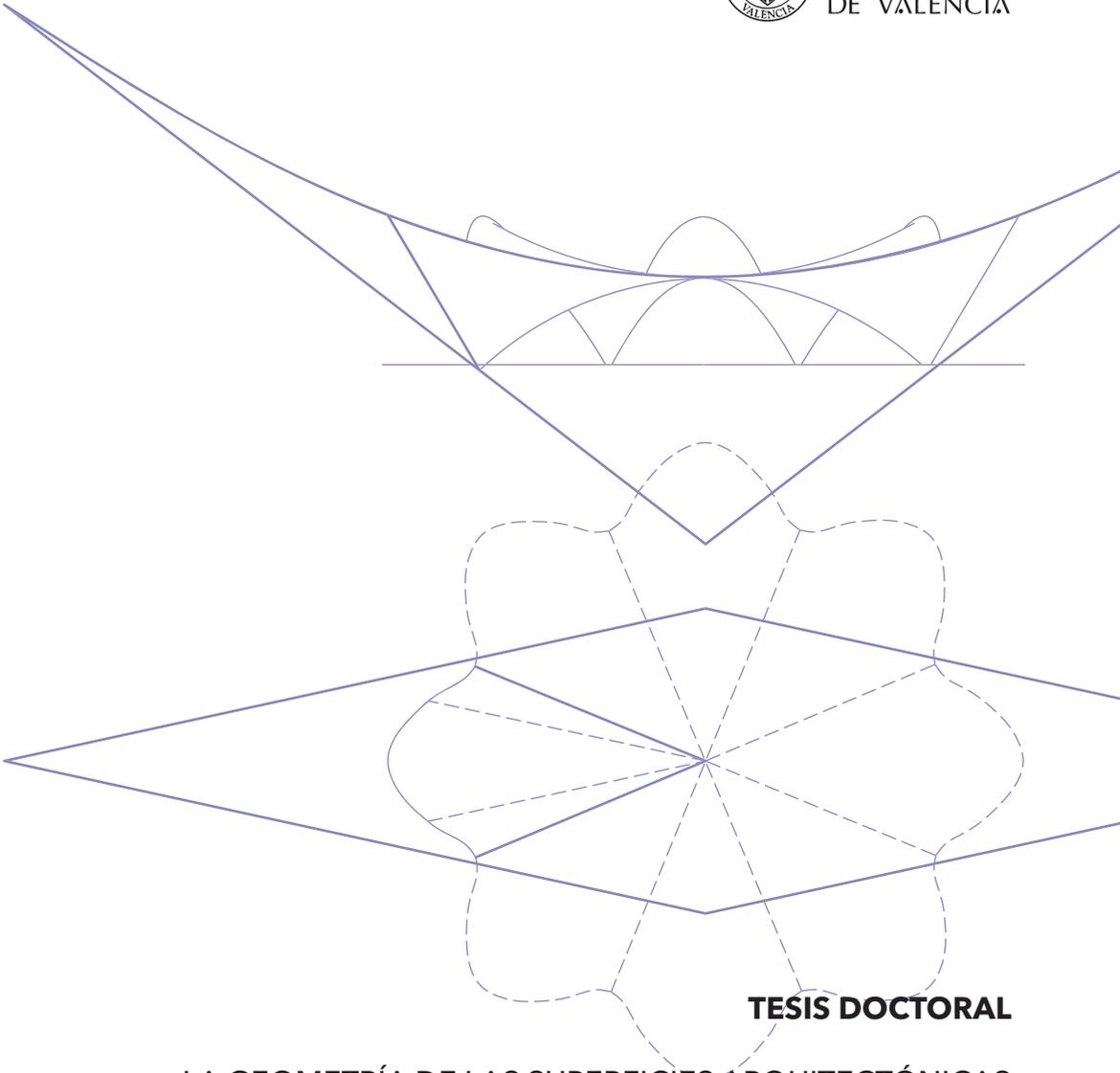




UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TESIS DOCTORAL

LA GEOMETRÍA DE LAS SUPERFICIES ARQUITECTÓNICAS
ANÁLISIS FORMAL GEOMÉTRICO DE LA
CIUTAT DE LES ARTS I LES CIÈNCIES DE VALÈNCIA

DOCTORANDO D. FRANCISCO JAVIER SANCHIS SAMPEDRO

DIRECTORES Dña. CONCEPCIÓN LÓPEZ GONZÁLEZ
D. JORGE GARCÍA VALLDECABRES

VALENCIA, 2013

Mari y Hugo, simplemente gracias...

RESUMEN | ESPAÑOL

La importancia de la utilización de la geometría en el diseño de Arquitectura, y más en concreto el uso de las superficies geométricas como configuradoras del espacio arquitectónico, es el tema central del presente trabajo de investigación. En él se pone en valor el uso de estas formas geométricas definidas como elemento de control en la fase de diseño de los edificios y que a su vez ayuda a mantener una coherencia con el comportamiento estructural y una mayor facilidad tanto en la ejecución como en la materialización constructiva.

En primer lugar se hace un repaso histórico sobre el uso de las superficies geométricas en las diferentes épocas y corrientes de la Arquitectura, así como de las diferentes investigaciones actuales que existen al respecto.

Posteriormente se pasa a realizar un estudio geométrico de aquellas superficies de mayor aplicación en el diseño de Arquitectura, que se complementa con el desarrollo de análisis de edificios en los que el uso de estas geometrías es parte fundamental de su diseño. Se han analizado edificaciones de diferentes épocas y realizadas con materiales diversos y distintos sistemas estructurales.

Para concluir la parte de desarrollo de la investigación, se ha realizado un caso práctico de análisis formal geométrico, la "Ciutat de les Arts i les Ciències" de Valencia, que constituye un ejemplo de aplicación de las formas geométricas en la Arquitectura actual. Los análisis, fundamentalmente de generación de las superficies, también recogen la vertiente estructural y constructiva estudiada desde el punto de vista geométrico.

Como conclusión al trabajo se han realizado dos cuadros resumen, uno de ellos con la clasificación de las superficies geométricas de aplicación en arquitectura, resultado de la investigación sobre las diferentes clasificaciones, y otro cuadro resumen de los análisis realizados en la CACV, donde se ha establecido un COEFICIENTE DE IDONEIDAD de aplicación de estas superficies que tiene en cuenta tanto el diseño geométrico como la coherencia estructura-geometría y la aplicabilidad de la geometría en la construcción de las superficies.

RESUMEN | VALENCIÀ

La importància de la utilització de la geometria en el disseny d'Arquitectura, i més en concret l'ús de les superfícies geomètriques com a configuradores de l'espai arquitectònic, és el tema central del present treball de investigació. En ell es posa en valor l'ús d'aquestes formes geomètriques definides com a element de control en la fase de disseny dels edificis i que al seu ús ajuda a mantenir una coherència amb el comportament estructural i una major facilitat tant en l'execució com en la materialització constructiva.

En primer lloc es fa un repàs històric sobre l'ús de les superfícies geomètriques en les diferents èpoques i corrents de l'Arquitectura, així com de les diferents investigacions actuals que existeixen al respecte.

Posteriorment es passa a realitzar un estudi geomètric d'aquelles superfícies de major aplicació en el disseny d'Arquitectura, que es complementa amb el desenvolupament d'anàlisi d'edificis en els que l'ús d'aquestes geometries és part fonamental del seu disseny. S'han analitzat edificacions de diferents èpoques i realitzades amb materials diversos i diferents sistemes estructurals.

Per concloure la part de desenvolupament de la investigació, s'ha realitzat un cas pràctic d'anàlisi formal geomètric, la "Ciutat dels Arts i les Ciències" de València, que constitueix un exemple d'aplicació de les formes geomètriques en l'Arquitectura actual. Les anàlisis, fonamentalment de generació de les superfícies, també recullen la vessant estructural i constructiva estudiada des del punt de vista geomètric.

Com a conclusió al treball s'han realitzat dos quadres resum, un d'ells amb la classificació de les superfícies geomètriques d'aplicació en arquitectura, resultat de la investigació sobre les diferents classificacions, i un altre quadre resum de les anàlisis realitzades a la CACV, on s'ha establert un COEFICIENT D'IDONEÏTAT d'aplicació de estes superfícies que té en compte tant el disseny geomètric com la coherència estructura-geometria i l'aplicabilitat de la geometria en la construcció de les superfícies

ABSTRACT | ENGLISH

The importance of the use of geometry in architecture design, and more specifically the use of geometric surfaces that shape the architectural space as is the focus of this research. It adds value to the use of these geometric shapes defined as a control element in the design phase of buildings and which in turn helps maintain consistency with the structural behavior and greater ease in both the execution and the constructive realization.

First we make a historical survey on the use of geometric surfaces at different times and currents of Architecture, as well as the current research are different in this respect.

Subsequently, a study passes those geometric surfaces greater application in the design of architecture, complemented with the development of analysis of buildings in which the use of these geometries is a fundamental part of its design. We analyzed buildings from different eras and made with different materials and different structural systems.

To conclude the development of research, there has been a case study of geometric formal analysis, the "City of Arts and Sciences" of Valencia, which is an example of application of geometric shapes in the current architecture. Analysis mainly generating surfaces slope also collect structural and constructional studied from the standpoint of geometric.

As a conclusion to the work we have done two summary tables, one with the classification of geometric surfaces applications in architecture, the result of research on the different classifications, and a summary table of the analysis performed on the CACV, which has RATE FITNESS established application of these surfaces that takes into account both geometric design and geometry structural coherence and applicability of geometry in the construction of surfaces.

ÍNDICE

PARTE A | INTRODUCCIÓN

0 AGRADECIMIENTOS	1
1 PREFACIO	4
1.1 Motivaciones y justificación	4
1.2 Objetivos	13
1.3 Metodología	15
1.4 Contenido	25
2 GEOMETRÍA Y ARQUITECTURA	29
2.1 Reflexiones sobre Geometría y Arquitectura	29
2.2 Notas sobre la Geometría en la historia de la Arquitectura	35
2.3 Contextualización de la investigación en el área de la Expresión Gráfica Arquitectónica	53
2.4 Estado actual de la investigación. Fuentes documentales	57

PARTE B | LA GEOMETRÍA DE LAS SUPERFICIES ARQUITECTÓNICAS

3 ESTUDIO DE LAS SUPERFICIES GEOMÉTRICAS	65
3.1 Problemática del estudio de las superficies	65
3.2 Clasificación de las superficies	67
3.3 Estudio detallado: Fichas y ejemplos	103

PARTE C | ANÁLISIS FORMAL GEOMÉTRICO DE ARQUITECTURA CONTEMPORÁNEA

4 ANÁLISIS FORMAL GEOMÉTRICO DE LA CACV	201
4.1 Justificación	201
4.2 Metodología de análisis	203
4.3 Análisis de la CACV	205
5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES	345
5.1 Clasificación de superficies	345
5.2 Análisis formal geométrico de la CACV	351
5.3 Posibles líneas de investigación	357
6 BIBLIOGRAFÍA	360
7 ANEXOS	377
7.1 Planos de los edificios de la CACV	377



0 | AGRADECIMIENTOS

Una vez recorrido el camino hasta la finalización de la tesis doctoral, echo la vista a atrás y no puedo más que ser generoso en agradecimientos con todos aquellos que, cada uno dentro de sus posibilidades y a su manera, han contribuido en mi investigación mediante sus aportes o su conocimiento sobre diversas materias, o simplemente aquellos que me han ayudado a hacer el trabajo más agradable y llevadero.

Es por esto que aprovecho esta ocasión, este espacio privilegiado, para acordarme de todos ellos y agradecer su contribución.

En el ámbito institucional me gustaría agradecer a la empresa CACSA que se encarga de gestionar la “Ciutat de les Arts i de les Ciències” y en concreto a Patricia Mira Moreno y Vicente Pelegero García, por facilitarme el acceso a sus instalaciones. También ha sido de muchísima utilidad en el desarrollo del presente trabajo de investigación la información que desde las diferentes empresas constructoras se ha facilitado: planos de proyecto, imágenes de la construcción, información sobre el proceso constructivo... y lo que es más importante, su experiencia adquirida durante la ejecución de los diferentes edificios.

En el ámbito universitario agradecer a la Universitat Politècnica de València la oportunidad de pertenecer a ella como profesor, así como todas las facilidades que nos ofrece a los investigadores para desarrollar nuestro trabajo.

Al Departamento de Expresión Gráfica agradecerle su apoyo a esta investigación, y más en concreto a Jorge Llopis, mi primer director y quien motivó mi iniciación en esta disciplina y me aconsejó en mis primeros momentos en la universidad, y a Pablo Navarro, director actual, por su clara apuesta por la investigación en el departamento.

Un agradecimiento muy especial va dirigido a Concepción López González y Jorge García Valdecabres, mis directores, que me han apoyado y tutorizado de manera ejemplar desde el principio haciéndome entrar en la tradición investigadora del departamento. Lo cierto es que sin su ayuda, sus consejos y sus libros, ésta tesis no sería lo mismo. Igualmente he de agradecer el apoyo y la sabiduría aportada por Felipe Soler Sanz,

mi profesor de geometría en primer año de arquitectura, y que también ha seguido de cerca mi trabajo aportando su conocimiento sobre la materia y su buen hacer.

No me puedo olvidar de mis compañeros de asignatura, tanto en la ETS de Ingeniería de la Edificación, Rafael Ligorit, Javier Blanes, José Cayetano, Santiago Martínez y Jordi Lloret, con los que comparto trabajo e "inquietudes geométricas" diariamente, como de los profesores de la ETS de Arquitectura, Juan Cisneros, Pedro Cabezos, Julio Albert, Antonio Sintas y Jose Luis Higón, de los que he de reconocer que he aprendido mucho y he compartido interesantes conversaciones acerca de geometría.

De manera muy personal me gustaría darle las gracias a Eduardo Espín. A pesar de su jubilación y de ya no poder compartir las largas conversaciones de despacho, me introdujo en el estudio de la geometría y con sus consejos me guió hacia la investigación. Con la esperanza de no haberle defraudado, Eduardo Espín, gracias por la oportunidad.

Y no puedo agotar el apartado de agradecimientos en el Departamento sin mencionar a todos aquellos que de una manera u otra me han apoyado como son mis compañeros de la asignatura de Dibujo Arquitectónico de la ETSIE, Ángeles, Marta, Marcos, Simeón, Daniel y Jacinto, y los profesores Pedro Verdejo, Paco Hidalgo, Juan Carlos Navarro...

Ya en mi escuela, porque considero la ETSIE como mi segunda casa, agradecer el apoyo que me han dado los dos directores que he tenido, Rafael Sánchez y Javier Medina, ya que siempre me han transmitido su apoyo. Mención especial he de hacer al subdirector Luis Palmero con el que colaboro intensamente y que me ha ayudado a ver "la otra" de la universidad. Gracias a esta colaboración espero que el futuro traiga interesantes proyectos internacionales. A mi amigo y compañero, con quien he compartido intensos veranos de trabajo en la universidad, Igor Fernández, agradecerle el haber sido un gran apoyo en los momentos más duros... ahora me toca a mi amigo! Y al resto de compañeros, de los cuales resultaría interminable su cita en estas breves líneas.

Mi agradecimiento también a la Universidad Europea de Madrid, por permitir centrarme profesionalmente en la docencia de la Expresión Gráfica y de esta manera aunar esfuerzos en una única dirección. Agradecer a Charo, Miguel, Isabel, Lorenzo y Regina, su apoyo y compañerismo.

También quiero hacer mención a mis alumnos, con los que día a día trabajo y que con su interés por la geometría me ayudan a esforzarme constantemente por mejorar, investigar y descubrir nuevos campos de aplicación.

Respecto a la familia, agradecer a mis padres la educación que me han ofrecido y la cultura del esfuerzo que me han transmitido. La verdad, sin alguna de estas dos cosas no es posible llegar a culminar un trabajo como el presente. A mis hermanos, agradecerles que sean tal y como son y el saber que siempre están ahí.

Y por último, lo más importante para mi. Agradecer a Mari, mi mujer, su paciencia y su generosidad. Estoy totalmente convencido de que sin ella no estaría hoy aquí escribiendo estas líneas. No creo que pueda devolverle las horas pasadas delante del ordenador... pero me propongo intentarlo. Y por supuesto a Hugo, mi hijo que a día de hoy tiene tres meses y medio, me has dado la fuerza para dar el empujón definitivo. Dicen que los niños vienen con un pan bajo el brazo... tú has venido con la tesis!

Valencia a 30 de abril de 2013



1 | PREFACIO

1.1 | MOTIVACIONES Y JUSTIFICACIÓN

EL DESCUBRIMIENTO DE LA GEOMETRÍA EN LA ARQUITECTURA

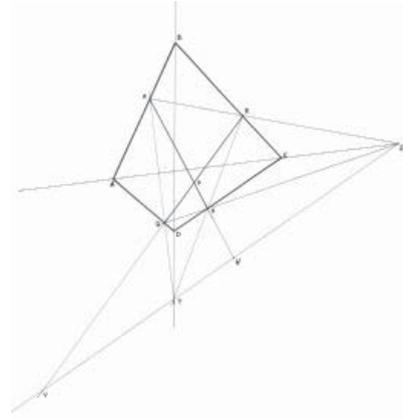
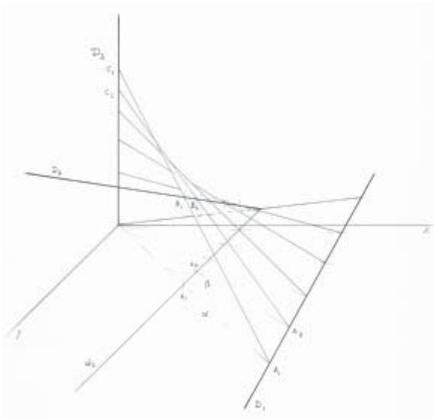
“La geometría de las superficies arquitectónicas”.

Desde un primer momento la materia y la reflexión sobre el estudio de la íntima relación que existe entre geometría y arquitectura me cautivó. Y no estoy hablando del momento en que decidí comenzar mi andadura investigadora. Fue como estudiante, en las clases de Historia de la Arquitectura y Composición de la ETSAV. Hasta ese momento se me habían presentado como los grandes de la arquitectura contemporánea a Mies Van der Rohe, Frank Lloyd Wright, Le Corbusier (en su faceta más racionalista), Gerrit Thomas Rietveld, Louis Kahn, Charles y Ray Eames... y otros arquitectos más cercanos en el tiempo y el espacio como Alberto Campo Baeza, Carlos Ferrater, Ignacio Vicens, Rafael de la Hoz, Alvaro Siza... La arquitectura de todos ellos está llena de racionalidad, de planos en la mayoría de los casos ortogonales, de horizontalidad... Ésta arquitectura de referencia se generaba desde planteamientos cartesianos. Mis proyectos en la escuela estuvieron impregnados de esta “racionalidad ortogonalizada”, fruto de la senda marcada por mis diferentes profesores de proyectos.

Mientras, coincidiendo en el tiempo, a mitad de la década de los 90 del siglo pasado algo estaba pasando en el panorama nacional e internacional que me hacía sospechar que la visión de la arquitectura que se me estaba dando era parcial. Si bien los conceptos y el tipo de arquitectura que se me mostraban eran atractivos y muy válidos, solo eran una parte del todo. Frank Ghery estaba construyendo su primer Guggenheim en Bilbao, en Valencia Santiago Calatrava levantaba la Ciudad de las Artes y las Ciencias, Norman Foster era premiado con el premio Pritzker tras construir el “Palau de Congressos” de Valencia, Rem Koolhaas también gana el mismo galardón por edificios como el “Educatorium” en Utrech y posteriormente construiría la “Casa da Música” de Oporto, Jean Nouvel levantaba la “Torre Agbar” en Barcelona y el nombre de Zaha Hadid o Alejandro Zaera también empezaban a oírse... y así decenas de ejemplos.

Entonces es cuando empecé a interesarme por esta “nueva concepción”

página anterior | Imágen del
“American Air Museum” en
Cambridge, Inglaterra, 1997 -
Norman Foster + Partners



1.1

de la arquitectura que se abrió frente a mí. Sentía la necesidad de profundizar en el conocimiento hasta llegar a comprender como desde el primer momento de la génesis proyectual de la arquitectura, en el desarrollo del diseño y en el proceso de ejecución material, es la geometría la que facilita que el discurso sea coherente, racional y eficaz hasta el más pequeño detalle. El tema no era nuevo. Eero Saarinen, Le Corbusier (en su lado más expresivo), Félix Candela, Eduardo Torroja, Oscar Niemeyer, Jorn Utzon, Eladio Dieste, Pier Luigi Nervi, Marcel Breuer, Aldo Rossi... y un sinfín de arquitectos e ingenieros utilizaban la geometría en sus obras, en ocasiones desde un punto de vista orgánico y expresivo, pero en muchas otras ocasiones de manera precisa consiguiendo que esta geometría ayudara a sus edificios y construcciones a ser más estables, menos pesados, mas "racionales y eficientes"... Fue entonces cuando comencé estudiar todas aquellas superficies geométricas que desconocía y que aplicadas a la arquitectura ofrecen resultados tan sorprendentes.

1 | "Perspectiva cónica"
Felipe Soler Sanz - Servicio de Publicaciones UPV, 1996

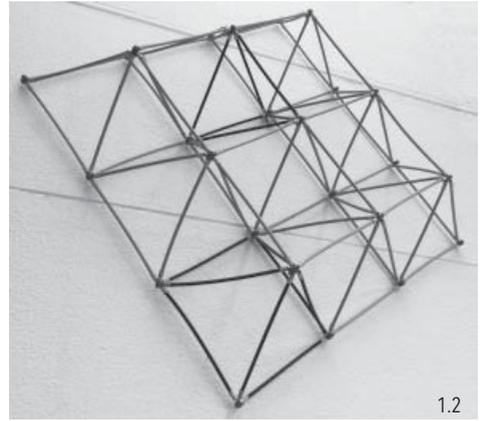
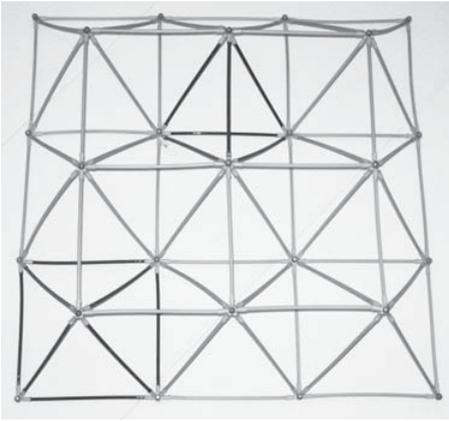
1.1 | Imágenes extraídas de los "Apuntes sobre cuádrilas regladas" del profesor Felipe Soler Sanz

Como estudiante en los primeros cursos de arquitectura tuve la suerte de cursar la asignatura de Geometría Descriptiva con el profesor Felipe Soler Sanz¹ que impartía su último curso en activo como docente. Gracias a sus clases aprendí a concebir la geometría del espacio con una visión unitaria de acuerdo como la facilitan las relaciones de homología, proporcionalidad, los conceptos de polaridad y sus aplicaciones.

DOCENCIA E INVESTIGACIÓN: BINOMIO INSEPARABLE

La docencia desde los primeros años de mi formación en arquitectura fue en paralelo a mis estudios. Ésta siempre ha estado ligada a la Expresión Gráfica en todas sus facetas. He podido conocer, gracias a la oportunidad de haber impartido clase de repaso en diferentes academias de nivel universitario, tanto para estudiantes de arquitectura, arquitectura técnica y diversas ingenierías, de que manera en cada uno de los distintos grados se trata la representación gráfica y más en concreto la materia de geometría.

Tras un periodo de experiencia laboral como arquitecto, realizando arquitecturas "racionalistas ortogonalizadas" y fundamentalmente de carácter comercial, pasé a formar parte del cuerpo docente de la Uni-



1.2

2 | "PFG-T14: Superficies arquitectónicas singulares", OBRA PROPIA, 2011 - Publicación que recoge los Proyectos Final de Grado de los alumnos del taller dirigido por Rafael Ligorit y Francisco Javier Sanchis.

3 | "Los palacios góticos de la ciudad de Valencia. Su estudio y catalogación. Ejemplo gráfico" Concepción López - Tesis doctoral UPV, 1996

4 | "Las formas del hormigón. Catálogo práctico de diseño" Trabajo Final de Máster Francisco Javier Sanchis Sampedro

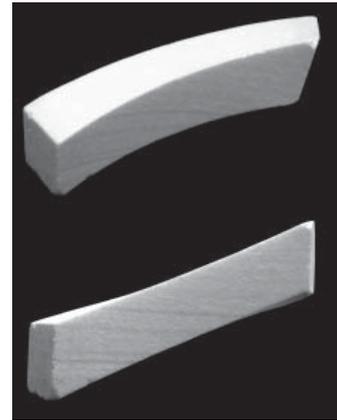
1.2 | Maqueta de celosía espacial realizada por el profesor Rafael Ligorit donde se aprecia una de las aplicaciones de los poliedros regulares en edificación.

versitat Politècnica de Valencia, donde me incorporo a la asignatura de Geometría Descriptiva en la Escuela Técnica de Ingeniería de Edificación (por aquel entonces de Gestión de la Edificación impartiendo la titulación de Arquitecto Técnico). En este periodo tuve la ocasión de compartir tiempo y espacio con el profesor Eduardo Espín Grancha, por el que manifiesto un gran reconocimiento y admiración, con el que pude conocer y aprender muchos detalles de la materia. Me llamó mucho la atención los estudios sobre superficies, intersecciones y sombras, así como sus extensos conocimientos sobre tratados de estereotomía de la piedra. Las largas conversaciones de despacho junto con Javier Blanes Plá, compañero de asignatura e íntimo colaborador del profesor Espín, sobre las superficies poliédricas y sus aplicaciones en arquitectura también me hicieron aprender y motivaron mi estudio hacia esta materia.

Posteriormente se me planteó la posibilidad de coordinar junto con el profesor y arquitecto Rafael Ligorit Tomás, compañero de estudios durante la carrera de Arquitectura de Rafael Valdecabres y ambos discípulos del profesor Fernando Nagore en la Universidad de Navarra en la década de los setenta, un taller de Proyecto Final de Grado de la nueva titulación de Ingeniero de Edificación². La temática final de este nuevo taller fue el estudio de las superficies geométricas aplicadas al diseño de la arquitectura.

Durante la dirección de los proyectos, entre final de carrera y final de grado, he podido comprobar que la información acerca de las superficies geométricas aplicadas a la arquitectura se encuentra muy dispersa, incluso en algunos casos es inexistente. A esto se le suma el hecho de que dependiendo del ámbito de arquitectura que se esté trabajando, se utiliza nomenclatura diferente para las mismas superficies ya que se manejan características diversas.

Dirigido por los profesores y catedráticos, Javier Benlloch Marco del Departamento de Construcciones Arquitectónicas y director del Máster de Edificación, y Concepción López González³ del Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica, y como primer paso en la investigación, redacté mi Trabajo Final de Máster⁴ que versaba sobre las superficies geométricas y las nuevas posibilidades formales y expresivas que ofrecía



1.3

el nuevo material, el hormigón armado, surgido a finales del siglo XIX y su evolución en los primeros años del siglo XX. Con este trabajo profundicé en aspectos geométricos y estructurales centrándome en un único material, analizando cualitativa y cuantitativamente las posibilidades del mismo. Fue una oportunidad para introducirme en el uso de programas de cálculo válidos para este tipo de superficies, diferentes de las que se suelen calcular habitualmente en la práctica profesional. Como conclusión del trabajo realicé un estudio donde, a partir de unos requisitos de forma previos, comparé el comportamiento estructural de diferentes formas geométricas de hormigón aplicables al diseño de la arquitectura.

Superado el trabajo final de máster, los profesores Concepción López González y Jorge García Valdecabres me sugieren continuar el trabajo iniciado en torno al análisis de los trazados reguladores de la arquitectura contemporánea a partir de la geometría métrica del espacio. Después de haber conocido los resultados de los trabajos desarrollados por ellos⁵ recientemente así como los obtenidos anteriormente por los profesores Felipe Soler Sanz⁶ y Rafael Valdecabres Gómez⁷, me planteo continuar los trabajos de análisis geométrico en torno a esta materia.

