciones es la aparición de fisuras y la consiguiente pérdida de agua. Esto se solucionaba con el hiperboloide hiperbólico ya que permite un doble pretensado en dos direcciones según sus generatrices, dándole una fuerza a la estructura del contorno que evita así el peligro de fisuración bajo la acción de la presión hidráulica del agua.

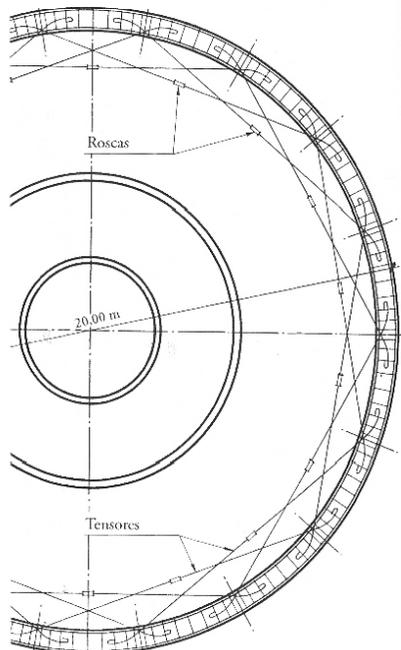
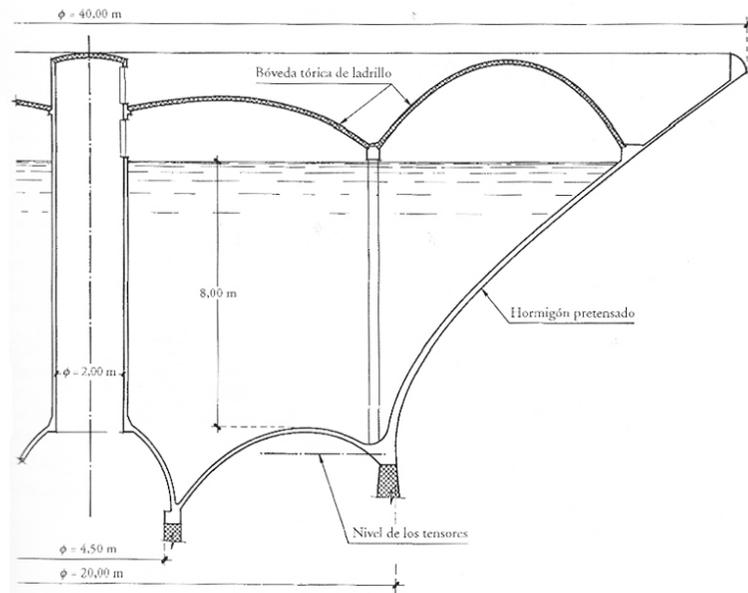


Fig 3.54 - Planos en planta y sección del depósito

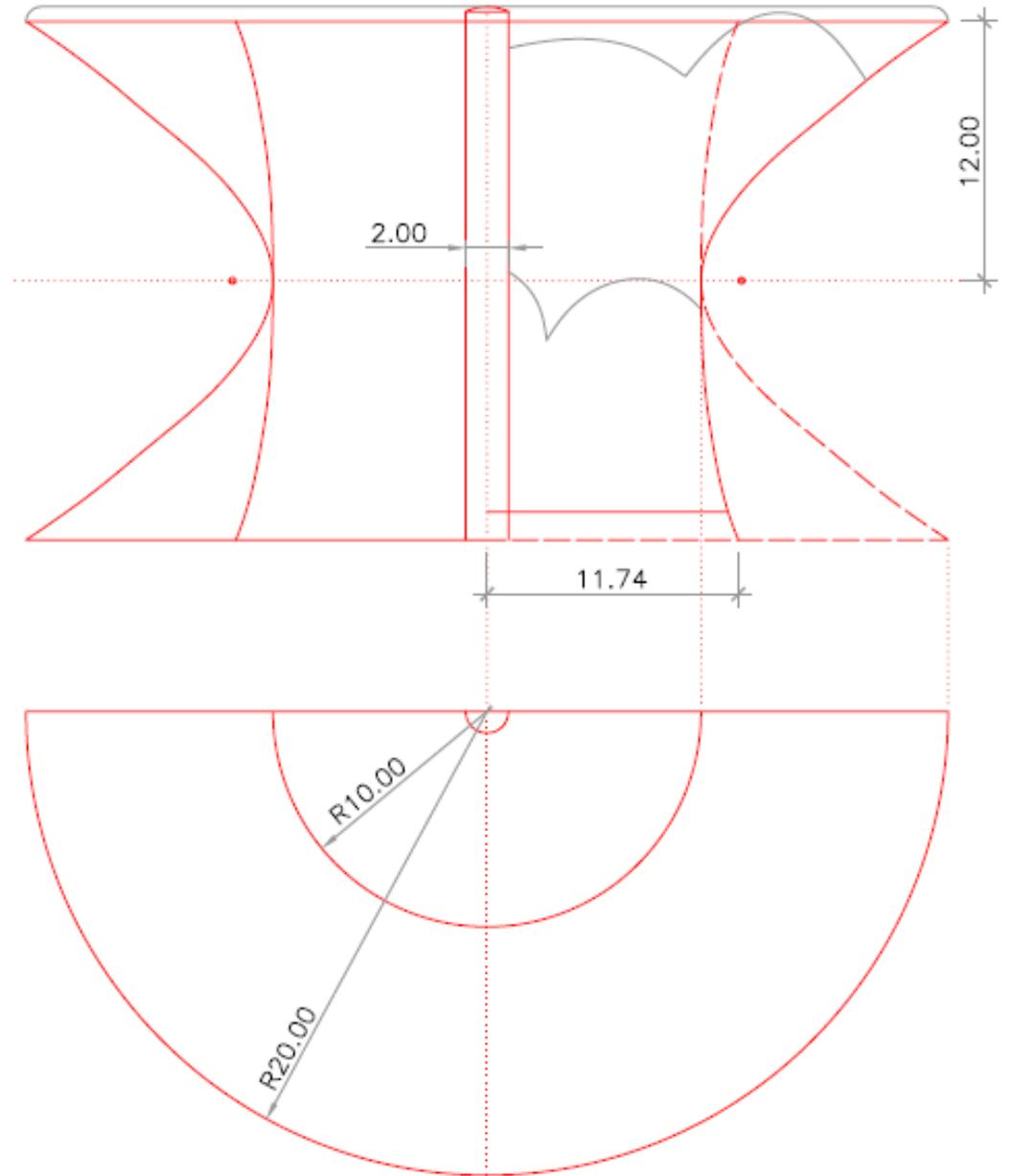
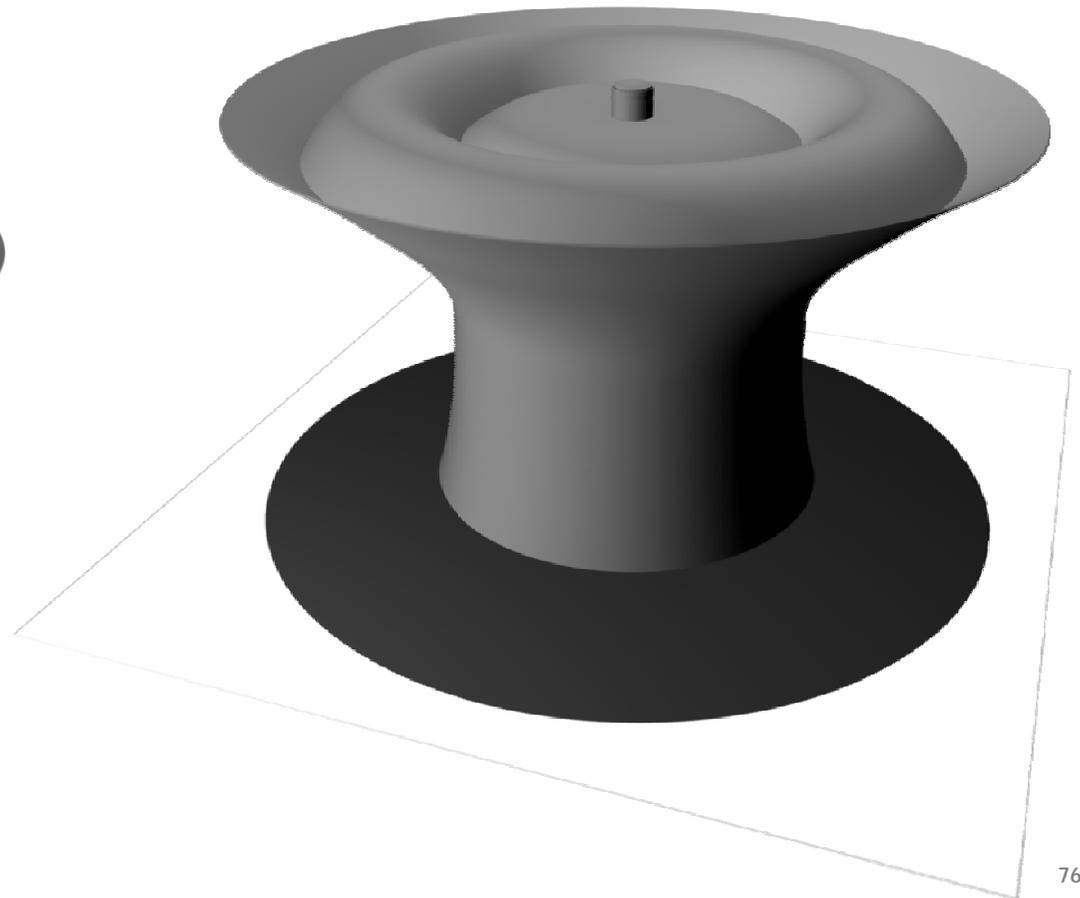
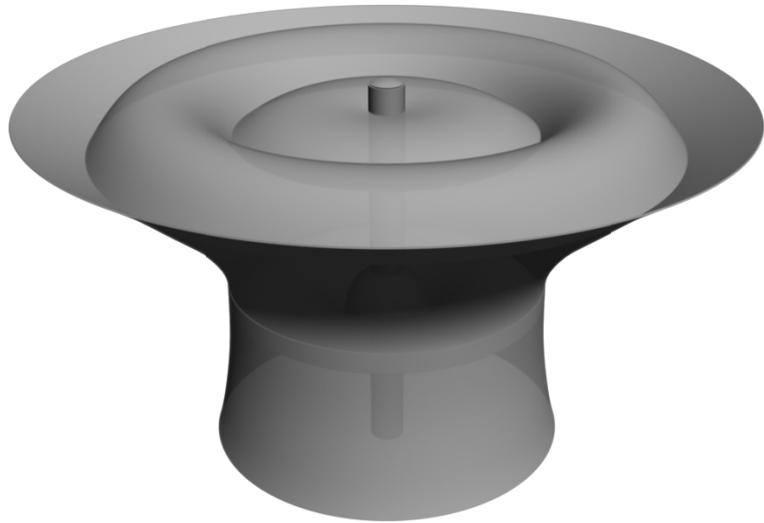
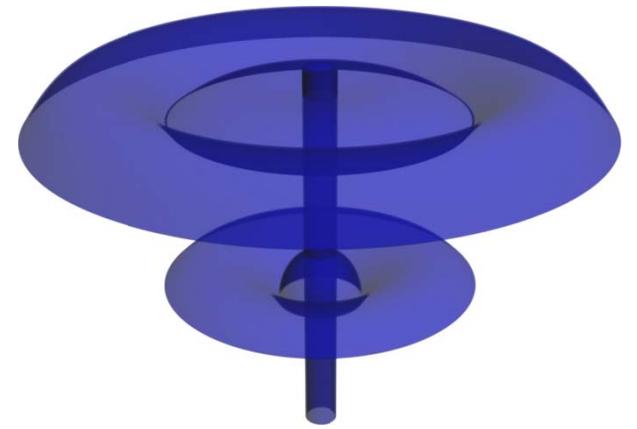
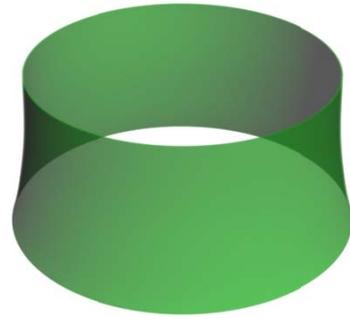
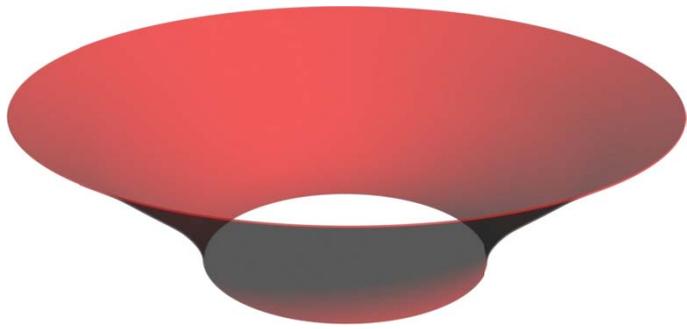


Fig 3.55 - Esquema de la geometría básica del depósito



4_Estudio estructural: las formas geométricas del hormigón

Conocido el material y sus características, vamos a pasar a realizar un estudio del comportamiento estructural del hormigón ligado a su forma geométrica. El objetivo es establecer las ideas principales de comportamiento estructural por forma del hormigón, para lo que se va a elaborar una clasificación de formas geométricas posibles. A esto se le incorporará también un estudio de cálculo estructural de esfuerzos frente a unos estados de carga marcados por la normativa actual española, el "Código Técnico de la Edificación", mediante los programas informáticos adecuados.

4.1_Clasificación de las superficies

En este apartado vamos a realizar una clasificación, a partir de los conceptos expuestos en el apartado 2, de las diferentes superficies que puede adoptar el hormigón armado e indicaremos en **negrita** aquellas que posteriormente serán objeto de nuestro análisis estructural.

SUPERFICIES PLANAS O DE CURVATURA CERO

Láminas simples

Láminas plegadas

Láminas prismáticas

Láminas poliédricas

SUPERFICIES DE CURVATURA SIMPLE

Superficies cilíndricas

Cilindro de base circular

Cilindro de base elíptica

Cilindro de base parabólica

Superficies cónicas

Cono de base circular

Cono de base elíptica

Cono de base parabólica

Conoide

Conoide recto

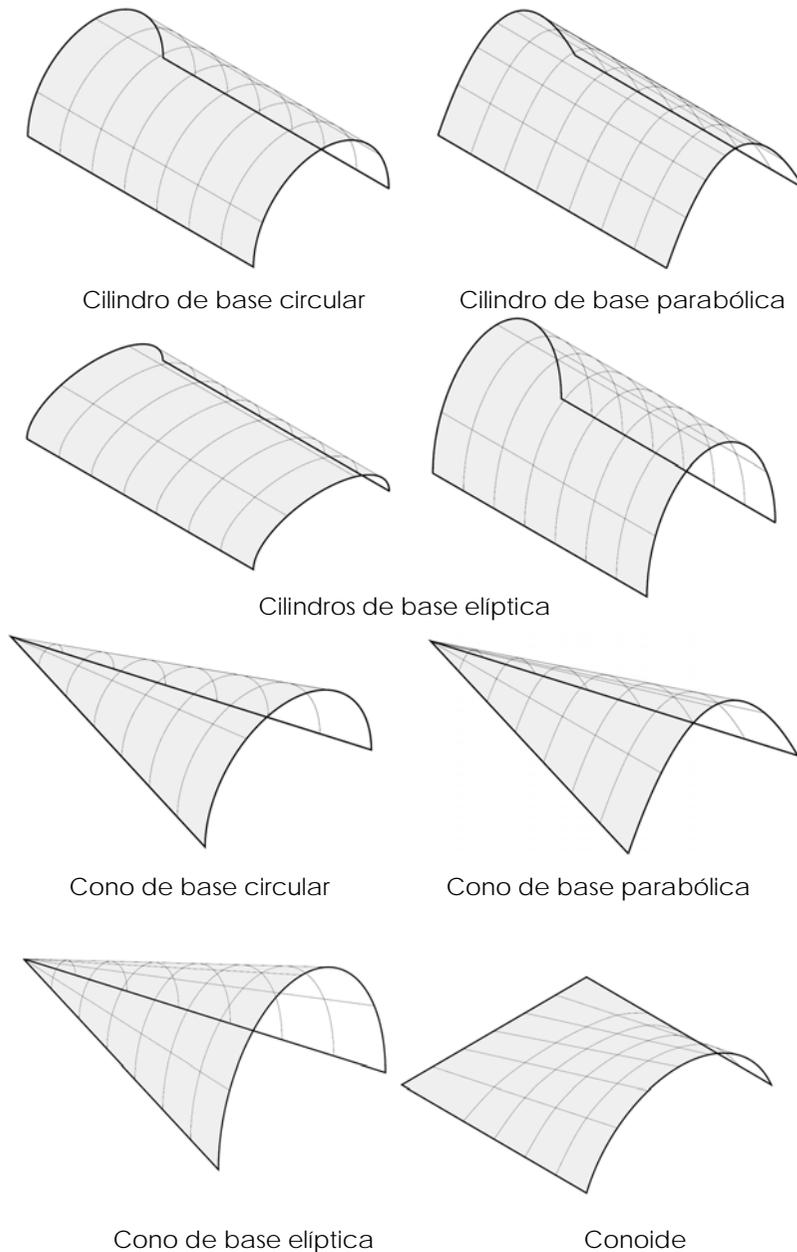


Fig 4.1 - Clasificación de las superficies

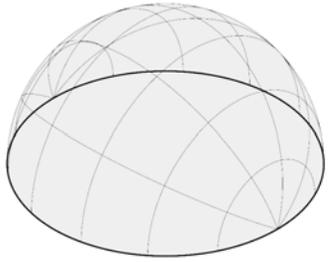
SUPERFICIES DE DOBLE CURVATURA

Superficies sinclásticas

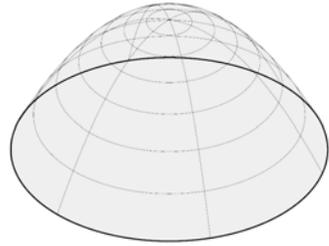
- Esfera**
- Elipsoide
- Paraboloide elíptico**
- Toroide

Superficies anticlásticas

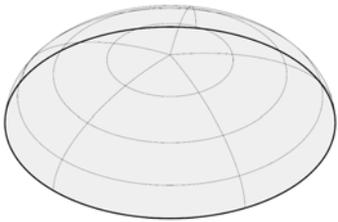
- Paraboloide hiperbólico**
- Hiperboloide hiperbólico
- Toroide



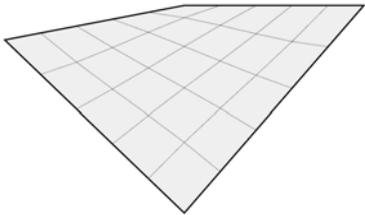
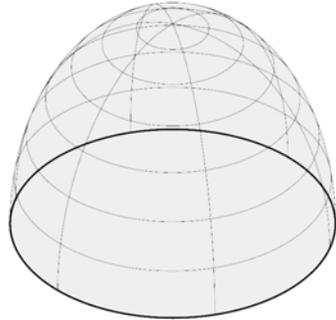
Esfera