GEOMETRÍA COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO Y ANÁLISIS

La Geometría es una herramienta fundamental de diseño y análisis de la Arquitectura. No es casual que, tradicionalmente, en todos los planes de estudio de las escuelas de Arquitectura e Ingeniería aparezca como una materia de estudio obligatoria, abarcando una parte importante de los créditos de los primeros cursos⁸. En los últimos años la geometría entendida en sentido clásico ha perdido importancia frente a otras asignaturas de expresión gráfica en las que se emplea como instrumento fundamental el ordenador y los programas de dibujo informatizado⁹. La cuestión es tratar de evitar que se pierda el concepto de la disciplina que no solo suministra los medios para la representación gráfica de la arquitectura, sino que facilita la formación de la estructura del pensamiento y del lenguaje gráfico de la misma. Y es esta capacidad formativa la que se hace ineludible que se transmita a través de los nuevos medios y las nuevas estrategias.¹⁰

5 | "La instauración del sistema metroológico valenciano y de Jaume I en la tradición medieval: Los sistemas de unidades, las prácticas de control y los usos" Concepción López y Jorge García

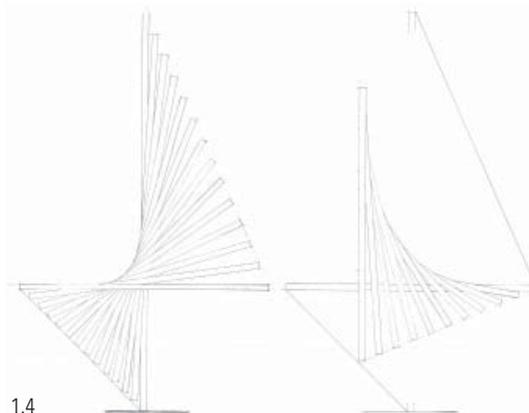
6 | "Trazados reguladores octogonales en la Arquitectura Clásica" Felipe Soler Sanz - Ediciones Generales de la Construcción, Valencia 2008

7 | "Estructura geométrica de las superficies arquitectónicas" Rafael Valdecabres Gómez - Servicio de Publicaciones UPV, 1988

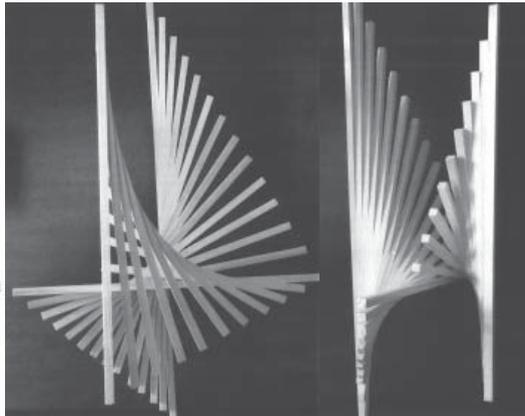
8 | "Sobre dibujo y diseño. A propósito de la proyectividad de la representación de la arquitectura". Juan M. Otxotorena

9 | "Libro Blanco del Título de Grado en Ingeniería en Edificación", ANECA 2004

1.3 | Pieza modelada en poliestireno simulando la estereotomía de la piedra de un pasamanos de escalera helicoidal. Realizada por los profesores Eduardo Espín y Javier Blanes



1.4



10 | "Seis ideas para una nueva geometría... ¿Descriptiva?" Ángel José Fernández Álvarez. En este artículo publicado en el nº5 de la revista EGE en 2008, el autor hace una reflexión sobre el estado actual de la materia de geometría descriptiva y su futuro a la luz de la entrada del EEES.

11 | "La métrica y las trazas en la iglesia de San Juan del Hospital en Valencia" Tesis doctoral UPV, 2010. Jorge García Valldecabres
En esta tesis el profesor Jorge García Valldecabres hace un levantamiento de la Iglesia para posteriormente estudiar los trazados reguladores de la misma. Es un claro ejemplo de investigación en arquitectura patrimonial antigua

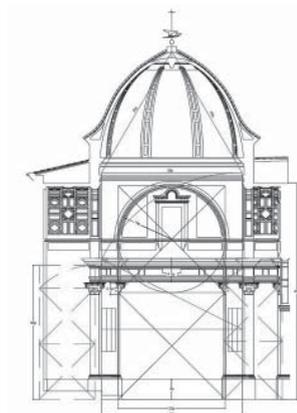
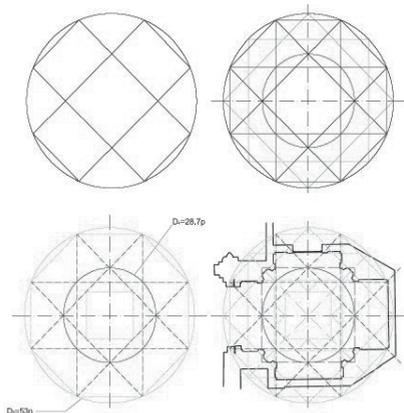
1.4 | Secuencia de planos e imágenes de una de las maquetas que forman parte de la actual línea de investigación del profesor Felipe Soler Sanz. Imágenes cedidas por el autor.

En un primer momento el presente trabajo surge con la intencionalidad de enriquecer y responder a esta inquietud. El pensamiento y su manifestación a través del lenguaje gráfico son los que vertebran y sirven a las materias en sus distintas fases que intervienen no solo en la formación del futuro profesional, sino también en los distintos campos del ejercicio.

Al plantearme este estudio me encuentro en un primer momento con que el concepto Geometría es muy amplio. Por un lado nos encontramos con la parte instrumental de la geometría, la denominada "Geometría Descriptiva", y que tiene por objetivo el estudio de los diferentes Sistemas de Representación; Otra parte de la geometría que se puede aplicar al análisis de la arquitectura es la "Geometría Métrica Plana", que se encarga de estudiar las relaciones en planta y alzado de las diferentes partes del edificio intentando deducir los trazados reguladores que generaron la arquitectura estudiada; y en siguiente lugar tendríamos la "Geometría Métrica Espacial" que se centraría en el estudio de las superficies geométricas que se generan al aplicar los trazados anteriormente mencionados.

Con todo esto, al plantearme realizar una tesis doctoral sobre superficies geométricas, me planteo en primer lugar hacer una recopilación de todas las fuentes documentales que tratan la geometría métrica espacial como herramienta de diseño y análisis de la arquitectura y posteriormente una aplicación práctica de análisis en un edificio actual de reciente construcción y donde el empleo de las superficies es importante y singular, siempre sin perder de vista la condición de técnico que me obliga a tener una visión global de ésta utilización. Las consecuencias estructurales y constructivas van íntima e irremediabilmente ligadas al diseño de un edificio, por lo que no hay que perderlas nunca de vista, es más, siempre hay que relacionarlas con el diseño y la aplicación de las diferentes geometrías singulares.

*"La geometría es la clave para entender el resto de parámetros de la construcción. Establece un criterio geométrico simple que permite, mediante su repetición o derivación, obtener un orden racional en un todo y que subyace aunque pudiera presentarse aparentemente desordenado."*¹¹



1.5

Hoy en día, y más que nunca, la geometría se convierte en herramienta imprescindible para la rehabilitación de los edificios históricos. Toda intervención sobre un edificio con valor patrimonial requiere realizar inicialmente un profundo estudio previo. Un análisis en el cual la geometría es la clave para entender el resto de parámetros de la construcción y la estructura. Establecer un criterio geométrico simple que introduzca un orden racional en el todo, aparentemente desordenado.

Pero este tipo de estudios también se pueden realizar en edificios patrimoniales recientes con un triple objetivo: Realizar un correcto mantenimiento de los mismos, comprender el diseño y los parámetros que utilizó el arquitecto en su ideación, y lo que para mí es más interesante, analizar cualitativamente y cuantitativamente el diseño y de esta manera poder comprender y valorar las diferentes soluciones estructurales y constructivas derivadas del uso de la geometría.

ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN

Actualmente pertenezco al departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica en la Universidad Politécnica de Valencia, en el cual existe una larga tradición de investigación en el análisis de la geometría métrica plana en la edificación de carácter histórico-patrimonial. Compañeros como Juan Carlos Navarro Fajardo, cuya investigación versa sobre las trazas y montañas de las bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV a XVI¹² o Jorge García Valldecabres que en su tesis hizo un estudio geométrico de los trazados reguladores aplicados a la iglesia de San Juan del Hospital de Valencia¹¹, son ejemplos recientes de esta tradición.

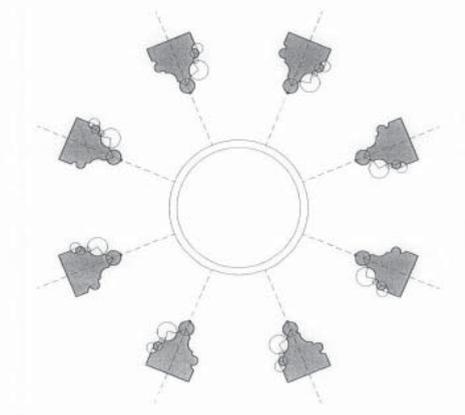
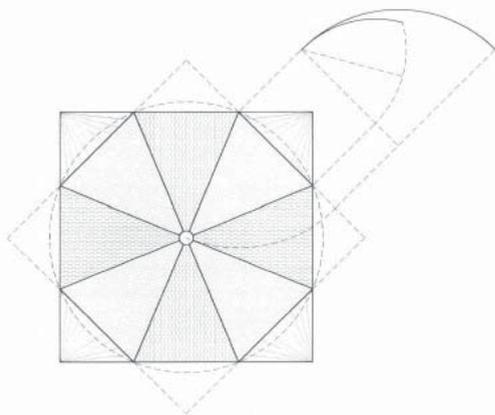
A través de mis directores volví a tener relación con el profesor Soler Sanz y pude conocer los interesantes trabajos de investigación que venía desarrollando¹³ y que tan buenos resultados estaban dando en torno a el estudio de edificios, tanto de arquitectura clásica como contemporánea. Una parte de los resultados han sido recopilados en el libro titulado "Trazados octogonales en la Arquitectura Clásica"⁶. Este fue prologado por el profesor José María Gentil Baldrich en forma de artículo de investigación con el título "Sobre la proporción y los trazados reguladores geométricos de la Arquitectura". En él expone las inquietudes y con-

12 | "Bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV al XVI. Traza y montea" Tesis doctoral, 2004. Juan Carlos Navarro Fajardo

El estudio de las diferentes geometrías de las bóvedas de crucería valenciana, un elemento tridimensional, lleva al profesor Juan Carlos Navarro Fajardo en su tesis doctoral a realizar un estudio geométrico plano de las bóvedas para extraer sus trazas

13 | "Apuntes sobre cuádricas regladas" Felipe Soler Sanz. Apuntes manuscritos en los que aporta una gran base teórica acerca de las superficies regladas de aplicación en arquitectura

1.5 | Análisis geométricos extraídos de la tesis doctoral "La métrica y las trazas en la iglesia de San Juan del Hospital en Valencia" Jorge García Valldecabres, 2010



1.6

14 | "Las cúpulas de la arquitectura religiosa de la provincia de Alicante: del Renacimiento al siglo XIX" Francisco García Jara - Tesis doctoral UPV, 2008

15 | "La composición geométrica de las villas paladianas. La Rotonda" Juan José Cisneros - Tesis doctoral UPV, 1996

16 | "Colección de ejercicios de Geometría Descriptiva" Juan José Cisneros y Pedro Manuel Cabezos

17 | "Geometría para la arquitectura. Ejercicios de sistemas de representación" Julio Albert, Vicente Querol y Antonio Sintas

18 | "Contribución al estudio del asoleo geométrico. Procedimientos para el cálculo del factor de obstrucción solar" José Luis Higón - Tesis doctoral UPV, 2004

1.6 | "Análisis geométricos extraídos de la tesis doctoral Bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV al XVI. Traza y monte" Juan Carlos Navarro Fajardo 2004

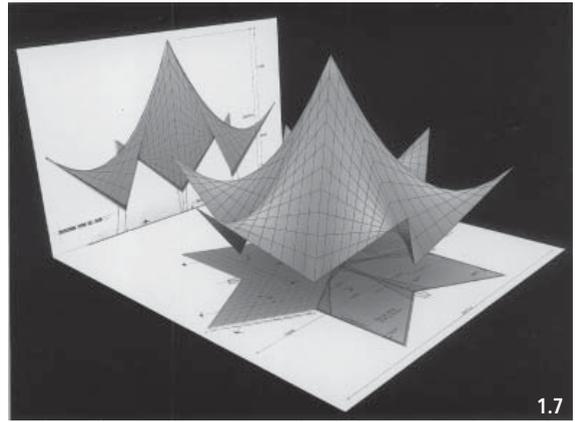
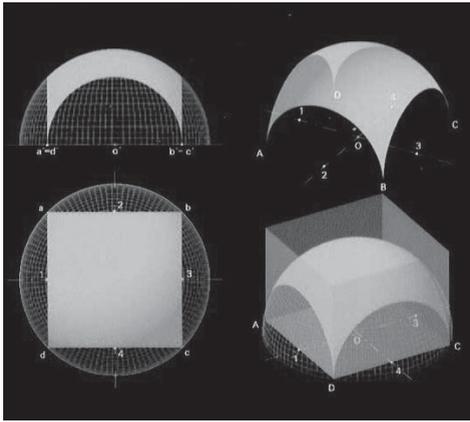
dicionantes que los arquitectos y maestros de obra encuentran en los distintos momentos del diseño, desde sus primeros esbozos, hasta su ejecución material con la puesta en obra. Fue un libro muy bien recibido por la comunidad científica y los estudiosos de la materia.

El profesor Soler Sanz prosiguió las investigaciones dirigiendo distintos trabajos entre los que destacan dos interesantísimas tesis doctorales sobre el trazado geométrico de cúpulas realizado por el profesor de la Universidad de Alicante, Francisco García Jara¹⁴, y otra sobre los trazados reguladores en la iglesia de San Juan del Hospital del profesor Jorge García Valldecabres¹¹, codirigida por la profesora Concepción López y con una introducción muy completa acerca de la tradición del uso de la geometría en el diseño de la arquitectura antigua.

Por aquel entonces pude conocer los trabajos que había llevado a cabo el profesor Rafael Valldecabres Gómez, y que en el año 1985 publicó bajo el título "Hacia la comprensión de las superficies arquitectónicas", libro de reducida tirada y que pronto fue reeditado y ampliado en el mismo año bajo un nuevo título. El trabajo del profesor Valldecabres trataba de manera conjunta las superficies agrupándolas por familias y subfamilias, atendiendo al modo de ser generadas y obtenidas, y que responde a una clasificación contrastada y con una especial atención a la intencionalidad arquitectónica.

Continuadores en parte de las líneas de trabajo iniciadas por Soler Sanz y Valldecabres Gómez son también los profesores Juan José Cisneros Vivó¹⁵ y Pedro Cabezos Bernal¹⁶, Julio Albert Ballester y Antonio Sintas Martínez¹⁷, y José Luis Higón Calvet¹⁸ los cuales desarrollan en la asignatura de Geometría Descriptiva los principios de análisis y generación del diseño arquitectónico a través de los nuevos medios informáticos.

El presente campo de estudio en el que se enmarca el trabajo de la memoria de tesis doctoral permite la aplicación del análisis tridimensional tanto de edificios antiguos como contemporáneos. En él se emplean tanto los métodos gráficos tradicionales de la geometría descriptiva como las herramientas informáticas actuales, que ayudarán a la rápida definición de los parámetros y clasificación de las entidades geométri-



cas singulares encontradas. Así podremos comprender mejor el diseño y las consecuencias del mismo desde sus distintos puntos de vista: el estético compositivo, el constructivo y el de la estabilidad - durabilidad estructural.

1.7 | Imágenes extraídas de la colección de ejercicios de Geometría Descriptiva de la ETSAV-UPV

1.2 | OBJETIVOS

19 | Utilizando los instrumentos de control de forma tal y como los plantea el profesor Ruiz de la Rosa en su publicación "Traza y simetría de la arquitectura en la antigüedad y medievo" Edita Universidad de Sevilla, 1987

La investigación se va a centrar en el reconocimiento, análisis y clasificación de la geometría utilizada para el diseño global de los edificios y en determinadas partes singulares, incidiendo fundamentalmente en la comprensión de las leyes que configuran la geometría que las define, en los motivos por los que se debieron emplear y en la verificación de sus consecuencias constructivas y estructurales. A continuación paso a enumerar los objetivos del trabajo:

1_Estudiar como la geometría ha sido empleada a lo largo de la historia de la Arquitectura, y de esta manera poner en valor su utilización en el diseño de los edificios. Se recorrerán aquellas etapas de la historia más significativas e influyentes de la arquitectura occidental actual¹⁹. Para este propósito ha sido de gran ayuda el manual del profesor José Antonio Ruiz de la Rosa.

2_Analizar la relación entre Geometría, Diseño, Estructura y Construcción. Establecer la importancia de la Geometría como herramienta que ayuda a dar coherencia al resto de parámetros de la Arquitectura. Para esta finalidad se ha seguido entre otros el libro sobre superficies del profesor Rafael Valldecabres Gómez.

3_Realizar un estudio de las clasificaciones de las superficies geométricas aplicadas a la Arquitectura estudiando las que se han realizado desde diferentes campos de la ciencia y la edificación (geometría descriptiva, matemáticas, estructuras, construcción, ...). Tras este estudio se marca como objetivo el diseño de una única clasificación que recoja al máximo posible todas las estudiadas anteriormente.

4_Developar un estudio de las superficies geométricas desde el punto de vista arquitectónico, utilizando para ello los sistemas de representación más adecuados y los medios informáticos que ayuden a un mejor entendimiento de las mismas. El estudio se llevará a cabo a partir de unas fichas en las que se indicará la clasificación de las mismas acorde a lo establecido en el anterior objetivo, así como sus propiedades geométricas fundamentales. También se incluirán un resumen de las principales aplicaciones en Arquitectura.

5_Catalogación del uso de la Geometría mediante diversos ejemplos de Arquitectura. Se realizarán una serie de análisis geométricos de edificios en los que la utilización en su diseño de las superficies geométricas ha sido de relevante importancia. Estos análisis acompañarán a las fichas anteriores a modo de catálogo de aplicación para su mejor comprensión y posible aplicación. La selección de los edificios a analizar se realizará teniendo en cuenta las diferentes épocas de la historia de la Arquitectura, los distintos materiales utilizados en su construcción y los diversos usos dados al edificio o elemento analizado.

6_Analizar en profundidad el uso de la geometría en edificios contemporáneos de la ciudad de Valencia, así como su relación con el resto de parámetros estructurales, constructivos y de diseño. Los edificios escogidos serán los que integran la "Ciutat de les Arts i de les Ciències" de Valencia.

7_Realizar un resumen comparativo de los parámetros obtenidos en los estudios anteriores de manera que se puedan determinar afinidades y divergencias entre ellos²⁰, según el grado de idoneidad de cada una de las superficies geométricas analizadas, desde la aplicación geométrica de las superficies en el diseño, sus consecuencias en el proceso de ejecución material y su coherencia estructural.

Con este trabajo se pretenda dar luz y poner en valor ante la sociedad y los profesionales de la arquitectura, la importancia que tiene el uso de una geometría bien definida y elegida de acuerdo a unos principios propios de la lógica del diseño para la concepción y materialización de un edificio. Para ello, se aportan análisis de casos reales y actuales, y se establecen unos criterios de buena práctica, que se ponen de relieve en el coeficiente de idoneidad.

Una vez planteados los problemas y los ejemplos de aplicación, para finalizar se abren una serie de líneas de investigación para su posterior desarrollo a través de nuevos estudios.

20 | Se plantea recoger toda la información en un cuadro comparativo tal y como ya lo realizó el profesor Rafael Valdecabres Gómez en su publicación "Análisis Formal de 20 iglesias del casco antiguo de Valencia" editado por el autor en Valencia, 1993

1.3 | METODOLOGÍA

21 | Conferencia en la UPV en 1995 "Il disegno come strumento per l'analisi grafica dell'architettura" - Mario Docci

22 | Artículo en la revista Tectónica nº17 "Geometrías complejas" - "Geometría, Técnica y arquitectura" - Ramón Araujo Armero

El método empleado, y que más adelante explicaré en detalle, está basado en el que el profesor Mario Docci denomina "metodología estructuralista" y que en sus propias palabras:

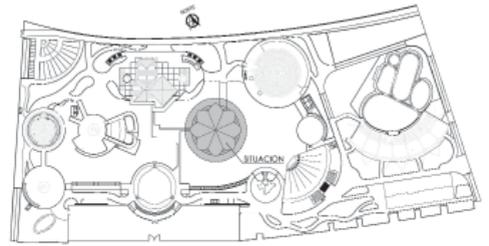
"... consiste en examinar un determinado suceso, descomponerlo en sus partes constituyentes para clasificarlas y volver a componerlo para poder comprender las relaciones que unen las partes entre sí y cada una de ellas con el todo".²¹

En todas estas acciones de descomposición y recomposición aplicadas a la arquitectura, la geometría es la herramienta fundamental del análisis.

Para ello, y siguiendo las indicaciones del profesor Docci, tras un análisis de los trazados geométricos planos que podemos extraer de las plantas, alzados y secciones de los edificios, a la manera que se ha venido haciendo en el Departamento, realizamos una generación geométrica partiendo de formas lo más básicas posibles e indicando las operaciones de modelado y modificación de la misma mediante planos, transparencias, líneas de sección, colores... en diferentes pasos independientes que finalmente se vuelven a componer para así tener una mejor comprensión del conjunto y las partes que lo forman.

En el desarrollo de los análisis he intentado que resulten muy explicativos y que de esta manera pueda servir a aquellos investigadores noveles que quieran adentrarse en el estudio de las superficies geométricas arquitectónicas y para todos aquellos arquitectos e ingenieros que quieran profundizar en el tema.

El estudio de los trazados reguladores es el paso previo al estudio tridimensional de la arquitectura que propongo en esta investigación. En la actualidad estos trazados bidimensionales, tal y como se va a comentar más adelante, se vuelven fundamentales en el diseño asistido por ordenador. Las herramientas informáticas de modelado tridimensional permiten una gran libertad y facilidad de creación y modificación de formas de todo tipo, que nunca antes ha existido en la historia de la arquitectura²². Debido a esto, se están utilizando en la actualidad formas muy complejas donde la geometría de las superficies no se ha tenido en



PLANTA P.O.U

1.9

cuenta como herramienta de control estructural y constructivo.

La intención es que no resulte una investigación donde se estudie la geometría como algo aislado en el diseño de un edificio, sino que como indicaba Vitruvio en su tratado, la triada estética, construcción y estructura estén íntimamente relacionadas. Por este motivo se han realizado análisis de edificios y parte de estos en los que la geometría y el uso de las superficies forman parte de su diseño, y se han analizado también las consecuencias que este uso ha tenido en el resto de facetas del edificio. Se ha realizado el análisis de varios edificios de diferentes épocas y estilos, un total de 47 arquitecturas, a nivel únicamente geométrico con el fin de poner en valor el uso de la geometría métrica espacial a lo largo de la historia de la arquitectura y situar la investigación dentro del contexto en el que se va a desarrollar.

Ya en la parte final de la investigación se han desarrollado análisis más completos sobre una serie de edificios y partes de ellos, ubicados en la "Ciutat de les Arts i de les Ciències" de Valencia, en los que, además del aspecto geométrico se ha querido analizar las repercusiones estructurales y constructivas que han tenido, relacionándolas con el diseño geométrico.

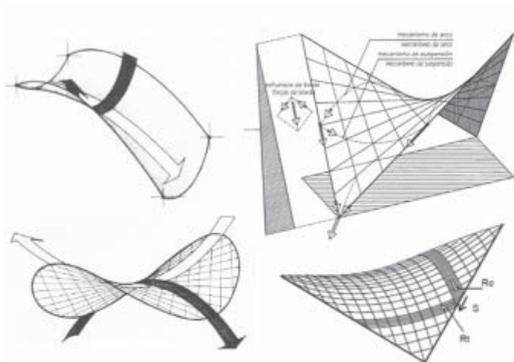
Los resultados de este análisis se han plasmado en una tabla que permite compararlos y extraer conclusiones. La conclusión más inmediata se ha incluido en la tabla, en la que se ha incorporado una columna con lo que se ha venido en denominar "coeficiente de idoneidad", que hace referencia al "buen o mal" uso de la geometría en relación con el diseño, estructura y construcción del edificio.

Una parte fundamental de la investigación se centra en la arquitectura reciente diseñada a partir de geometría definida. Tal y como se ha expuesto anteriormente, el estudio de este tipo de edificios no se puede abordar a la manera de la arquitectura tradicional o la arquitectura racionalista. Las formas complejas que componen este tipo de construcciones requieren de un estudio geométrico tridimensional.

Sucede lo mismo que al abordar el estudio las bóvedas góticas, como

1.8 | Imagen del edificio del restaurante del "Parc Oceanogràfic Universal" de Valencia, Félix Candela, Civis Project, CMD entre otros, 2002.

1.9 | Planta general del "Parc Oceanogràfic Universal", con la situación del edificio del Restaurante.



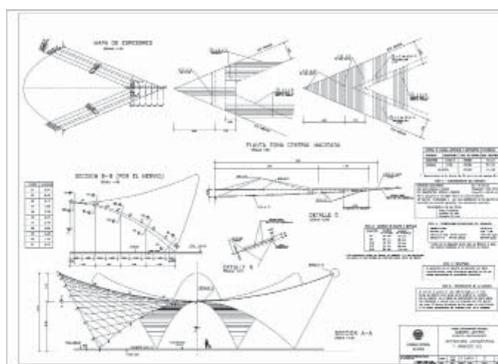
1.10

1.10 | Imágenes de estudio de la geometría y distribución de los esfuerzos del paraboloides hiperbólico

"Las estructuras de Félix Candela", Colin Faber, Compañía Editorial Continental SA, 1981

"Sistemas de estructuras", Heino Engel, Gustavo Gili, 1997

1.11 | Plano del proyecto de ejecución de la cubierta del Restaurante del "Parc Oceanográfico Universal". En él se puede apreciar el exceso de información recibida e innecesaria para nuestra investigación.



1.11

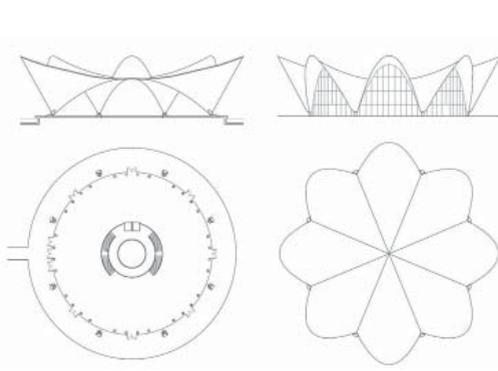
se puede observar en la tesis doctoral de Juan Carlos Navarro¹². En un primer momento hay que analizar y descubrir los trazados geométricos planos a partir de alzados, plantas y secciones, que en el caso de las bóvedas de crucería se podrían materializar en las plantillas de los canteros, para posteriormente pasar a dar espacialidad a estos trazados. De esta forma se puede tener un conocimiento completo de las superficies que dan forma a la bóveda, o como es mi caso, al edificio.

A diferencia de lo que sucede en el estudio de arquitectura antigua¹¹, donde la toma de datos cobra un papel fundamental en el estudio ya que no se posee información gráfica sobre los edificios, en el caso de la presente investigación el problema es diametralmente el opuesto. Por lo general existe un exceso de información. Archivos de dibujo por ordenador, imágenes, artículos, comunicaciones a congresos... Todo un despliegue de documentación acorde con la sociedad de la información en la que vivimos. Pero este aspecto, en contra de lo que se puede pensar, no es necesariamente una ventaja. Durante la investigación se ha podido constatar que las representaciones que se han manejado no siempre han sido correctas, incluso en ocasiones, muy alejadas de la realidad construida.

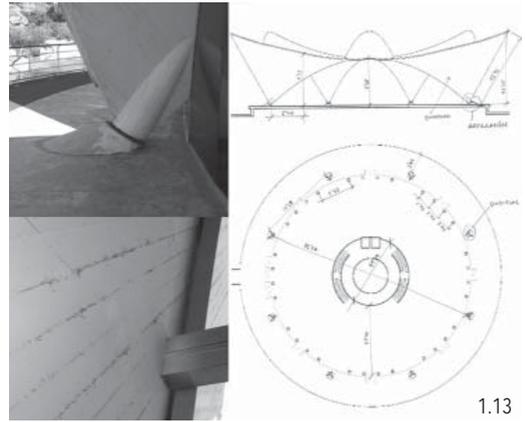
Por este motivo es por lo que, a pesar de la actualidad de los edificios y el exceso de información del que se dispone, previo al análisis de las formas que allí aparecen, se ha visto la necesidad de realizar un esfuerzo de selección, simplificación y comprobación de la información obtenida. La metodología que se ha venido empleando en la investigación es la que se va a describir a continuación. Se ha seleccionado un ejemplo ilustrativo para que se aprecie de manera práctica el proceso seguido.

1_Búsqueda de información:

Parece lógico pensar que si se quiere investigar patrimonio reciente, cuyo arquitecto no ha fallecido, toda la información previa a la investigación debería de provenir del mismo. La fuente de información no necesariamente ha de ser la del redactor del proyecto, sino que puede venir de cualquier otro de los agentes que hayan intervenido en la construcción. El único interés que podría tener el contactar con el arquitecto



1.12



1.13

sería el de conocer la intencionalidad del diseño, pero esto queda fuera del campo de esta investigación.

Gracias al carácter reciente de los edificios, se ha podido contactar con empresas constructoras, suministradoras, de management, ingenierías... que de manera parcial han ido aportando diferente tipo de documentación muy útil para el desarrollo posterior de las investigaciones. Ésta información es muy valiosa, ya que habla tanto del diseño geométrico de los elementos como de la materialización del edificio, que como todos sabemos no siempre responde de manera fiel al proyecto realizado por el arquitecto.

El inconveniente de conseguir la documentación de esta manera es que está muy dispersa y distribuida de manera parcial, además de ser en ocasiones excesiva para el alcance que pretende la investigación.

En la imagen 1.11 se puede observar el alto nivel de información que contiene unos de los planos que nos fue facilitado por los ingenieros que diseñaron la cubierta del restaurante del "Parc Oceanogràfic", Carlos Lázaro y Alberto Domingo.²³⁻²⁴

2_ Estudio y selección de la información obtenida:

Una vez obtenida la información acerca de uno de los edificios hay que realizar un trabajo de estudio y selección de la documentación necesaria para realizar las posteriores investigaciones. En este proceso, en ocasiones bastante complejo por la gran cantidad de información y la disgregación de la misma, es importante marcar los objetivos de estudio y la información que se va a necesitar posteriormente para la investigación. Siempre se puede volver para recuperar información descartada en este proceso, pero resulta más laborioso hacerlo a posteriori.

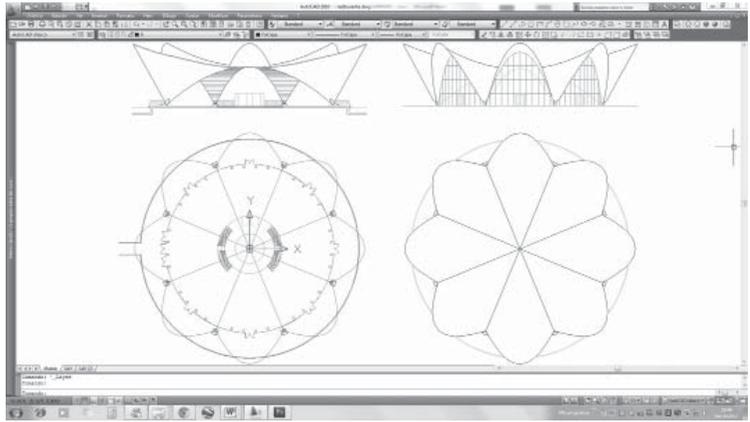
A continuación, en la imagen 1.12 se puede observar la información seleccionada para el estudio de la cubierta del restaurante.

23 | "Superficies arquitectónicas singulares. La cubierta JCHypar", Sergio Vinat Jarque, Proyecto Final de Grado ETSIE, 2011.

24 | "Superficies arquitectónicas singulares. Cubierta de acceso al Oceanogràfic", Leticia Martínez Martín, Proyecto Final de Grado ETSIE, 2011.

1.12 | Planos previos extraídos de los planos de proyecto y seleccionados para su posterior comprobación in situ.

1.13 | Imágenes tomadas in situ de diferentes detalles del edificio que pueden ser de relevancia para el estudio posterior y plano de trabajo con comprobación dimensional de la cubierta del Restaurante.



1.14

25 | "Edición avanzada de fotomodelos de edificios"
 Pablo Navarro Esteve, José Luis Cabanes Ginés,
 EGA: revista de expresión gráfica arquitectónica, ISSN 1133-6137, N.º. 14, 2009, págs. 68-73

1.14 | Captura de pantalla del programa Autocad 2010 donde ya se han realizado las modificaciones observadas en la fase de comprobación in situ. Se puede apreciar como la documentación que se maneja está incluida en un único archivo y relacionada entre sí por criterios de Geometría Descriptiva.

3_Toma de datos, apuntes y fotos in situ:

Una vez ya se ha seleccionado la información, la siguiente fase metodológica consiste en acudir al edificio para comprobarla, y en su caso tomar los datos necesarios y que no estén reflejados en la misma. La comprobación que se suele realizar es fundamentalmente dimensional, de manera que se comprueban aquellas magnitudes generales y también aquellas que generen dudas acerca de su representación. Si se detecta alguna carencia con respecto de la información obtenida, se realiza una toma de datos sobre la misma para luego incorporarla al estudio.

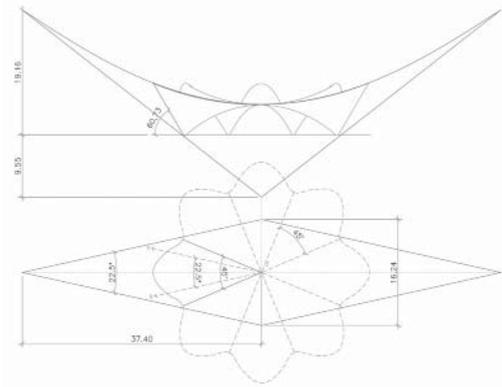
La toma de fotografías también es una actividad importante para documentar el edificio. Además de las imágenes generales, suelen buscarse fotografías cuyos encuadres ayuden a entender detalles concretos o incluso empiecen a desvelar geometrías que más adelante se analizarán.

En la mayoría de ocasiones se descarta el levantamiento fotogramétrico debido a la singularidad en la forma de los edificios, que dificultan el trabajo. Sin embargo, la utilización del escáner 3d podría ser una alternativa a la comprobación de los datos de manera tradicional. El profesor Pablo Navarro Esteve²⁵ lidera una línea de investigación con magníficos resultados que podría completar esta fase de manera mucho más precisa.

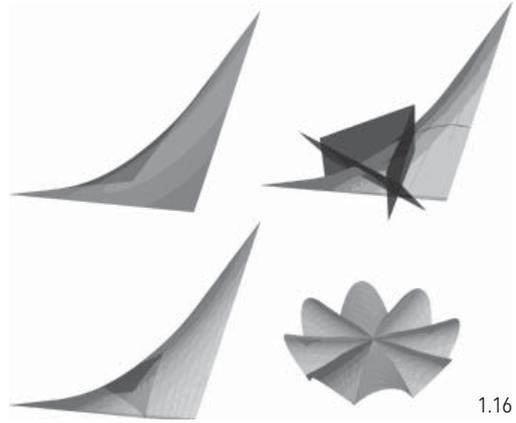
También puede realizarse una toma de datos del entorno, ya que en ocasiones la información obtenida está descontextualizada y puede resultar de interés estudiar el edificio en relación con el emplazamiento.

Si durante todas estas comprobaciones se percibe algún tipo de patología que pudiera resultar interesante para el estudio estructural o constructivo posterior, se documenta mediante apuntes y fotografías. Estas manifestaciones patológicas pueden desvelarnos un mal comportamiento estructural, un inapropiado proceso constructivo, un despiece de materiales... y en consecuencia una mala aplicación de las superficies geométricas.

Como se puede apreciar en la imagen 1.13, se realizó una comproba-



1.15



1.16

ción dimensional del edificio del restaurante y se realizaron una serie de fotografías que posteriormente ayudaron a documentar las investigaciones que se realizaron sobre el mismo.

4_Simplificación y preparación final de los datos del estudio:

Una vez ya se ha seleccionado la información, se han realizado las comprobaciones in situ y se han añadido aquellos datos y fotografías de interés, se prepara la documentación para la siguiente fase donde comienza el análisis del edificio.

Los datos se preparan en un único archivo de cad que contenga toda la información necesaria y relacionada siguiendo los criterios de la Geometría Descriptiva, de manera que las diferentes vistas del edificio o del elemento constructivo a estudiar se relacionen y haya correspondencia de vistas. La representación se realiza lo más simplificada posible para que resulte sencillo su estudio posterior.

Así mismo, todas las anotaciones, imágenes y datos recopilados se almacenan convenientemente seleccionados y organizados.

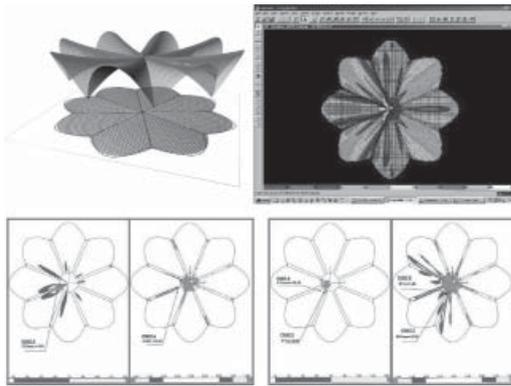
En la captura de pantalla 1.14 se puede ver el resultado final de estas fases de documentación y toma de datos de la cubierta del edificio del restaurante.

5_Búsqueda de los trazados reguladores:

Teniendo la información seleccionada, comprobada y representada de manera simplificada, el siguiente paso es analizar los trazados reguladores de diseño. Esta es una labor compleja y analítica. En ocasiones estos trazados se pueden ver con facilidad, pero en la mayoría de las superficies complejas no son directos y requieren de diferentes operaciones basadas en los métodos de la Geometría Descriptiva para su estudio. Cambios de plano, giros, abatimientos... cualquiera de los métodos de trabajo que en su día estudiamos en primer curso de arquitectura son nuestros aliados en el proceso de análisis.

1.15 | Trazados reguladores de la cubierta del Restaurante.

1.16 | Proceso de modelización de la cubierta. Como se puede apreciar se pretende que el modelado sea lo más explicativo posible para que los alumnos puedan entender la superficie y su generación.

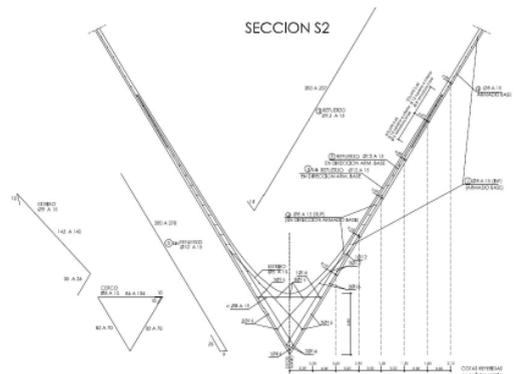


1.17

26 | El hecho de utilizar varios programas informáticos es debido a las diferentes características de los mismos. Habitualmente el Autocad se ha utilizado para los trazados bidimensionales y algunas modelizaciones. El Rhinoceros debido a su mayor potencia en la modelización es el que se ha utilizado para las modelizaciones de superficies más complejas. Y el 3dStudio, debido a sus avanzadas propiedades de renderizado y aplicación de materiales, se ha empleado para dar la imagen final al proceso de modelado.

1.17 | Modelo final de la cubierta del Restaurante, pantallazo y datos extraídos del programa de cálculo de estructuras SAP 2000.

1.18 | Sección de la cubierta del Restaurante con indicación de las armaduras, espesores y replanteo de la superficie.



1.18

En un primer momento se han de buscar trazados en los alzados, plantas y secciones que se obtienen a partir de los planos del edificio. En estas vistas podemos encontrar rectas, circunferencias, elipses, polígonos regulares... Estos trazados son las directrices y/o generatrices de las superficies que van definiendo la forma del edificio. Una vez encontradas estas geometrías básicas hay que relacionarlas entre sí. Las de la planta con las del alzado, las de una sección con las del otro alzado... De esta comparación en ocasiones se puede obtener la geometría generadora. En otras ocasiones es necesario realizar algún cambio de plano para obtener otra proyección del edificio, o un abatimiento, para obtener una verdadera magnitud...

Los trazados reguladores de la cubierta del restaurante (imagen 1.15) son bastante complejos y debido a que la superficie, tal y como veremos más adelante, no se encuentra "completa" en el edificio, sino que está cortada por unos planos que la desvirtúan.

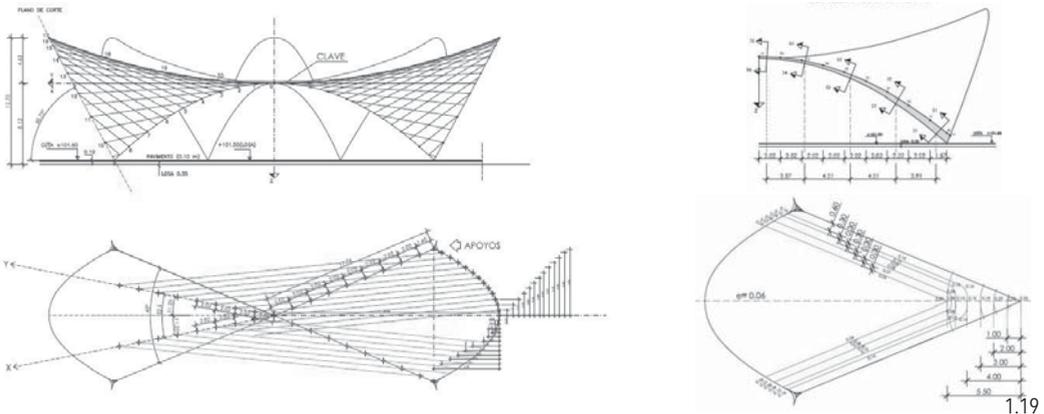
6_Modelización esquemática y explicativa:

Posteriormente a la consecución de los trazados reguladores y su posición en el edificio, se procede a generar los modelos tridimensionales esquemáticos que servirán de base para los posteriores estudios.

Esta modelización, no pretende ser una representación fotorealística, sino que su objetivo es generar una superficie en tres dimensiones que puedan ser objeto de estudio desde muy diversos puntos de vista: estructural, constructivo, formal...

Para generar estos modelos, se utilizan diferentes programas informáticos dependiendo del tipo de superficie y de las necesidades de representación. Los más empleados son el Autocad 3d, Rhinoceros y 3dStudio²⁶.

Además de este objetivo, dada nuestra condición de profesores de Geometría Descriptiva, siempre se ha procurado que el proceso de modelización que se realiza de las superficies sea lo más explicativo posible. Probablemente motivado por la falta de motivación de nuestros estu-



1.19

diantes hacia la asignatura, desde hace ya años utilizamos el contenido de nuestra investigación para que vean una aplicación sobre edificios reales y lo más cercanos posibles.

Como se puede apreciar en la imagen, el proceso de modelización seguido en la cubierta del restaurante pretende ser muy claro y explicativo, realizado por pasos y con indicación 3d de los planos que intervienen en el proceso así como de la superficie original.

7_Trabajo de análisis con los modelos:

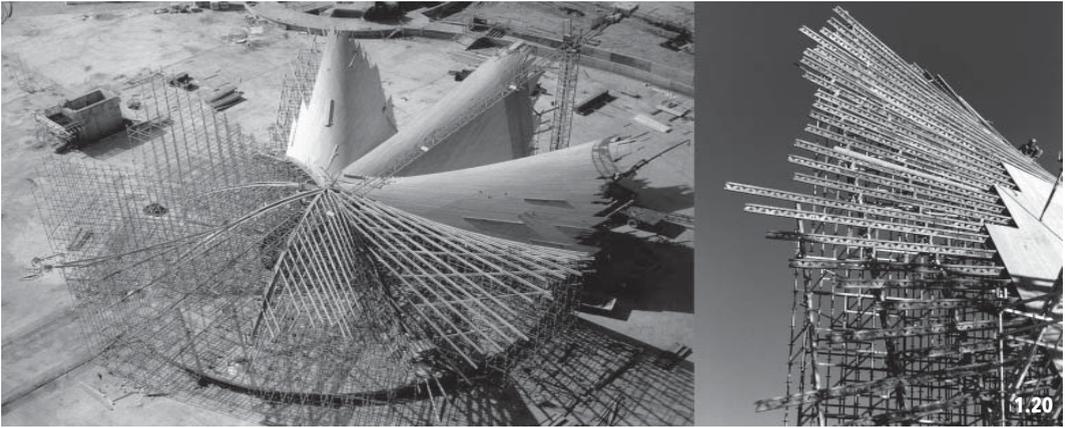
Una vez obtenidos los modelos, el análisis que se puede realizar con ellos es muy diverso. Desde un análisis puramente geométrico donde se puede estudiar la generación de la superficie, sus características geométricas, hasta como estas influyen en su construcción o comportamiento estructural. Pueden obtenerse secciones que nos hablen de la distribución de esfuerzos en la superficie. Pueden introducirse en programas de cálculo (imagen 1.17) para ver las deformaciones que tendrían frente a diferentes hipótesis de carga. Pueden estudiarse diferentes despieces de los materiales (imagen 1.18)...

En las imágenes 1.19 a 1.20 puede apreciarse el uso de la geometría de las superficies durante la ejecución de la cubierta, materializado en el diseño del encofrado cuyos largueros y listones de madera siguen la dirección de las generatrices rectas del paraboloides hiperbólico.

En definitiva, llegados a este punto, se pone al servicio de aquella línea de investigación que quiera trabajar sobre cualquier aspecto relacionado con la superficie analizada, un modelo que le permite afrontar el estudio de la manera más sencilla y efectiva posible.

Sirva como ejemplo el estudio realizado sobre la cubierta del restaurante del "Parc Oceanogràfic", donde además del estudio geométrico de generación y posterior modelización de la cubierta, se realizó un estudio del proceso constructivo y del comportamiento estructural.

1.19 | Planos de análisis realizados a partir de la modelización de la cubierta del restaurante de su estudio geométrico.
"Superficies arquitectónicas singulares. La cubierta JCHypar", Sergio Vinat Jarque, Proyecto Final de Grado ETSIE, 2011.



1.20 | Imágenes de la ejecución de la cubierta del Restaurante donde se puede apreciar el uso de la geometría en la colocación de las vigas de encofrado y el propio encofrado.

"Superficies regladas en Arquitectura. Análisis constructivo", Aleksander Sashkov Angelov, Proyecto Final de Carrera, 2009

Para concluir este apartado comentar que para comprender la arquitectura reciente se requiere de un análisis espacial que el caso de la arquitectura tradicional se realiza en el plano. La geometría métrica plana ha de dar un paso más y convertirse en espacial para el total entendimiento de las superficies singulares que en esta se dan. El uso de los programas informáticos de modelización tridimensional son imprescindibles para poder llegar al modelo, pero también los métodos de la Geometría Descriptiva más tradicional se vuelven imprescindibles para la obtención de los trazados planos que serán la base del posterior modelado.



1.4 | CONTENIDO

El presente trabajo de investigación está organizado de manera progresiva, de lo más general a lo particular. Es por esto que se ha estructurado en tres partes fundamentales:

PARTE A | INTRODUCCIÓN

En esta primera parte se comienza desarrollando un prefacio en el que se indican los motivos y la justificación que llevan al desarrollo del trabajo, se marcan los objetivos a conseguir, la metodología a emplear y, en estas líneas, se describe el contenido del trabajo.

A continuación se analiza la relación que existe entre el uso de la geometría en la arquitectura y otras facetas de esta como son la construcción, la estructura o el diseño en fase de proyecto.

En el apartado siguiente se desarrolla un breve pero necesario repaso por el uso que se ha dado a la geometría de las superficies en la historia de la arquitectura, haciendo especial incapié en las superficies singulares utilizadas en cada una de las épocas y todo aquello que motivó su utilización: nuevos materiales, sistemas estructurales y constructivos, parámetros estéticos...

Durante este resumen histórico de aplicación de la geometría métrica espacial en la historia de la arquitectura se incidirá en aquellos arquitectos, maestros de obra, constructores... valencianos y que han hecho un uso singular de las superficies geométricas.

Tras una breve explicación de las diferentes modalidades de investigación que existen en el área de expresión gráfica y situar el trabajo dentro de ellas, se procede a establecer el estado de la investigación relacionada con el tema e indicar las fuentes documentales más relevantes que se van a utilizar.

página anterior | Imagen de la superficie de la cubierta del Restaurante recién desenfocada. Se puede apreciar la ligereza y los apoyos. Imagen cedida por FCC.

PARTE B | LA GEOMETRÍA DE LAS SUPERFICIES ARQUITECTÓNICAS

Para comenzar esta segunda parte, se expone en primer lugar la problemática que motiva en parte este trabajo. Al adentrarse en el estudio de las superficies en general, nos encontramos con una gran disparidad de clasificaciones que a lo largo de la historia y desde los diferentes campos de investigación, se han realizado de las mismas. Dependiendo el punto de vista de los estudios se han establecido criterios diferentes de clasificación y parametrización. Incluso dentro de un mismo campo, los diferentes autores no han establecido una única clasificación sino que cada uno ha dado sus matices personales.

Posterior a esta exposición se procede a detallar de manera más concreta las clasificaciones dentro de los diferentes campos: geometría, estructuras, matemáticas y programas de diseño asistido por ordenador. Dada la dificultad de establecer una clasificación global que tenga en cuenta todos los parámetros estudiados, se adoptará unos criterios por cada una de las áreas de conocimiento que después se utilizará para definir de manera detallada cada una de las superficies.

Para finalizar esta parte se han realizado unas fichas a modo de catálogo que pretenden dos objetivos:

1_Mostrar las superficies geométricas de mayor uso en la Arquitectura, con su clasificación desde diferentes puntos de vista y basándose en las establecidas en el punto anterior. También se indica en las fichas aquellas propiedades geométricas más relevantes.

2_Dar un catálogo de ejemplos representativos del uso de las superficies analizadas que ilustren la aplicación de estas a lo largo de la historia de la arquitectura, con diferentes materiales y sistemas estructurales.

La información con la que se ha trabajado en esta parte del trabajo está extraída de libros, revistas, ponencias, páginas web...

27 | "Control gráfico de formas y superficies de transición", Isabel Crespo Cabillo, Tesis Doctoral, Univesitat Politècnica de Catalunya, 2005.

28 | "Valor barroco en la arquitectura valenciana"; Francisco Juan Vidal, General de Ediciones de Arquitectura, 2006.

PARTE C | ANÁLISIS FORMAL GEOMÉTRICO DE ARQUITECTURA CONTEMPORÁNEA

La tercera parte es la aplicación práctica de lo anteriormente estudiado.

Para comenzar esta tercera parte se realiza una introducción que, en resumen, defiende el hecho de que el uso de las superficies geométricas en la arquitectura actual se ha convertido en la herramienta de la que dispone el arquitecto para luchar contra el minimalismo impuesto durante las primeras décadas del siglo XX.

"Liberada la arquitectura del recurso del ornamento, la geometría se convierte de ésta manera en la responsable de la expresión arquitectónica"²⁷

Teniendo en cuenta estas consideraciones, y tal y como indica Francisco Juan²⁸, en la ciudad de Valencia tenemos uno de los ejemplos de arquitectura contemporánea donde mejor se aprecia, entre otras consideraciones, el uso de esta geometría como recurso compositivo de la arquitectura, lo que él llega a definir como el "nuevo barroco valenciano". Esto es lo que justifica el análisis de la "Ciutat de les Arts i de les Ciències" de Valencia como ejemplo de arquitectura contemporánea en la que se deja el peso de la expresión arquitectónica a las superficies geométricas. Posteriormente se pasa a analizar uno por uno los edificios que componen el complejo CACV haciendo especial incidencia en aquellas superficies geométricas que definen la forma de los edificios.

CONCLUSIONES

Finalmente se desarrollan unas conclusiones que consistirán en la realización de unos cuadros resumen correspondientes al estudio realizado en las partes B y C. El primero de los cuadros contiene una clasificación de las superficies que incluye los criterios de las analizadas en la parte B, y el segundo expone de manera comparativa los parámetros estudiados de las diferentes superficies de la CACV, estableciendo para cada una de ellas lo que se define como coeficiente de idoneidad.



2 | GEOMETRÍA Y ARQUITECTURA

2.1 | REFLEXIONES SOBRE GEOMETRÍA Y ARQUITECTURA

1 | "Los diez libros de arquitectura" – Marco Vitruvio Polión

2 | "El escándalo de la ópera de Sidney" Félix Candela

Estas primeras reflexiones sirven de marco en torno al cual se van a desarrollar los estudios posteriores y de como la arquitectura y la geometría, como disciplina científica, se han desarrollado de manera paralela complementándose y ayudando a resolver los problemas se se iban plantenado.

En el tratado más antiguo que se conserva sobre arquitectura, "De Architectura"¹, Marco Vitruvio afirma que la arquitectura descansa en tres principios fundamentales: 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.

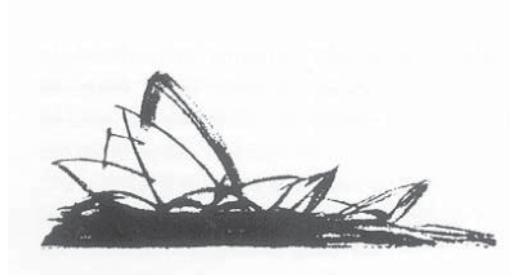
La consecuencia de priorizar uno de los tres principios sobre los otros dos nos lleva a casos tan conocidos como el de la Ópera de Sidney. La opinión expuesta en 1964 por Félix Candela sobre la resolución del concurso de este edificio de Jörn Utzon y el desenlace final de la obra, que supuso un elevado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

*"¿Para qué descender a tan prosaicos detalles como el de asegurarse que una estructura tiene posibilidades de ser construida? Quédese 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."*²

Si bien es cierto que el resultado final de la ópera de Utzon constituye uno de los edificios más bellos de la historia de la arquitectura, el camino hasta su materialización no fue sencillo. Las sugerentes y atractivas formas del diseño preliminar que obtuvieron el premio del jurado, presidido por Eero Saarinen, se volvieron en contra del arquitecto durante el desarrollo de la construcción.

"Los dibujos enviados para este proyecto son tan simples como un sencillo diagrama. Sin embargo, al revisarlos una y otra vez, estamos convencidos de que representan un concepto que pue-

página anterior | Imagen de la "Ópera House" en Sidney, Australia, 1973 - Jörn Utzon,



de hacer de la Ópera de Sidney uno de los grandes edificios del mundo.”³

Parecía que estas formas, tal y como estaban diseñadas, no podían llevarse a cabo sin que perdieran su atractivo inicial. Las formas originales de sus dibujos no eran reconocibles geoméricamente.

“Como dato curioso, antes del concurso de la Ópera de Sidney, Utzon había ganado 7 de las 18 competiciones en que había participado, pero nunca había visto ninguno de sus diseños construido. Llegaba la hora de la realidad.”⁴

No fue hasta la incorporación al equipo de construcción del ingeniero Ove Arup (y de otros arquitectos e ingenieros que colaboraron con Utzon, como es el caso del español Rafael Moneo) cuando, tras un hábil ejercicio de geometrización de las cúpulas, el edificio se pudo finalmente construir. La forma que Utzon había diseñado “a sentimiento” se vio obligada a adaptarse en una geometría conocida, calculable y construable. La solución a la que se llegó fue la conocida hoy como la “Esfera de Utzon”, ya que todas las bóvedas al final se construyeron a partir de porciones de una misma esfera, por lo que todas tenían la misma curvatura... Y es que la forma de las estructuras, su geometría, definen las construcciones de manera fundamental.