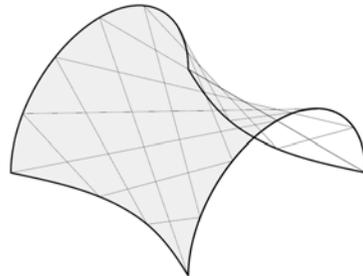
Paraboloide elíptico



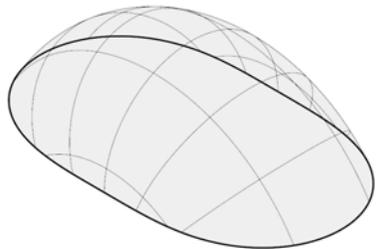
Elipsoides



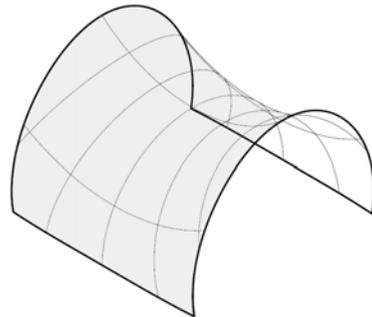
Paraboloide hiperbólico



Hiperboloide hiperbólico



Toroide (sinclástica)



Toroide (anticlástica)

Fig 4.2 – Clasificación de las superficies

4.2_Acciones, estados de carga y combinaciones

ACCIONES SOBRE LAS SUPERFICIES

Suponiendo las estructuras a analizar situadas en Valencia y acorde a lo establecido en el Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico de Seguridad Estructural – Acciones en la Edificación (CTE DB SE-AE) las acciones a las que se van a someter son las siguientes:

ACCIONES PERMANENTES

PESO PROPIO	- Anejo C / Tabla C5 - Forjado de losa de hormigón e=20 cm	5 kN/m²
PRETENSADO	- No se considera	
TERRENO	- No se considera	

ACCIONES VARIABLES

SOBRECARGA DE USO	- Tabla 3.1 - G – Cubiertas accesibles incl<20° - No se considera reducciones	1 kN/m²
BARANDILLAS O ELEMENTOS DIVISORIOS	- No se considera	
VIENTO	- $q_e = q_b \cdot C_e \cdot C_p$ = presión estática - q_b = presión dinámica = 0.5 kN/m ² - C_e = coef. de exposición Tabla 3.3 / Grado IV máx. = 2.6 - C_p = coef. de presión Naves y construcciones diáfanos / Tabla 3.5 = 0.7 / - 0.5	0.91 kN/m² -0.65 kN/m²
ACCIONES TÉRMICAS	- No se consideran	
NIEVE	- Altitud inferior a 1000 m	1 kN/m²

ACCIONES ACCIDENTALES

- SISMO - No se considera
- INCENDIO - No se considera
- IMPACTO - No se considera

ESTADOS DE CARGA

Por tanto, los diferentes estados de carga a los que se van a someter las estructuras analizadas son:

CARGAS VERTICALES

	Carga
Peso propio	5 kN/m ²
Sobrecarga de uso	1 kN/m ²
Nieve	1 kN/m ²

CARGAS HORIZONTALES

Viento	Presión	0.91 kN/m ²
	Succión	-0.65 kN/m ²

COMBINACIONES DE CÁLCULO

El estudio de las diferentes estructuras se va a realizar para las siguientes combinaciones de carga:

ESTADO LÍMITE ÚLTIMO

		Carga	Coef.
Peso propio		5 kN/m ²	1,35
Sobrecarga de uso		1 kN/m ²	1,5
Nieve		1 kN/m ²	1,5
Viento	Presión	0.91 kN/m ²	1,5
	Succión	-0.65 kN/m ²	1,5

ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

		Carga	Coef.
Peso propio		5 kN/m ²	1
Sobrecarga de uso		1 kN/m ²	1
Nieve		1 kN/m ²	1
Viento	Presión	0.91 kN/m ²	1
	Succión	-0.65 kN/m ²	1

4.3_Modelización de las estructuras y programa de cálculo

Para el análisis estructural siguiente se ha optado por utilizar el programa de cálculo por elementos finitos más utilizado en el mercado: el SAP 2000 V8. Este programa ofrece la posibilidad de realizar análisis estáticos no lineales para elementos y placas. También diseña elementos de hormigón, y no tiene limitado el número de nodos a diferencia de otros programas.

Para la introducción de los datos en el programa se han partido de los modelos estructurales realizados en AutoCAD. Se ha partido de un dibujo sólido de la geometría propuesta y se ha discretizado convirtiendo la superficie en un conjunto de superficies planas (3dcaras) con una relación de 1/10 con respecto de la superficie total. Para ello se han utilizado las generatrices de la superficie, en el caso de ser regladas, secciones de la misma paralelas a los planos coordenados, o bien secciones radiales generando meridianos, como en el caso de la esfera. Esto nos crea una cuadrícula en tres dimensiones que nos sirve para discretizar y aproximar la superficie por las superficies planas que requiere el programa para realizar el cálculo.

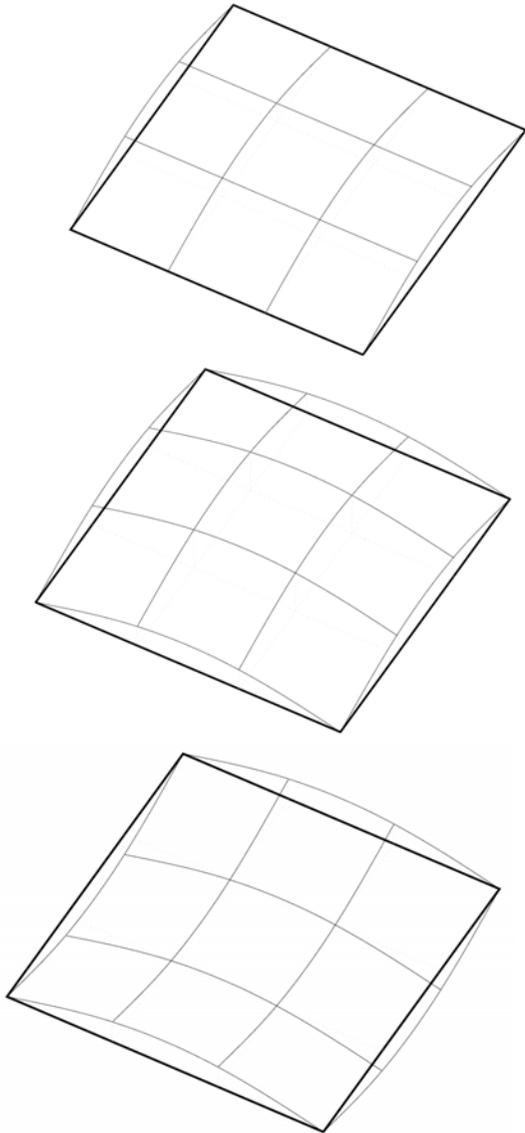


Fig 4.3 – Ejemplos de modelización de las superficies de curvatura simple y doble curvatura mediante superficies planas

4.4_Estudio estructural de las superficies

Para realizar un estudio práctico, se proponen las siguientes condiciones, de un caso real, para homogeneizar los resultados.

Las estructuras que se van a analizar a continuación, han de cubrir una luz en dos direcciones perpendiculares de 10 x 10 m, es decir, aproximadamente 100 m² sin que sus apoyos se introduzcan en esta zona. Valoraremos tanto la superficie cubierta por la superficie como la altura libre máxima alcanzada. El espesor para todas ellas va a ser el mismo, y se establece en 20cm.

Para mejor comprensión de las condiciones de partida se pueden observar en el esquema adjunto.

Las superficies que se van a utilizar, debido a que han de cumplir con los citados requisitos, son las siguientes:

caso 1_cilindro de base circular

caso 2_cilindro de base parabólica

caso 3_esfera

caso 4_paraboloide elíptico

caso 5_conoide

caso 6_paraboloide hiperbólico

En algunas de las superficies se va a realizar más de un análisis haciendo diferentes modelizaciones de los apoyos.

Los resultados se mostrarán de forma matricial, en una tabla, donde se podrán observar los esfuerzos axiales, momentos flectores y deformada de cada uno de los casos analizado.

Para finalizar se realizará un resumen de conclusiones relacionando los resultados obtenidos en todos los casos.

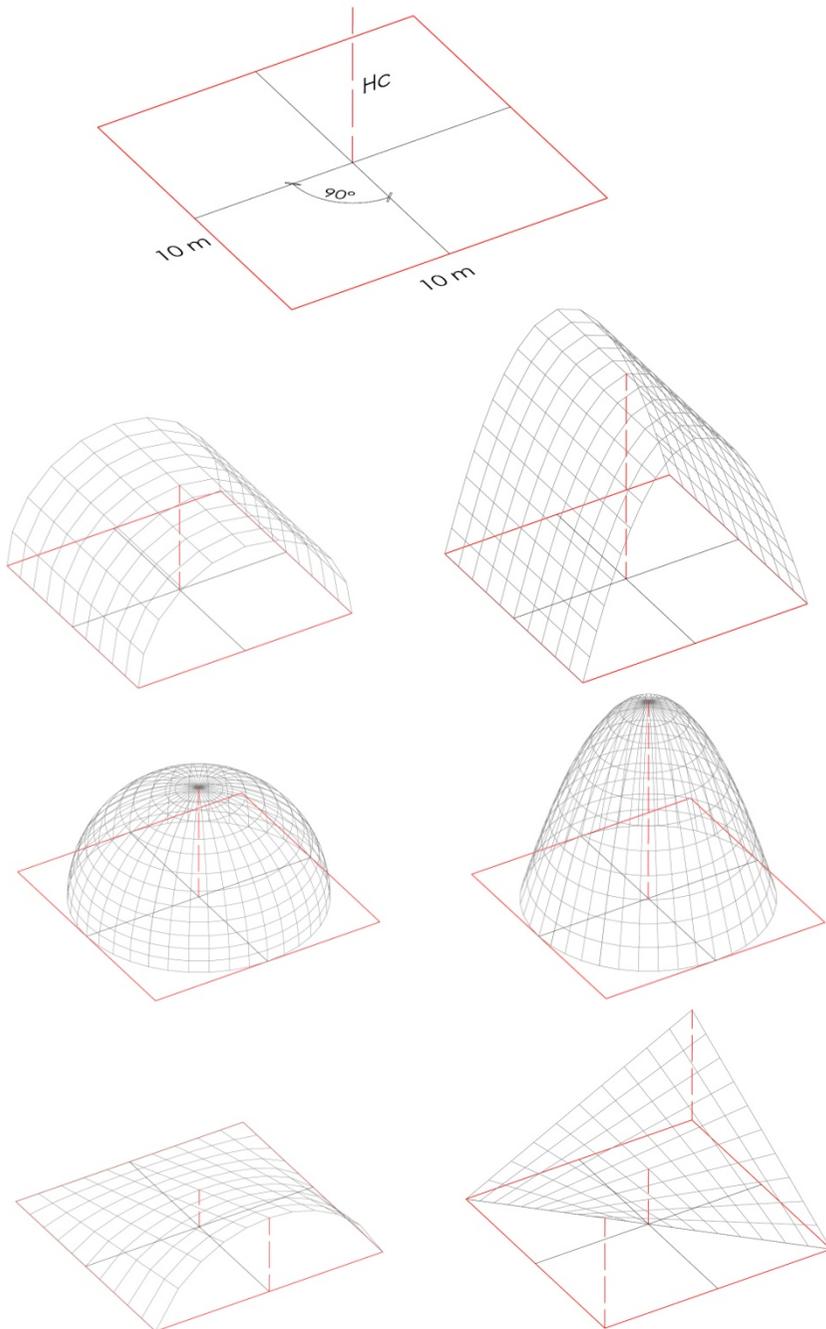
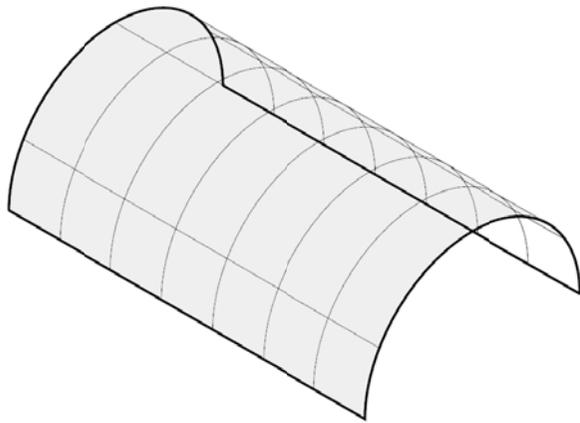
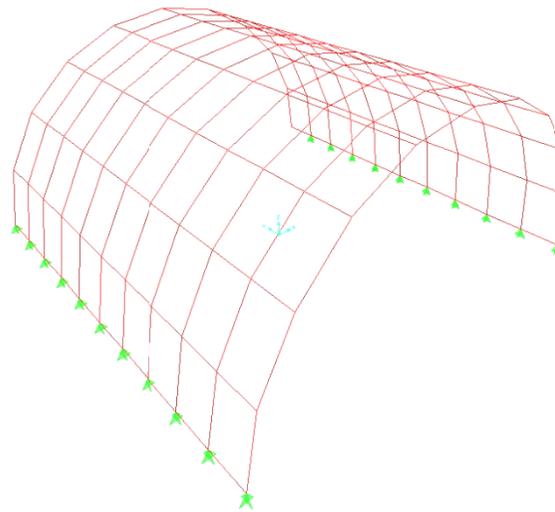