“La estructura ocupa en arquitectura un lugar que le da existencia y aguanta la forma.”⁵

El desarrollo de un concepto estructural es parte importante del proyecto arquitectónico. El uso de la geometría en esta fase temprana del proyecto es por tanto imprescindible.

La diferenciación que hoy en día se da entre el diseño arquitectónico y estructural no está justificada. Actualmente existe la creencia de que es posible construir casi cualquier cosa, y probablemente sea cierto. La aparición en los siglos XX y XXI de innumerables materiales con cualidades impensadas siglos atrás y el desarrollo de nuevas técnicas constructivas apoyadas en los grandes avances de la ingeniería, hacen de este pensamiento una realidad.

3 | Argumentos de los miembros asesores del jurado del concurso para la Ópera de Sidney

4 | Artículo para el congreso “Graphica” celebrado en Brasil en 2007 – “La geometría, soporte de la idea en el proceso de diseño” – Esther Vallejo Lobete, Fernando Fadón Salazar, José Enrique Cerón Hoyos

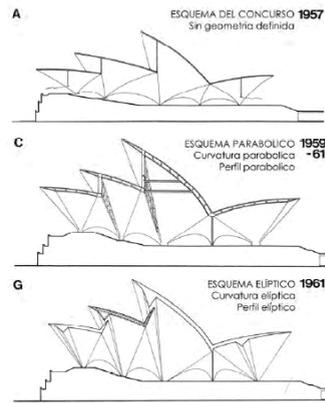
5 | “Sistemas de estructuras” – Heino Engel

2.1 | Imagen de la “Opera house” de Sidney, obra de Jörn Utzon

2.2 | Boceto presentado por Utzon al concurso de la “Opera House” en 1957 y que sedujo al jurado.



2.3



2.4

6 - 7 | Artículo en la revista Tectónica n°17 "Geometrías complejas" - "Geometría, Técnica y arquitectura" - Ramón Araujo Armero

2.3 | Portada del diario "The Sydney Morning Herald" donde parece la noticia titulada "Un diseño danés controvertido gana el concurso de la Ópera House" en referencia al proyecto de Utzon

2.4 | Imagen de la publicación "Utzon's sphere: Sydney Opera House-how it was designed and built" de Yuzo Mikami, donde se aprecia la evolución en el diseño de las bóvedas de la Ópera.

Si a este hecho le sumamos el desarrollo de las herramientas informáticas aplicadas a la representación gráfica de la arquitectura, como pueden ser los programas de parametrización de formas, las superficies de Bezier provenientes del campo de la ingeniería automovilística..., el diseño de los edificios se lleva a límites inimaginables hace tan sólo unas décadas. La problemática surge cuando con estos diseños, en muchas ocasiones, se llega a geometrías que resultan incontrolables e injustificadas, o lo que es lo mismo, difícilmente construibles y modelizables estructuralmente.

"Las soluciones destacarán ahora por su heterodoxia: los soportes, inclinados; los forjados, curvos o inclinados; las retículas, irregulares. El espacio se va a poblar de caprichosas formas." ⁶

LA GEOMETRÍA COMO INSTRUMENTO DE DISEÑO

La geometría desde siempre ha sido el instrumento que ha permitido a los arquitectos, de muy diversas formas, unir la creatividad del proceso de diseño, con las necesidades estructurales y constructivas.

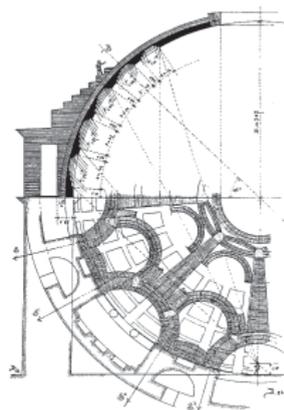
En sus inicios, la arquitectura se inspiraba en la naturaleza. La fascinación por el descubrimiento de las leyes geométricas que la ordenan ha hecho que los hombres hayan intentado imitarla, repitiendo estas formas en sus construcciones.

"Siempre nos ha fascinado descubrir regularidades en la naturaleza... podemos entender el mundo como un agregado infinito de formas simples... la naturaleza adopta diferentes soluciones para las superficies además de la esfera, mostrando su preferencia por la doble curvatura y por las derivadas de las secciones cónicas o de la catenaria." ⁷

Esta repetición de las formas de la naturaleza pronto se encontró con limitaciones provenientes del uso de los materiales disponibles en cada época y de los sistemas estructurales, derivados de ellos, que se aplicaban. Es entonces cuando la geometría se convierte en indispensable. Otorga la sencillez que necesita la arquitectura, estableciendo una serie



2.5



2.6

de reglas, mediante trazados, reglas de composición... que ayudan a materializarla. Esta sencillez práctica no ha de confundirse con la sencillez de las ideas. La geometría ha ayudado a materializar la práctica totalidad de las ideas a lo largo de la historia de la arquitectura.

Una de las aplicaciones prácticas que la geometría ha tenido, a modo de ejemplo a lo expuesto en el párrafo anterior, es dar una solución a un problema que se plantea durante la ideación del proyecto de arquitectura. Es el denominado *"síndrome del papel en blanco"*⁸. Este problema reside en el esfuerzo intelectual que ha de realizar el arquitecto al encontrarse frente al reto de crear una nueva arquitectura desde cero. Existen una serie de condicionantes de entrada que ha de tener en cuenta en su diseño, como son las ordenanzas y normativas, cánones estéticos, funcionalidad del edificio, condicionantes estructurales y constructivos... y que ha de combinarlos para que su diseño sea "válido". En este momento el uso de la geometría, mediante sus trazados reguladores, mallas geométricas, la denominada *"ley del ángulo recto"*⁹, el concepto de catenaria... se convierte en un aliado en la fase de diseño para el arquitecto.

Históricamente la geometría en la arquitectura se ha estudiado desde un punto de vista bidimensional. El estudio de los trazados reguladores, proporciones... en plantas, alzados y secciones, han centrado el esfuerzo de los investigadores (que no siempre arquitectos) de la arquitectura. Y no han ido desencaminados, su trabajo supone un punto de partida muy importante para posteriores investigaciones.

Lo que se propone en esta investigación es considerar la arquitectura como algo tridimensional. Probablemente, la arquitectura del pasado, ha basado su forma en geometrías planas, lo cual no quiere decir que al utilizarlas no hayan derivado de ellas interesante geometrías tridimensionales, superficies singulares que además de estéticas también son eficientes constructiva y estructuralmente.

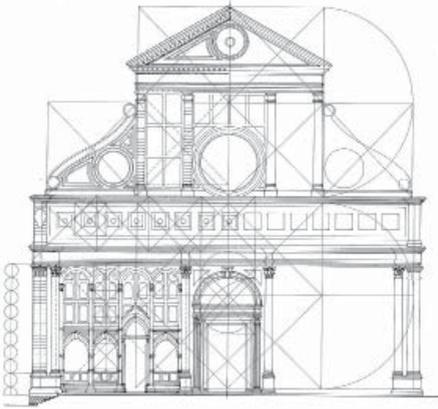
*"... cuando hay una pauta de composición, como se ha dicho muchas veces, es posible encontrar relaciones geométricas consecuencia de ella y en las que no había pensado el autor."*¹⁰

8 - 10 | "Sobre la proporción y los trazados geométricos de la arquitectura" José M^o Gentil Baldrich, prólogo del libro "Trazados reguladores octogonales en la arquitectura clásica" de Felipe Soler Sanz.

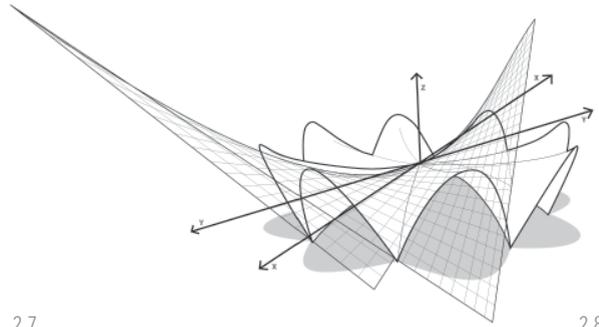
9 | Artículo en la revista Tectónica n^o17 "Geometrías complejas" - "Geometría, Técnica y arquitectura" - Ramón Araujo Armero

2.5 | "Esfera de Utzon"

2.6 | Análisis de los trazados geométricos reguladores del Panteón de Agripa, Roma



2.7



2.8

11 | “Control gráfico de formas y superficies de transición”, Isabel Crespo Cabillo, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.

12 | Artículo para el congreso “Graphica” celebrado en Brasil en 2007 – “La geometría, soporte de la idea en el proceso de diseño” – Esther Vallejo Lobete, Fernando Fadón Salazar, José Enrique Cerón Hoyos

2.7 | Análisis de los trazados geométricos reguladores de la basílica de “Santa Maria Novella”, Florencia. Fachada diseñada en el s XV por León Battista Alberti

2.8 | Análisis de la superficie geométrica generadora de la cubierta del restaurante Los Manantiales, Xoximilco (México) obra de Félix Candela

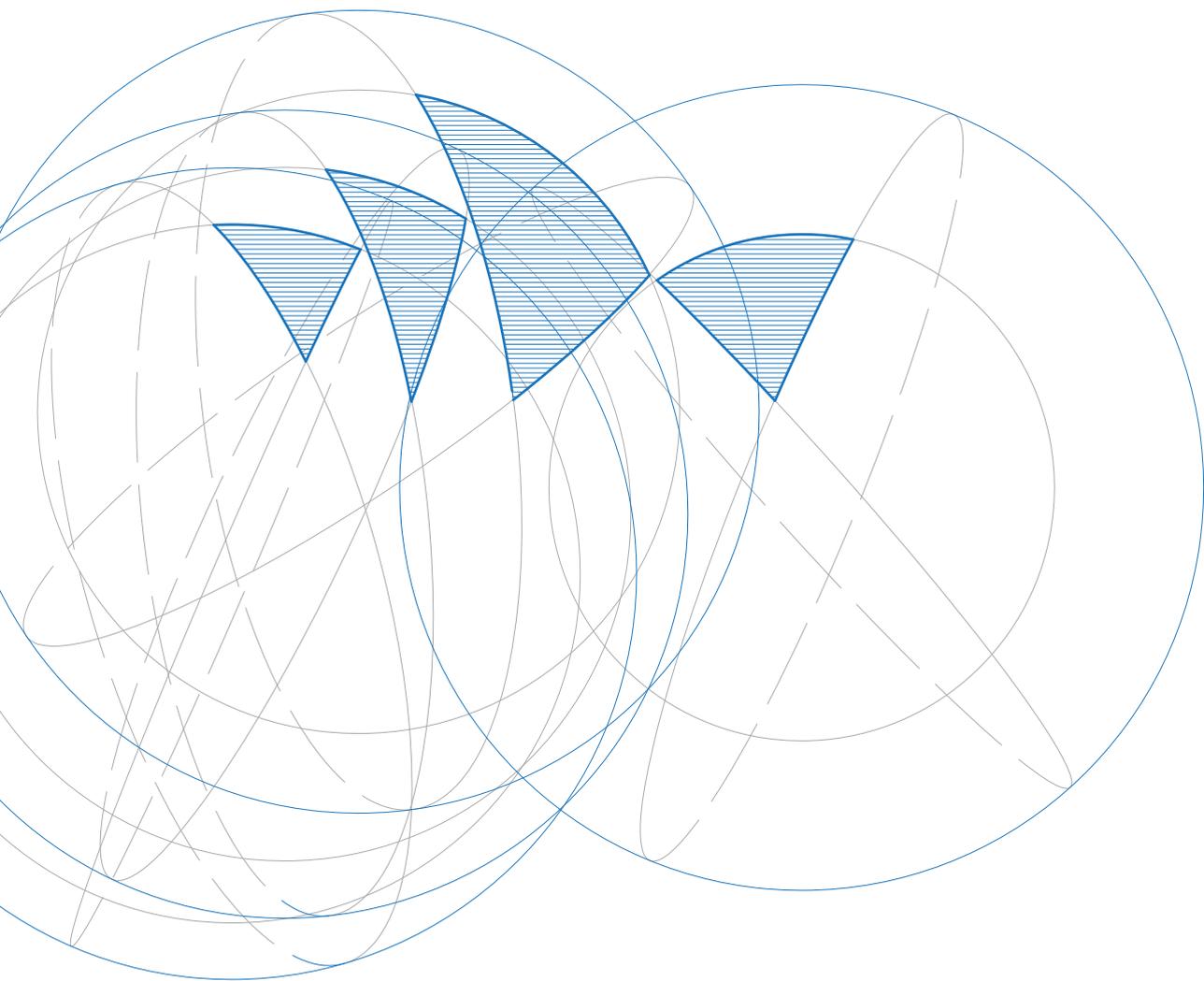
El uso de la geometría tridimensional en arquitectura, tal y como indica Isabel Crespo Cabillo en su tesis doctoral, *“ha tenido su mayor juego de posibilidades en dos propósitos constructivos: el reto de la cubrición de grandes espacios y el levantamiento de altas torres”*¹¹. A esta consideración, habría que añadirle dos aspectos más que correspondería a la necesidad de organización en planta y sección de los espacios, y a la búsqueda de un estética en cada una de las épocas y tipos de arquitectura.

Tal y como se ha indicado en los objetivos, la investigación se va a centrar en el análisis de las geometrías utilizadas para el diseño global de determinados edificios, o para el de alguna de sus partes singulares, incidiendo fundamentalmente en esas superficies geométricas, en los motivos principales para su utilización y en sus consecuencias estructurales y constructivas. A pesar de ello no podremos evitar hacer otro tipo de consideraciones de carácter religiosos, simbólico... que se han utilizado a lo largo de la historia de la arquitectura, aunque no será el principal objetivo a tratar.

Como veremos a lo largo del desarrollo de la investigación, en referencia a la utilización de la geometría en los proyectos arquitectónicos, nos podremos encontrar en tres casos bien diferenciados:

- En ocasiones la técnica constructiva o la estructura estarán sometidas a la forma geométrica buscada. *“La geometría condicionó la idea”*.
- En otras ocasiones sucederá al revés, las geometrías utilizadas serán consecuencia del análisis de un determinado sistema estructural o constructivo, por lo que la geometría se someterá a la estructura. *“La geometría representó la idea”*
- Por último, en un tercer caso, la geometría e idea serán aspectos compatibles y se apoyarán la una en la otra. *“La geometría liberó a la idea”*¹²

En el apartado de estudio detallado se han seleccionado una serie de ejemplos de edificios y arquitectos de todas las épocas, desde Roma al siglo XXI. Con esta selección se pretende dar una visión general y poner en valor el uso de la geometría en cada una de las épocas, que a continuación se repasan de manera resumida, y dar un catálogo de ejemplos de utilización de cada una de las superficies estudiadas.



2.2 | NOTAS SOBRE LA GEOMETRÍA EN LA HISTORIA DE LA ARQUITECTURA

A continuación se realizará un breve repaso por la utilización que se ha hecho de la geometría en la historia de la Arquitectura, centrandó la atención en las superficies utilizadas y su justificación. Del mismo modo se destacarán aquellas figuras de la arquitectura valenciana de relevante importancia y que han ido desarrollando el uso de superficies singulares y novedosas en las diferentes épocas en nuestro entorno próximo. De esta manera se pretende incluir los posteriores análisis dentro de la tradición de empleo de superficies arquitectónicas novedosas en nuestra región.

En el principio de los tiempos, la arquitectura surge como una necesidad. Después de que el hombre abandonara la cueva como medio de refugio y por la necesidad de protegerse de las inclemencias del tiempo, empezó a hacer arquitectura. En el grabado adjunto, realizado por Vitruvio, se puede apreciar esta necesidad de resguardo frente a la lluvia y como los brazos del hombre forman lo que podría ser una cubierta a dos aguas.

Una vez vista la necesidad de la arquitectura, el hombre empezó a experimentar y a construir sus cabañas a partir de formas simples, siempre basadas en los materiales existentes y en principios estructurales muy básicos. Normalmente estas geometrías imitaban formas que el hombre había observado en la naturaleza.

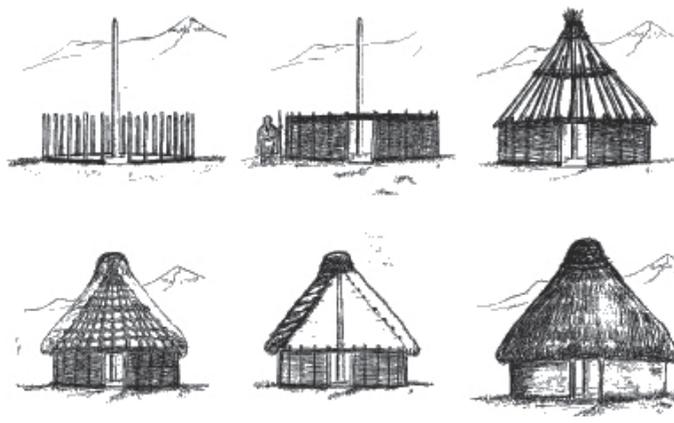
Estas formas las podemos observar hoy todavía en las cabañas de las diferentes tribus que han llegado hasta nuestro tiempo. Formas circulares, cónicas, cilíndricas, incluso esféricas son las que conforman sus construcciones.

Los egipcios utilizaron geometrías muy puras en sus edificios. Estas formas simplificadas como las pirámides, los prismas puros... de gran fuerza compositiva, se veían reforzadas por múltiples recursos geométricos como la simetría y la proporción. Esto unido a la gran escala de sus construcciones, hace que los edificios egipcios tengan un carácter simbólico y monumental. No sólo se refleja esta geometría en su forma tridimensional, sino también en las plantas, ordenadas mediante unas retículas desde la escala global de sus asentamientos hasta la escala de detalle de sus edificios.

página anterior | Esquema geométrico de las bóvedas de la "Opera House" en Sidney, Australia, 1973 - Jorn Utzon,



2.9



2.10

"Toda expresión plástica en Egipto obedece a un riguroso plan geométrico: en el templo un trazado en retícula establece relaciones numéricas básicas entre sus elementos y definen desde la forma de las piezas al plan del conjunto." ¹³

En la arquitectura egipcia el uso de formas provenientes de la naturaleza también tuvo lugar, pero estas se limitaron a motivos ornamentales como capiteles, cenefas, esculturas...

La arquitectura griega tiene dos casos significativos y con un enfoque de diseño diferente.

Por un lado estaría la construcción de templos, cuyo máximo exponente lo encontramos en el "P Partenón" de Atenas. En estas arquitecturas prima el aspecto exterior y los detalles ornamentales frente a la configuración de un espacio interior agradable o funcional. Utilizan una geometría muy sencilla, ortogonal, siempre buscando la proporcionalidad. La complejidad de estos templos reside en las correcciones ópticas que les realizaban, fruto de un profundo estudio geométrico, para que las formas resultaran lo más proporcionadas posibles. Por tanto, las formas obtenidas son de extrema sencillez en su conjunto, fundamentalmente simbólicas. No sucede así con los detalles ornamentales, inspirados en su mayor parte en la naturaleza, como los capiteles o fustes de las columnas, o en los antiguos templos de madera, ejemplo de ello son los triglifos y las metopas existentes en los frisos.

En el extremo contrario tendríamos los teatros y los estadios, cuya geometría surge de la función que han de desempeñar. Normalmente derivan de un trazado geométrico en planta, donde predominan las formas circulares, el cual se lleva después al espacio configurando de esta manera la forma del edificio sin especial interés, más que el ornamental, en la geometría exterior del mismo.

Se considera la arquitectura romana heredera de la griega, pero existen varios aspectos que hicieron que esta supusiera un gran salto formal respecto de la griega.

Por un lado el descubrimiento de materiales, como el Opus Caemen-

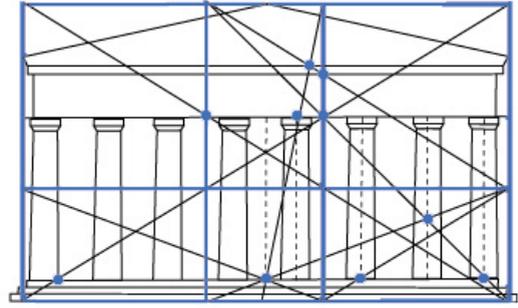
13 | Artículo en la revista Tectónica n°17 "Geometrías complejas" - "Geometría, Técnica y arquitectura" - Ramón Araujo Armero

2.9 | "Hombre protegiéndose de la lluvia" - Grabado de Vitruvio. El dibujo representa simbólicamente la necesidad del hombre de protegerse frente a la naturaleza.

2.10 | Esquema de construcción de una cabaña primitiva. Se puede apreciar las formas cilíndricas en el cerramiento y cónica en la cubierta, ambas materializadas constructivamente según sus generatrices por listones de madera. También se observa el eje de ambas superficies transformado en el único elemento estructural de la construcción.



2.11



2.12

14 | "La idea construida" - Alberto Campo Baeza

15 | Artículo para el congreso "Graphica" celebrado en Brasil en 2007 - "La geometría, soporte de la idea en el proceso de diseño" - Esther Vallejo Lobete, Fernando Fadón Salazar, José Enrique Cerón Hoyos

16 | "El panteón de Agripa en Roma" - Carlos Sánchez-Montañana

2.11 | Pirámides de Gizah, en Egipto. En la imagen se aprecia la rotundidad de la geometría de estas construcciones y como se consigue un mayor impacto visual mediante la repetición de la misma forma a diferentes escalas, símbolo también de grandeza del emperador que mandaba construirla.

2.12 | Estudio de relaciones geométricas y trazados reguladores de la fachada del Partenón de Atenas. Grecia.

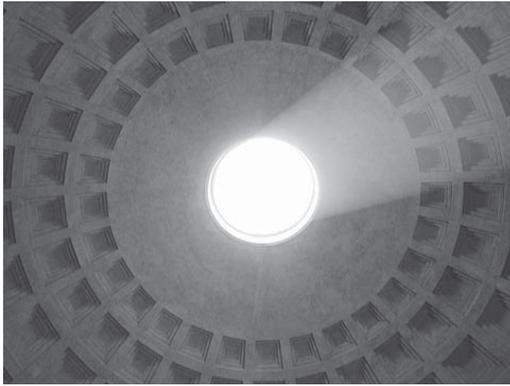
tium (denominado también el Hormigón Romano), y la utilización de nuevos sistemas constructivos, como el uso de encofrados, dieron paso a un nuevo repertorio formal. El arco, la bóveda y la cúpula se emplearon de manera generalizada en los edificios de esta época. Mucho tuvo que ver en esto el avance en la ingeniería civil romana, la cual utilizó muy diversas formas pero siempre como resultado de un análisis funcional y estructural.

Un ejemplo de esto lo podemos observar en el "Panteón" de Roma, edificio construido por Marco Vipsanio Agripa, arquitecto, por orden del emperador Augusto, para conmemorar la batalla de Actium. Posiblemente uno de los interiores más bellos de la historia de la arquitectura. Agripa se enfrentó al problema de tener que cubrir un gran espacio de forma circular y de grandes dimensiones, alrededor de 44 metros de diámetro. Esto lo consiguió gracias a la utilización de una geometría esférica que iba aligerándose conforme ascendía en altura hasta culminar en un óculo abierto de casi 9 metros de diámetro. Este óculo, en palabras de Alberto Campo Baeza es *"la más maravillosa trampa que el ser humano ha tendido a la luz del Sol todos los días, y en la que el astro rey todos y cada uno de los días vuelve a caer gozosamente."*¹⁴

*"El edificio define una geometría clara y sencilla, a una escala admirable para su época. Es consecuencia del dominio de la geometría."*¹⁵

*"En la geometría plana, el círculo es símbolo del Cielo y el cuadrado de la Tierra, y el octógono intermedia entre uno y otro, y a través de él se logra la cuadratura del círculo, la unión indisoluble del espíritu y la materia."*¹⁶

Por tanto, en esta época podemos encontrarnos con un nuevo repertorio formal. La arquitectura se puebla de bóvedas, cúpulas, arcos... Todos estos nuevos elementos constructivos basan su forma en geometrías a base de superficies de revolución y traslación, como esferas y cilindros, y las intersecciones entre estas, dando lugar a las denominadas curvas cónicas. Desde el punto de vista bidimensional, nos encontramos con trazados reguladores a base de circunferencias, triángulos, cuadrados, rectángulos áureos...



2.13



2.14

Otro rasgo geométrico bidimensional lo encontramos en las ciudades de nueva planta. Mientras que sus ciudades antiguas los romanos las entendieron como una yuxtaposición de edificios singulares que no mantenían una relación entre sí, otra cosa muy diferente eran las ciudades que fundaban de nueva planta y que tenían su origen en los campamentos militares. En estas sí que se podía apreciar una geometría en forma de cuadrícula heredada de estos, y que además ordenaba de manera racional los espacios y edificios públicos relacionándolos entre sí y con los edificios de viviendas. Esta cuadrícula hipodámica tendría una gran repercusión en el urbanismo posterior a ésta época.

Un claro ejemplo de esta organización "hipodámica" de las ciudades romanas de nueva planta lo encontramos en la primitiva ciudad de "Valentia", como se puede apreciar en el plano de reconstrucción de la imagen 2.14.

Una referencia obligada de este periodo de la historia de la arquitectura es la figura de Marco Vitruvio, quien escribió y dibujó el primer tratado de arquitectura del que se tiene noticia. En él definió sus tres principios: firmitas (firmeza), utilitas (utilidad) y venustas (belleza). También definió los tres órdenes clásicos que sirvieron de referencia o módulo para la arquitectura romana y como inspiración para arquitecturas posteriores. Se establecieron una serie de reglas y trazados reguladores que ayudaban a cumplir los tres principios vitruvianos.

*"La triada vitruviana permanece aunque la expresión de la misma cambie, como en todo arte la pureza del principio que lo constituye es vigente y permanece"*¹⁷

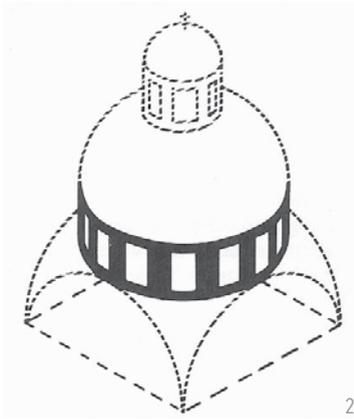
Si la arquitectura romana se consideraba la heredera de la griega, el románico lo es a su vez de ésta primera. Eso sí, repite los principios de la época romana pero con menos medios económicos y técnicos.

La gran novedad, o gran logro según se mire, es el paso de la planta cuadrada a la forma circular mediante fundamentalmente dos elementos característicos de esta época como son las trompas y pechinas. Estas soluciones son el resultado de un hábil desarrollo geométrico, constructivo y estructural.

17 | Prólogo del libro "Investigando los bienes arquitectónicos" - Ángela García Codoñer

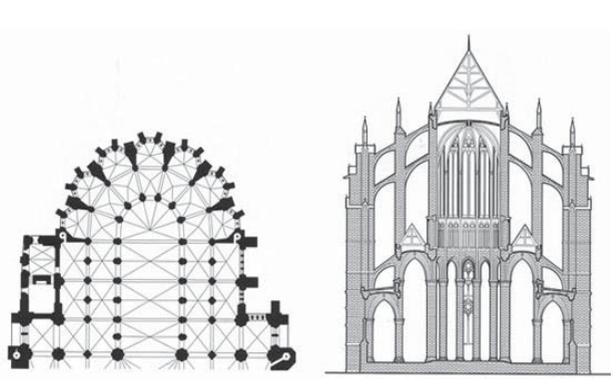
2.13 | Óculo del Panteón de Roma. En la imagen se observa como se ha aligerado la cúpula mediante la geometría de la superficie. Es interesante también la corrección óptica que se hace de los casetones. Otro aspecto que puede observarse es la "trampa a la luz" que comenta Alberto campo Baeza.

2.14 | Trazado hipodámico de la originaria ciudad de Valentia en el 200 d.C. En este plano se puede observar como la ciudad, basada en un campamento romano en un meandro del río Turia tiene su estructura organizada en base a calles ortogonales entre sí.



2.15

2.15 | Esquema genérico de la arquitectura románica. Composición de cúpula esférica sobre tambor cilíndrico y linterna superior. Transición entre la planta cuadrada del edificio y la planta circular de la cúpula resuelta mediante unos elementos esféricos denominados pechinas.



2.16

2.16 | Planta parcial y sección transversal de la Catedral de Beauvais, Francia (1284). Ejemplo de construcción gótica de una catedral donde la estructura configura el edificio y se deja ver al exterior en forma de contrafuertes y pináculos.

Los edificios en esta época se caracterizan por una gran riqueza de los interiores, mientras que la forma exterior surge como contramolde de la forma interior. Con el fin de mejorar la estabilidad de las construcciones, los muros son muy másicos y tienen un perfil piramidal o cónico.

Los elementos constructivos característicos de estas arquitectura son las bóvedas de crucería, arcos de diafragma, arcos torales, pechinas y trompas. Por tanto la geometría utilizada no va mucho mas allá de cilindros y esferas.

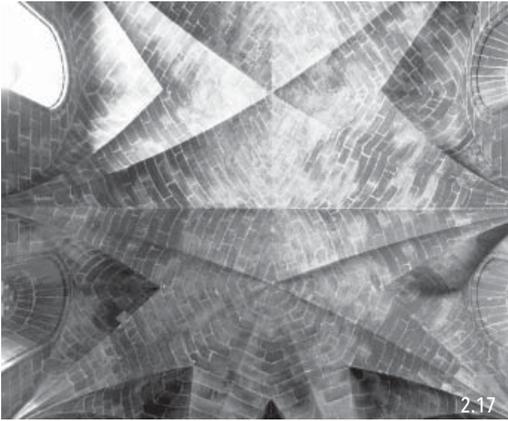
Con la entrada del gótico como nueva corriente arquitectónica se produce un nuevo planteamiento estructural motivado por el reto de conseguir cada vez mayor altura con los edificios y alcanzar una mayor luz entre apoyos. Aparece lo que se vendrá a llamar posteriormente "sinceridad estructural". La estructura no se oculta sino que pasa a formar parte de la composición de los edificios. El edificio pasa a convertirse en un "artefacto".

En resumen, el nuevo sistema constructivo se materializa mediante la repetición de una sección característica. Los cerramientos se convierten en grandes vanos por lo que se produce una mayor iluminación interior.

Bóvedas nervadas, de crucería, arbotantes, pináculos, escaleras de caracol... son algunos de los nuevos elementos constructivos que aparecen en esta época. Todos ellos materializados a partir de una serie de trazados bidimensionales como son los arcos de varios centros y apuntados, y que se completan tridimensionalmente con una amplio repertorio de superficies, como pueden ser intersecciones de cilindros, superficies cónicas, helicoidales, esféricas...

En este periodo, en la ciudad de Valencia se da una época dorada en las artes y la literatura caracterizada por la creatividad:

"Si hubiera que emplear una palabra que definiera la arquitectura que se realiza en Valencia en esta época, esta sería "innovación" (...) Se exploran originales procedimientos geométricos conducentes al trazado de arcos, bóvedas y escaleras (...) Todo ello supone un gran conocimiento de la estereotomía y corte de la pie-



2.17



2.18

dra, así como de la geometría”¹⁸

Y es que durante el gótico se reúnen en Valencia una serie de maestros canteros que mediante su “buen oficio” desarrollan obras de gran importancia y con una gran carga de creatividad e innovación geométrica.

Como ejemplo de esto tenemos a Francesc Baldomar (1425-1476) que destaca por la construcción de la “Capilla de los Reyes del convento de Santo Domingo” (1439-1463) y las “puertas de Quart” (1441-60). En la primera desarrolla una innovadora técnica con la que genera unas sorprendentes bóvedas de arista.

Uno de sus discípulos¹⁹, Pere Compte, desarrolló las bóvedas aristadas de Baldomar convirtiéndolas en el rampante redondo y las bóvedas masivas y de múltiples nervios que podemos apreciar en la “Lonja de Valencia” de 1483. Todas estas geometrías estaban basadas en la forma de la esfera.

Otros ejemplos de esta prolífica generación de maestros “picapedrers” son Antoni Dalmau, quien realizó la ampliación de la “Catedral de Valencia”, y Pere Balaguer, autor de la emblemática “torre de Serranos”.

En el Renacimiento se retoman los tipos formales de la antigüedad clásica, pero con una diferencia muy importante, y que será fundamental para la arquitectura a partir de ésta época. El Hombre pasa a ser la referencia para todo. Ejemplo de ello es el vasto estudio de Leonardo da Vinci plasmado de manera resumida en su “Hombre de Vitruvio”.

Además de esto, el estudio de la perspectiva cónica o natural ayuda a los arquitectos de la época a comprender y ser conscientes del espacio. La arquitectura ya no será una repetición de un módulo sino que la importancia del espacio interior plasmado en las cúpulas renacentistas recuperará el concepto tridimensional.

La creación de un espacio central al interior y la configuración del paisaje urbano al exterior serán las dos características fundamentales de esta nueva arquitectura.

18 | “El buen oficio frente al concurso. Los maestros canteros valencianos del siglo XV”. Comunicación presentada en el congreso EGA. Oporto, 2012. Concepción López González.

19 | “Pere Compte, arquitecto”. Arturo Zaragoza y Mercedes Gómez-Ferrer.

2.17 | Vista cenital de las bóvedas de arista de la “Capilla de los Reyes del convento de Santo Domingo” Valencia 1439-1463 - Francesc Baldomar

2.18 | Interior de la “Lonja de mercaderes de la seda” Valencia 1483 - Pere Compte



2.19



2.20

2.19 | Fachada de la Iglesia de Santa Maria Novella, Florencia (1480) obra de Leon Battista Alberti. En ella se puede apreciar la composición a base de relaciones y trazados geométricos.

2.20 | Grabados de Alberto Durero donde se pueden ver algunos de los estudios renacentistas sobre la perspectiva cónica o natural.

20 | "Architecture" Philibert Delorme - París, 1568

21 | "Libro de traças de cortes de piedra" Alonso de Vandelvira - Madrid, 1575

22 | "Cerramientos y traças de monte" Ginés Martínez de Aranda - Madrid

Por lo que se refiere a la geometría, desde el punto de vista bidimensional se le vuelve a dar mucha importancia a las relaciones métricas como son la proporción, la simetría, el orden, la relación entre partes... Todo ello relacionado además con los elementos constructivos. Se podría decir que se da una unión entre ciencia, técnica y arte en el diseño de la arquitectura. Desde el punto de vista de superficies geométricas no se incorporan nuevas formas, sino que se vuelve a la tradición clásica de cúpulas y bóvedas.

Como apunte importante, aparece en la historia de la arquitectura la figura del arquitecto como autor intelectual, diferenciándolo de esta manera la figura de maestro de obras, el cual queda destinado a la ejecución de los edificios.

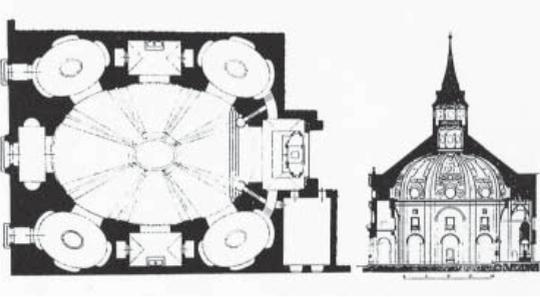
El Barroco es una época de la historia de la arquitectura muy creativa, en al que aparecen nuevas formas mucho más ricas y expresivas. Los edificios se pueblan de formas curvas, óvalos, escenografías... Estas formas a su vez provocan unos juegos de sombras que cambian la percepción del usuario de la arquitectura. El usuario pasa a convertirse en actor de la arquitectura.

Mediante el uso de los más diversos recursos, los arquitectos intentan distorsionar la percepción lógica que los usuarios tienen de los espacios interiores y exteriores.

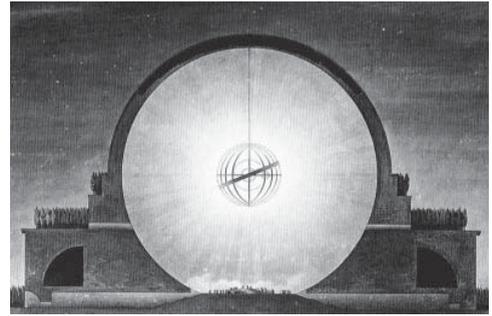
Como es lógico pensar, con todos estos propósitos, el repertorio formal y geométrico se enriquece. Aparecen nuevas geometrías como los elipsoides en las cúpulas, cilindros de base elíptica o a partir de una composición de curvas...

Todas estas nuevas formas se emplean con un fin más estético que constructivo, supeditando su uso al capricho del artista.

En el siglo XVI aparecen los primeros tratados que recogen la "Traza de cantería", conocida como la estereotomía de la piedra. El primer impreso fue el de Philibert Delorme²⁰ en Francia. En España se editarían los de Alonso Vandelvira²¹, Ginés Martínez de Aranda²² y Alonso de Guardia con representaciones en planta, alzados abatimientos, secciones o de-



2.21



2.22

sarrollos en proyección ortogonal.

Esta época del arte y de la arquitectura ha caracterizado Valencia, la cual siempre ha sido considerada Barroca²³. Sus tradiciones, su arte, su arquitectura... se pueblan de numerosos ejemplos con las características de este periodo.

Juan Pérez Castiel (1650-1707) autor del "claustro del monasterio de Santa María del Puig", proyectó para la ciudad de Valencia, además de numerosas iglesias parroquiales, el "palacio de San Pio V" (1683), actualmente Museo de Bellas Artes.

Otra personalidad valenciana de gran importancia que cabe destacar es Tomás Vicente Tosca Mascó, erudito, matemático, cartógrafo y teólogo. En 1703 elaboró un plano detallado de la ciudad de Valencia dibujado en perspectiva caballera con minuciosos detalles de edificios públicos y privados, calles, plazas... Y entre otras diseñó y construyó la "iglesia de Santo Tomás y San Felipe Neri" de Valencia en 1725. El pare Tosca, como es conocido, incluyó en su publicación "Compendio mathematico" un capítulo sobre cantería.²⁴

Debido a las múltiples guerras, al barroco le sucede un periodo de la historia la Arquitectura en el que se cede protagonismo a la Ingeniería Militar, ya que la mayor parte del dinero de los diferentes países se destina a fines bélicos.

Es entonces, en tiempos de crisis, cuando florecen nuevas ideas y concepciones de la arquitectura. Se trabaja en busca de los edificios y ciudades ideales que se alejen del clasicismo imperante hasta el momento. Surge la denominada "Arquitectura de papel". En ella la utilización de geometrías tanto bidimensionales como tridimensionales es muy importante. Además este uso cambia la concepción de las superficies geométricas convirtiéndolas en parte fundamental de la composición de la arquitectura, utilizándolas de manera muy pura.

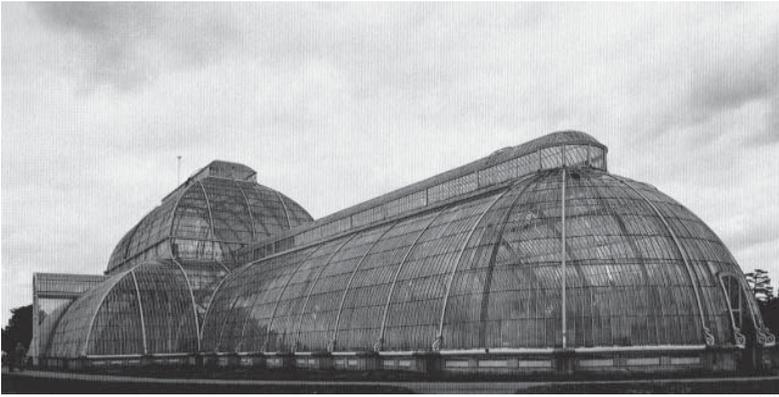
Desde un punto de vista bidimensional, se utilizan trazados básicos mediante polígonos regulares (no solo triángulos o cuadrados) y circunferencias. Ya tridimensionalmente nos encontraremos con formas puras

23 | "Valor barroco de la arquitectura valenciana"
Francisco Juan Vidal

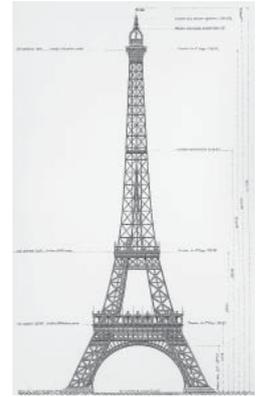
24 | "Compendio mathematico. Tomo V: Arquitectura civil, monte y cantería" Tomás Vicente Tosca Mascó - Valencia, 1707

2.21 | Iglesia de las Bernardas, Alcalá de Henares (1618) obra de Juan Gómez de Mora. En la planta se pueden apreciar las formas elípticas tanto en la capilla central como en las laterales. Estas formas se repiten en la sección longitudinal, lo que quiere decir que la superficie utilizada en la cúpula es un elipsoide.

2.22 | Cenotafio a Newton, arquitectura de papel (1784) realizada por Etienne-Louis Boullée. El empleo de las geometrías puras en esta arquitectura no construida consistió el elemento principal de composición.



2.23



2.24

25 | "Traité de Stéréotomie"
Amédée-François Frézier, 1739

como las esferas, las pirámides regulares... siempre empleadas desde un punto de vista muy simbólico.

26 | "Sobre la geometría descriptiva y su difusión en España" Gentil Baldrich y Rabasa Díez - Prólogo a la publicación "Geometría Descriptiva. Lecciones dadas en las escuelas normales en el año tercero de la república" Gaspard Monge - Madrid, 1803

Arquitectos significativos de esta época son Étienne Louis Boullée y Claude-Nicolas Ledoux.

Destacable en éste periodo de la historia de la arquitectura es el tratado de estereotomía realizado por el ingeniero Frezier²⁵ donde propone el uso de superficies mas "regulares" sustituyendo las geometrias de superficies curvas por conos y cilindros, aparentemente más simples.

2.23 | "Casa de las palmeras en el real jardín botánico de Kew/Surrey", Inglaterra (1848) obra de Decimus Burton y Richard Turner. Ejemplo de nueva concepción de las bóvedas aplicando los nuevos materiales de la época, el hierro y el vidrio.

A finales del siglo XVIII aparece en el panorama intelectual arquitectónico e ingenieril la figura de Gaspard Monge (1746-1818), quien desarrollo una sistematización geométrica de la representación del espacio y la definición matemática de curvas y superficies. Los orígenes de su teoría han de buscarse en la tradición de la estereotomía de la piedra.

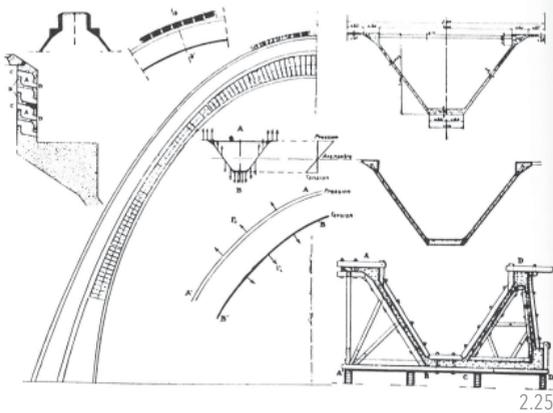
*"Desarrollo la geometría descriptiva como un lenguaje racional, lógicamente estructurado, que unifica procedimientos gráficos de los oficios o gremios. Constituido en lengua técnica universal facilitaría la comunicación del proyectista y el ejecutor como individuos distintos. Monge menciona como objetivos la representación y la operatividad sobre lo representado."*²⁶

2.24 | Alzado de la Torre Eiffel, París (1889) obra de Gustave Eiffel con motivo de la Exposición Universal. Constituye una nueva tipología que fue posible por la utilización de los nuevos materiales como el hierro forjado en este caso.

La aparición de nuevos materiales en el siglo XIX y, como consecuencia, el abandono del sistema constructivo mural permiten en esta época un repertorio formal completamente renovado. Aparece un nuevo vocabulario en el campo de la industria y la ingeniería completamente ajeno a la tradición arquitectónica.

Las nuevas estructuras de hierro hacen posible cubrir grandes luces y levantar altas torres, con lo que aparecen nuevas formas que anteriormente no podían ejecutarse. El vidrio le da ligereza a los edificio dejando el esqueleto portante a la vista. De esta manera se vuelve al concepto de "edificio como artefacto" que ya se dio en el Barroco.

En esta época se entiende como nunca antes la frase de Eduardo Torroja:



*"Cada material tiene una personalidad distinta, y cada forma impone un diferente estado tensional."*²⁷

A partir de este momento, la historia de la arquitectura no recorre un único camino, sino que las diferentes tendencias marcadas por corrientes artísticas, filosóficas, ingenieriles... van desarrollando diferentes tipos de arquitectura en paralelo. Por tanto vamos a repasar algunas de esas corrientes, las más relevantes, sin que necesariamente estén ordenadas temporalmente, sino que pueden compartir espacio en el tiempo.

La aparición del hormigón armado supuso toda una revolución formal y estructural. Se podría decir que con este nuevo material aparecido a mediados del siglo XIX se conseguía unir dos grandes momentos de la arquitectura, el concepto estructural del gótico con la expresividad y riqueza formal del barroco.

La estructura pasa a ser el elemento fundamental de la arquitectura como elemento expresivo fundamental.

Impulsado por las patentes de Joseph Monier, de ingenieros como Robert Maillart y arquitectos como Auguste Perret, el sistema constructivo de pilares y vigas que conocemos hoy en día fue evolucionando a partir de trabajos como el de Le Corbusier y que bautizó como el "sistema dominó".

Pero por lo que afecta a la presente investigación, el uso estructural a base de pilares y vigas, no tiene riqueza formal en sí mismo, más allá de liberar la fachada de la función estructural. La característica que más interesa del hormigón es su cualidad expresiva. Empezando por Eugène Freyssinet, descubridor del pretensado, la vibración, diversas técnicas de descimbrado... pasando por ingenieros como Eduardo Torroja, arquitectos como Eero Saarinen, Pier Luigi Nervi y Félix Candela, el hormigón armado ha sido utilizado creando las formas más novedosas en la historia de la arquitectura hasta el momento.²⁸

*"... y el resultado fue el repertorio más increíble de formas insólitas"*²⁹

27 | "Razón y ser de los tipos estructurales" - Eduardo Torroja Miret

28 | "Las formas del hormigón. Catálogo práctico de diseño" - Francisco Javier Sanchis Sampedro - Trabajo Final de Máster - UPV

2.25 | "Hangares en Orly" París (1921-23) diseñados por Eugène Freyssinet. En la imagen se muestran los dibujos de construcción donde se pueden apreciar el diseño de los encofrados y otros detalles. Las naves tenían una longitud de 175 m por 91 m de anchura, y una altura de 60 m.

2.26 | "Pabellón del siglo en Breslau", Polonia (1911-1913). Edificio diseñado por Max Berg utilizando al máximo las capacidades portantes del hormigón que se conocían en la época. La cúpula es un casquete esférico de 65 m de diámetro que descansa sobre 4 arcos circulares y está materializada por 32 nervaduras dispuestas en forma de estrella siguiendo la dirección de los meridianos de la superficie.



2.27



2.28

29 | Artículo en la revista Tectónica nº17 "Geometrías complejas" - "Geometría, Técnica y arquitectura" - Ramón Araujo Armero

30 | "El hormigón armado y el desarrollo de la tipología laminar: la transformación del canon en la arquitectura moderna" - Comunicación presentada en el IV Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 2005 - Carmen Jordá Such

2.27 | "Terminal de TWA en el aeropuerto internacional de Idlewild", Nueva York (1956-1962) diseñada por Eero Saarinen, que en sus propias palabras comentaba la intención de su diseño: "Queremos que el pasajero reciba una impresión totalmente nueva cuando penetre en el edificio (...) todo contribuye al mismo universo de formas"

2.28 | Estación de metro "City Hall" Nueva York - Rafael Guastavino

El resultado del uso expresivo del hormigón dio como resultado un novedoso repertorio formal. Además de repetir formas clásicas como las bóvedas cilíndricas o las cúpulas esféricas, aparecieron nuevas superficies como las superficies regladas de doble curvatura: Paraboloide hiperbólico, hiperboloide hiperbólico, conoide... posteriormente veremos que también se han utilizado superficies irregulares gracias a la moldeabilidad del material.

Esta corriente estuvo vigente durante la primera mitad del siglo XX y ya en los años 60, y debido a la subida de costes de la construcción, fue perdiendo fuerza hasta desaparecer.

"La economía de las cáscaras va muy ligada al coste de los encofrados y de la mano de obra. Mientras éstos se mantuvieron bajos, la nueva tipología se fue expandiendo y cuando, en los años sesenta, se produjo una subida de costes generalizada, la construcción laminar languideció hasta desaparecer prácticamente"³⁰

Las bóvedas tabicadas son una técnica tradicional que utilizaba rasillas y yeso o cemento rápido, con una ejecución de manera sencilla y rápida, crear formas resistentes por su geometría.

El sistema, más limitado que los derivados del hormigón, permitía construir grandes superficies de doble curvatura sinclástica.

El máximo exponente que utilizó esta técnica fue Rafael Guastavino Moreno (1842-1908), valenciano formado en Barcelona y que desarrolló la mayor parte de su obra en los Estados Unidos donde difundió el sistema constructivo.

Entre todas sus obras son de especial interés la "Grand Central Terminal", la "catedral de Saint John the Divine" y la estación de metro "City Hall" en Nueva York.

El Modernismo marca el paso del siglo XIX al XX. Los arquitectos se centran en las formas de los detalles, formas siempre inspiradas en la naturaleza. Estas nuevas geometrías no siempre son regulares, sino que son más bien escultóricas. En muchas ocasiones surgen como resultado del



2.29



2.30

diálogo entre los arquitectos y los artesanos y oficios.

Por lo general la forma sigue a la función. Aparecen con fuerza los arcos catenarios o de directriz parabólica. Estas figuras son estables gracias a la forma, por lo que se utilizan en muchos casos con función estructural.

Cabe destacar entre los arquitectos ligados a este movimiento a Antoni Gaudí (1852-1926), el cual además de realizar con gran éxito esa imitación a la naturaleza, consigue reproducirla haciendo una hábil abstracción geométrica. Las superficies orgánicas de árboles, vegetación, animales... se convierten en paraboloides hiperbólicos, conoides, helicoides... consiguiendo además de esta manera una simplificación de su construcción. A continuación se incluyen unas citas del arquitecto que muestran su personalidad:

"El interior del templo será como un bosque"

"Yo soy geómetra, que quiere decir sintético"

"El uso de las superficies regladas es lógico por su superioridad plástica y su facilidad constructiva"³¹

Probablemente la corriente más extendida desde principios hasta finales del siglo XX es el racionalismo. Su objetivo fundamental es la modulación de todos los elementos intervinientes en la arquitectura. Para ello hace uso de la retícula estructural y de la racionalización de la construcción.

No por ello deja de ser una arquitectura interesante, pero su repertorio formal es escaso, limitándose a planos y rectas ortogonales entre si.

"Se establecen nuevos principios tipológicos y se elabora un nuevo sistema constructivo acorde a las nuevas tecnologías - el sistema de estructura reticular con cerramientos independientes - sometiéndolo a la ley del ángulo recto"³²

Probablemente podemos encontrar su origen en el Minimalismo defendido por el arquitecto Adolf Loos, quien en su artículo de 1908, "Ornamento y delito" hace una defensa de la eliminación de cualquier tipo de ornamentación en la arquitectura... y lo cierto es que el ornamento en-

31 | Citas atribuidas a Antoni Gaudí en el capítulo "Geometría Gaudiniana" de la publicación "Gaudí. La búsqueda de la forma" - Claudi Alsina y Josep Gomez-Serrano

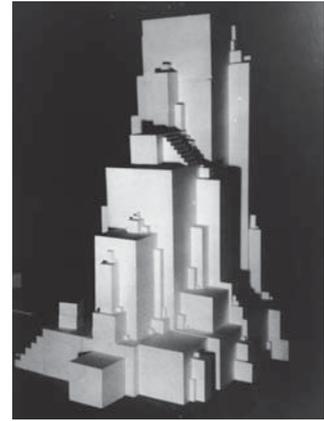
32 | Artículo en la revista Tectónica nº17 "Geometrías complejas" - "Geometría, Técnica y arquitectura" - Ramón Araujo Armero

2.29 | "La Sagrada Familia", Barcelona, obra de Antoni Gaudí. En la vista interior podemos observar el ejercicio de geometrización de formas orgánicas y naturales que realizó el arquitecto en el diseño de las bóvedas del edificio.

2.30 | "Casa para Lilly y Hugo Steiner" Viena (1910) diseñada por el arquitecto Adolf Loos. En esta vivienda de principios del siglo XX se puede apreciar el diseño minimalista que proponía el autor con un recho total a la ornamentación.



2.31



2.32

33 | "Ornamento y delito" - Adolf Loos

34 | "Cinco puntos para una nueva arquitectura" - Le Corbusier

2.31 | "Casa Schroeder" Utrecht - Gerrit Th. Rietveld. Ejemplo de concepto neoplástico aplicado a la arquitectura

2.32 | "Architektone" obra de Kasimir Malevich. La composición de volúmenes puros era una de las propuestas de la vanguardia neoplástica para la nueva arquitectura que defendían, en este caso materializada en una escultura.

tendido a la manera clásica o modernista no ha vuelto a la arquitectura.

*"Sin embargo, lo que es natural en el papúa y en los niños, en el hombre moderno resulta ser degeneración. Descubrí lo siguiente y se lo comuniqué al mundo: La evolución cultural equivale a eliminar el ornamento del objeto de uso cotidiano."*³³

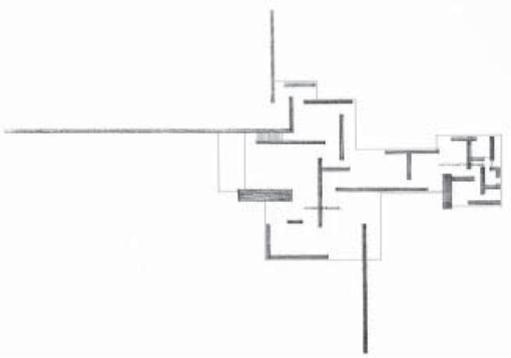
Esta corriente fue seguida por numerosos arquitectos derivando en lo que se han venido a denominar las vanguardias, en las que se mezclaba la arquitectura con el resto de artes.

Entre otras cabe destacar el Neoplasticismo o De Stijl con figuras representativas como Gerrit Thomas Rietveld y Theo van Doesburg en arquitectura, pero también Piet Mondrian en pintura y Kasimir Malevich con sus esculturas denominadas "Arquitectones". Los principios de este movimiento se basaban en la reducción a formas poligonales simples como rectángulos y rectas, evitando toda intersección entre ellas, utilizando los colores primarios más el blanco y negro. Constituía de algún modo una abstracción y desmaterialización de la arquitectura.

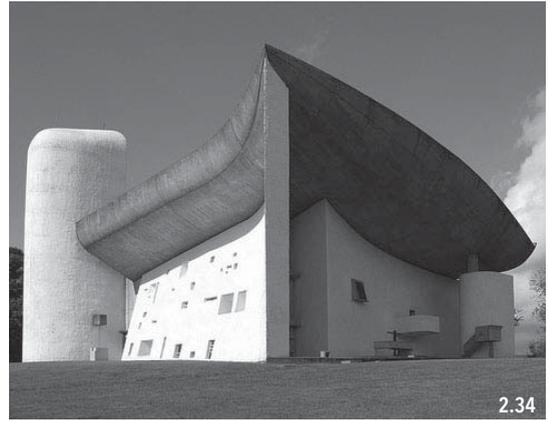
Otra de las vanguardias a destacar es el denominado Estilo Internacional, impulsado por la escuela de la Bauhaus alemana, con arquitectos al frente como Walter Gropius y Mies van der Rohe. El espacio libre, la desmaterialización de la estructura, los planos horizontales casi infinitos y sobretudo el sometimiento a la ley del ángulo recto son las características más importantes del movimiento. Su lema, "Menos es más".

Todas estas vanguardias, a nivel formal no aportan novedades importantes sino más bien todo lo contrario, realizan una reducción casi al mínimo de las formas utilizadas.