Fig 4.4 - Parametrización del problema

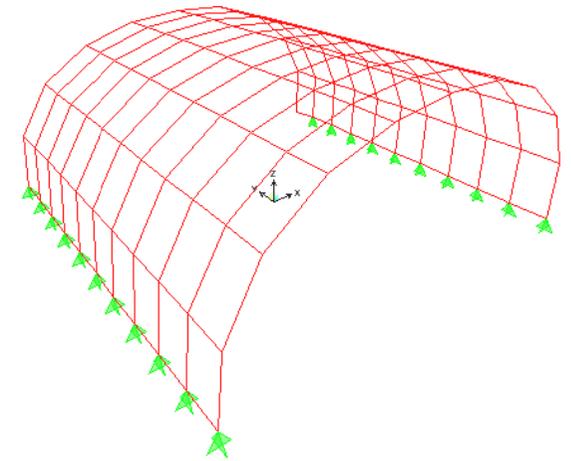
caso 1a_cilindro de base circular



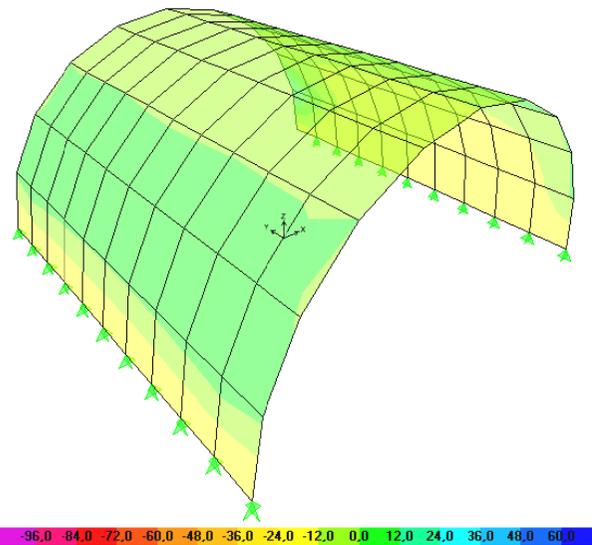
modelización



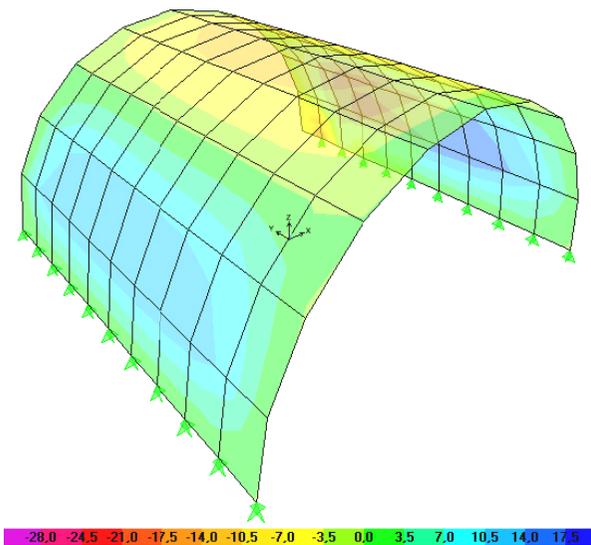
deformada en ELS



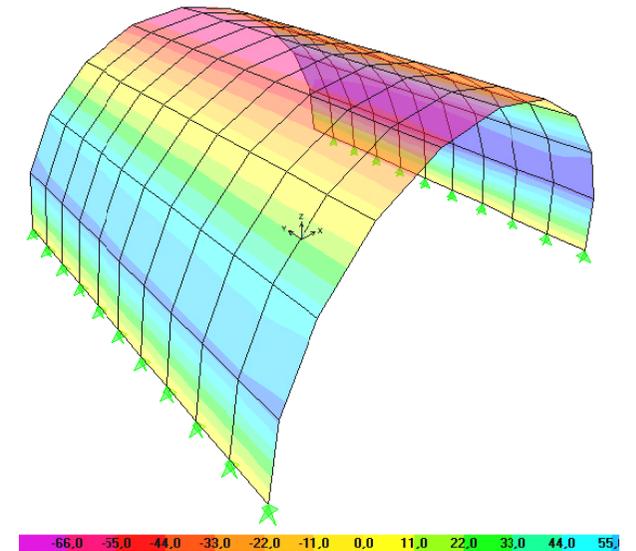
axiles



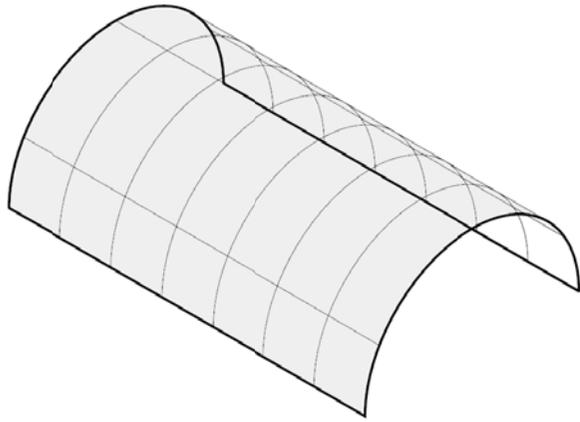
momentos flectores transversales



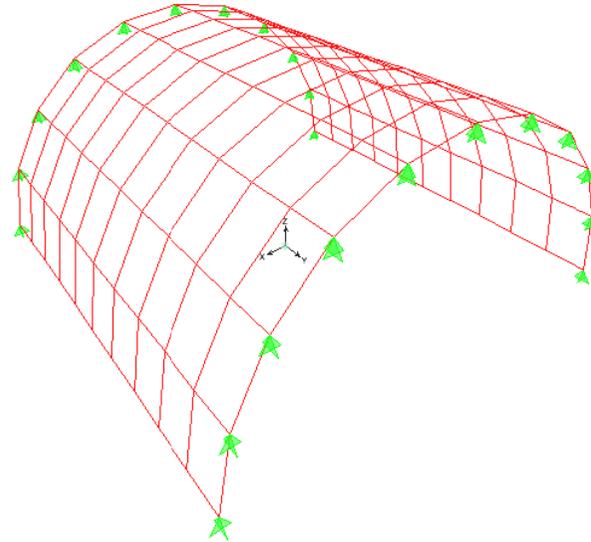
momentos flectores longitudinales



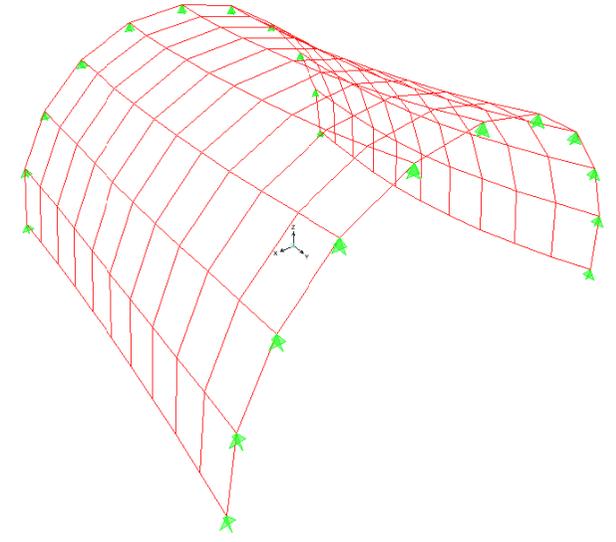
caso 1b_cilindro de base circular



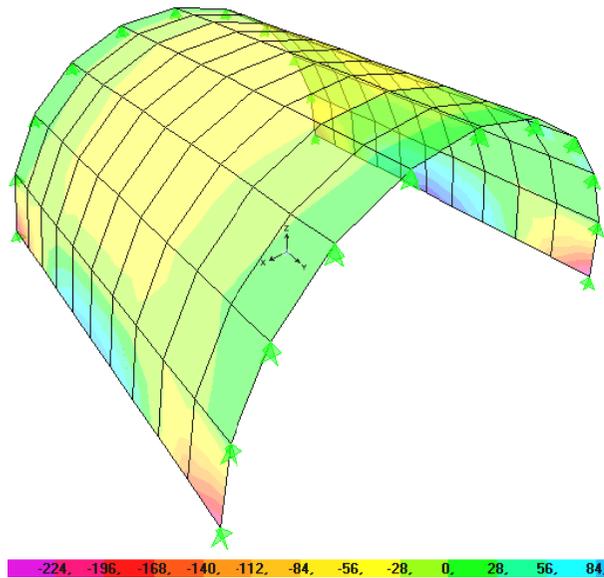
modelización



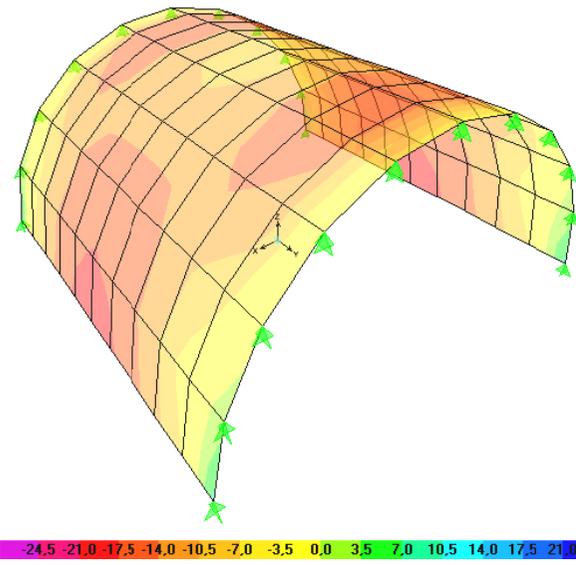
deformada en ELS



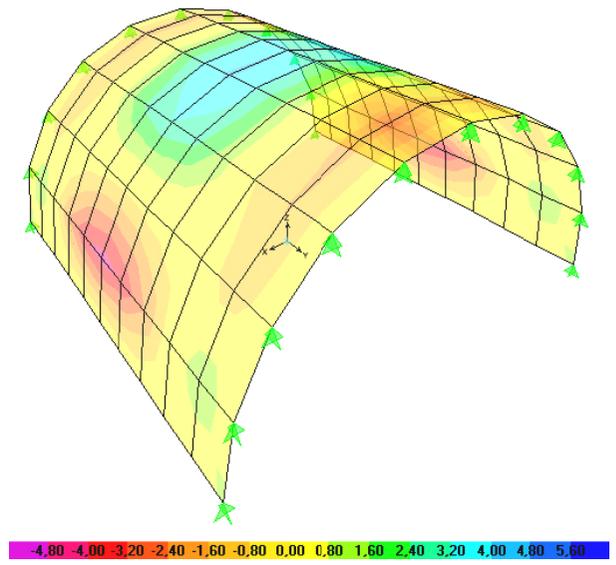
axiles



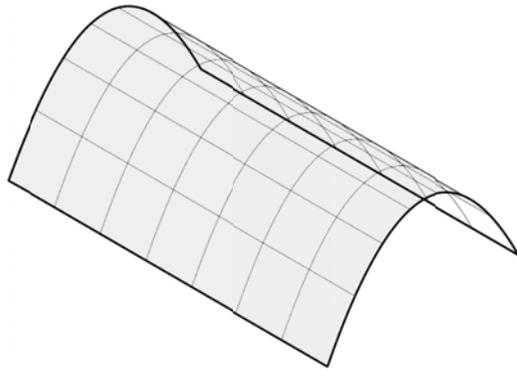
momentos flectores transversales



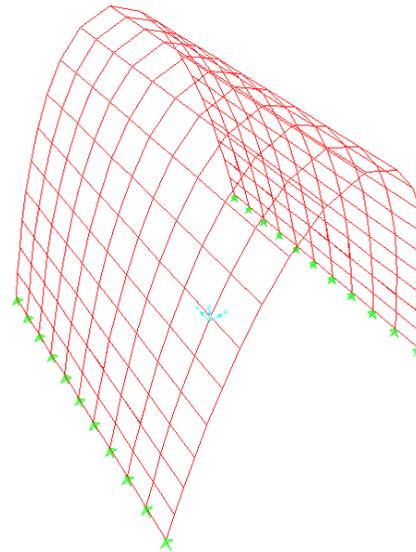
momentos flectores longitudinales



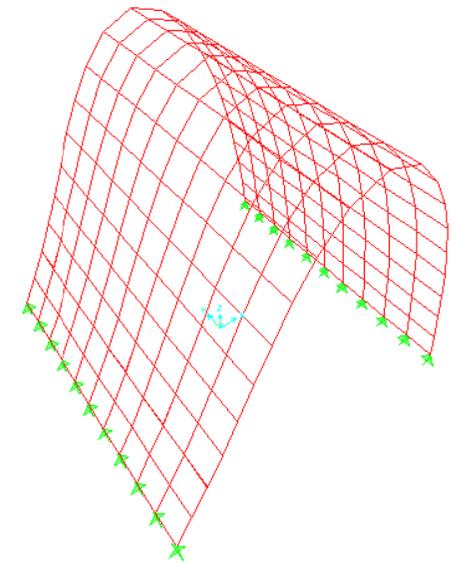
caso 2a_cilindro de base parabólica



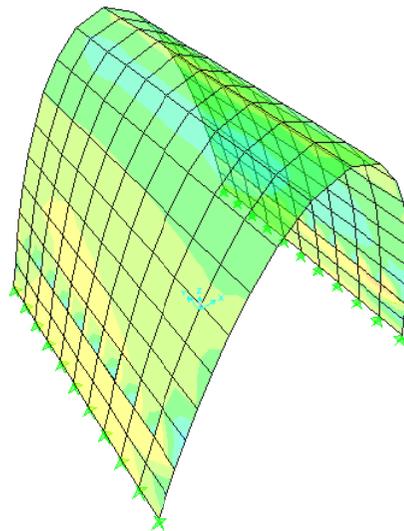
modelización



deformada en ELS

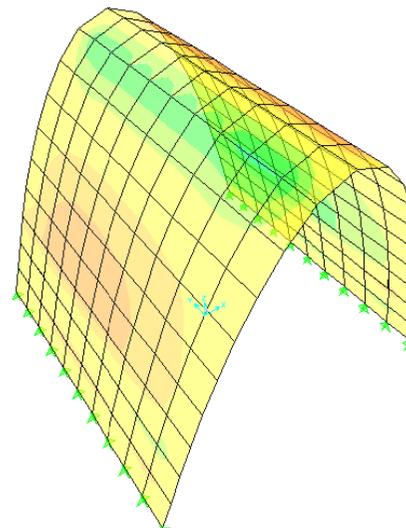


axiles



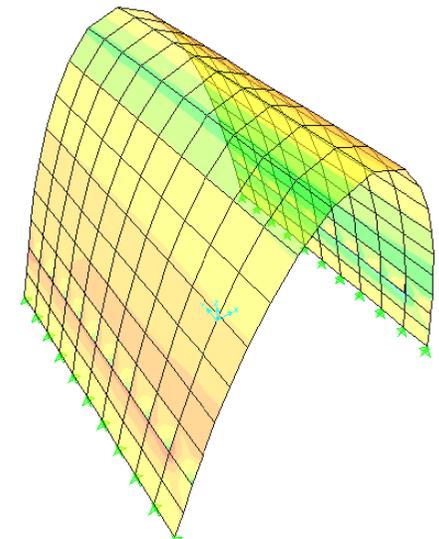
-36,0 -31,5 -27,0 -22,5 -18,0 -13,5 -9,0 -4,5 0,0 4,5 9,0 13,5 18,0 22,5

momentos flectores transversales



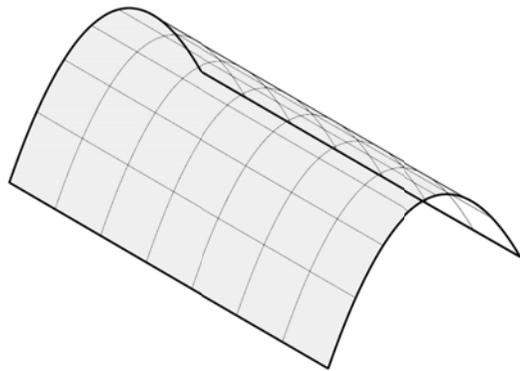
-2,40 -2,00 -1,60 -1,20 -0,80 -0,40 0,00 0,40 0,80 1,20 1,60 2,00 2,40 2,80

momentos flectores longitudinales

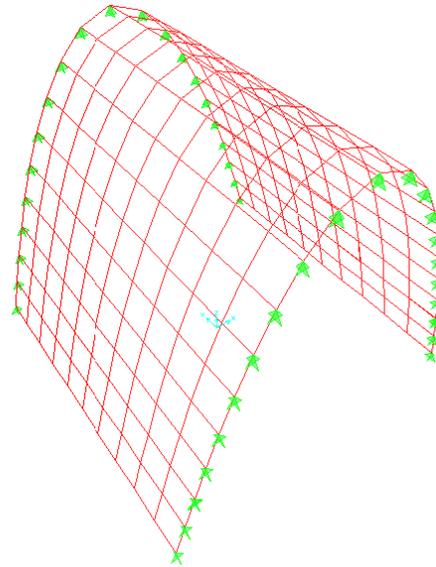


-15,6 -13,0 -10,4 -7,8 -5,2 -2,6 0,0 2,6 5,2 7,8 10,4 13,0 15,6 18,2

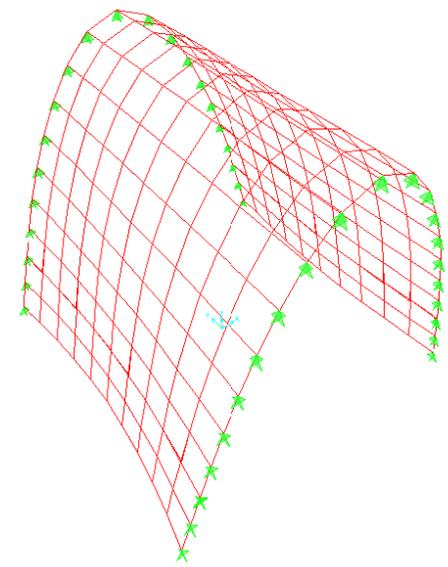
caso 2b_cilindro de base parabólica



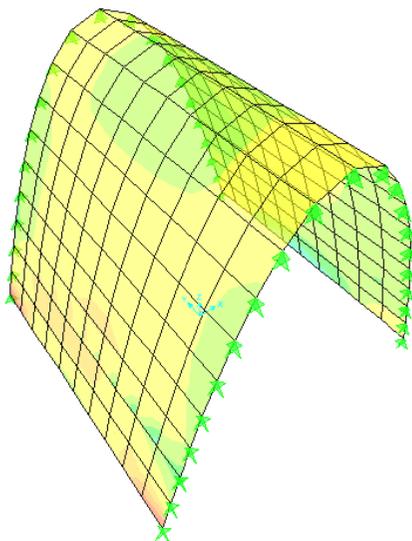
modelización



deformada en ELS

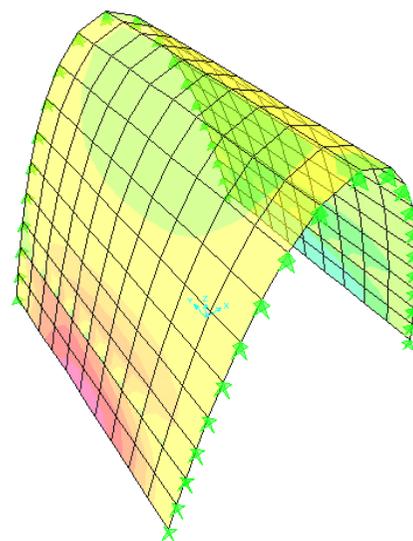


axiles



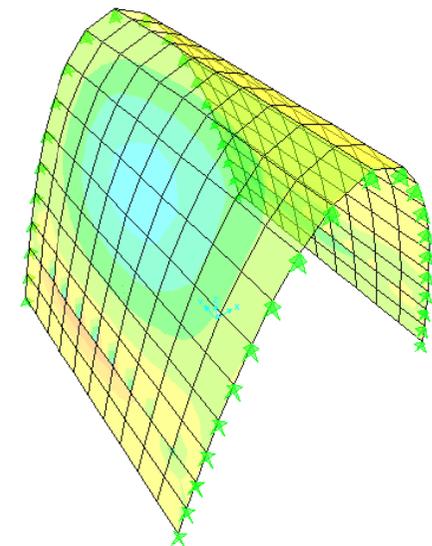
-385, -330, -275, -220, -165, -110, -55, 0, 55, 110, 165, 220, 275, 330

momentos flectores transversales



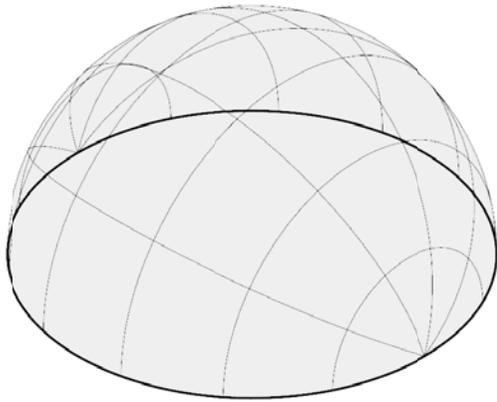
-24,5 -21,0 -17,5 -14,0 -10,5 -7,0 -3,5 0,0 3,5 7,0 10,5 14,0 17,5 21,0

momentos flectores longitudinales

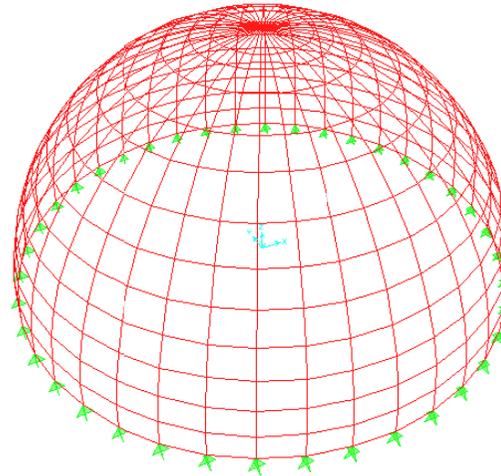


-16,8 -14,4 -12,0 -9,6 -7,2 -4,8 -2,4 0,0 2,4 4,8 7,2 9,6 12,0 14,4

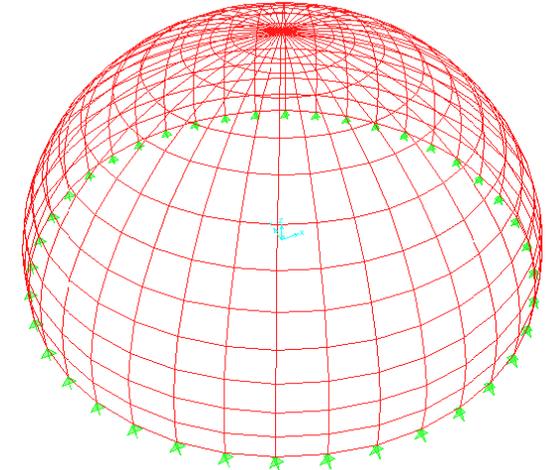
caso 3_esfera



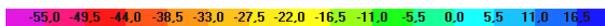
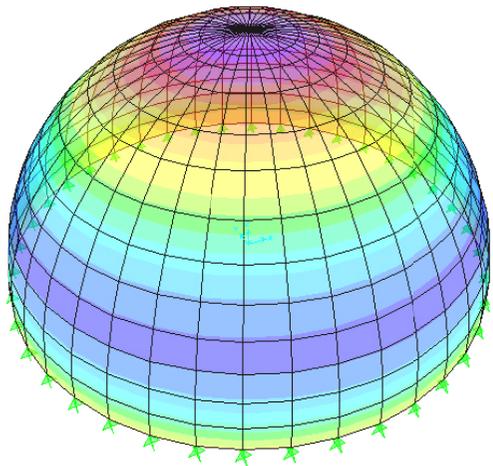
modelización



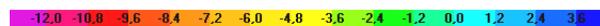
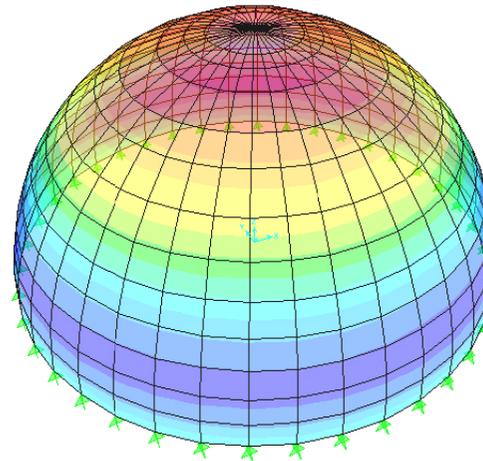
deformada en ELS