Una figura que cabe destacar a principios del siglo XX es Charles Édouard Janneret, conocido como "Le Corbusier". Arquitecto y teórico de la arquitectura establece unos principios que han llegado hasta hoy en día³⁴: La descomposición de la arquitectura en sus elementos constituyentes, la separación del pasado, el gusto por la máquina, el funcionalismo... son características de su arquitectura que mezcla tanto en edificios puramente racionalistas, hasta construcciones donde el poder expresivo



2.33



2.34

que consigue fundamentalmente a través de las formas de hormigón es enorme. Cabe también destacar el reestudio de la figura humana que realiza, retomando así el concepto renacentista de ligar la construcción a las medidas antropométricas, y que culmina resumiéndolas en su "Modulor". Le Corbusier utiliza la geometría como ordenadora de la arquitectura en el sentido clásico.

Frente a estos movimientos o arquitecturas minimalistas, surgen arquitectos que se oponen frontalmente, como es el caso de Robert Venturi, quien enuncia la frase "menos es... aburrido"³⁵. A pesar de ello el repertorio formal geométrico no se ve enriquecido.

Es con la llegada de las estructuras tensadas, las lonas hinchables y las mallas espaciales cuando las formas geométricas en arquitectura encuentran nuevas expresiones. Como exponente de estas nuevas técnicas tenemos por ejemplo a Richard Buckminster Fuller³⁶ que se dedicó al estudio de las cúpulas geodésicas, o a Frei Otto, con sus estructuras tensadas³⁷. Estas estructuras forman superficies mínimas que permiten mayor grado de libertad que los paraboloides hiperbólicos a un menor coste económico. La única restricción que tienen es que dependen de los elementos que hacen de límite.

A finales del siglo XX tiene lugar un hecho comparable a la aparición del hormigón armado y es el desarrollo de los programas informáticos de diseño asistido por ordenador. Lo que en un principio fue una sustitución bastante intuitiva de la delineación manual se ha convertido en una potente herramienta de diseño de la arquitectura.

Anteriormente se ha señalado como causa de la casi desaparición de las formas regladas de doble curvatura el encarecimiento de los costes de construcción. Quizá otra de las causas, no menos importante, era la dificultad que suponía en el diseño para los arquitectos el uso de estas superficies, tanto su representación como su posterior modelización para el cálculo.

"Este problema, la carencia de libertad en el diseño, que aparece en la utilización de superficies cuádricas o mínimas, es el mismo que se planteó en el origen de una nueva disciplina: obtener cur-

35 | "Complejidad y contradicción en arquitectura" - Robert Venturi

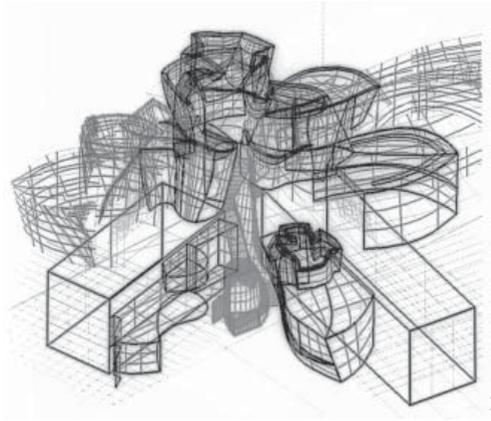
36 | "The artifacts of R. Buckminster Fuller. Vol4" Richard Buckminster Fuller

2.31 | "Casa de campo de ladrillo" (1924) diseño de Ludwig Mies van der Rohe. En este diseño conceptual se puede observar la idea de arquitectura del autor y del movimiento que representa. La planta está generada a partir de planos que en la mayoría de los casos se prolongan más allá de las intersecciones para que se lean como independientes e infinitos.

2.32 | "Capilla de Notre dame-du-haut" en Ronchamp, Francia (1950-1955) obra de Le Corbusier. Esta es uno de los edificios del arquitecto correspondientes a su faceta menos racionalista y más expresiva. Las formas conseguidas con el hormigón nada tienen que ver con planos ortogonales.



2.35



2.36

37 | "Frei Otto y el debate sobre la génesis de la forma arquitectónica" - Artículo publicado en la revista EGA nº16 - Juan María Songel

38 | "Arquitectura y matemáticas. La geometría al servicio del arte: de Gaudí a Ghary" - Artículo publicado en la revista Mètode "L'art i la forma" - Joan Monterde

39 | Desarrolladas por los ingenieros DeCasteljau y Bezier (del que toman el nombre) en las compañías Citroën y Renault de manera independiente, pero llegando a las mismas conclusiones.

2.35 | "Cubierta olímpica en Munich" Alemania (1968-1972) obra de Frei Otto, Günter Behnisch, Keonhardt y André.

2.36 | "Museo Guggenheim en Bilbao", España (1991-1997) diseñado por el arquitecto Frank Gehry. En la imagen se aprecia la complejidad del modelo tridimensional de alambre computerizado, geometría imposible de trabajar sin los programas de diseño asistido por ordenador años atrás.

vas y superficies de formas diversas pero con un procedimiento sencillo. Esto se puede conseguir con ecuaciones, puesto que la intuición, mal que nos pese a los geómetras, se pierde cuando sustituimos una superficie por una ecuación. Hace falta un procedimiento geométrico simple que permita construir cosas complicadas"³⁸

Con la aparición de las curvas y superficies de Bezier a finales de los años 60 provenientes de la industria automovilística³⁹, aplicadas posteriormente a los programas de dibujo asistido por ordenador, el diseño de una nueva arquitectura que ya no solo se basa en formas regladas sino en todo tipo de formas orgánicas e irregulares se hizo posible. Este hecho ligado al desarrollo de la denominada High Tech, hace posible los edificios de arquitectos como Norman Foster y Santiago Calatrava, con planteamientos más geométricos, y otros como Frank Ghery, Zaha Hadid y Daniel Libeskind con un diseño más escultórico y orgánico.

Las consecuencias del uso de estos programas y "superficies informatizadas" ha llevado a una gran heterodoxia arquitectónica, llena de formas caprichosas a modo de esculturas gigantescas con una amplia libertad de concepción pero con una total indiferencia a las leyes de la física. No es extraño encontrarnos con casos en los que es, no imposible, pero sí muy complejo construir determinadas arquitecturas diseñadas a partir de "modelos tridimensionales orgánicos informáticos". Incluso casos en los que los costes de la obra multiplican por 4 o 5 los previstos en el proyecto. Es lo que algunos autores han venido a llamar el "informalismo contemporáneo":

"...extraño manierismo adolescente con el imperdonable pecado de la aconstructividad".⁴⁰

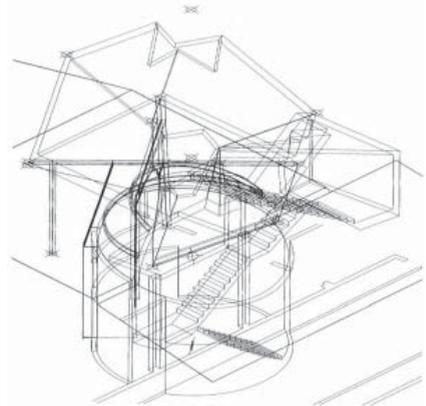
"Los edificios más relevantes de la Postmodernidad buscan un "carácter" sorprendente y banalmente efectista."⁴¹

El rasgo común de todas estas arquitecturas es el no considerar la relación entre el diseño estético y técnico de los edificios.

"La solución natural de un problema (arte sin artificio) de impues-



2.37



2.38

tos previos que la originaron, impresiona con su mensaje, satisfaciendo, al mismo tiempo, las exigencias del técnico y del artista.”⁴²

Hoy en días esta forma de diseñar se hace viable por dos motivos fundamentalmente: por un lado tenemos una disponibilidad y medios técnicos que nunca antes se habían dispuesto en la historia de la arquitectura, y por otro lado, vivimos en una sociedad llena de excesos en la que resulta posible y sencillo justificar el elevado sobrecoste de una obra... ¿Será necesaria quizá una vuelta a cero? ¿Un replanteamiento de la situación actual?

Para concluir este repaso por la extensa y vasta historia de la arquitectura me gustaría hacer una reflexión como preámbulo a la exposición del trabajo.

Hace falta una vuelta a los principios de la arquitectura. Se hace necesaria en estos momentos de constante aceleración, una tranquila y reposada reflexión sobre la base de la arquitectura, la triada vitruviana. La integridad formal, la unidad entre las partes, la coherencia entre el diseño, la estructura y la construcción... es fundamental.

Para ello, para conseguir lo que podríamos denominar una “arquitectura adecuada o correcta” es necesaria la investigación, la experimentación... y la formación técnica, la cual se está perdiendo en nuestras escuelas en favor de cuestiones más artísticas.

“Se asiste a un momento histórico en que la geometría está siendo cuestionada como pilar básico de conocimiento del mundo técnico. Sin embargo, se ve que de forma rotunda o en un anonimato más silencioso, como protagonista dentro de un programa de diseño asistido, la Geometría sigue siendo incuestionable para la ejecución de las grandes estructuras.”⁴³

La geometría se convierte en el soporte necesario para dominar los programas informáticos, hacer eficientes las estructuras y viable la construcción de los nuevos edificios.

40 | Artículo en la revista Tectónica nº17 “Geometrías complejas” – “Geometría, Técnica y arquitectura” – Ramón Araujo Armero

41 | “Valor Barroco en la arquitectura Valenciana” - Francisco Juan Vidal

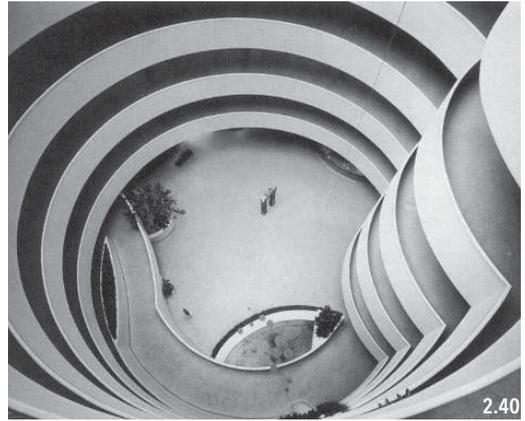
42 | “Razón y ser de los tipos estructurales” - Eduardo Torroja Miret

43 | Artículo para el congreso “Graphica” celebrado en Brasil en 2007 – “La geometría, soporte de la idea en el proceso de diseño” – Esther Vallejo Lobete, Fernando Fadón Salazar, José Enrique Cerón Hoyos

2.37 - 2.38 | “The box”, California (1990-1994) diseño de Eric Owen Moss. Sirva de ejemplo este edificio de la facilidad de creación de nuevas composiciones gracias a la ayuda del ordenador, pero que carecen de justificación y de criterio estructural o constructivo en su ideación.



2.39 | "Iglesia de la medalla milagrosa" México DF (1953)
obra de Félix Candela



2.40 | "Museo Guggenheim" Nueva York (1959)
Diseñado por Frank Lloyd Wright

El correcto uso de la geometría y las superficies singulares con criterios no solo estéticos, sino estructurales y constructivos, no ha de suponer una merma en la creatividad y la belleza de los edificios. Es más, el utilizar estos criterios puede generar edificios como los que se muestran, y que han pasado a la historia de la arquitectura. Si a esto le unimos las herramientas informáticas de las que disponemos hoy en día, podríamos afirmar que no existe límite en el diseño geométrico de la arquitectura.

2.3 | CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN EN EL ÁREA DE LA EXPRESIÓN GRÁFICA ARQUITECTÓNICA

El presente apartado está fundamentado en la publicación "Investigando los bienes arquitectónicos" coordinada por Ángela García Codoñer y Francisco Juan Vidal. En él se da una instantánea muy clara del panorama científico dentro del área en que está incluida la tesis, y es por esto la referencia tan explícita.

44 | "Declaración sobre el levantamiento arquitectónico. Carta del Rilievo" - Castell Sant Angelo, Roma 2000

45 | Conferencia en la UPV en 1995 "Il disegno come intrumento per l'analisi grafica dell'architettura" - Mario Docci

"Podemos definir investigar cómo realizar actividades intelectuales o experiencias sistemáticas, encaminadas a aumentar los conocimientos o mejorar los procedimientos en una determinada materia".

La pregunta que surge de la definición anterior es... ¿Cómo investigan los arquitectos? Todo el mundo tenemos en la retina a los científicos con sus probetas y microscopios, pero un arquitecto ¿que herramientas utiliza para investigar? ¿Que investiga?

Los campos de investigación en arquitectura son variados, pero todos tienen algo en común, el "PENSAMIENTO GRÁFICO". Ya en la Carta del Rilievo⁴⁴ se reconoce el levantamiento arquitectónico como plena tarea de investigación. El conocimiento del bien, documentarlo gráficamente, es previo a cualquier tipo de estudio o de intervención en arquitectura.

Pero no solo el levantamiento es investigación, en mayor o menor medida todos los arquitectos usan en su investigación la expresión gráfica, y para ello se utiliza normalmente lo que ha venido a denominarse la "metodología estructuralista"

"Metodología aceptada y rigurosa para el análisis de la arquitectura, que utiliza esencialmente el dibujo como instrumento de comprensión y, por tanto, de investigación"

"El análisis que lleva a cabo un estructuralista consiste en examinar un determinado suceso, descomponerlo en sus partes constituyentes, para clasificarlas, y volverlo a componer para poder comprender, de este modo, las relaciones que unen recíprocamente las diferentes partes entre sí y cada una de ellas con el todo."⁴⁵

Este tipo de análisis que se realiza dentro del área de la expresión gráfica pueden ser de diferentes tipos:

- Análisis descriptivo-formales - Se prescinde de los contenidos de la arquitectura y considera la forma por su manifestación externa y per-

ceptible.

- Análisis procesativos - Consideración genética de la forma, en cuanto a producto o consecuencia de la acción formalizadora de su artífice, en cuanto resultado final de un complejo proceso de ideación y ejecución.

- Análisis técnico-constructivos - Otro campo de análisis es el de la materialización de la arquitectura. El que atiene a la ejecución, a las técnicas constructivas, a los materiales empleados y a sus aparejos, a los sistemas tectónicos... Un ejemplo de este tipo de análisis lo podemos observar en los "Manuales del Recupero" italianos.⁴⁶

- Análisis funcionales - Analizan gráficamente el contenido, los espacios habitables que conforman, los "lugares" que generan, que ordenan y que sustentan. Lo más habitual es analizarlo desde el punto de vista de la función.

- Análisis de implantación - Hacen referencia al contexto y entienden la arquitectura como una intervención, como una alteración, como la imposición de un nuevo orden en un determinado entorno."

Lo bien cierto es que no es posible encajonar la investigación de la Arquitectura en una clasificación diseccionada en metodologías o tipos de análisis estancos. Es inevitable la interrelación de los diferentes campos.

Además de esto, otra de las preguntas que surgen en referencia a la investigación dentro del área de Expresión Gráfica es... ¿todos los dibujos utilizados para los diferentes análisis son iguales? ¿existen diferentes maneras de representar según lo que se está estudiando?

La respuesta la da el profesor Francisco Juan Vidal al principio de su texto hablando de los diferentes "campos" dentro de la expresión gráfica. Simplemente por enumerarlos, estos serían:

- Geometría, que define como la "matemática gráfica"
- Dibujo de concepto o de ideación
- Dibujo como comunicación
- Dibujos de entendimiento y asimilación

46 | Inventarios en forma de dibujos de gran formato que incluyen abundantes detalles constructivos, esquemas perspectivos de ensamblaje, secuencias de ejecución... de edificios que muestran aspectos tipológicos relacionados con periodos significados de la historia edificatoria del lugar.

- Dibujos de documentación o interpretación del documento construido
- Historia del dibujo
- Estudio historiográfico, biográfico...
- Investigación sobre enseñanza o aprendizaje del dibujo, proyecto docente como proyecto de investigación

El presente estudio y análisis de las superficies arquitectónicas singulares queda perfectamente encuadrado dentro de lo que se ha comentado anteriormente.

En un primer lugar, al introducirse en el estudio se genera una necesidad de clasificación, que como indica el profesor Carlos Montes:

*"Acudiendo a nuestra disciplina (hablando de la arquitectura y el dibujo), llegamos a comprender por qué el conocimiento y análisis de las formas artísticas y arquitectónicas precisa también de la clasificación y categorización. (...) podemos definir al hombre culto e instruido como un hombre articulado, capaz de distinguir, clasificar y definir, la variedad infinita de objetos, formas y conceptos de acuerdo con grupos, que, abarcando multitud de ellos, se articulan de acuerdo con elementos, propiedades, rasgos formales o factores comunes."*⁴⁷

Por tanto una primera parte del trabajo presentado consiste en una clasificación de las superficies a estudiar posteriormente para tener un panorama general y conocer sus características principales.

Ya en segundo lugar, el tipo de análisis que se plantea es fundamentalmente del tipo "descriptivo-formal", centrándose como objetivo principal en la geometría, de ahí que se haya denominado ANÁLISIS FORMAL-GEOMÉTRICO. Pero los análisis que se realizarán a continuación también tienen algo de "procesativos" ya que describen el proceso de diseño geométrico de la forma, no solo la forma en sí. Además, no podemos olvidarnos que estamos analizando arquitectura, por lo que cuando se analice los edificios de la "Ciutat de les Arts i de les Ciències", también se harán referencias a las consecuencias estructurales y constructivas derivadas del uso de las superficies, por lo que también tendrán algo de

"técnico-constructivos". Como indicábamos anteriormente, es inevitable la interrelación de los diferentes tipos de análisis.

Y ya por último, la herramienta utilizada para el conocimiento de las superficies utilizadas en los diferentes edificios analizados sería claramente el "dibujo geométrico", desde un punto de vista "científico o de matemática gráfica" (entendida como lenguaje universal biunívoco). Pero a pesar de este claro carácter geométrico del dibujo, también se ha pretendido que el lenguaje gráfico tenga parte de "dibujo de comunicación, entendimiento y asimilación", intentando que los análisis realizados sean lo más explicativos posibles:

"Si el arquitecto o arquitectos que idearon la creación o la modificación del organismo arquitectónico se valieron del dibujo y de la geometría para su ideación, volver a dibujarlo resultará imprescindible para alcanzar a comprender cada uno de los episodios de este proceso configurador."

Queda pues de esta manera encuadrado el tipo de investigación que se va a realizar dentro del área de Expresión Gráfica Arquitectónica.

48 | "Geometría métrica y descriptiva para arquitectos" Fernando Nagore - Universidad de Navarra, EUNSA 1986

49 | "La forma arquitectónica" Ignacio Araujo - Ediciones UN, Pamplona 1976

50 | "Estructura geométrica de las superficies arquitectónicas" Rafael Valdecabres Gómez - Editorial UPV, Valencia 1988

51 | "Apuntes sobre cuádricas regladas" Felipe Soler Sanz - Apuntes manuscritos

2.4 | ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN. FUENTES DOCUMENTALES.

El estado actual de la investigación acerca de la aplicación de la geometría en el diseño de la arquitectura y sus consecuencias, tal y como se ha indicado y se podrá apreciar en apartados posteriores, está muy disperso por diferentes áreas de conocimiento. Geómetras, matemáticos, historiadores del arte y teóricos la arquitectura, estructuristas... todos ellos investigan sobre este tema y cada uno da su visión, en muchas ocasiones parcial e interesada (entiéndase por interesada aquella que es de interés para sus análisis) por lo que se hace imprescindible un recorrido por todos estos ámbitos de estudio para poder establecer el estado del arte.

Por tanto se va a hacer un repaso de las fuentes documentales utilizadas para la realización de esta investigación organizándolas por área de conocimiento:

GEOMETRÍA_EXPRESIÓN GRÁFICA ARQUITECTÓNICA

El área de la geometría vinculada a la expresión gráfica arquitectónica es el más influyente en esta investigación, debido a la pertenencia del doctorando en este departamento de la Universitat Politècnica de València. Cabe destacar todas las líneas de investigación y fuentes documentales previas existentes en el departamento.

Continuando la línea iniciada por Fernando Nagore en la Universidad de Navarra⁴⁸, profesor también de expresión gráfica e Ignacio Araujo⁴⁹, profesor del área de proyectos y expresión gráfica, Rafael Valdecabres Gómez y Felipe Soler Sanz arrancan un campo de investigación en Valencia acerca de la geometría de las superficies arquitectónicas⁵⁰. Después de su temprano fallecimiento esta investigación fue continuada por el profesor Soler Sanz quien hoy en día continúa analizando y experimentando con las superficies regladas⁵¹. Sus estudios acerca de las superficies de aplicación en la arquitectura han sido un gran apoyo para la realización de esta tesis.

En la actualidad, y como consecuencia de la aplicación de los programas informáticos de diseño arquitectónico, la línea de investigación acerca de la geometría en el departamento a dado un cambio sustancial. Quizá no existe como tal investigación, ya que no se genera producción de

publicaciones⁵² o de comunicaciones en congresos, pero si que existe a nivel docente aunque con gran carga de investigación en sus planteamientos y enunciados de ejercicios⁵³. Un primer paso para el establecimiento de esta línea investigadora dentro del departamento con un carácter más investigador es la realización por parte del doctorado de un par de publicaciones, comunicaciones en congresos de investigación, exposiciones y un taller de proyecto final de grado, de las que cabe destacar:

- "La geometría de las superficies arquitectónicas", de carácter docente pero con análisis de edificios singulares, editado por Diazotec, 2012

- "PFG T14: Superficies arquitectónicas singulares" , junto con el profesor Rafel Ligorit Tomás, editado por Obra Propia, 2011

- "La geometría de las superficies arquitectónicas: Análisis de la Ciudad de las Artes y de las Ciencias de Valencia", comunicación presentada en el XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la Edificación, celebrado en Valencia en 2012

Por lo que se refiere a tesis doctorales relacionadas con el área y la investigación, en el departamento resultaron motivadoras en introductorias referente al estudio de arquitectura las de los profesores Juan Carlos Navarro Fajardo⁵⁴ y Jorge García Valldecabres⁵⁵. En el primer caso, el estudio geométrico de los trazados reguladores de las bóvedas de crucería y su representación utilizando métodos de geometría descriptiva, junto con los posteriores trabajos de representación geométrica realizados por el equipo de investigación del autor, sirvió de motivación para el diseño de la metodología de esta investigación. En el caso del profesor García Valldecabres, el rigor geométrico de los análisis y la tradición del uso de la geometría métrica plana ha servido de referente en el desarrollo de los análisis. Además también cabe destacar la ayuda en todo momento del autor, que junto con Concepción López González han dirigido la presente investigación.

Y ya fuera del departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica de la UPV, se han consultado un gran número de fuentes documentales refe-

52 | "Geometría para la arquitectura. Ejercicios de sistemas de representación" Julio Albert Ballester, Vicente Querol Romero y Antonio Sintas Martínez – Editorial UPV, Valencia 2010. Única publicación al respecto, con carácter docente

53 | "Prácticas de Geometría Descriptiva" Unidad de geometría descriptiva ETSAV-UPV

54 | "Bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV a XVI. Traza y monte" Juan Carlos Navarro Fajardo – Tesis doctoral UPV, Valencia 2004

55 | "La métrica y las trazas en la iglesia de San Juan del Hospital de Valencia" Jorge García Valldecabres – Tesis doctoral UPV, Valencia 2010

56 | "Control gráfico de la forma y superficies de transición" Isabel Crespo Cabillo – Tesis doctoral UPC, Barcelona 2005

57 | "Geometría de formas estructurales y formas de transición" Luis Fernando García Lara – Revista In situ nº18, Barcelona 2008

58 | "Genesi dell'architettura. Geometria per il progetto" Carmela Crescenzi – 13º Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica, Valencia 2010

59 | "Oscar Niemeyer. La geometría della forma" Alessandra Pagliano -Serie di architettura e design Franco Angeli, Milán 2011

60 | "El vientre de un arquitecto" Raúl Ibañez Torres – Sociedad, ciencia, tecnología y matemáticas, 2004

61 | "La geometría, soporte de la idea en el proceso de diseño" Esther Vallejo Lobete, Fernando Fadón Salazar y José Enrique Cerón Hoyos – Congreso Graphica, Brasil 2007

rentes al área de geometría. De entre todas ellas cabe destacar varios trabajos.

La tesis doctoral de Isabel Crespo Cabillo⁵⁶, donde investiga acerca de las superficies de transición que se utilizan en la arquitectura para resolver el paso entre diferentes partes de los edificios o de sus elementos, ha servido de motivación e inspiración para el presente trabajo. Los análisis realizados y su metodología han servido de punto de partida. Igualmente la metodología empleada en los análisis que Luis Fernando García Lara⁵⁷ realiza para la revista "In situ" ha sido adaptada en esta tesis.

Cabe destacar los trabajos realizados por la profesora Carmela Crescenzi⁵⁸ en los que analiza arquitectura contemporánea desde un punto de vista geométrico, pero realizando unas láminas con composiciones muy atractivas desde el punto de vista de diseño arquitectónico.

Una publicación adquirida tras una clase impartida en la universidad de Nápoles y realizada por la profesora Alessandra Pagliano⁵⁹ sobre la obra de Oscar Niemeyer y las superficies geométricas que utiliza el arquitecto en sus diseños, sirvió para estructurar la parte de análisis geométrico de la investigación.

El trabajo de Raul Ibañez Torres⁶⁰, muy difundido por internet, y el artículo publicado por Esther Vallejo, Fernando Fadón y José Enrique Cerón en el congreso Graphica en Brasil en 2007⁶¹, en los que se hace un repaso histórico rápido por la aplicación de la geometría en la historia de la arquitectura, han sido también de gran ayuda. En el primero el autor se centra en las superficies dando ejemplos de aplicación que sirven de base para posteriores búsquedas. En el otro artículo, se hace una exposición cronológica desde el punto de vista de la ideación geométrica del proyecto.

Otros documentos que quizá no se hayan utilizado para el desarrollo de la investigación, pero si que han servido como reflexión acerca de la actualidad del tema y del futuro de la investigación sobre superficies geométricas aplicadas a la arquitectura y a las nuevas tecnologías informáticas que se están desarrollando.

En esta línea estarían los artículos escritos por el profesor Mario Docci⁶², en el que resulta muy interesante la descripción de los tres modos actuales que se están empleando para el diseño de arquitectura a partir de la tecnología informática actual; el realizado por Aitor Goitia Cruz⁶³, en el que habla del "efecto Guggenheim" y las arquitecturas denominadas "soft" diseñadas con formas escultóricas; y por último el expuesto en el último Congreso Internacional de Expresión Gráfica por el profesor Ángel José Fernández Álvarez⁶⁴, donde habla de "Geometrías inteligentes para construir formas complejas" y defiende la prefabricación de la arquitectura como futuro inmediato y salida de la crisis actual, con el apoyo fundamental de la geometría.

MATEMÁTICAS

Además de la consulta de las publicaciones que se indicarán en el apartado 3.2 de clasificación de superficies, el hecho de incluir esta faceta viene motivado por el estudio de diversas publicaciones matemáticas.

En primer lugar se ha de destacar la aportación del profesor Joaquín Moreno Flores, matemático y compañero de la UPV, que durante varios años lleva desempeñando un gran esfuerzo de búsqueda de aplicaciones concretas de las matemáticas en las diferentes ramas de la arquitectura y la edificación, fundamentalmente con fines docentes. Muestra de ellos son algunas de las publicaciones⁶⁵ y jornadas que está realizando.

Toda la investigación de Claudi Alsina Catalá⁶⁶ acerca de la aplicación de la geometría a la arquitectura también ha resultado de mucho interés y aplicación en la investigación.

La revista "Mètode" publicada por la "Universitat de València" incorpora multitud de artículos escritos por investigadores de la facultad de Matemáticas en los que relacionan la geometría matemática con el diseño de la arquitectura. Cierta es que muchos de ellos no son del todo acertados, probablemente por la formación no técnica de sus autores. De entre todos cabe destacar el escrito por Juan Monterde⁶⁷ en el que explica el descubrimiento, desarrollo y aplicación de las superficies de Bezier.

62 | "Dibujo y proyecto de arquitectura" Mario Docci - 13º Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica, Valencia 2010

63 | "Soft Show" Aitor Goitia Cruz - 13º Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica, Valencia 2010

64 | "Diseño y fabricación digital: Geometrías inteligentes para construir formas complejas" Ángel José Fernández Álvarez - XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la Edificación, Valencia 2012

65 | "Matemáticas para la edificación" Joaquín Moreno Flores - Editorial Paraninfo, Valencia 2011

66 | "Geometría a l'arquitectura" Claudi Alsina Catalá, Joan Jacas Moral y M. Santos Tomás Belenguer - Ediciones UPC, Barcelona 2007

67 | "Arquitectura y matemáticas. La geometría al servicio del arte: de Gaudí a Gehry" Juan Monterde - revista Mètode nº37, Valencia 2003

68 | "Razón y ser de los tipos estructurales" Eduardo Torroja Miret - CSIC, Madrid 1957

69 | "Estructuras para arquitectos" Mario Salvadori y Robert Heller - Nobuko, 2005

70 | "Sistemas de estructuras" Heino Engel - Gustavo Gili, Barcelona 2001

71 | "Las estructuras de Félix Candela" Colin Faber - Compañía editorial continental, Mexico DF 1981

72 | "Análisis de tipologías estructurales: Bóveda, lámina, cúpula y paraboloides" Ignacio Requena Ruiz - Apuntes internet

73 | "El hormigón armado y el desarrollo de la tipología laminar: la transformación del canon en la arquitectura moderna" Carmen Jordá Such - Actas del 4º Congreso Nacional de Historia de la construcción, Cádiz 2005

74 | "Sobre cáscaras y blobs. Superficies estructurales de la era digital" Martín Bechthold - ARQ lecturas nº63, Santiago 2006

ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

En este área de conocimiento es obligatoria la referencia a una serie de publicaciones más antiguas, que no por ello han dejado de estar de actualidad. Muestra de ello son las recientes reediciones que han sufrido.

La publicación de Eduardo Torroja Miret⁶⁸, que constituye casi más un tratado de filosofía acerca de las estructuras que un libro técnico; la publicación de Mario Salvadori y Robert Heller⁶⁹ que está redactada con enfoque totalmente de diseño estructural dirigido a arquitectos; y la enciclopedia gráfica que supone el libro de Heino Engel⁷⁰, han sido la base de las investigaciones acerca de la influencia de la geometría en la estructura. Así también, el libro de Colin Faber⁷¹ que se centra en las estructuras diseñadas por Félix Candela, ha servido para entender el funcionamiento de las estructuras laminares de hormigón.

Además de estas publicaciones clásicas de estructuras, los apuntes del profesor Ignacio Requena Ruiz⁷² donde explica diferentes tipologías estructurales como son la bóveda, la lámina, la cúpula y el paraboloides, han servido para centrar en la investigación la distribución de esfuerzos que se provoca en cada uno de estos elementos constructivos.

Y para finalizar este apartado, entre otros artículos consultados se destacan dos por su carácter de resumen histórico, el primero, y por su mirada hacia el presente-futuro de las estructuras laminares, el segundo. Me refiero a los artículos escritos por la profesora Carmen Jordá Such⁷³ de la UPV hablando del cambio formal que supuso el desarrollo de las superficies laminares de hormigón en la primera mitad del siglo XX, y del escrito por Martín Bechthold⁷⁴ en el que explica, al igual que el anterior texto, la deriva de las estructuras de "cáscara" pero comentando las nuevas líneas de investigación que se están llevando a cabo con el objetivo de reducir los costes de ejecución. Este último sirve como motivación y punto de partida para una de las líneas de investigación propuestas en las conclusiones de esta tesis doctoral.

HISTORIA Y CRÍTICA DE LA ARQUITECTURA

El último área de la arquitectura que se ha trabajado es el correspondiente a la historia y teoría de la arquitectura. Entre la multitud de libros, artículos, comunicaciones... consultadas, podemos diferenciar tres tipos.

Por un lado están los textos generalistas que hacen un repaso por la historia de la arquitectura o por alguna de sus épocas, normalmente centrándose en aspectos más estilísticos que técnicos.

También están los que repasan la historia pero con algún tema de referencia. En este grupo nos encontramos con el artículo que Ramón Araujo Armero⁷⁵ escribió para la revista "Tectónica" y que repasa la importancia de la aplicación de la geometría en el diseño arquitectónico a lo largo de toda la historia. De gran interés resulta su reflexión final acerca del carácter imprescindible de la geometría en la arquitectura "informatizada" actual. Otro texto que podríamos incluirlo en este tipo es el redactado por José Antonio González Casares, Manuel J. Martínez Carrollo y Antonio Ruiz Sánchez⁷⁶, donde se hace un repaso en primer lugar por las superficies de aplicación en arquitectura para posteriormente analizar una serie de edificios donde se han utilizado.

Y por último estaría el tercer tipo de publicaciones, las que repasan la trayectoria profesional de alguno de los arquitectos en cuyas obras se ha empleado la geometría como elemento generador del diseño de sus edificios. Algunas de estos textos consultados serían los de Antón Capitel⁷⁷, hablando sobre la obra de Utzon, la publicación de Pilar Chias y Tomás Abad⁷⁸, que recoge la obra de Eduardo Torroja Miret con planos e imágenes de sus edificios, los artículos, exposiciones y publicaciones llevados a cabo por Pepa Casinello⁷⁹ sobre las construcciones de Félix Candela, o la tesis doctoral y posteriores artículos de Juan María Songel⁸⁰ que tratan sobre la figura y la obra de Frei Otto.

En este último apartado cabe destacar una obra interesante por su enfoque geométrico. Es la coordinada por Daniel Giralt⁸¹ acerca de la geometría utilizada en la obra de Antoni Gaudí. En esta publicación se hace un repaso por todo el repertorio formal geométrico del arquitecto

75 | "Geometría, técnica y arquitectura" Ramón Araujo Armero - Revista Tectónica nº17, Madrid

76 | "Estudio y aplicación de superficies curvas en el patrimonio arquitectónico" Jose Antonio González Casares, Manuel J. Martínez Carrollo y Antonio Ruiz-Sanchez - Granada 2011

77 | "Jorn Utzon. Origen y fortuna del organicismo tardío" Antón Capitel - Revista arquitectura, Madrid 1959

78 | "Eduardo Torroja: Obras y proyectos" Pilar Chias Navarro y Tomás Abad Balboa - Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja, Madrid 2005

79 | "Félix Candela. In memoriam (1910-1997) From thin concrete shells to the 21st century's lightweight structures" P. Casinello, M. Schlaich, J.A. Torroja - Informes de la construcción vol62, 2010

80 | "Frei Otto y el debate sobre la génesis de la forma arquitectónica" Juan María Songel - Revista EGA nº 16, Valencia 2010

81 | "Gaudí. La búsqueda de la forma" Daniel Giralt Miracle, Ayuntamiento de Barcelona 2002

catalán, explicando desde la base teórica geométrica, hasta la aplicación constructiva y estructural en sus edificios. Todo esto acompañado de unos buenos dibujos y esquemas donde se analiza geoméricamente diversas formas de su arquitectura. Cada uno de los capítulos va firmado por diferentes investigadores de distintas áreas de conocimiento.

Digno de señalar es el estudio acerca del diseño geométrico de las columnas del "templo de la Sagrada Familia" de Barcelona, realizado por Jordi Bonet i Armengol.



3 | LAS SUPERFICIES GEOMÉTRICAS ARQUITECTÓNICAS

3.1 | PROBLEMÁTICA DEL ESTUDIO DE LAS SUPERFICIES

MI EXPERIENCIA COMO DOCENTE E INVESTIGADOR

El estudio de las superficies geométricas y su aplicación en la arquitectura es mi campo de investigación desde hace ya años, como he comentado en la introducción. En un primer momento mi acercamiento a este campo de estudio fue muy motivador, ya que se abría frente a mí un gran repertorio de formas geométricas, muchas de ellas desconocidas hasta ese momento. Poco a poco, pasado el tiempo, fui profundizando más en su complejidad y pude constatar una realidad. Me encontré con una gran disparidad de clasificaciones que a lo largo de la historia y desde los diferentes campos de investigación se habían realizado. Es más, incluso dentro de un mismo campo los diferentes autores no habían establecido una única clasificación, sino que cada uno basándose en unos criterios establecía su propia clasificación. A veces las diferencias entre una y otra consistían en pequeños matices. En otras ocasiones eran grandes diferencias de criterio las que existían.

A continuación se procederá a detallar las clasificaciones más significativas en cada uno de los campos de estudio indicados. Las diferentes publicaciones estudiadas son de autores de referencia, y no son todas las estudiadas, pero sí las más significativas, además de ser las que han servido de referencia para el posterior estudio pormenorizado de las superficies.

Fundamentalmente vamos a entrarnos en 4 campos importantes: la geometría descriptiva, el diseño estructural, el análisis matemático y el modelado informático.

Posteriormente al análisis de las mencionadas clasificaciones, y dada la dificultad de establecer una clasificación global que tenga en cuenta todos los parámetros estudiados, se adoptarán unos criterios en cada una de las áreas de conocimiento de manera que se pueda definir una superficie a partir de ellos y que sus características principales queden completamente definidas.

Para finalizar este tercer apartado se realizará un desarrollo a partir de una fichas con carácter muy explicativo que pretenden dos objetivos:

página anterior | Imágen de la "Iglesia de San Francisco de Asís" en Papulha, Brasil, 1943 - Oscar Niemeyer

por un lado mostrar las superficies geométricas de mayor uso en la arquitectura, con su clasificación desde diferentes puntos de vista y basándose en los criterios establecidos en el punto anterior; por otro lado dar algunos ejemplos representativos del uso de las superficies analizadas. La realización de estos análisis no se pretenden que sea exhaustiva, sino más bien una colección de ejemplos que ilustren la aplicación de las superficies a lo largo de la historia de la arquitectura y las diferentes maneras de hacerlo. La información con la que se ha trabajado en esta fase está extraída de libros, revistas, ponencias, páginas web...

El desarrollo del estudio de superficies que se va a realizar a continuación pretende tener un carácter muy divulgativo, de manera que pueda servir tanto a alumnos de arquitectura e ingeniería, futuros investigadores que se adentren en este universo de las superficies como a profesionales que quieran profundizar en el tema para un uso en sus proyectos.

3.2 | CLASIFICACIÓN DE LAS SUPERFICIES

GEOMETRÍA DESCRIPTIVA

En primer lugar, conviene establecer una definición geométrica de las superficies. Según el profesor José María Gomis Martí, podemos establecer 4 definiciones geométricas dependiendo el campo de la propia geometría en que nos manejemos. Por tanto podríamos definir las superficies como:

"1_Lugares geométricos de puntos, rectas o curvas que cumplen ciertas condiciones.

2_Envoltentes de planos o superficies que cumplan ciertas condiciones o resulten de ciertas construcciones.

3_Transformadas proyectivas de otras superficies.

4_Trayectorias de rectas o curvas (elementos generadores) que se desplazan según una ley dada a través de algunos otros elementos geométricos fijos (directrices)."¹

La primera definición hace referencia a un criterio algebraico en el que se tiene que establecer la condición que han de cumplir los puntos, rectas y curvas con una ecuación o sistema, criterio que en ocasiones no será sencillo de definir. Lo interesante de ésta definición es que ya aparecen en ella los elementos que generan las superficies: rectas y curvas.

En la segunda definición quiere resaltar el carácter infinitesimal de las superficies como elementos infinitamente delgados. Realmente no añade mucho más a la anterior definición.

A partir de el concepto de homología, la tercera definición deja un gran universo de posibilidades, indicando que una superficie puede obtenerse mediante esta relación geométrica y sus derivadas (afinidad, homotecia, traslación) a partir de otra. Quizá es el campo más teórico del estudio de las superficies y que es difícilmente aplicable en arquitectura.

Es la cuarta definición la que podríamos considerar más completa y

práctica, ya que por un lado habla de los elementos que generan las superficies, las RECTAS y las CURVAS, definiéndolas como elementos generadores o GENERATRICES. Por otro lado indica que una superficie es una TRAYECTORIA, lo que supone una generación a partir de un movimiento. Y en último lugar indica que este movimiento viene marcado por una ley marcada por otros elementos secundarios, llamados DIREC-TRICES. Más adelante utilizaremos estos tres criterios para hacer la clasificación geométrica de las superficies.

ANÁLISIS DE LAS CLASIFICACIONES GEOMÉTRICAS

A continuación se expondrá y analizarán un total de 6 clasificaciones de superficies desde un criterio exclusivamente geométrico. Los autores y los libros de donde están extraídas las mismas son:

- Taibo Fernández, Ángel
Geometría Descriptiva y sus aplicaciones. Tomo II: Curvas y Superficies
Edit. Tebar Flores
- Izquierdo Asensi, Fernando
Geometría Descriptiva
Edit. Paraninfo
- Gomis Martí, José María
Curvas y superficies en el diseño de ingeniería
Servicio Publicaciones UPV
- Ferrer Muñoz, José Luis
Superficies poliédricas
Edit. Paraninfo
- Leighton Wellman, B.
Geometría descriptiva: Compendio de GD para técnicos
Edit. Reverté
- Sanchis Sampedro, Francisco Javier
La geometría de las superficies arquitectónicas
Edit. Diazotec

TAIBO FERNÁNDEZ, ÁNGEL

Geometría Descriptiva y sus aplicaciones. Tomo II: Curvas y Superficies.

CLASE	FAMILIA	GRUPO	SUPERFICIE	
REGLADAS	DESARROLLABLES	POLIEDROS	TETRAEDRO CUBO OCTAEDRO DODECAEDRO ICOSAEDRO	
		RADIADAS	CÓNICAS	CONO PIRÁMIDE
			CILÍNDRICAS	CILINDRO PRISMA
	DE IGUAL PENDIENTE			
	TANGENCIALES			HELIZOIDE DESARROLLABLE
	POLARES			
	RECTIFICANTES			
	DE TRES DIRECTRICES			HIPERBOLOIDE ELÍPTICO PARABOLOIDE HIPERBÓLICO CONOIDE
	ALABEADAS	DE PLANO DIRECTOR		
		DE CONO DIRECTOR		HELIZOIDES ALABEADOS
	CURVAS	SEGUNDO GRADO		ESFERA ELIPSOIDE PARABOLOIDE ELÍPTICO HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO
REVOLUCIÓN		TORO ESCOCIA		
VARIAS		HELIZOIDES CURVOS SERPENTINES		
COMPUESTAS				

El hecho de empezar con esta clasificación es debido a que con toda probabilidad es la clasificación más recurrente en todas las bibliografías tanto de publicaciones posteriores como de los planes de estudio de las asignaturas de geometría descriptiva a nivel nacional.

En ella se establece en un primer nivel, que el autor denomina como CLASE, el criterio del elemento generador: Superficies REGLADAS serían las generadas por rectas y superficies CURVAS las que se definen a partir de curvas. Este criterio se repetirá en la mayoría de clasificaciones en el ámbito de la geometría.

En un segundo nivel, denominado FAMILIA, clasifica las superficies regladas según su desarrollabilidad en DESARROLLABLES y ALABEADAS,

siendo estas últimas las no desarrollables. Las superficies curvas no se subdividen en este nivel.

Ya en un tercer nivel, las superficies se clasifican según su GRUPO y SUPERFICIE, con unos criterios que no son homogéneos. Por ejemplo se utilizan criterios de forma (superficies POLIÉDRICAS serían las compuestas por varias caras planas), criterios de generación (superficies de PLANO GENERADOR, aquellas que se generan mediante la intersección de las directrices con planos directores paralelos), incluso apareciendo un criterio de VARIAS, donde se colocan aquellas superficies que no se han podido clasificar en los criterios anteriores.

Ya para finalizar aparece el nombre de las superficies que se mantendrá en posteriores clasificaciones prácticamente sin modificaciones, a excepción de los HELIZOIDES.

En esta primera clasificación ya nos encontramos con contradicciones que son consecuencia de encasillar de manera rígida las diferentes superficies. Por ejemplo, las PIRÁMIDES y PRISMAS está clasificadas en las superficies radiadas, mientras que son superficies formadas por planos, o lo que es lo mismo, POLIÉDRICAS. La ESFERA, se puede considerar como una superficie de REVOLUCIÓN, mientras que no está clasificada en ese criterio, sino en el de SEGUNDO GRADO.

Se podrían dar más ejemplos, pero ya podemos observar que el realizar una clasificación cerrada de las superficies desde el punto de vista geométrico no es sencillo, y probablemente, tampoco posible.

Es por este motivo por el que observaremos que los diferentes autores que estudiamos a continuación realizan variaciones sobre esta clasificación, pequeñas eso sí, pero atendiendo a estas contradicciones que estamos comentando.

IZQUIERDO ASENSI, FERNANDO
Geometría descriptiva

GRUPO	FAMILIA	CLASE	SUPERFICIE		
REGLADAS	DESARROLLABLES	PLANAS	PLANO TETRAEDRO CUBO		
		POLIEDRALES	REGULARES	OCTAEDRO DODECAEDRO ICOSAEDRO	
			IRREGULARES		
		RADIADAS	CÓNICAS	CONO PIRÁMIDE	
			CILÍNDRICAS	CILINDRO PRISMA	
		DE IGUAL PENDIENTE			
		TANGENCIALES			HELIZOIDE DESARROLLABLE
		POLARES			
		RECTIFICANTES			
		ALABEADAS			CONO ALABEADO CONOIDE CILINDROIDE
CURVAS	REVOLUCIÓN	GENERATRIZ CURVA	TORO ESCOCIA ESFERA		
		GENERATRIZ RECTA	REGLADA CONO DE REVOL. DESARROL. CILINDRO DE REV. REGLADA HIPERBOL. DE REV. ALABEADA		
COMPUESTAS					

La publicación de Fernando Izquierdo Asensi es también un referente a nivel bibliográfico. No es difícil de apreciar que está claramente inspirada en la anterior. Aún así se ha analizado porque incorpora algunas modificaciones interesantes respecto a la de Ángel Taibo.

Cabe destacar que en esta publicación que la clasificación no está realizada en forma de tabla sino redactada en varios párrafos, pero que al organizarla matricialmente responde al mismo esquema que la anterior.

En primer lugar hacer notar que los criterios de clasificación en los dos primeros niveles son los mismos. Es ya en el tercer nivel de clasificación en el que nos encontramos novedades.

Para empezar aparecen las superficies PLANAS. Probablemente las grandes olvidadas en todas las clasificaciones por ser un tipo de superficie muy elemental y que se suele estudiar junto con los diferentes sistemas

de representación. Aún así no deja de ser una superficie.

Las superficies regladas alabeadas prácticamente no son objeto de clasificación sino que se limita a indicar algunas de ellas.

Y la siguiente novedad importante nos la encontramos en la clasificación de las curvas. En este apartado abandona la clasificación anterior y se centra en las superficies curvas de revolución, a las que posteriormente dedica un capítulo de la publicación. Diferencia entre 2 grupos según la generatriz, RECTA o CURVA. Dentro de las de generatriz recta diferencia entre DESARROLLABLES y ALABEADAS, al igual que en las superficies regladas de la parte superior de la clasificación.

Esta duplicidad de criterios es un claro ejemplo de lo complicado que resulta la clasificación única.

Además esta clasificación se olvida de las superficies curvas que no están generadas por revolución.

GOMIS MARTÍ, JOSE MARÍA
Curvas y superficies en el diseño de ingeniería

CLASE	FAMILIA	GRUPO	SUBGRUPO	SUPERFICIE
REGLADAS	DESARROLLABLES	POLIEDROS	REGULARES	TETRAEDRO CUBO OCTAEDRO DODECAEDRO ICOSAEDRO
			IRREGULARES	
		RADIADAS	DIR. POLIGONAL	PIRÁMIDE PRISMA
			DIR. CÓNICA (CUÁDRICAS PARABÓLICAS)	CONO CUÁDRICO CILINDRO CUÁDRICO
			DIR. DE ORDEN SUPERIOR	SUP. CÓNICA SUP. CILÍNDRICA
			2 DIRECTRICES CURVAS CONO DIRECTOR	CONVOLUTA DE IGUAL PENDIENTE
		TANGENCIALES	HELICOIDE DESARROLLABLE POLARES RECTIFICANTES HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	
		3 DIRECTRICES RECTAS (CUÁDRICAS HIPERBÓLICAS)		
		ALABEADAS	2 DIRECTRICES RECTAS Y 1 DIRECTRIZ CÓNICA	CONOIDES
			2 DIRECTRICES CÓNICAS Y 1 DIRECTRIS RECTA	PASO OBLÍCUO CILINDROIDE
	DIRECTRIZ HELICOIDAL Y CONO O PLANO DIRECTOR		HELICOIDES ALABEADOS	
	CURVAS	CUÁDRICAS ELÍPTICAS		ESFERA ELIPSOIDE PARABOLOIDE ELÍPTICO HIPERBOLOIDE ELÍPTICO
			DE REVOLUCIÓN	TORO ESCOCIA
HELICOIDALES CURVAS		HELICOIDES CURVOS SERPENTINES		
GRÁFICAS			SUPERFICIES TOPOGRÁFICAS	

Una vez más se puede observar en la clasificación que realiza José María Gomis Martí la influencia de la primera clasificación que analizamos. Aún así e igual que en el caso anterior, el autor hace algunas modificaciones sobre la original que son interesante de analizar.

En este caso se vuelve a hacer caso omiso de las superficies planas.

El concepto de CLASE y GRUPO se alternan, apareciendo el concepto de SUBGRUPO.

En el tercer nivel vuelve a mezclar criterios de generación y forma, y además aparecen criterios matemáticos, aparece el concepto de CUADRICA. Esto es debido al talante matemático de la publicación donde se mezclan criterios puramente geométricos de representación gráfica, con definiciones y demostraciones de índole matemática, algebraica y diferencial.

En el apartado de superficies regladas ALABEADAS, el autor hace un aporte interesante clasificando las superficies según sus DIRECTRICES, tanto por el número como por su forma. Quizás esta es la novedad más interesante ya que no genera un gran contenedor con superficies que poco tienen que ver, sino que las clasifica de manera muy racional utilizando sus directrices.

Por último cabe destacar que desaparecen las superficies compuestas que no habíamos comentado, pero que aparecían en las dos clasificaciones anteriores, y éstas son sustituidas por las superficies GRÁFICAS y/o TOPOGRÁFICAS. Bajo mi punto de vista, quizá en una clasificación de superficies geométricas regulares, no caben superficies irregulares y deformables con el tiempo como son las topográficas.

FERRER MUÑOZ, JOSE LUIS
Superficies poliédricas

DESARROLLABLES	POLIEDROS	REGULARES	
		SEMIRREGULARES	
RADIADA		CÓNICAS	
		CILÍNDRICAS	
SUPERFICIES	ALABEADAS	CONO	
		PIRÁMIDE	
	NO DESARROLLABLES	CURVAS	CILINDRO
			PRISMA
	ALABEADAS	PLANO DIRECTOR	PARABOLOIDE
			HIPERBÓLICO
	NO DESARROLLABLES	CURVAS	CONOIDE
			HELIZOIDE
	ALABEADAS	CONO DIRECTOR	HELIZOIDE
			TRES DIRECTRICES
NO DESARROLLABLES	CURVAS	ESFERA	
		ELIPSOIDE	
ALABEADAS	PLANO DIRECTOR	HIPERBOLOIDE	
		ETC...	
NO DESARROLLABLES	CURVAS	DE REVOLUCIÓN	
		OTRAS	
NO DESARROLLABLES	CURVAS	SUP. TORAL	
		HELIZOIDE CURVO	
NO DESARROLLABLES	CURVAS	SERPENTIN	

En su libro dedicado a las superficies poliédricas, José Luis Ferrer Muñoz realiza una clasificación general de las superficies donde cambia los criterios de clasificación que habíamos visto en las anteriores.

El primer criterio de clasificación que establece el autor es el basado en la desarrollabilidad, dividiendo las superficies en DESARROLLABLES y NO DESARROLLABLES. Es curioso como no habla de alabeadas hasta el segundo nivel e incorpora las curvas dentro de las no desarrollables.

Sin embargo, más allá de esta reorganización en base a este primer criterio, en un tercer nivel repite algunas de los aspectos comentados en las anteriores clasificaciones. Considera el PRISMA y la PIRÁMIDE como radiada y no como poliédricas. La ESFERA no está considerada como superficie curva de revolución, sino como CUÁDRICA.

Sin embargo una de las clasificaciones que aclara bastante y de manera muy simple es las de las superficies ALABEADAS, hablando únicamente de plano director, cono director y tres directrices.

Como ya se ha comentado el libro está dedicado a las superficies po-

liédricas, convirtiéndose en la publicación de este tipo de superficies más completas que podemos encontrar. Por tanto es interesante todo el desarrollo que realiza de estas superficies así como su clasificación que podemos ver a continuación.

POLIEDROS	REGULARES	CONVEXOS	TETRAEDRO CUBO OCTAEDRO DODECAEDRO ICOSAEDRO
		ESTRELLADOS	DODECAEDRO ICOSAEDRO
	SEMIRREGULARES	ARQUIMEDIANOS ESTRELLADOS	13 TIPOS
	DE CATALÁN		13 TIPOS
	IRREGULARES		

En la clasificación se han omitido algunos tipos de superficies por simplicidad ya que no aportaban más información que el nombre y podrían restar claridad a la misma.

LEIGHTON WELLMAN, B.
Geometría descriptiva: Compendio de GD para técnicos

SUPERFICIES PLANAS				
POLIEDROS	REGULARES		TETRAEDRO CUBO OCTAEDRO DODECAEDRO ICOSAEDRO	
	IRREGULARES			
SUPERFICIES DE SIMPLE CURVATURA			CONO CILINDRO CONVOLUTA	
SUPERFICIES REGLADAS	TRES LINEAS DIRECTRICES	3 RECTAS	HIPERBOLOIDE ELÍPTICO HIPERBOLOIDE DE REVOLUCIÓN	
		2 RECTAS + 1 CURVA		
		1 RECTA + 2 CURVAS 3 CURVAS	SUP. CÓNICA ALABEADA CUERNO DE VACA	
	SUPERFICIES ALABEADAS	DOS LINEAS DIRECTRICES Y UN PLANO DIRECTOR	2 RECTAS	PARABOLOIDE HIPERBÓLICO
			1 RECTA + 1 CURVA 2 CURVAS	CONOIDE HELICOIDE RECTO CILINDROIDE
		DOS LINEAS DIRECTRICES Y UN ÁNGULO CTE CON UN PLANO	2 RECTAS 1 RECTA + 1 CURVA 2 CURVAS	HIPERBOLOIDE CONCOIDE HELICOIDE OBLICUO HELICOIDE OBLICUO
SUPERFICIES DE DOBLE CURVATURA	SUPERFICIES DE REVOLUCIÓN (incluye a las superficies de simple curvatura, alabeadas y de doble curvatura)	REGULARES	ESFERA ESFEROIDE PARABOLOIDE DE REVOLUC. HIPERBOLOIDE DE REVOLUCIÓN DE DOS RAMAS TORO ANULAR	
		IRREGULARES		
SUPERFICIES DE EVOLUCIÓN (sup. contorneadas)				

La presente clasificación tiene aspectos muy interesantes que la diferencian de las anteriores.

En un primer nivel, aunque con otra denominación para las superficies curvas, utiliza el mismo criterio que las primeras. Lo interesante está en el concepto de CURVATURA, que volverá a aparecer en el segundo nivel, aspecto que luego será muy recurrente en las clasificaciones estructurales.

En el segundo nivel elimina el criterio de desarrollabilidad, que dejará para un desarrollo posterior como una propiedad de las diferentes superficies sin que sirva como criterio para clasificarlas. En este nivel aparecen las superficies planas y un nuevo tipo que sustituye a las radiadas, las superficies de SIMPLE CURVATURA, haciendo referencia a los CONOS, CILINDROS y CONVOLUTAS.

Las superficies alabeadas tienen una clasificación similar a la de Gomis Martí, lo que hace pensar por las fechas de publicación que este último pudo heredarla de la presente. Es realmente una clasificación exhaustiva en cuanto a las directrices, pero que clasifica de manera muy metódica y ordenada estas superficies.

En lo que respecta a las superficies de doble curvatura (antes curvas) hace una diferenciación entre las superficies de REVOLUCIÓN y las de EVOLUCIÓN. Éstas últimas no aparecían en las anteriores clasificaciones.