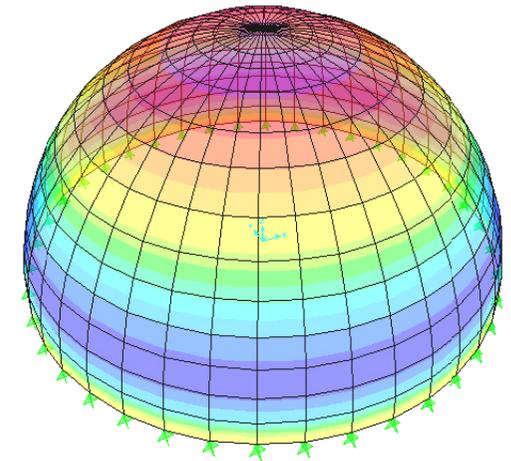
axiles



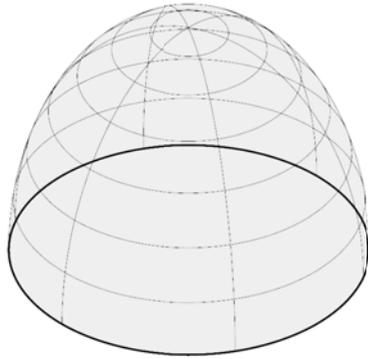
momentos flectores transversales



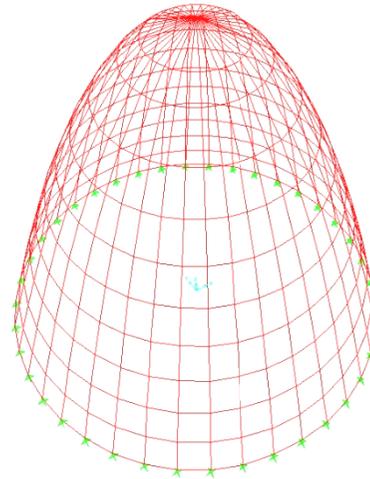
momentos flectores longitudinales



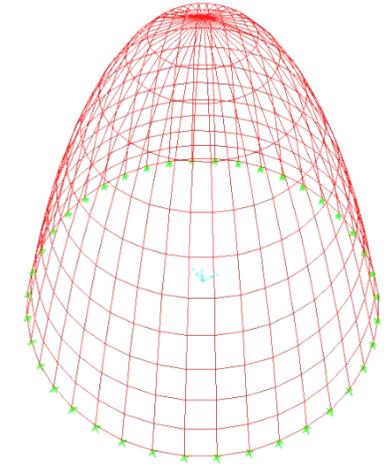
caso 4_paraboloide elíptico



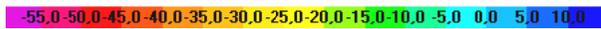
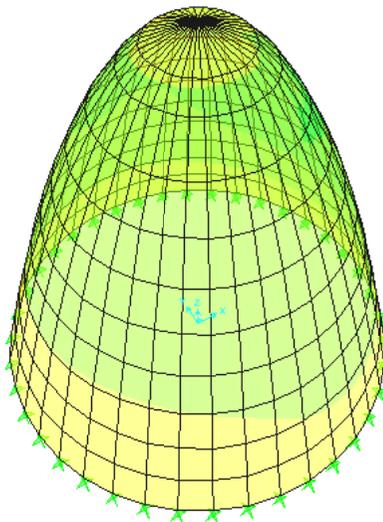
modelización



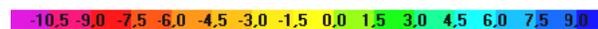
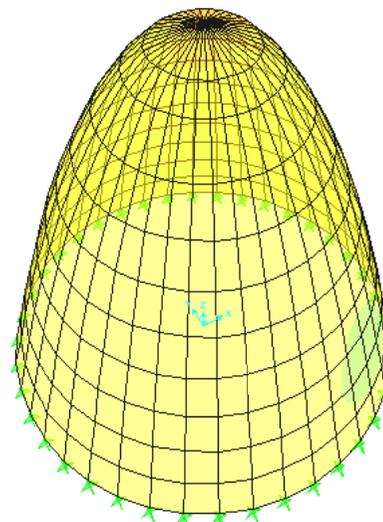
deformada en ELS



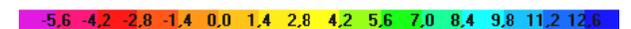
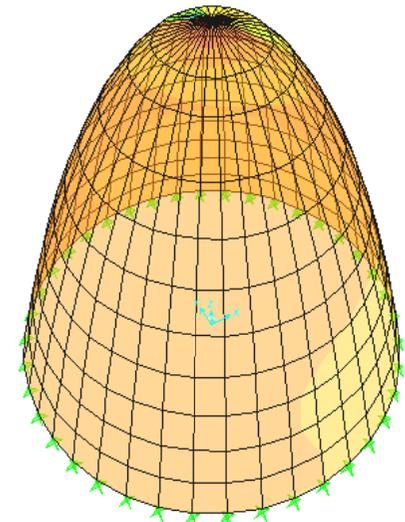
axiles



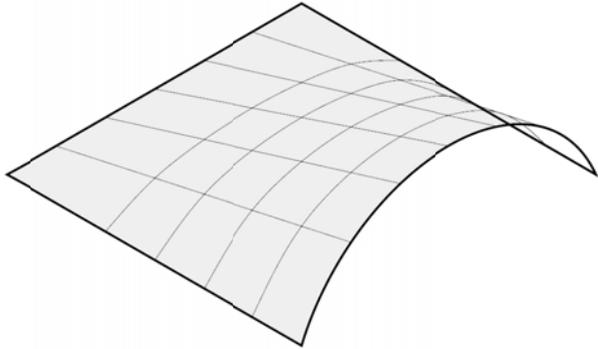
momentos flectores transversales



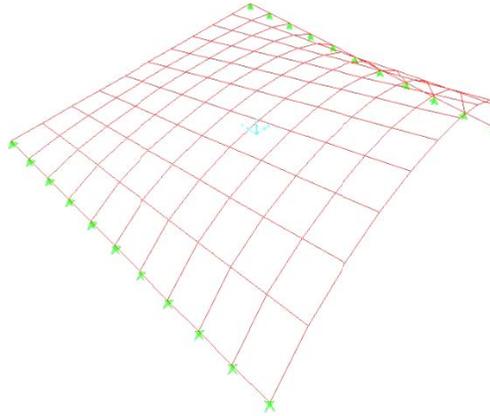
momentos flectores longitudinales



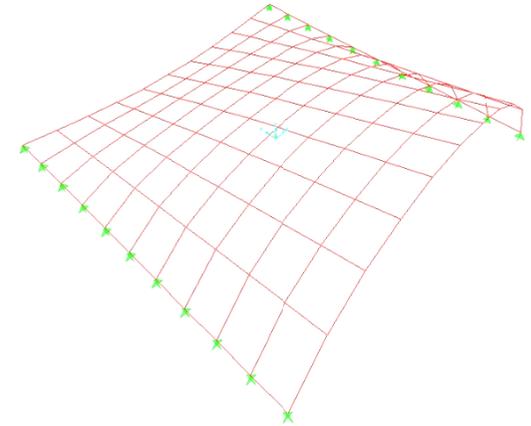
caso 5_conoide



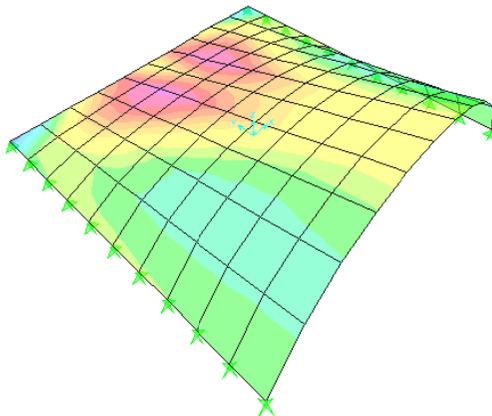
modelización



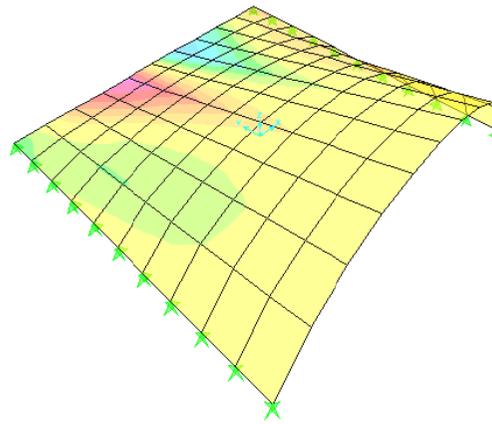
deformada en ELS



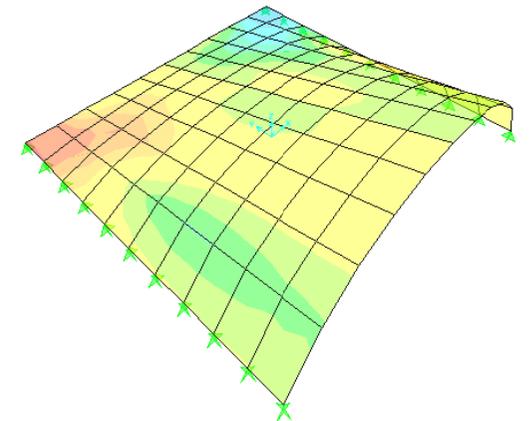
axiles



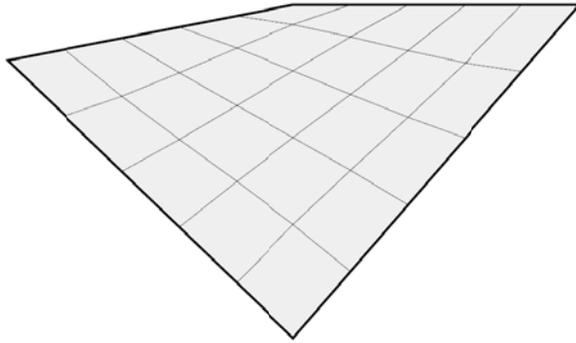
momentos flectores transversales



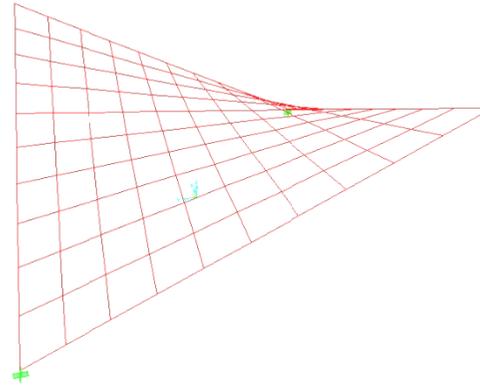
momentos flectores longitudinales



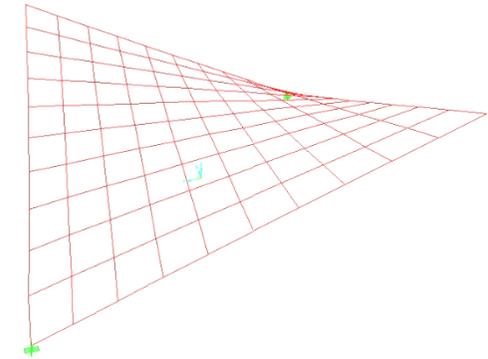
caso 6_paraboloide hiperbólico



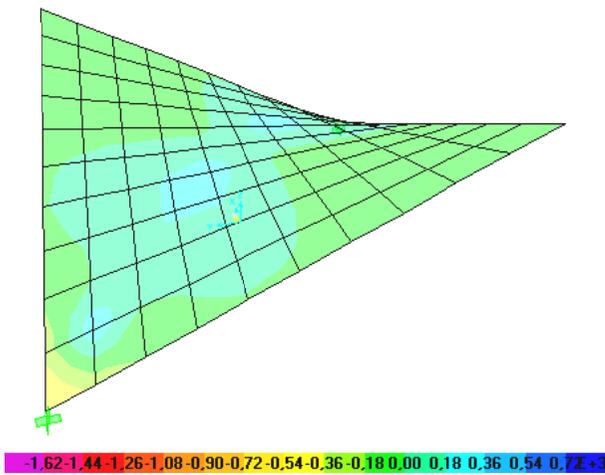
modelización



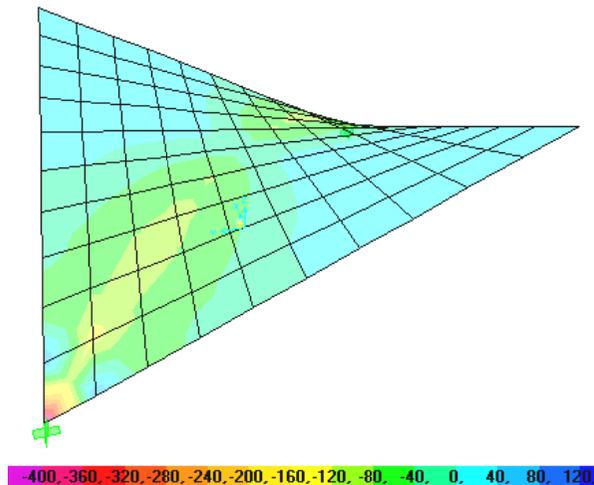
deformada en ELS



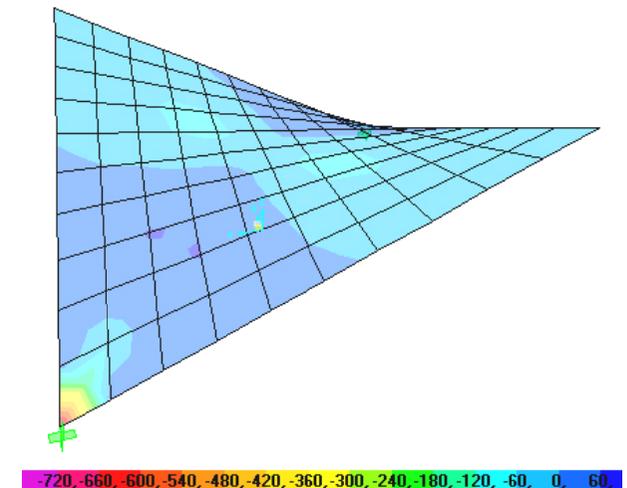
axiles



momentos flectores transversales



momentos flectores longitudinales



caso	superficie	sup	Hc	Hmax	Nmax-min		M1max-min		M2max-min		def
		m ²	m	m	kN	kN	kN· m	kN· m	kN· m	kN· m	m
1 a	cilindro - circunferencia	100.00	5.00	5.00	6.50	-34.15	13.65	-13.10	68.10	-65.40	1.51E-04
1 b	cilindro - circunferencia	100.00	5.00	5.00	105.30	-217.10	7.80	-18.75	4.10	-4.3	9.10E-05
2 a	cilindro - parábola	100.00	9.33	9.33	6.25	-8.30	-1.00	-1.20	-5.35	-5.90	1.65E-03
2 b	cilindro - parábola	100.00	9.33	9.33	30.75	-118.60	10.20	-22.95	8.15	-1.90	7.75E-04
3	esfera	78.54	5.00	5.00	16.90	-60.20	4.00	-12.00	18.35	-12.00	4.79E-05
4	paraboloide elíptico	78.54	9.33	9.33	-24.85	-28.05	0.10	-4.80	0.05	-10.00	5.04E-05
5	conoide	100.00	1.66	3.33	113.85	-280.05	123.35	-127.50	56.30	-55.45	5.25E-04
6	paraboloide hiperbólico	100.00	2.50	5.00	256.95	-654.60	29.80	-427.10	61.10	-721.83	1.53E-03

sup Superficie cubierta
Hc Altura central
Hmax Altura máxima
Nmax-min Axil máximo y mínimo en ELU
M1max-min Momento flector transversal máximo y mínimo en ELU
M2max-min Momento flector longitudinal máximo y mínimo en ELU
def Deformada máxima en ELS

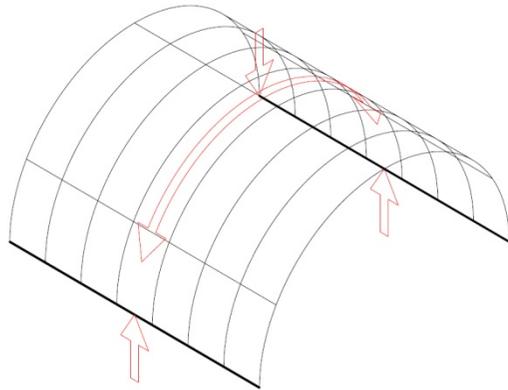


Fig 4.5 - Forma de trabajo del caso 1a

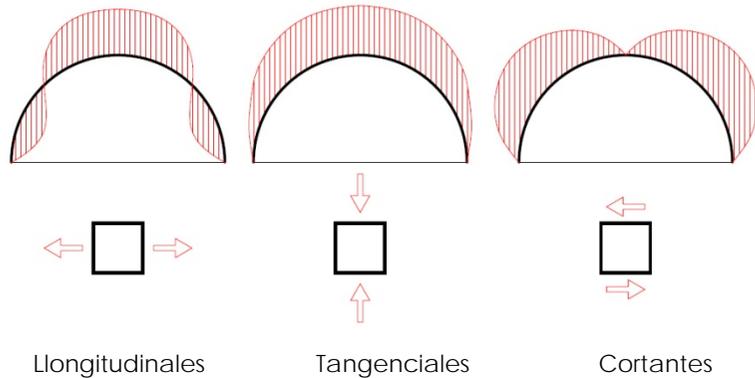


Fig 4.6 - Simplificación de los esfuerzos de membrana - caso 1a

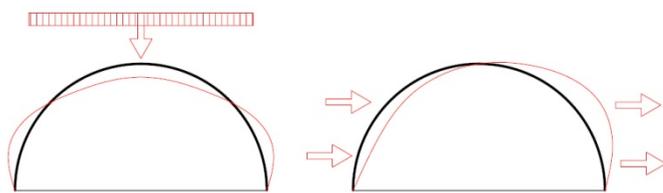


Fig 4.7 - Deformaciones de la superficie frente a las cargas - caso 1a

4.5_Conclusiones del estudio

CILINDRO DE BASE CIRCULAR

Para esta superficie se han realizado dos diferentes modelizaciones cambiando las condiciones de apoyo:

- En la primera se han apoyado de manera articulada las dos generatrices longitudinales del cilindro (caso1a).
- En la segunda lo que se ha hecho es apoyar, también mediante apoyos articulados, los arcos de circunferencia exteriores (caso 1b).

Esta diferencia en el modelizado de los apoyos se ha planteado para estudiar la diferencia de comportamiento de la misma superficie frente a condiciones diferentes de vinculación exterior.

Caso 1ª:

La bóveda que se encuentra apoyada por sus dos generatrices rectas, frente a las solicitaciones verticales, trabaja tensionalmente como un arco sometido a las compresiones y a las flexiones que se generan transversalmente, aunque su trazado no sea exactamente la antifunicular de las cargas.

En los apoyos, está bóveda cilíndrica generan cargas verticales y empujes horizontales, obligando que éstos tengan la dimensión suficiente como para lograr que su peso propio centre la resultante sobre la base de sustentación para mantener el conjunto en situación de equilibrio. Además estos empujes producen esfuerzos cortantes tendentes a producir deslizamientos. Estos problemas no son desconocidos, ya que en la construcción de catedrales ya se solucionaban con la construcción de contrafuertes.

El problema que nos podríamos encontrar es si el apoyo fuera empotrado. Entonces tendríamos momentos flectores en la base de la bóveda, lo que podrían suponer otro problema, ya que normalmente existirá una diferencia notable entre la sección de la bóveda y los apoyos (por el motivo que hemos apuntado antes). Esto lo hemos conseguido solucionar con el apoyo articulado, que elimina los esfuerzos de flexión en el apoyo.

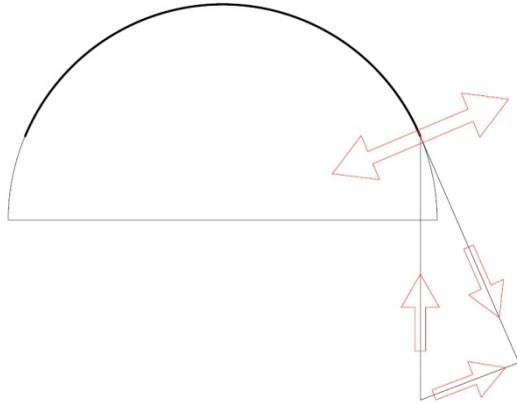


Fig 4.8 – Apoyos no verticales de la superficie

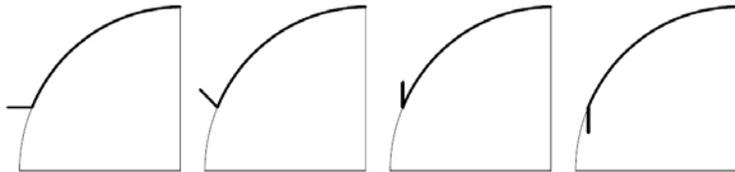


Fig 4.9 – Diferentes posibilidades de vigas de rigidez

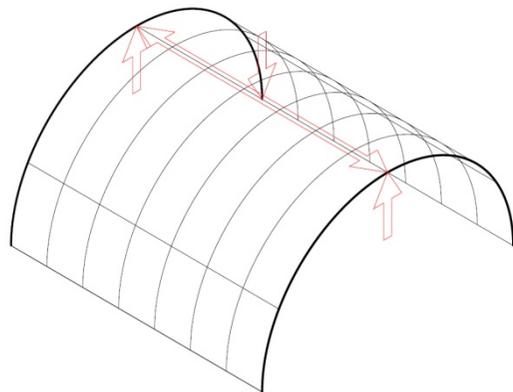


Fig 4.10 – Forma de trabajo del caso 1b

Por lo que se refiere a las deformaciones, frente a cargas verticales el comportamiento de esta superficie se puede considerar de muy bueno. Estas deformaciones son simétricas, lo que estabiliza la estructura. No pasa lo mismo para las cargas de viento, que generan una deformación asimétrica y hace que los arcos se alejen todavía más de la funicular de cargas, creando excentricidades de las cargas. Un error habitual en este tipo de estructuras es no considerar la acción del viento, y como es evidente tras los resultados obtenidos, no es nada despreciable.

Otro factor a tener en cuenta es la forma de la superficie cuando llega a los apoyos. La sección transversal de la superficie cilíndrica debe ser tal que las tangentes en sus extremos sean verticales, ya que si la tangente final no es vertical, existirá una componente de la reacción normal a la superficie que provocará una flexión en el borde. Debido a esto, si fuera necesario se dispondrán unas vigas de rigidez en los bordes para que resistan las flexiones, sin embargo la diferencia de rigidez entre lámina y viga creará unas perturbaciones de borde con momentos flectores diferentes. Un ejemplo ilustrativo de este fenómeno lo podemos observar en la vivienda taller de Joan Miro diseñada por Josep Lluís Sert.

Caso 1b:

En este caso se ha optado por modelizar los apoyos en los arcos de circunferencia extremos. De esta manera hemos obtenido una lámina cilíndrica, cuyo mecanismo resistente es muy diferente al de una bóveda a pesar de ser formalmente iguales.

Bajo estas condiciones de apoyo, podemos considerar las generatrices continuas, lo que permite que la bóveda trabaje a flexión según esa dirección. Esto a su vez provoca que cada arco se ayude de los contiguos, repartiendo el exceso de carga que puede concentrarse en él, produciendo así la desaparición de la función primaria del arco.

El funcionamiento tensional de una lámina de este tipo deja de ser el de una bóveda pasando a ser más semejante al de una viga y por tanto deja de ser de interés para nosotros.

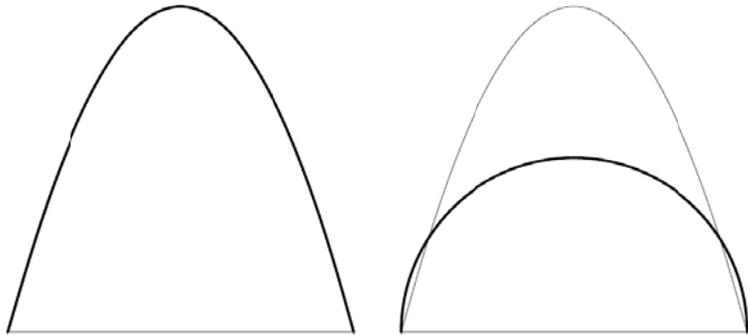


Fig 4.11 – Comparación entre la directriz parabólica y circular



Fig 4.12 – Edificio en construcción en Santorini (Grecia) – Agosto 2011

CILÍNDRICO DE BASE PARABÓLICA

Para este cilindro se han realizado los mismos supuestos de apoyo con un resultado similar al anterior. El caso 2a resulta interesante para el trabajo, mientras que el caso 2b, al igual que el 1b, pasa a tener un comportamiento tipo viga, por lo que no lo analizaremos con más profundidad.

Caso 1a:

Al igual que en el caso 1a, la superficie apoya en dos generatrices rectas. La diferencia con el caso anterior es la directriz de la superficie. Mientras que antes se trataba de una circunferencia, la cual se alejaba de la funicular de las cargas, en este caso la directriz es parabólica, y podríamos decir que prácticamente coincide con ella. Este detalle es el que hace que la superficie esté trabajando prácticamente toda a compresión. Tan solo la carga de viento horizontal hace que se generen unas tracciones de poca importancia.

Además, tal y como se puede apreciar en la imagen adjunta, esta directriz mejora sensiblemente la verticalidad en los apoyos, casi eliminando cualquier esfuerzo de flexión en estos. El único inconveniente que tiene este detalle es que para conseguir esa "casi" verticalidad en el apoyo que elimine la componente horizontal, la directriz ha de tener una altura considerablemente mayor que la de la circunferencia. Esto aumenta la superficie de hormigón a construir, por lo que a un mismo espesor tendríamos mucha más cantidad de material.

Por tanto, este tipo de superficie mejora las capacidades resistente de las superficies cilíndricas de base circular ya que se aproxima más al trazado de la catenaria, pero por otra parte, tienen mayor superficie, con el consiguiente incremento de la cantidad de material a utilizar.

Por lo que se refiere a la ejecución, no tienen diferencias notables, ya que se tratan de superficies regladas fácilmente encofrables con tablas rectas y sus directrices tienen un trazado geométrico básico.

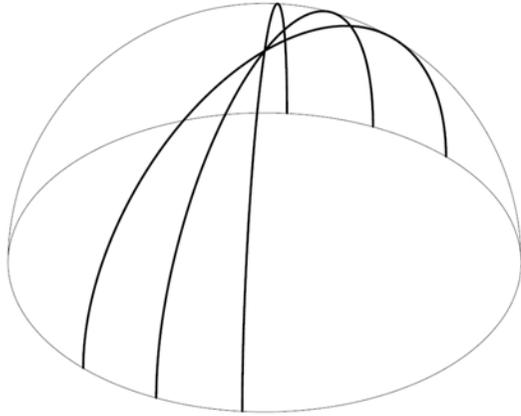


Fig 4.13 – Meridianos de la esfera = arcos funiculares

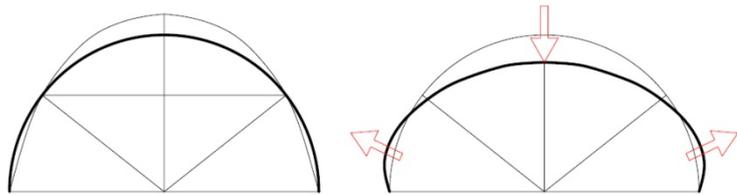


Fig 4.14 – Comparación meridiano con funicular y deformación de la cúpula frente a carga vertical

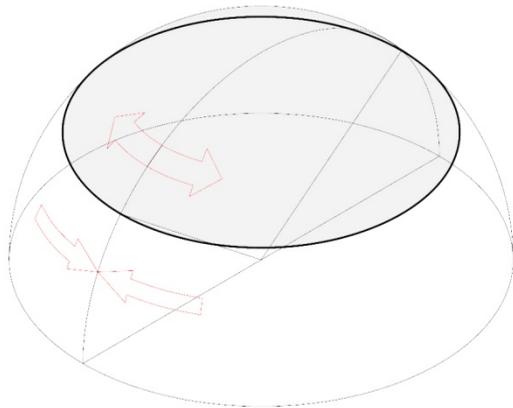


Fig 4.15 – Esfuerzos de tracción y compresión

ESFERA

La cúpula esférica estudiada se ha modelado mediante un apoyo continuo en todo su perímetro de manera articulada. Otras posibilidades que no se han contemplado en este estudio y que podrían ser objeto de una continuación de la investigación podrían ser la reducción de los apoyos a un número reducido, la modelización de estos como empotramientos, la generación de bóvedas derivadas de la esférica pura como la vaida, la rebajada...

El mecanismo resistente de la cúpulas esférica se basa en que cada meridiano (sección de eje vertical que pasa por su centro) se comporta como si fuera un arco funicular, resistiendo las cargas sin desarrollar apenas tensiones de flexión.

Tan solo es posible que aparezcan flexiones en los apoyo dependiendo de las condiciones externas que le hayamos dado a la estructura. Si los bordes experimentaran un libre movimiento horizontal en los apoyos, la cúpula no estaría sometida a flexiones. En el caso de que los apoyos se modelarán mediante empotramientos, existirían pequeñas flexiones en los arranques, pero que serían amortiguados por la propia cúpula sin problemas debido a la acción de los anillos paralelos horizontales.

Los paralelos (secciones por planos horizontales) de la cúpula restringen el desplazamiento lateral, apareciendo de esta manera tensiones en anillo. La consecuencia de este hecho es el doble comportamiento de membrana que se da lugar en la cúpula. En la parte superior (delimitada por un ángulo aproximado de 52°, tal y como se puede apreciar en las imágenes del cálculo en el estudio) la deformación de los arcos meridianos es hacia el interior, apareciendo esfuerzos de compresión en esta zona. Sin embargo, en la zona inferior (debajo de este paralelo a 52°) la esfera se deforma hacia el exterior, actuando estos anillos paralelos mediante fuerzas de tracción.

Las deformaciones en la parte alta de la cúpula son las menores de todos los casos estudiados por lo que podemos considerar que el comportamiento de estas superficies frente a deformaciones es muy bueno, siendo estas casi nulas.

PARABOLOIDE ELÍPTICO

La cúpula en forma de paraboloides elíptico se ha modelizado de manera similar a la de forma esférica con el fin de obtener resultados comparables. Igual que en el caso anterior se podrían estudiar más casos que podrían formar parte de una investigación posterior.

En este caso de cúpula, nos encontramos con que todos los meridianos o secciones verticales son parábolas que se aproximan a la forma de la funicular de cargas. Debido a esto podemos ver en los resultados de cálculo que toda la cúpula traba a compresión y que no aparece ningún esfuerzo de tracción. Como hemos indicado en apartados anteriores de este trabajo, el hormigón es un material que tiene como una de sus características principales su buen trabajo frente a esfuerzos de compresión. Por lo tanto nos encontramos ante el caso óptimo de superficie.

Por lo que se refiere a las deformaciones, al igual que la cúpula esférica, nos encontramos en uno de los casos más favorables ya que la deformación que se produce en su parte más alta es la menor (junto con la esfera) de las estudiadas.

El único inconveniente que puede tener esta cúpula, al igual que los cilindros de base parabólica, es el incremento de superficie de hormigón, que puede llegar a ser del orden del doble.

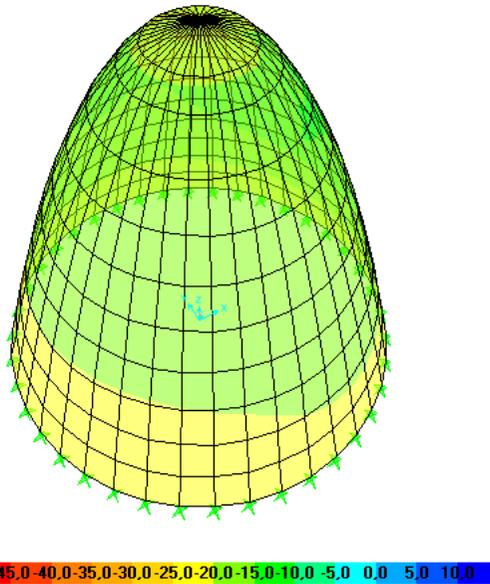


Fig 4.16 – Esfuerzos axiales de compresión en el paraboloides elíptico

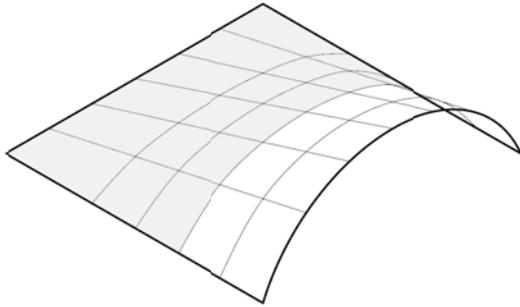


Fig 4.17 – Conoide con indicación de la zona de comportamiento tipo viga biapoyada

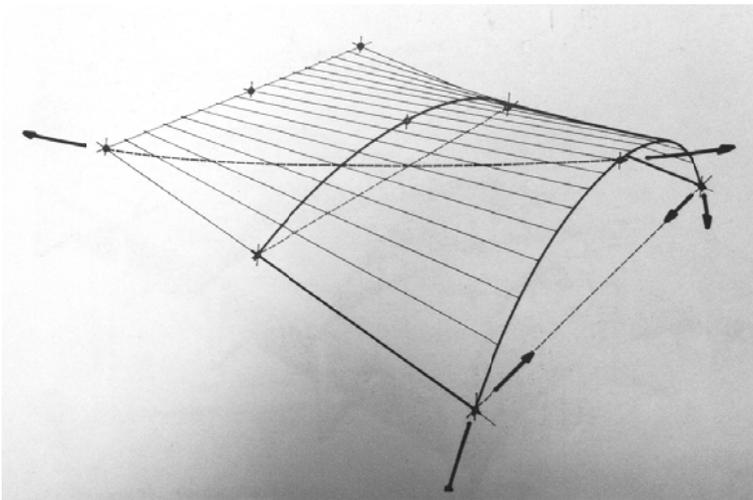


Fig 4.18 – Esquema de conoide para la fábrica Fernández de Félix Candela (Faber, 1981)

CONOIDE

La superficie conoidal apoyada en dos de sus generatrices tiene un comportamiento muy diferente dependiendo si nos acercamos a la directriz curva o a la directriz recta que la definen.

En las zonas próximas a la directriz curva, el comportamiento es muy similar al del cilindro de base circular apoyado en sus generatrices. Este comportamiento es aceptable y se basa en la distribución de esfuerzos según los arcos transversales de la superficie. Conforme estos arcos se acercaran a la funicular de las cargas el comportamiento mejoraría sustancialmente.

La zona problemática es la próxima a la directriz recta, donde la curvatura de los arcos va disminuyendo hasta anularse en ella. En esta zona el comportamiento es prácticamente el de viga biapoyada, por lo que no tiene interés para nosotros.

Por este motivo, en el diseño de las bóvedas conoidales para la fábrica Fernández realizado por Félix Candela evitaba esta "cola" del conoide, no llegando a materializar la zona que trabaja como viga. En la imagen se puede apreciar este detalle del diseño.

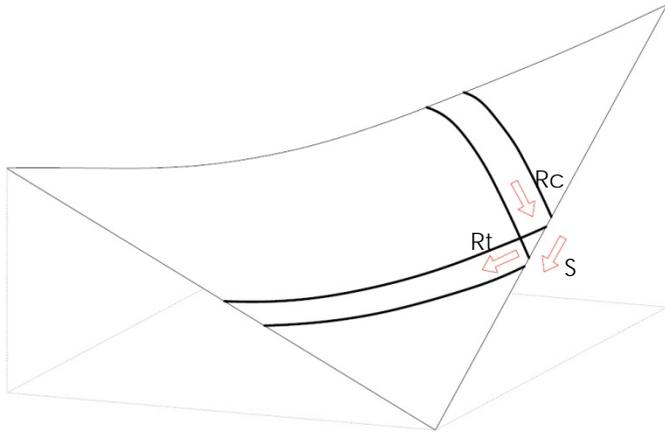


Fig 4.19 – Comportamiento estructural del paraboloides hiperbólico



Fig 4.20 – Apoyo articulado en la cubierta del restaurante del Parc Oceanogràfic de Valencia

PARABOLOIDE HIPERBÓLICO

El paraboloides hiperbólico es quizás la superficie más compleja de analizar de todas las estudiadas.

Para entender el comportamiento de este tipo de superficies vamos a considerar la superficie dividida en dos series de arcos parabólicos que siguen la dirección de las parábolas principales. Estos arcos, también denominados por algunos autores fajas, funcionan una de las familias a compresión y otra a tracción. De esta manera se transmiten las cargas que soporta la estructura hasta los bordes del paraboloides dando una resultante de tracción R_t y una de compresión R_c . Estas se combinan y dan como resultado una fuerza S que sigue la dirección del borde, tal y como muestra la figura adjunta. Estas resultantes se van sumando hasta llegar al apoyo, que en caso del análisis realizado, está modelizado como un empotramiento y tiene que soportar las flexiones que la resultante S genera.

Indicamos en el análisis de la cubierta del restaurante del Parc Oceanogràfic de Valencia que los apoyos se habían diseñado como articulaciones y que esta era una de las diferencias fundamentales con las estructuras anteriores diseñadas por Candela. De esta manera, los ingenieros Lázaro y Domingo lo que consiguieron fue que no aparecieran esfuerzos de flexión en los apoyos resolviendo el problema anteriormente expuesto.

El comportamiento del paraboloides hiperbólico analizado es fundamentalmente a compresión debido a los arcos parabólicos comprimidos, salvo en la proximidad de los apoyos onde los esfuerzos cambian bruscamente debido al empotramiento. De ahí la importancia de la novedad introducida en la cubierta del Parc Oceanogràfic.

Las deformaciones en los extremos de los vuelos son del orden de 1,5 mm , por lo que se encuentran al límite de lo admisible.

En este caso se ha estudiado un solo paraboloides apoyado en un cuadrilátero alabeado, pero para posteriores investigaciones sería interesante analizar combinaciones de este formando cubiertas muy interesantes como las que se van a desarrollar en el catálogo práctico de diseño, incluso paraboloides seccionados de manera que los bordes no fueran rectos si no curvos.

CONCLUSIÓN FINAL

En general el comportamiento de las superficies estudiadas se puede considerar bueno. Es cierto que no en todos los casos las estructuras tienen una resistencia por forma óptima, pero sí que con un espesor de hormigón de 20 cms hemos conseguido cubrir luces considerables sin que la deformación haya sido excesiva.

La forma de la superficie es determinante para el mecanismo portante de las estructuras de superficie activa. El diseño de una forma correcta, junto con la continuidad de la superficie, es requisito previo.

Por otro lado, la capacidad de estas superficies portantes para desviar fuerzas, es decir, transmitir cargas, depende de la situación de la superficie respecto a la dirección de la fuerza actuante. Frente a esfuerzos gravitatorios o de uso habitual en edificación, su comportamiento se acerca al óptimo. No se puede decir lo mismo de su comportamiento frente al esfuerzo de viento, el cual se desprecia en muchas de las ocasiones en el cálculo.

En resumen podríamos concluir que la superficie que mejor ha funcionado para los parámetros establecidos como hipótesis al comienzo del estudio es el paraboloide elíptico. Esto es debido a varios aspectos:

- Es una superficie de doble curvatura
- Es sinclástica
- Las dos direcciones son favorables para resistir esfuerzos verticales
- Sus curvaturas son parábolas y por lo tanto se aproximan a la funicular de las fuerzas

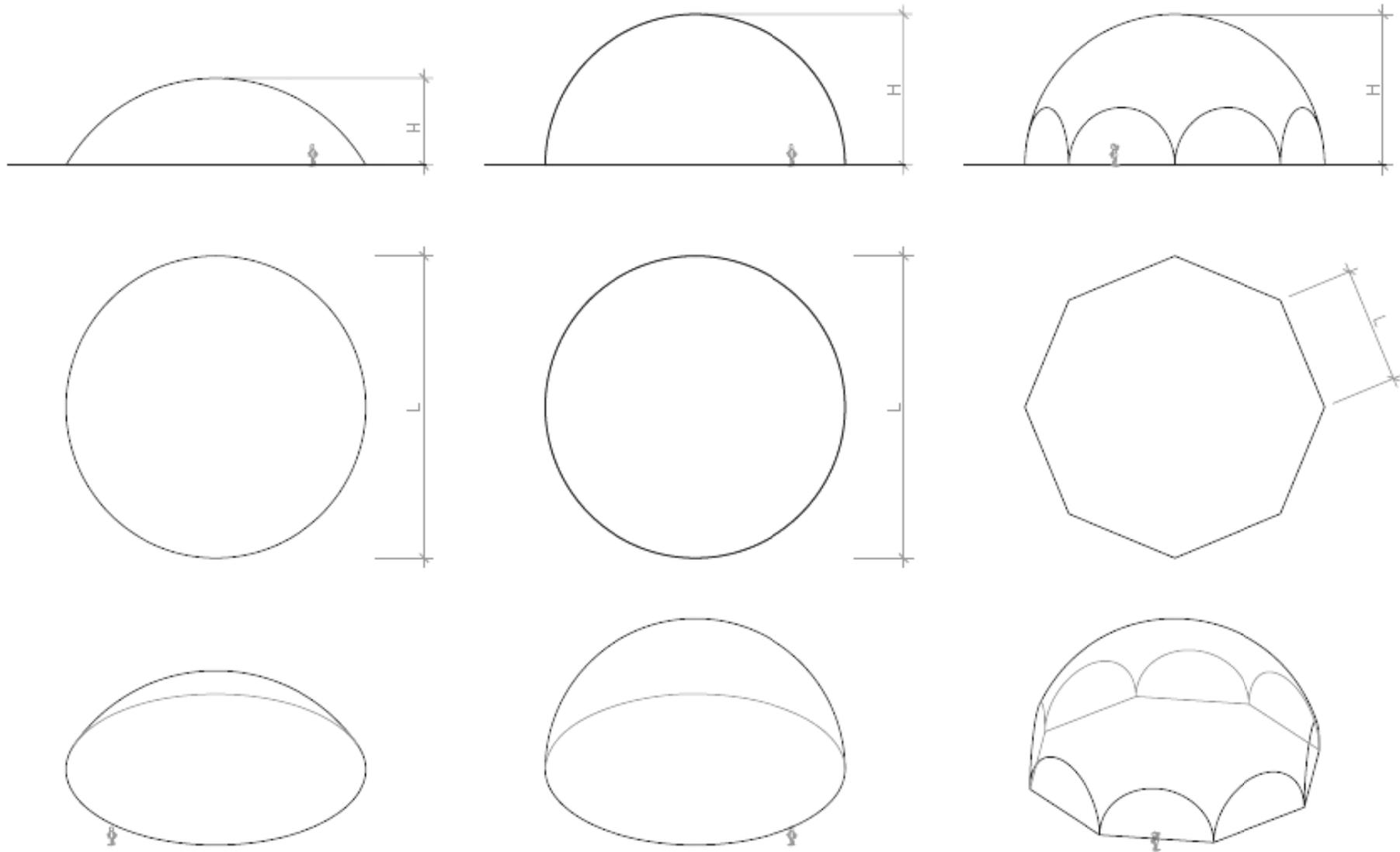
El resto de superficies analizadas no cumplen alguna condición de las indicadas y por tanto su comportamiento, a pesar de no ser malo, empeora el del paraboloide elíptico.

Queda para investigaciones posteriores el estudiar derivaciones de las superficies estudiadas en este trabajo, combinaciones de las mismas y darles diferentes condiciones de apoyo.

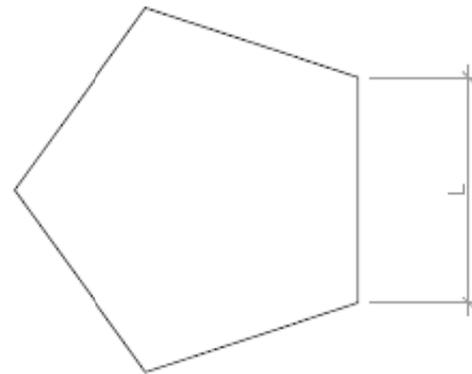
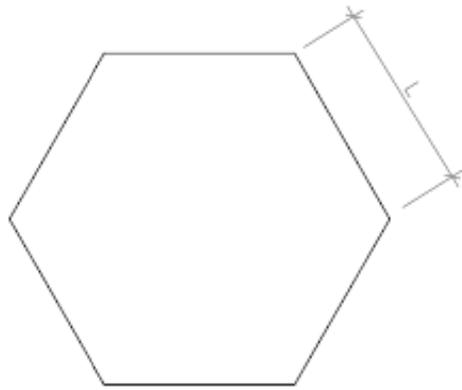
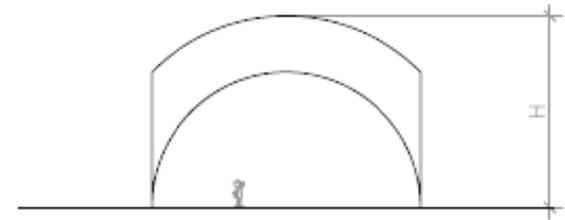
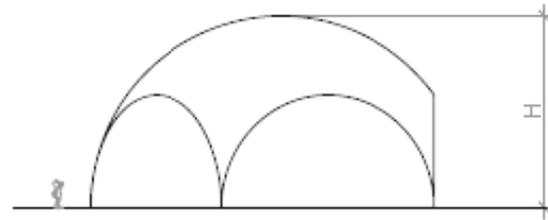
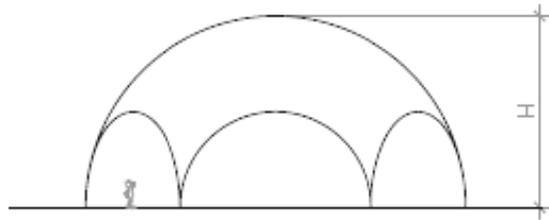
5_Catálogo práctico de diseño

Como resultado de toda la investigación realizada se plantea realizar un catálogo práctico de formas geométricas del hormigón que incluirá los parámetros más importantes de su geometría y datos más significativos del comportamiento estructural, con el objetivo de que sirva para ser usado por los arquitectos en la fase del diseño de los edificios.

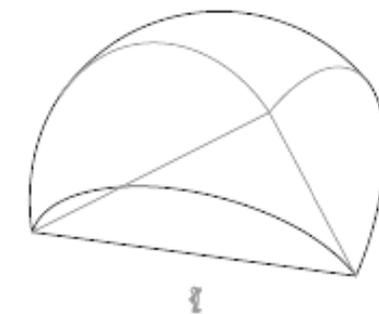
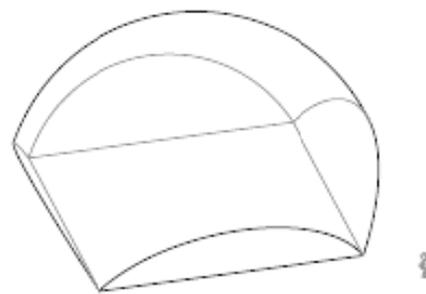
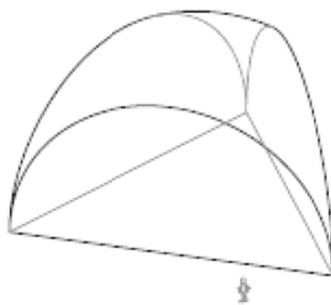
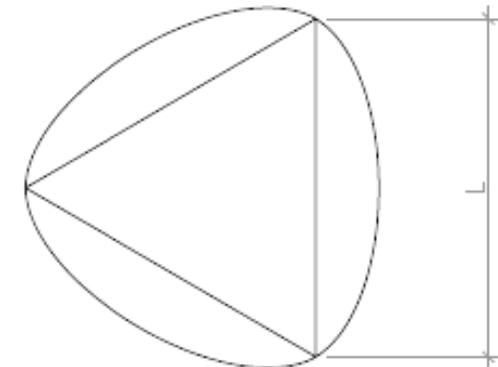
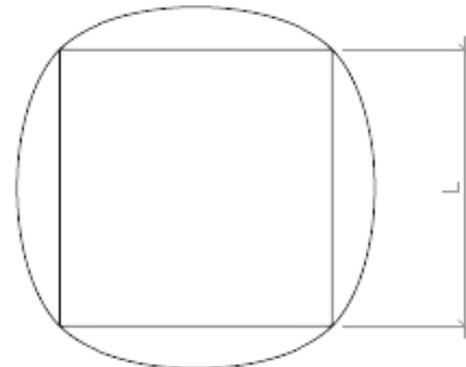
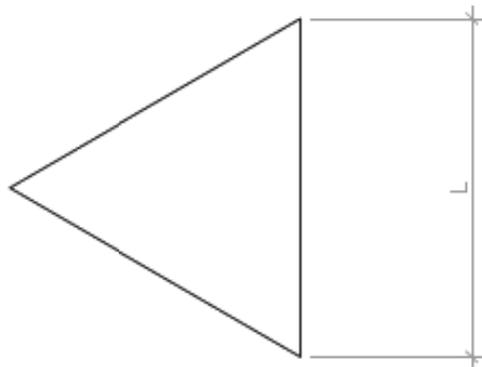
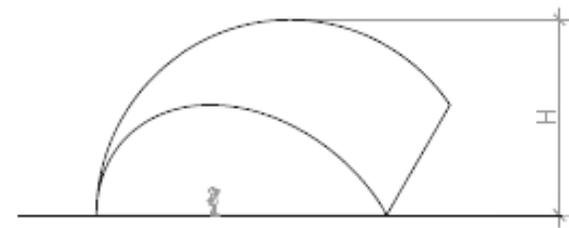
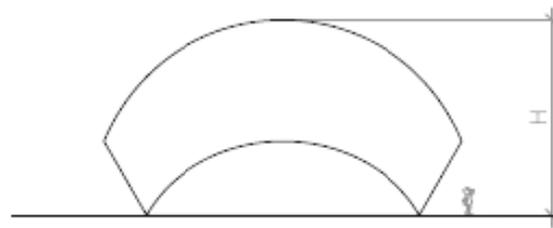
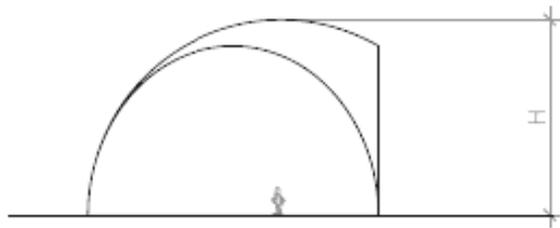
esfera_01



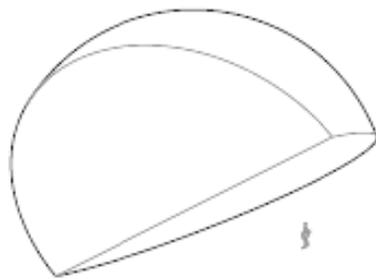
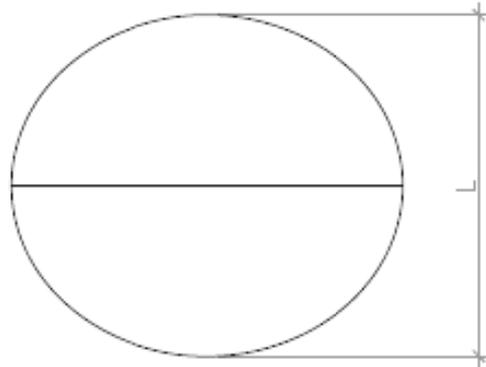
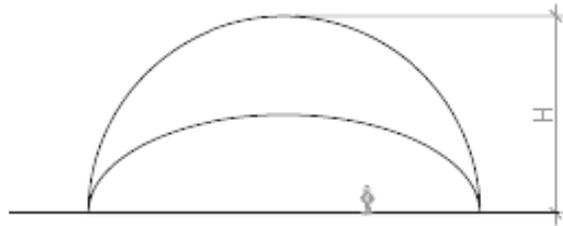
esfera_02



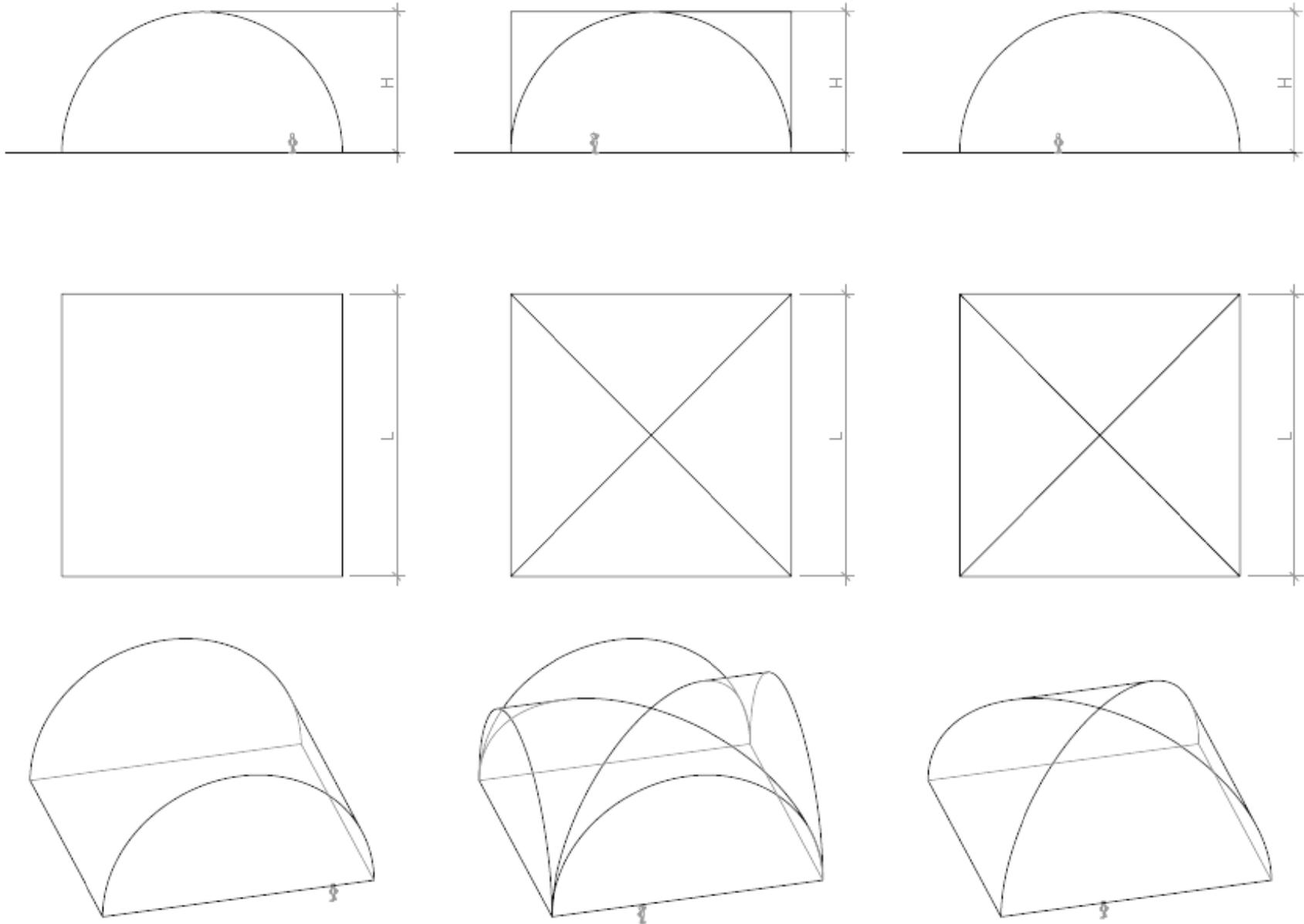
esfera_03



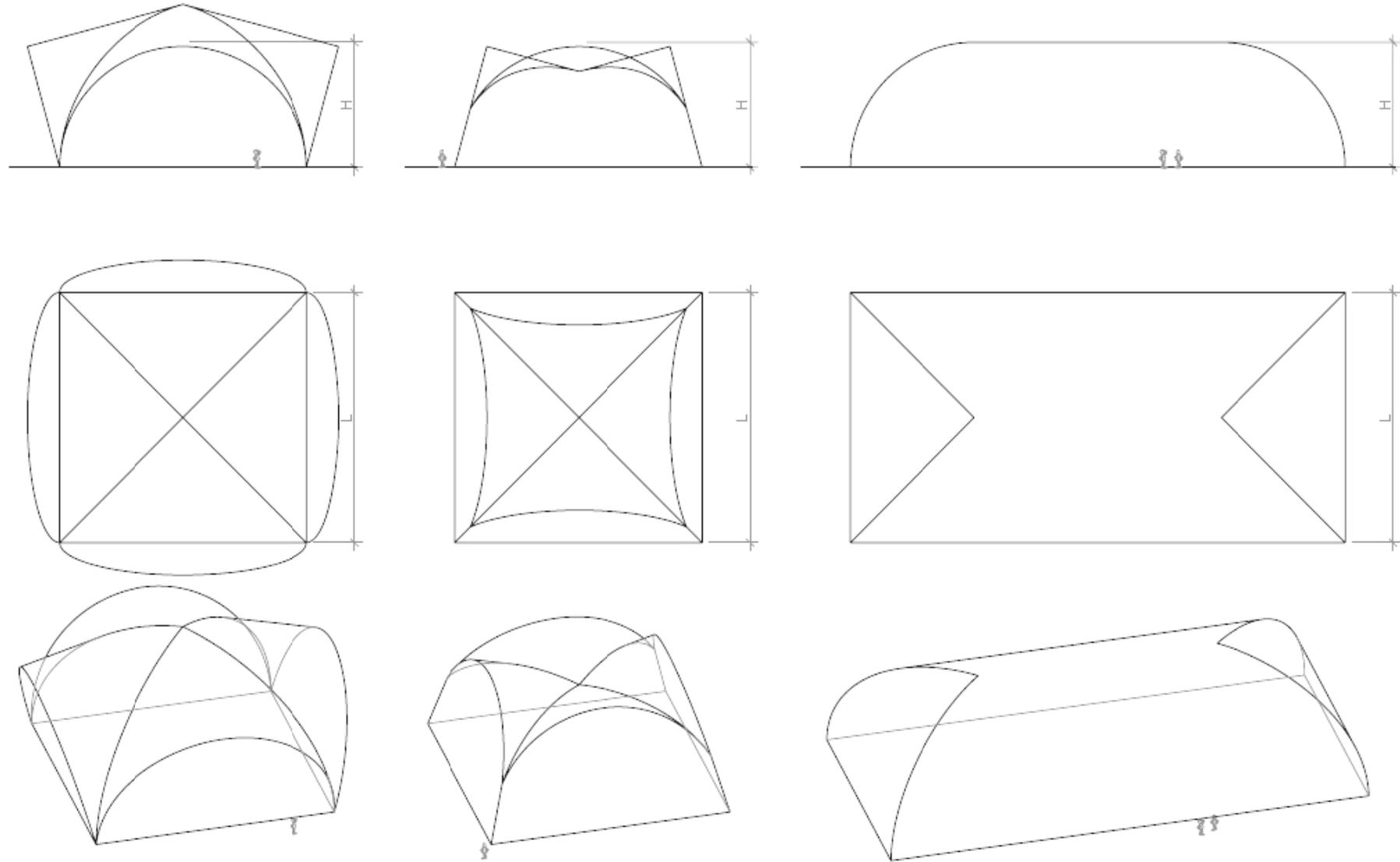
esfera_04



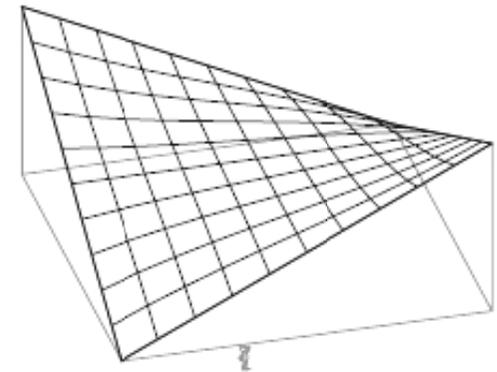
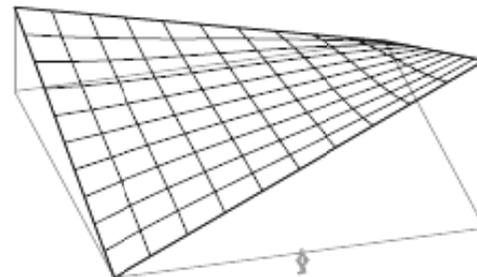
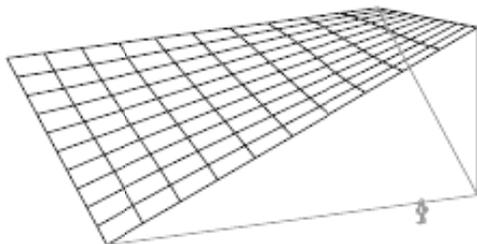
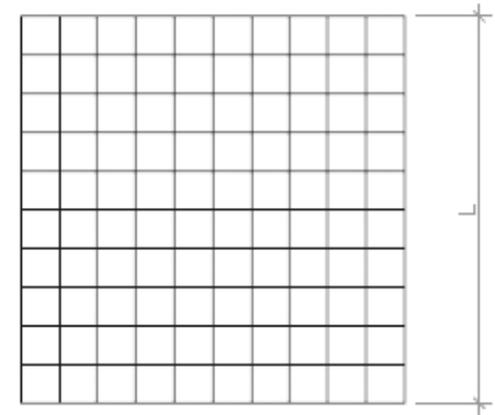
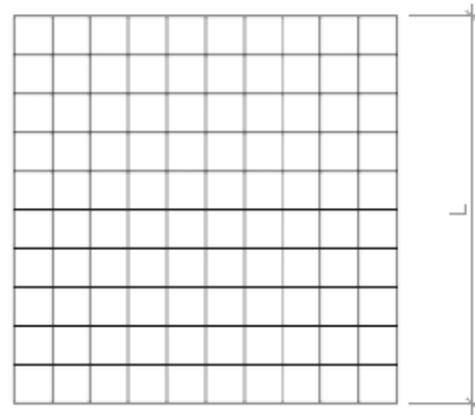
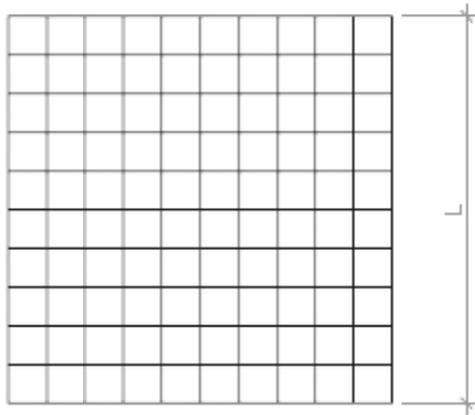
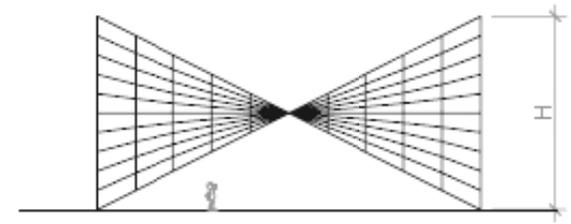
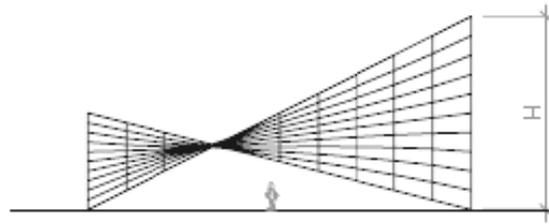
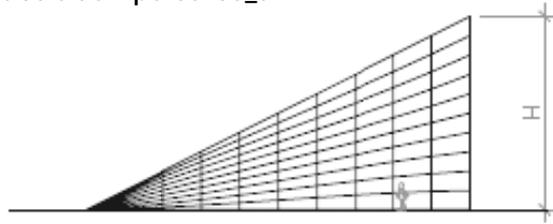
cilindro_01



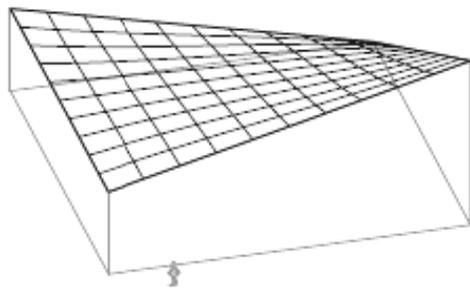
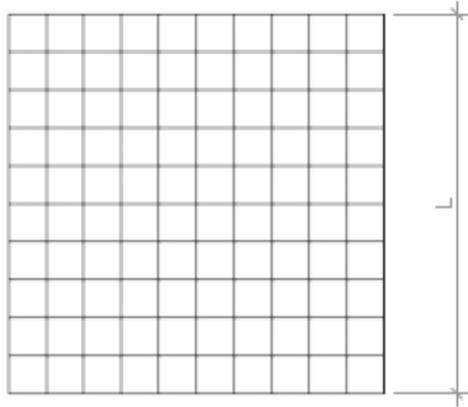
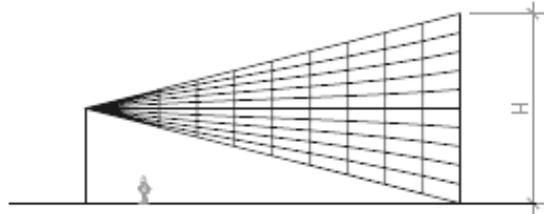
cilindro_02



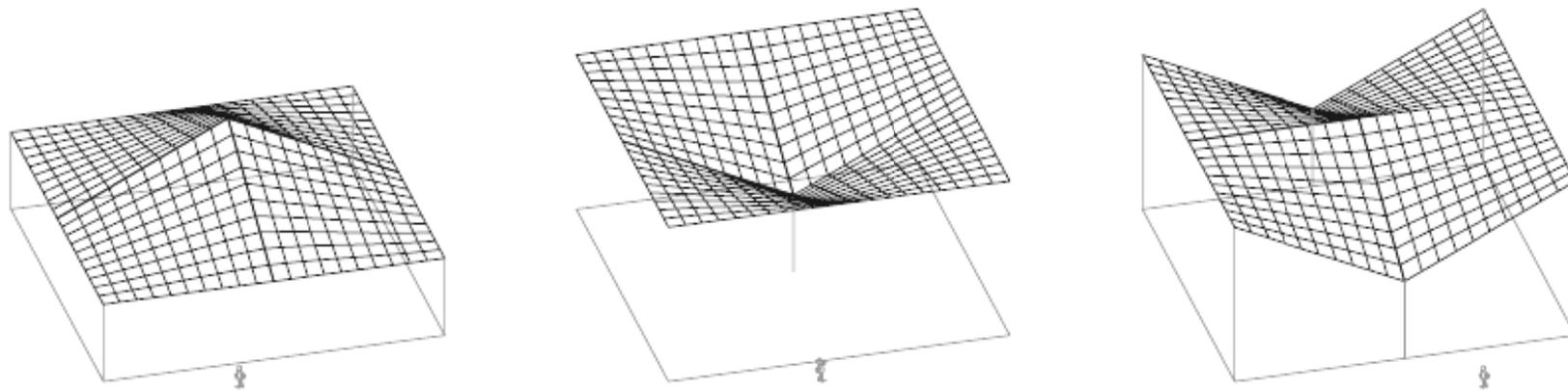
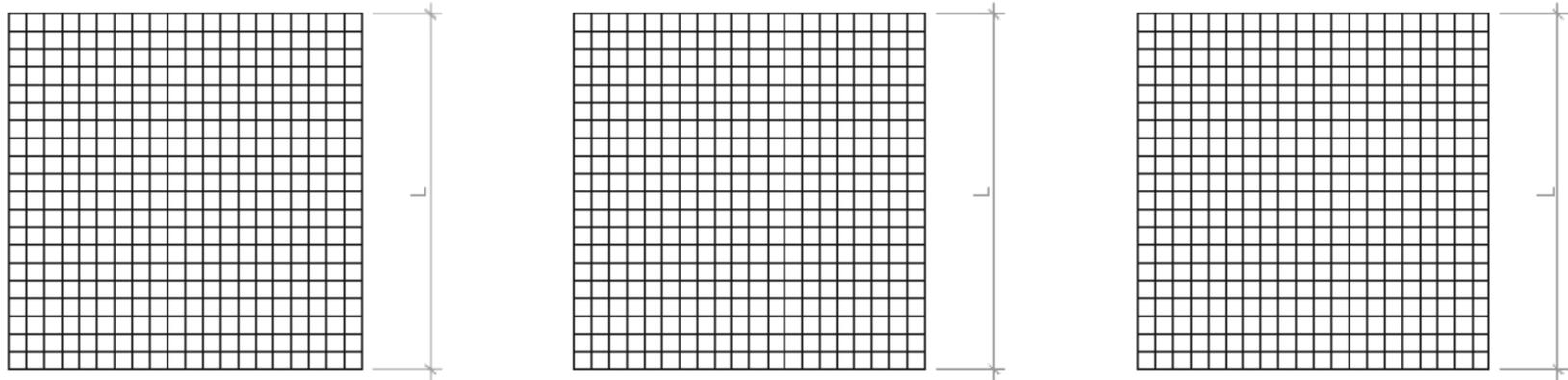
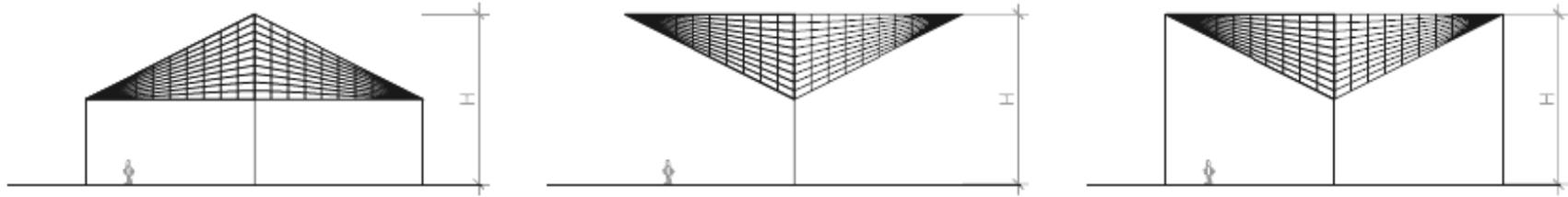
paraboloide hiperbólico_01



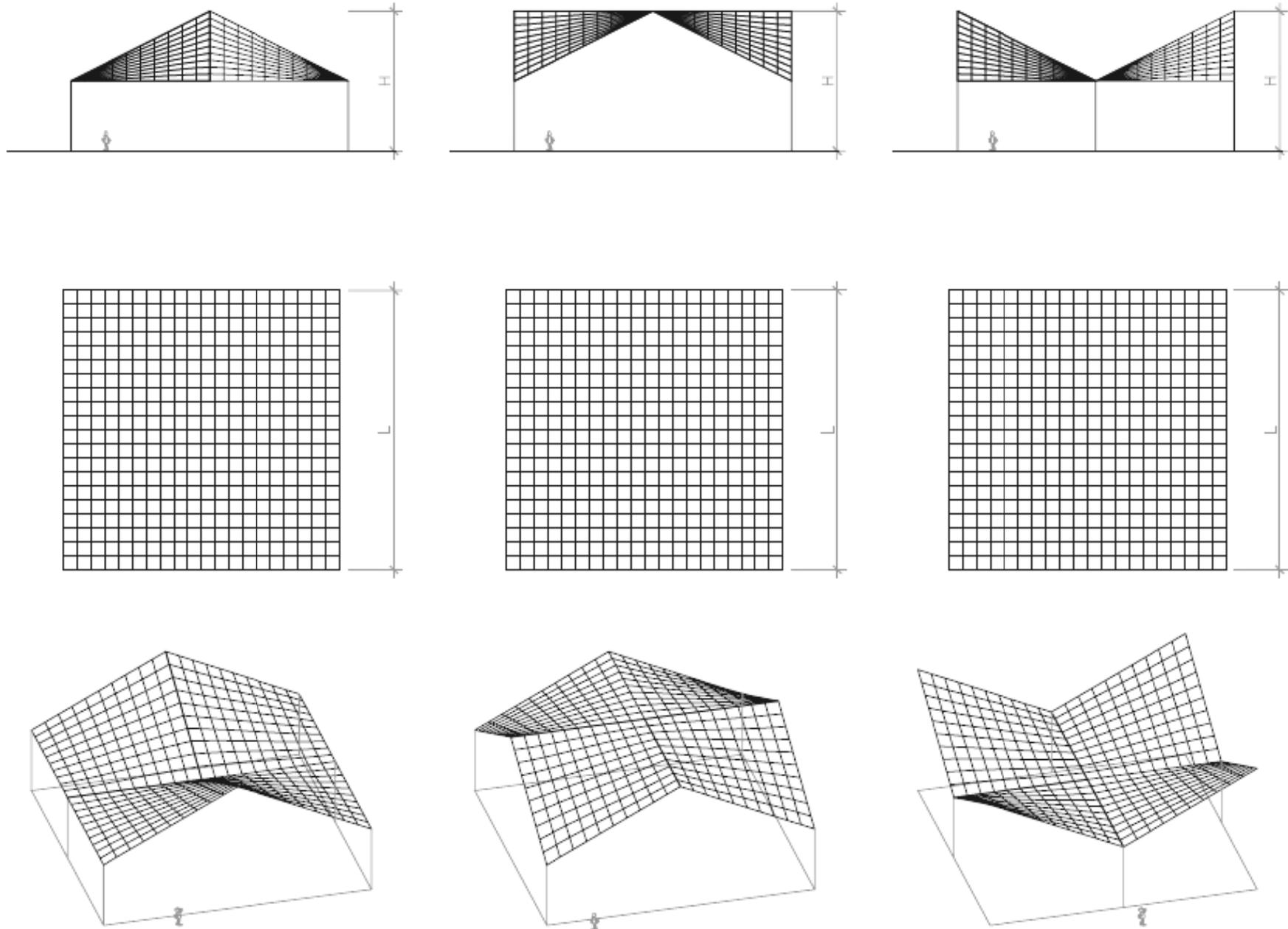
paraboloide hiperbólico_02



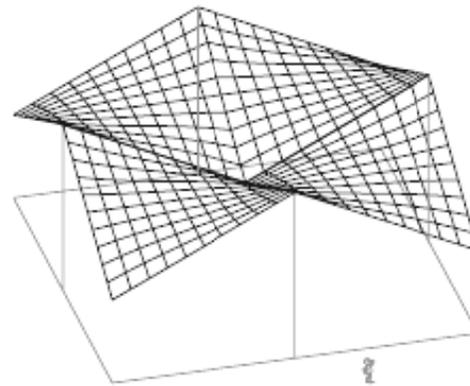
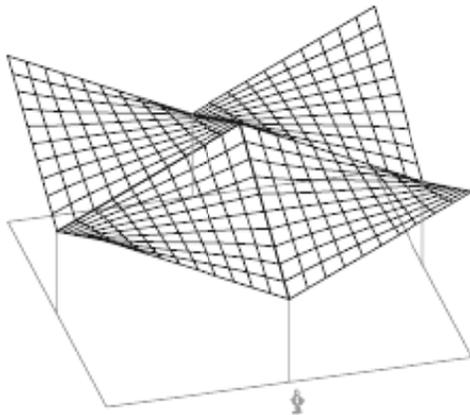
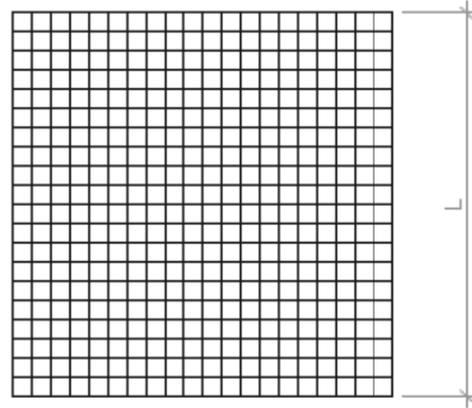
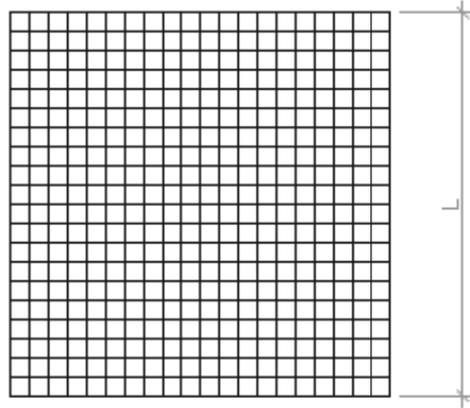
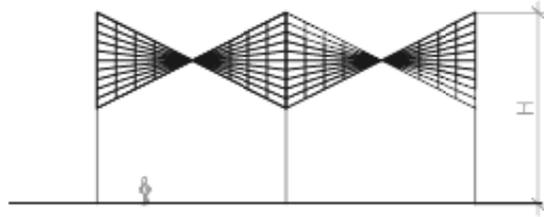
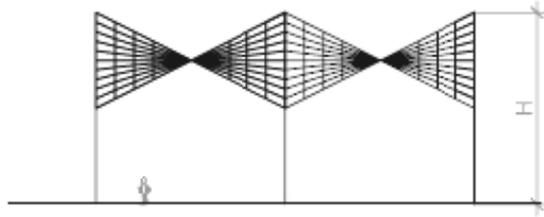
paraboloide hiperbólico_03



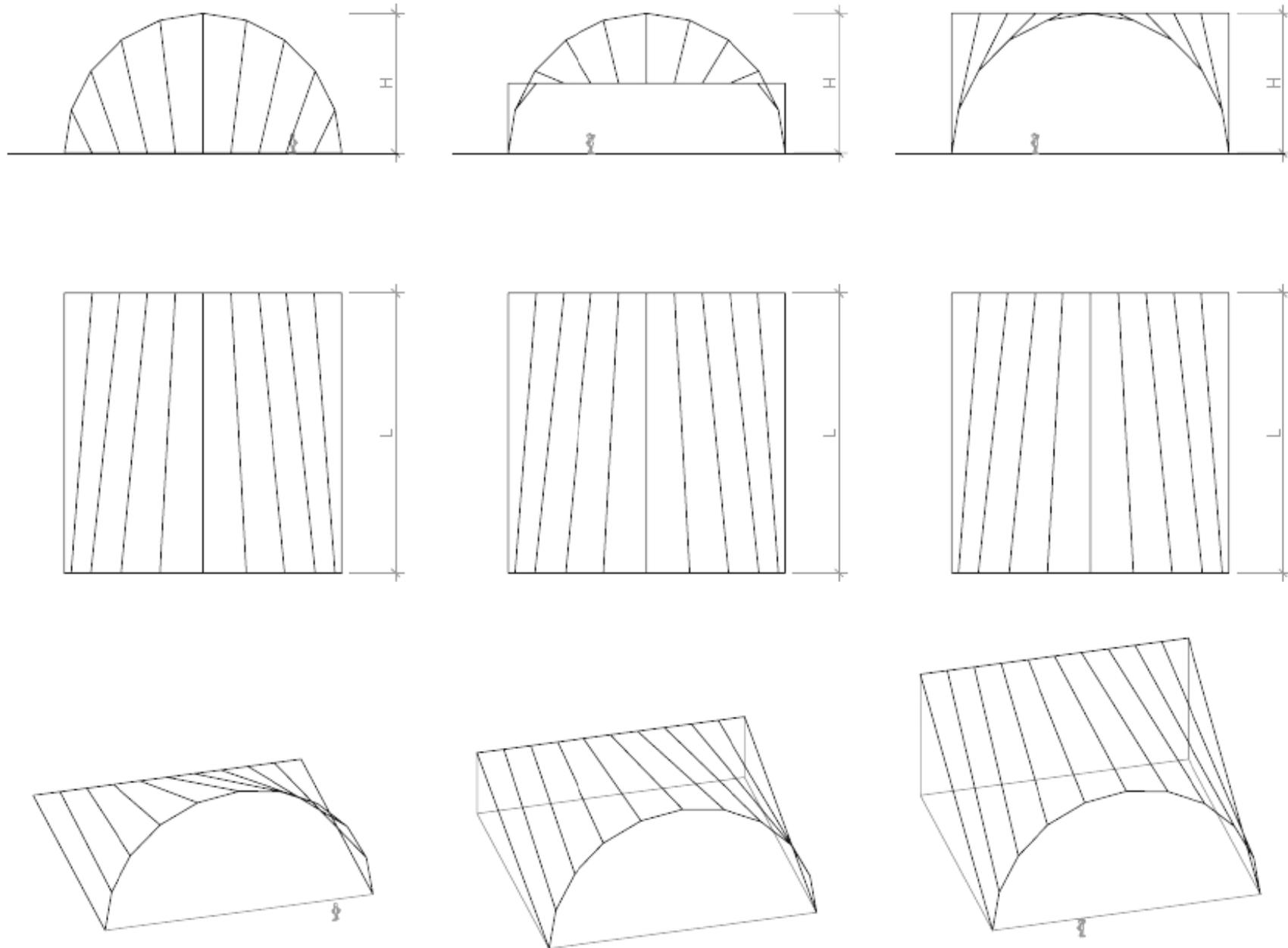
paraboloide hiperbólico_04



paraboloide hiperbólico_05



conoide_01



6_Bibliografía

ACI 318-83: Building code requirements for structural concrete. (1983). Detroit: American Concrete Institute.

Antuña Bernardo, J. (2002). *Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret.* Madrid: Tesis doctoral - Universidad Politécnica de Madrid.

Bernabeu Larena, A. (2007). *Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea.* Madrid: Tesis doctoral - Universidad Politécnica de Madrid.

Calavera Ruiz, J. (1999). *Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón armado. Tomo I.* Madrid: INEMAC - Instituto técnico de materiales de construcción.

Candela Outeriño, F. (1968). *El escándalo de la Ópera de Sidney.* Madrid: Arquitectura.

Charleston, A. (2007). *La estructura como arquitectura: Formas, detalles y simbolismo.* Barcelona: Editorial Reverté S.A.

Crespo Cabillo, I. (2005). *Control gráfico de formas y superficies de transición.* Barcelona: Tesis doctoral - Universitat Politècnica de Catalunya.

Diez, G. (2005). *Diseño estructural en arquitectura: Introducción.* Buenos Aires: Nobuko.

EHE 08 - Instrucción de hormigón estructural. (2008). Madrid: Ministerio de Fomento.

Engel, H. (1997). *Sistemas de estructuras.* Barcelona: Gustavo Gili.

Faber, C. (1981). *Las estructuras de Félix Candela*. Mexico DF: Compañía editorial continental S.A.

Ibáñez Torres, R. (2004). *El vientre de un arquitecto*.

Millais, M. (1997). *Estructuras de edificación*. Madrid: Celeste ediciones.

Olvera López, A. (1968). *Análisis, cálculo y diseño de las bóvedas de cáscara*. México DF: Compañía editorial continental S.A.

Salvadori, M., & Heller, R. (1986). *Estructuras para arquitectos*. New Jersey: Nobuko.

Torroja Miret, E. (1958). *Las estructuras de Eduardo Torroja*. Madrid: CEDEX - Ministerio de Fomento.

Torroja Miret, E. (1957). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: CSIC.

Varios. (2010). *Félix Candela 1910-2010*. Valencia: IVAM - Ministerio de Cultura - Sociedad estatal de conmemoraciones culturales.

7_Índice de imágenes

Imagen	Fuente	Página
Fig 0.1	Benevolo, L. <i>"El arte y la ciudad antigua"</i> México, Gustavo Gili (1979)	3
Fig 0.2	Drew, P. <i>"Sidney opera house: Jorn Utzon"</i> London, Phaidon (1995)	3
Fig 0.3	Drew, P. <i>"Sidney opera house: Jorn Utzon"</i> London, Phaidon (1995)	4
Fig 0.4	elaboración propia	5
Fig 0.5	elaboración propia	5
Fig 1.1	Benevolo, L. <i>"El arte y la ciudad antigua"</i> México, Gustavo Gili (1979)	7
Fig 1.2	Simonnet, C. <i>"Hormigón: historia de un material"</i> San Sebastián, Nerea (2009)	8
Fig 1.3	Simonnet, C. <i>"Hormigón: historia de un material"</i> San Sebastián, Nerea (2009)	8
Fig 1.4	Simonnet, C. <i>"Hormigón: historia de un material"</i> San Sebastián, Nerea (2009)	9
Fig 1.5	Jodidio, P <i>"Historia de la arquitectura del sXX"</i> Madrid, Taschen (2003)	10
Fig 1.6	Benevolo, L. <i>"Historia de la arquitectura moderna"</i> Barcelona, Gustavo Gili (2000)	11
Fig 1.7	Jodidio, P <i>"Historia de la arquitectura del sXX"</i> Madrid, Taschen (2003)	11
Fig 1.8	Jodidio, P <i>"Historia de la arquitectura del sXX"</i> Madrid, Taschen (2003)	12

Fig 1.9	Benevolo, L. " <i>Historia de la arquitectura moderna</i> " Barcelona, Gustavo Gili (2000)	12
Fig 1.10	Baker, G. " <i>Le Corbusier: análisis de la forma</i> " Barcelona, Gustavo Gili (2007)	13
Fig 1.11	Jodidio, P. " <i>Historia de la arquitectura del sXX</i> " Madrid, Taschen (2003)	13
Fig 1.12	Monteys, X. " <i>Obras y proyectos</i> " Gustavo Gil (2005)	14
Fig 1.13	www.greatbuildings.com – fecha de consulta: 02-08-2011	14
Fig 1.14	Benevolo, L. " <i>Historia de la arquitectura moderna</i> " Barcelona, Gustavo Gili (2000)	15
Fig 1.15	Jodidio, P. " <i>Historia de la arquitectura del sXX</i> " Madrid, Taschen (2003)	16
Fig 1.16	Torroja, E. " <i>Las estructuras de Eduardo Torroja</i> " Madrid, CEDEX - Ministerio de Fomento. (1958)	16
Fig 1.17	Benevolo, L. " <i>Historia de la arquitectura moderna</i> " Barcelona, Gustavo Gili (2000)	17
Fig 1.18	Crespo, I. " <i>Control gráfico de formas y superficies de transición</i> " Barcelona, Tesis doctoralUPC (2005)	17
Fig 1.19	Candela, F. " <i>Catálogo exposición IVAM</i> " Valencia, IVAM (2010)	18
Fig 1.20	elaboración propia	18
Fig 1.21	Benevolo, L. " <i>Historia de la arquitectura moderna</i> " Barcelona, Gustavo Gili (2000)	19
Fig 1.22	www.wikipedia.org – fecha de consulta: 25-07-2011	19
Fig 1.23	www.wikipedia.org - fecha de consulta: 23-07-2011	20
Fig 1.24	Benevolo, L. " <i>El arte y la ciudad antigua</i> " México, Gustavo Gili (1979)	20
Fig 1.25	Monteys, X. " <i>Obras y proyectos</i> " Gustavo Gil (2005)	21

Fig 1.26	www.urbanity.es – fecha de consulta: 25-07-2011	21
Fig 1.27	Salvadori, M. " <i>Estructuras para arquitectos</i> " New Jersey, Nobuko (1986)	22
Fig 1.28	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	22
Fig 1.29	Torroja, E. " <i>Las estructuras de Eduardo Torroja</i> " Madrid, CEDEX - Ministerio de Fomento. (1958)	23
Fig 1.30	Benevolo, L. " <i>Historia de la arquitectura moderna</i> " Barcelona, Gustavo Gili (2000)	23
Fig 1.31	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	24
Fig 1.32	Candela, F. " <i>Catálogo exposición IVAM</i> " Valencia, IVAM (2010)	24
Fig 1.33	www.sagradafamilia.cat – fecha de consulta: 12-08-2011	25
Fig 1.34	www.greatbuildings.com – fecha de consulta: 25-07-2011	25
Fig 1.35	Candela, F. " <i>Catálogo exposición IVAM</i> " Valencia, IVAM (2010)	26
<hr/>		
Fig 2.1	www.greatbuildings.com – fecha de consulta: 29-07-2011	29
Fig 2.2	elaboración propia	30
Fig 2.3	elaboración propia	31
Fig 2.4	elaboración propia	31
Fig 2.5	elaboración propia	32
Fig 2.6	Bernabeu, A. " <i>Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea</i> ". Madrid, Tesis doctoral UPM (2007)	32
Fig 2.7	elaboración propia	33

Fig 2.8	elaboración propia	33
Fig 2.9	elaboración propia	34
Fig 2.10	elaboración propia	34
Fig 2.11	elaboración propia	34
Fig 2.12	Documentación facilitada por Fomento de Construcciones y Contratas	35
Fig 2.13	Documentación facilitada por Fomento de Construcciones y Contratas	35
Fig 3.1	Antuña, J. " <i>Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret</i> " Madrid, Tesis doctoral UPM (2002)	37
Fig 3.2	Antuña, J. " <i>Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret</i> " Madrid, Tesis doctoral UPM (2002)	37
Fig 3.3	Torroja, E. " <i>Las estructuras de Eduardo Torroja</i> " Madrid, CEDEX - Ministerio de Fomento. (1958)	38
Fig 3.4	elaboración propia	38-39
Fig 3.5	Jodidio, P " <i>Historia de la arquitectura del sXX</i> " Madrid, Taschen (2003)	40
Fig 3.6	Jodidio, P " <i>Historia de la arquitectura del sXX</i> " Madrid, Taschen (2003)	40
Fig 3.7	Jodidio, P " <i>Historia de la arquitectura del sXX</i> " Madrid, Taschen (2003)	41
Fig 3.8	elaboración propia	41-42
Fig 3.9	Antuña, J. " <i>Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret</i> " Madrid, Tesis doctoral UPM (2002)	43
Fig 3.10	Antuña, J. " <i>Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret</i> " Madrid, Tesis doctoral UPM (2002)	43
Fig 3.11	Torroja, E. " <i>Las estructuras de Eduardo Torroja</i> " Madrid, CEDEX - Ministerio de Fomento. (1958)	44

Fig 3.12	elaboración propia	44-45
Fig 3.13	Duarte, A. "Josep Lluís Sert" Barcelona, Rockport (2003)	46
Fig 3.14	Duarte, A. "Josep Lluís Sert" Barcelona, Rockport (2003)	46
Fig 3.15	Duarte, A. "Josep Lluís Sert" Barcelona, Rockport (2003)	47
Fig 3.16	elaboración propia	47
Fig 3.17	elaboración propia	49
Fig 3.18	elaboración propia	49
Fig 3.19	elaboración propia	50
Fig 3.20	elaboración propia	50-51
Fig 3.21	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	52
Fig 3.22	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	52
Fig 3.23	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	52
Fig 3.24	Crespo, I. " <i>Control gráfico de formas y superficies de transición</i> " Barcelona, Tesis doctoralUPC (2005)	53
Fig 3.25	Crespo, I. " <i>Control gráfico de formas y superficies de transición</i> " Barcelona, Tesis doctoralUPC (2005)	53
Fig 3.26	Crespo, I. " <i>Control gráfico de formas y superficies de transición</i> " Barcelona, Tesis doctoralUPC (2005)	54
Fig 3.27	elaboración propia	54-55
Fig 3.28	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	56

Fig 3.29	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	56
Fig 3.30	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	57
Fig 3.31	elaboración propia	57-58
Fig 3.32	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	59
Fig 3.33	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	59
Fig 3.34	Candela, F. " <i>Catálogo exposición IVAM</i> " Valencia, IVAM (2010)	60
Fig 3.35	elaboración propia	60-61
Fig 3.36	Documentación facilitada por Fomento de Construcciones y Contratas	62
Fig 3.37	Documentación facilitada por Fomento de Construcciones y Contratas	62
Fig 3.38	elaboración propia	63
Fig 3.39	elaboración propia	63-64
Fig 3.40	Crespo, I. " <i>Control gráfico de formas y superficies de transición</i> " Barcelona, Tesis doctoralUPC (2005)	65
Fig 3.41	Crespo, I. " <i>Control gráfico de formas y superficies de transición</i> " Barcelona, Tesis doctoralUPC (2005)	65
Fig 3.42	Crespo, I. " <i>Control gráfico de formas y superficies de transición</i> " Barcelona, Tesis doctoralUPC (2005)	66
Fig 3.43	elaboración propia	66-67
Fig 3.44	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	68
Fig 3.45	Candela, F. " <i>Catálogo exposición IVAM</i> " Valencia, IVAM (2010)	68

Fig 3.46	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	69
Fig 3.47	elaboración propia	69-70
Fig 3.48	Torroja, E. " <i>Las estructuras de Eduardo Torroja</i> " Madrid, CEDEX - Ministerio de Fomento. (1958)	71
Fig 3.49	Antuña, J. " <i>Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret</i> " Madrid, Tesis doctoral UPM (2002)	71
Fig 3.50	Torroja, E. " <i>Las estructuras de Eduardo Torroja</i> " Madrid, CEDEX - Ministerio de Fomento. (1958)	72
Fig 3.51	elaboración propia	72-73
Fig 3.52	Antuña, J. " <i>Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret</i> " Madrid, Tesis doctoral UPM (2002)	74
Fig 3.53	Torroja, E. " <i>Las estructuras de Eduardo Torroja</i> " Madrid, CEDEX - Ministerio de Fomento. (1958)	74
Fig 3.54	Torroja, E. " <i>Las estructuras de Eduardo Torroja</i> " Madrid, CEDEX - Ministerio de Fomento. (1958)	75
Fig 3.55	elaboración propia	75-76
<hr/>		
Fig 4.1	elaboración propia	77
Fig 4.2	elaboración propia	78
Fig 4.3	elaboración propia	82
Fig 4.4	elaboración propia	83
Figuras varias	elaboración propia y resultados del programa SAP2000	84 a 91
Fig 4.5	elaboración propia	93
Fig 4.6	elaboración propia	93

Fig 4.7	elaboración propia	93
Fig 4.8	elaboración propia	94
Fig 4.9	elaboración propia	94
Fig 4.10	elaboración propia	94
Fig 4.11	elaboración propia	95
Fig 4.12	elaboración propia	95
Fig 4.13	elaboración propia	96
Fig 4.14	elaboración propia	96
Fig 4.15	elaboración propia	96
Fig 4.16	Resultado programa SAP2000 – elaboración propia	97
Fig 4.17	elaboración propia	98
Fig 4.18	Faber, C. " <i>Las estructuras de Félix Candela</i> " Mexico DF, Compañía editorial continental S.A. (1981)	98
Fig 4.19	elaboración propia	99
Fig 4.20	elaboración propia	99
Figuras varias	elaboración propia	102 a 113