Cabe indicar que el criterio de CURVATURA está mal empleado en este caso, ya que las superficies de doble curvatura no son exclusivamente las superficies CURVAS, sino que superficies regladas alabeadas como el PARABOLOIDE HIPERBÓLICO también tienen doble curvatura, aunque de otro tipo a la ESFERA por ejemplo.

Un detalle que cabe destacar de la clasificación es la nota que aparece en el apartado de superficies de revolución, indicando que éstas incluyen a las superficies de simple curvatura, alabeadas y de doble curvatura. Un ejemplo más de la imposibilidad de diseñar una única clasificación para las superficies.

SANCHIS SAMPEDRO, FRANCISCO JAVIER
La geometría de las superficies arquitectónicas

SUPERFICIES POLIÉDRICAS	IRREGULARES	PRISMA
		PIRÁMIDE
	REGULARES (POLIEDROS REGULARES)	TETRAEDRO
		HEXAEDRO
		OCTAEDRO
SEMIRREGULARES	DODECAEDRO	
	ICOSAEDRO	
SUPERFICIES RADIADAS NO POLIÉDRICAS	IRREGULARES	SUPERFICIE CÓNICA
	REGULARES (CUÁDRICAS PARABÓLICAS)	SUPERFICIE CILINDRICA
		CONO CUADRICO
SUPERFICIES REGLADAS	DESARROLLABLES	CILINDRO CUADRICO
		CONVOLUTA
	ALABEADAS	HELICOIDE DESARROLLABLE
		CONOIDE RECTO
		HELICOIDE AXIAL
SUPERFICIES CURVAS (DOBLE CURVATURA)	CUÁDRICAS ELIPTICAS	PARABOLOIDE HIPERBÓLICO
		HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO
	HELICOIDES CURVOS	ESFERA
		ELIPSOIDE
	SUPERFICIES DE REVOLUCIÓN	PARABOLOIDE ELIPTICO
HIPERBOLOIDE ELIPTICO		
		TOROIDE
		ESCOCIA

La clasificación mostrada en esta página esta extraída del libro que realicé con motivo de mi docencia de Geometría Descriptiva en primer curso de Ingeniería de Edificación. Ésta responde por tanto más a criterios de seguimiento del temario de la asignatura que al de una clasificación exhaustiva de las superficies.

Aún así caben destacar algunos aspectos como es el matiz de denominar a las superficies RADIADAS NO POLIÉDRICAS, descartando así de este apartado a los PRISMAS y a las PIRÁMIDES.

Sin embargo, siguen repitiéndose errores como no considerar la ESFERA como superficie de REVOLUCIÓN.

También el hecho de considerar las superficies REGLADAS independientes de las superficies RADIADAS o POLIÉDRICAS, también puede considerarse incorrecto.

CONCLUSIONES - CLASIFICACIONES GEOMÉTRICAS

Probablemente es en el campo de la Geometría Descriptiva donde existe menos disparidad de clasificaciones de las superficies.

Lo que en un primer momento puede parecer que está perfectamente clasificado y cerrado, realmente no lo está. Existen superficies que dependiendo del criterio podrían cambiar de clasificación, tal y como hemos podido comprobar.

La cuestión que surge de todo esto es si es conveniente la clasificación según criterios cerrados y direccionales, o conviene establecer una serie de criterios abiertos, que no generen una tabla que encasille los tipos de superficies, y de esta manera una superficie se clasifique según estos criterios independientemente de los mismos, sin niveles.

Es por esto que se propone clasificar las superficies desde el punto de vista geométrica según criterios abiertos y combinables. Estos criterios serían fundamentalmente tres:

- Elemento generador:

- SUPERFICIES REGLADAS - Generadas por RECTAS
- SUPERFICIES CURVAS - Generadas exclusivamente por CURVAS

- Movimiento de generación:

- DE REVOLUCIÓN - Por giro del elemento generador
- DE TRASLACIÓN - Por el movimiento del elemento generador
- HELICOIDAL - Por el movimiento combinado de revolución y traslación del elemento generador

- Directrices / Plano o cono director:

- NÚMERO Y TIPO DE DIRECTRICES
- PLANO DIRECTOR
- CONO DIRECTOR

En las fichas que se aportaran en el siguiente apartado se podrán ver ejemplos de aplicación de los criterios que se acaban de indicar.

ESTRUCTURAS

Como ya se ha comentado en la introducción del trabajo, geometría (forma) y estructuras están íntimamente ligadas. Queda patente en las palabras del Ingeniero Eduardo Torroja Millet:

*"La construcción, 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**; deben por tanto, poderse lograr sin adiciones ni ornamentaciones externas. 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. La obra mejor es la que se sostiene por su forma."*²

La racionalidad que defiende Torroja en estas palabras tan solo puede conseguirse a partir del uso de la geometría como elemento que da coherencia a la estructura, a la redistribución de cargas y esfuerzos y su transmisión a los apoyos.

Para entender la importancia de las formas geométricas en la estructura hay que introducir un concepto que será recurrente en las siguientes páginas y que ya ha aparecido en alguna de las clasificaciones geométricas. Me refiero al concepto de CURVATURA. El tipo de estructuras donde se aprecia mejor la influencia de esta característica de las superficies es en las estructuras en forma de cáscara delgada, como indica Mario Salvadori:

*"La nueva capacidad portante (hablando de una hoja de papel sostenida con una mano) no se obtiene aumentando la cantidad de material, sino dándole la forma adecuada. Las cáscaras delgadas son estructuras **resistentes por la forma**, suficientemente delgadas para no desarrollar tensiones apreciables de flexión, pero también suficientemente gruesas para resistir cargas por compresión, corte o tracción.*

Las cáscaras delgadas deben su eficiencia a la curvatura y al alabeo. A fin de comprender su comportamiento estructural, debemos familiarizarnos primero con sus características puramente geométricas.”³

3 | Salvadori, Mario y Heller, Robert - "Estructuras para arquitectos"

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.

Entendemos por CURVATURA la 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.

Para el estudio de la clasificación de superficies desde el punto de vista de la estructura hemos seleccionado las realizadas por 5 autores:

- COLIN FABER
Las estructuras de Félix Candela
Edit. Compañía editorial continental
- MARIO SALVADORI y ROBERT HELLER
Estructuras para arquitectos
Edit. Nobuko
- CARMEN GARCÍA REIG
Félix Candela. Centenario 2010
Edit.
- HEINO ENGEL
Sistemas de estructuras
Edit. Gustavo Gili
- FRANCISCO JAVIER SANCHIS SAMPEDRO
Las formas del hormigón. Catálogo práctico de diseño
Trabajo Final de Máster - UPV

COLIN FABER
Las estructuras de Félix Candela

SUPERFICIES PLANAS (o de curvatura 0)	LÁMINAS SIMPLES	
	LÁMINAS PLEGADAS	LÁMINAS PRISMÁTICAS LÁMINAS POLIÉDRICAS
SUPERFICIES DE CURVATURA SIMPLE	CILINDRICAS	CILINDRO DE BASE CIRCULAR CILINDRO DE BASE ELIPTICA CILINDRO DE BASE PARABÓLICA
	CÓNICAS	CONO DE BASE CIRCULAR CONO DE BASE ELIPTICA CONO DE BASE PARABÓLICA
	CONOIDE	CONOIDE RECTO
SUPERFICIES DE DOBLE CURVATURA	SINCLÁSTICAS	ESFERA ELISOIDE PARABOLOIDE ELÍPTICO TOROIDE
	ANTICLÁSTICA	PARABOLOIDE HIPERBÓLICO HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO TOROIDE

En esta publicación, Colin Faber repasa las más importantes obras del genial Félix Candela, centrándose en el aspecto estructural.

Previo al análisis de las obras del arquitecto español, realiza una explicación del funcionamiento y las características mecánicas de las estructuras laminares. En esta parte previa establece la clasificación que se muestra en esta página. En ella utiliza el concepto de curvatura como criterio de clasificación de las superficies.

El primer tipo de superficie son las superficies planas o de CURVATURA 0. Al seccionar estas superficies con un plano nos dará como solución una recta. En un siguiente nivel estas superficies las clasifica en láminas simples y plegadas.

El siguiente tipo de superficie son las de curvatura sencilla. Éstas 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).

En tercer lugar tenemos las superficies de doble curvatura, que son las

que dan lugar al nombre de cascarón propiamente dicho y se clasifican de acuerdo con su forma en dos grandes grupos:

4 | Faber, Colin - "Las estructuras de Félix Candela"

"- Superficies sinclásticas, aquellas 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" ⁴

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.

MARIO SALVADORI / ROBERT HELLER
Estructuras para arquitectos

CURVATURA (en un punto)	DESARROLLABLES	1 dirección de curvatura nula
	NO DESARROLLABLES	SINCLÁSTICAS Curvatura de mismo signo 2 direcciones de curvatura nula
SUPERFICIES DE REVOLUCIÓN	CÚPULAS	ESFÉRICA ELÍPTICA PARABÓLICA
	CONO SUPERFICIES TORALES	
SUPERFICIES DE TRASLACIÓN	CILINDRO	CIRCULAR ELÍPTICO PARABÓLICO
	PARABOLOIDE ELÍPTICO PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	
SUPERFICIES REGLADAS	PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	2 rectas alabeadas
	CILINDRO	2 curvas idénticas
	SUPERFICIES CONOIDALES	2 curvas distintas en planos paralelos
	CONOIDES	1 curva + 1 recta CIRCULAR, PARABÓLICO o ELÍPTICO
	CONOS	1 punto + 1 curva SECTORES CÓNICOS
	HIPERBOLOIDE DE UNA HOJA	2 circunferencias
SUPERFICIES COMPLEJAS		

La clasificación que realizan Mario Salvadori y Robert Heller en su libro estructuras para arquitectos, mezclan diferentes criterios: curvatura de las superficies, movimiento de generación y elemento generador. Debido a esto, se repiten las mismas superficies en los diferentes apartados.

El primer criterio de clasificación de superficies que utilizan es el de la CURVATURA, pero de manera diferente a la de Colin Faber, ya que no habla de curvatura nula, simple o doble curvatura, sino que relaciona ésta con el concepto que ya se estudió en la parte de geometría, la DESARROLLABILIDAD.

El movimiento de generación es el siguiente criterio de clasificación. Fundamentalmente se centra en dos tipos: el de REVOLUCIÓN y el de TRASLACIÓN. Este criterio es independiente del anterior ya que por ejemplo un cilindro que en la anterior clasificación sería una superficie desarrollable, ahora la consideraríamos generada por traslación.

Por último hablan de las superficies REGLADAS, debido a su importancia en la arquitectura y la construcción. La manera de clasificarlas es mediante sus directrices. Una vez más existen superficies que se habían clasificado anteriormente que vuelven a aparecer en esta clasificación, como por ejemplo el cilindro.

Realmente lo que están estableciendo los autores son tres criterios independientes y complementarios para clasificar las superficies y que cada uno de ellos aportan a la superficie unas determinadas características estructurales y constructivas.

Por tanto este podría ser un criterio para la clasificación desde el punto de vista estructural. Clasificar las superficies desde tres criterios complementarios:

- Curvatura de la superficie
- Generación de la superficie
- Elemento generador de la superficie

CARMEN GARCÍA REIG
Félix Candela. Centenario 2010

SUPERFICIES DE SIMPLE CURVATURA	DESARROLLABLES	LÁMINAS PRISMÁTICAS		
		LÁMINAS PLEGADAS		
		BÓVEDAS CÓNICAS		
		BÓVEDAS CILÍNDRICAS		
		LOSAS SINUSOIDALES		
		BÓVEDAS FUNICULARES		
SUPERFICIES DE DOBLE CURVATURA	ALABEADAS	ELÍPTICAS	BÓVEDA	
		SINCLÁSTICAS	ESFÉRICA	
			BOVEDA	
			ELISPOIDAL	
			CONOIDE	
	HIPERBÓLICAS ANTICLÁSTICAS	PARABOLOIDE REGLADO	BORDES CURVOS BORDES RECTOS	
SUPERFICIES COMPUESTAS Y MIXTAS				

Con motivo del centenario del nacimiento de Félix Candela, se celebró en Madrid una exposición con la obra del arquitecto. La publicación recoge el contenido de la exposición e incluye unas interesantes clasificaciones gráficas que se resumen en el cuadro anterior.

En ellas Carmen García utiliza el concepto de CURVATURA como criterio de clasificación. No incluye las superficies de curvatura nula quizás debido a que el arquitecto Candela no utiliza este tipo de superficies en su obra.

Un aspecto interesante de esta clasificación es que identifica el concepto de CURVATURA con el concepto de DESARROLLABILIDAD. A las superficies de simple curvatura les asigna la propiedad de ser desarrollables mientras que las de doble curvatura las clasifica como alabeadas.

Las superficies de doble curvatura las subdivide igual que vemos en el libro de Colin Faber en SINCLÁSTICAS, a las que también denomina ELÍPTICAS, y en ANTICLÁSTICAS o HIPERBÓLICAS. Esta segunda denominación es la que llama la atención ya que necesariamente no ha de haber correspondencia entre unas y otras. Por ejemplo el conoide no tiene porque tener una sección hiperbólica, de hecho, el conoide es una superficie sinclástica.

Otro de los temas interesante de esta clasificación es la identificación de las superficies con los elementos constructivos como bóvedas, láminas y losas.

El apoyo gráfico de la clasificación mediante el esquema de las obras de Candela es un atractivo de la clasificación, así como un apoyo visual para su comprensión.

HEINO ENGEL

Sistemas de estructuras

SUPERFICIES PLANAS / DOBLADAS	POLIEDROS: REGULARES Y SEMIRREGULARES PIRÁMIDES
SUPERFICIES CURVADAS SIMPLES	SUPERFICIES CILÍNDRICAS
SUPERFICIES EN CÚPULA	SUPERFICIES DE ROTACIÓN SÓLIDOS DE REVOLUCIÓN
SUPERFICIES EN SILLA DE MONTAR	SUPERFICIES EN FORMA DE PARABOLOIDE HIPERBÓLICO

El libro de "Sistemas de estructuras" de Heino Engel constituye un referente para todo arquitecto a la hora de diseñar una estructura que se separe de lo convencional. A pesar de ser un libro de estructuras es puramente gráfico y por esto ayuda a comprender de forma intuitiva, mediante diagramas de flechas y otros esquemas, el comportamiento estructural de las formas complejas. Además es un catálogo de diseño donde se aportan multitud de soluciones para los casos más diversos.

Tiene 2 apartados interesantes desde el punto de vista de la geometría. En su apartado 4 llamado "Sistemas estructurales de SUPERFICIE ACTIVA", Engel hace una clasificación en la que vuelve a utilizar el concepto que ya hemos visto de CURVATURA, solo que utilizando otros nombres.

La clasificación que establece es similar si consideramos las superficies PLANAS como superficies de curvatura nula, las curvadas simples mantendrían su nombre, las superficies EN CÚPULA serían las correspondientes a las de curvatura doble sinclásticas y las que denomina en SILLA DE MONTAR las de doble curvatura antielástica.

Por tanto estamos ante una clasificación similar a las anteriores.

Ya en el apartado 7 que titula "GEOMETRÍA forma estructural" incorpora un cuadro en el que diferencia entre superficies PLANAS y superficies COMPLEJAS. Las superficies planas las clasifica según su posición frente a los esfuerzos o su combinación, y las superficies complejas según su curvatura pero sin hacer referencia al cambio de curvatura en las de curvatura doble. Es interesante la identificación de las superficies con elementos o tipos estructurales como membranas, láminas, bóvedas, arcos...

SUPERFICIES PLANAS	VERTICAL	LÁMINA (PORTANTE)
		MURO PORTANTE
		RIGIDIZACIÓN
	HORIZONTAL	LÁMINA (PORTANTE)
		LÁMINA HORIZONTAL
		LÁMINA RIGIDIZADORA
	EN ÁNGULO	LÁMINAS PLEGADAS (PRISMÁTICAS)
		LÁMINAS PLEGADAS (PIRAMIDALES)
		VIGA DE LÁMINAS DOBLADAS
PÓRTICO DE LÁMINAS DOBLADAS		
ARCO DE LÁMINAS DOBLADAS		
SUPERFICIES COMPLEJAS	CURVATURA SENCILLA	MEMBRANA
		TUBO / TUBO NEUMÁTICO
		BÓVEDA
		NAVE NEUMÁTICA
		MEMBRANA
		MEMBRANA EN TIENDA
	CURVATURA DOBLE	COLCHÓN NEUMÁTICO
		TUBO NEUMÁTICO
		TUBOS
	COMBINADA	PÓRTICO-CAJA
		RETÍCULA DE LÁMINAS

Lo realmente interesante de la publicación reside en los cuadros resumen con características dimensionales y constructivas y los esquemas gráficos, tanto de diseño de las estructuras como de distribución de esfuerzos y deformaciones de las mismas.

SANCHIS SAMPEDRO, FRANCISCO JAVIER
Las formas del hormigón. Catálogo práctico de diseño

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
	CONOIDE	
	SUPERFICIES DE DOBLE CURVATURA	SUPERFICIES SINCLÁSTICAS
SUPERFICIES ANTICLÁSTICAS		PARABOLOIDE HIPERBÓLICO HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO TOROIDE

En el Trabajo Final de Máster investigué acerca de la geometría aplicada a las estructuras de hormigón y las posibilidades del material.

Para poder estudiar estas posibilidades realicé la presente clasificación basándome en el estudio de las anteriores. El criterio utilizado es por tanto el de la curvatura, repartiendo las superficies en 3 grupos: curvatura CERO, curvatura SIMPLE y DOBLE curvatura.

Ya en un segundo nivel el criterio de clasificación es diverso dependiendo de la curvatura de la superficie, pero cabe destacar la subclasificación de las superficies de doble curvatura en SINCLÁSTICAS y ANTICLÁSTICAS.

Más que identificar las superficies con elementos constructivos y estructurales, el nombre que reciben las superficies es el nombre geométrico.

CONCLUSIONES - ESTRUCTURA

Como hemos podido comprobar, el concepto de curvatura es fundamental en las diferentes clasificaciones basadas en las estructuras. Es por esto que la clasificación que se propone tendrá como primer criterio de clasificación este concepto.

Otro concepto que aunque no es recurrente puede utilizarse es el del elemento generador, ya que desde el punto de vista de distribución de esfuerzos y construcción de la superficie puede facilitar la comprensión y la ejecución.

El movimiento de generación también puede ser interesante como criterio de clasificación estructural.

Por tanto se propone una clasificación a partir de los siguientes criterios:

- Curvatura:
 - CURVATURA NULA - Cuando al seccionar por un plano obtenemos una recta en todas las direcciones
 - CURVATURA SIMPLE - Al seccionar por un plano obtenemos una recta en una dirección y una curva en la perpendicular
 - CURVATURA DOBLE - Si seccionamos por planos la superficie obtenemos curvas en todos los casos
 - SINCLÁSTICA - Las curvas obtenidas son del mismo signo
 - ANTICLÁSTICA - Las curvas cambian de signo
- Elemento generador:
 - REGLADAS / CURVAS
- Movimiento de generación:
 - REVOLUCIÓN / TRASLACIÓN

Como los criterios de generación también se incluyen en la clasificación geométrica, en las fichas que se adjuntan a continuación no se incluirán en la parte estructural, limitando esta a la curvatura únicamente.

5 | Gomis Martí, José María
- "Curvas y superficies en el
diseño de ingeniería" - SPUPV

MATEMÁTICAS

La clasificación matemática, pese a que es de obligada referencia al estar hablando de superficies geométricas, quizá desde el punto de vista de diseño arquitectónico es la menos interesante.

Si que adquiere interés al utilizar modelos informáticos en los que se parametrizan las superficies. Estos parámetros se pueden modificar con el objetivo de optimizar diferentes aspectos de las mismas, como puede ser la distribución de esfuerzos, el espesor del material, la altura libre en algún punto del edificio...

Desde un punto de vista matemático se puede trabajar fundamentalmente desde dos puntos de vista diferentes: el punto de vista ANALÍTICO o DIFERENCIAL⁵.

La clasificación analítica es la que realmente a efectos de parametrización y diseño más puede interesarnos a los arquitectos. Consiste en la definición de las superficies a partir de ecuaciones algebraicas que son función de 3 coordenadas x, y, z .

La definición diferencial utiliza los conceptos de curvatura y torsión de las superficies, por lo que desde el punto de vista de cálculo de esfuerzos podría ser interesante estudiarla. A pesar de ello y debido al carácter de la tesis no se va a profundizar en ella.

Fundamentalmente se ha estudiado 2 publicaciones, una de las cuales es el libro de referencia para la gran mayoría (por no decir todas) asignaturas de matemática aplicada de las escuelas de arquitectura:

- Larson / Edwards / Falvo
Algebra lineal
Edit. Pirámide
- Salas / Hille / Etgen
Calculus. Volumen II: Una y varias variables
Edit. Reverté

LARSON / EDWARDS / FALVO
 Álgebra lineal

SUPERFICIE	ECUACIÓN	TRAZA PLANO	OTROS
ELIPSOIDE	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$	ELIPSE Paralelo al XY	La superficie es una esfera si $a=b=c \neq 0$
		ELIPSE Paralelo al XZ	
		ELIPSE Paralelo al YZ	
HIPERBOLOIDE DE UNA HOJA	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$	ELIPSE Paralelo al XY	El eje del hiperboloide corresponde a la variable cuyo coeficiente es negativo
		HIPÉRBOLA Paralelo al XZ	
		HIPÉRBOLA Paralelo al YZ	
HIPERBOLOIDE DE DOS HOJAS	$\frac{z^2}{c^2} - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$	ELIPSE Paralelo al XY	El eje del hiperboloide corresponde a la variable cuyo coeficiente es positivo. No hay traza en el plano perpendicular a este eje
		HIPÉRBOLA Paralelo al XZ	
		HIPÉRBOLA Paralelo al YZ	
CONO ELÍPTICO	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$	ELIPSE Paralelo al XY	El eje del cono corresponde a la variable cuyo coeficiente es negativo. Las trazas en los planos coordenados paralelos a este eje son rectas que se cortan
		HIPÉRBOLA Paralelo al XZ	
		HIPÉRBOLA Paralelo al YZ	
PARABOLOIDE ELÍPTICO	$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$	ELIPSE Paralelo al XY	El eje del paraboloides corresponde a la variable elevada a la potencia unidad
		PARÁBOLA Paralelo al XZ	
		PARÁBOLA Paralelo al YZ	
PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	$z = \frac{y^2}{b^2} - \frac{x^2}{a^2}$	HIPÉRBOLA Paralelo al XY	El eje del paraboloides corresponde a la variable elevada a la potencia unidad
		PARÁBOLA Paralelo al XZ	
		PARÁBOLA Paralelo al YZ	

La clasificación que se realiza en esta publicación, más allá de la formulación de las ecuaciones de cada una de las superficies, resulta interesante por el concepto de TRAZA que ayuda a entender mejor el criterio de nomenclatura de las superficies.

La traza no es más que la línea que resulta de interseccionar la superficie con alguno de los planos coordenados. Dependiendo las curvas que resultan de sus tres trazas se le asigna una nomenclatura a la superficie. Así por ejemplo el ELIPSOIDE tiene sus tres trazas elipses, mientras que el PARABOLOIDE HIPERBÓLICO tiene dos parábolas y una hipérbola.

Resulta también de interés la indicación realizada en la columna de la derecha donde se especifica cual de las coordenadas x,y,o z se corresponde con el EJE de la superficie.

SALAS / HILLE / ETGEN
 Calculus. Volumen II: Una y varias variables

ECUACIÓN GENERAL DE UNA CUÁDRICA	$a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + 2a_{12}x_1x_2 + 2a_{13}x_1x_3 + 2a_{23}x_2x_3 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_0 = 0$ donde $(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3$ y los coeficientes a_i, a_0 son números reales.	
ECUACIÓN EN FORMA MATRICIAL	$(x_1, x_2, x_3)A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + (a_1, a_2, a_3) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + a_0 = 0$, siendo $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix}$	
ECUACIÓN REDUCIDA DE UNA CUÁDRICA	$\lambda_1y_1^2 + \lambda_2y_2^2 + \lambda_3y_3^2 + b_1y_1 + b_2y_2 + b_3y_3 + a_0 = 0$, donde $(b_1, b_2, b_3) = (a_1, a_2, a_3)P$ Se obtiene diagonalizando la matriz A	
CUÁDRICAS	ELIPSOIDE	GENERAL $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$
		ESFERA Como $a=b=c \neq 0$, $x^2 + y^2 + z^2 = a^2$
	HIPERBOLOIDE	DE 1 HOJA $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
		DE 2 HOJAS $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
	CONO $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$	
	PARABOLOIDE	ELÍPTICO $z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$
		HIPERBÓLICO $z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}$
	CILINDRO	ELÍPTICO $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$
		HIPERBÓLICO $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$
		PARABÓLICO $x^2 + ay = 0$
	DEGENERADAS	PAR DE PLANOS $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 0$
		PLANOS PARALELOS $x^2 = a^2$, siendo los planos $x=a, x=-a$
		PLANO DOBLE $x^2 = 0$, siendo el plano es el $x=0$

Como ya he comentado en la introducción de este apartado, la publicación "CALCULUS" es una referencia obligatoria en los estudios de matemática aplicada en las escuelas de arquitectura e ingeniería.

En el cuadro adjunto he pretendido realizar un resumen de la definición mediante la ecuación general de las cuádricas, su ecuación matricial y la ecuación reducida, que resulta de diagonalizar la matriz A.

El desarrollo de las ecuaciones de las diferentes superficies resulta muy completo, definiendo incluso lo que denomina CUÁDRICAS DEGENE-

RADAS, que no son más que las superficies cuádricas, las cuales al aplicarle unos determinados valores, dejan de ser superficies curvas y degeneran en superficies planas.

CONCLUSIONES - MATEMÁTICAS

La parametrización de las superficies cuádricas en los elementos de la matriz de la superficie permite en un momento determinado del diseño, del cálculo... modificar los parámetros y poder optimizar la superficie.

En el desarrollo posterior vamos a aplicar la nomenclatura derivada de las dos publicaciones analizadas, indicando en los casos que sea posible la ecuación de la superficie acorde a los indicado en ellas.

DIBUJO ASISTIDO POR ORDENADOR

En la actualidad, aunque no establezcan una clasificación al uso tradicional, no podemos dejar de lado al hablar de las superficies geométricas los programas de diseño asistido por ordenador.

Estos programas, en general las herramientas que ofrecen son de modelado a partir de formas básicas, modelado por movimiento de generación, creación de mallas a partir de sus directrices y de edición de las superficies y mallas obtenidas anteriormente. En general tienen órdenes parecidas de modelado y donde encontramos más diferencias son en las órdenes de edición.

A continuación vamos a analizar las órdenes de los 3 programas más utilizados en el ámbito de la arquitectura para poder establecer un criterio de "clasificación" a partir de la forma de dibujo de los programas DAO.

Los tres programas analizados son:

- AUTOCAD de la compañía Autodesk
- 3dSTUDIO MAX, actualmente también de Autodesk
- RHINOCEROS, de Robert McNeel & associates

Quizá estemos dejando fuera del estudio programas también extendidos en la práctica de la arquitectura o la ingeniería como el SKETCHUP, el SOLID WORKS o los programas BIM. El motivo de seleccionar los tres indicados es debido a que son los que se han utilizado para el estudio posterior de las superficies y el análisis de los edificios que se desarrollará a continuación.

AUTOCAD Autodesk

MODELADO	SUPERFICIES PLANAS	
	MALLAS GEOMÉTRICAS	PRIMITIVAS
		REVOLUCIONADAS
	SÓLIDOS BÁSICOS	TABULADAS
		REGLADAS
		DE ARISTAS
		POLISOLIDO
		PRISMA RECTANGULAR
		CUÑA
	GENERACIÓN	CONO
		ESFERA
		CILINDRO
TOROIDE		
PIRÁMIDE		
EXTRUSIÓN		
EDICIÓN	CORTE	UNIÓN
	SECCIÓN	DIFERENCIA
	BOOLEANAS	INTERSECCIÓN

El Autocad es el programa más extendido en la práctica profesional debido a su dilatada implantación y a su libertad de creación de las formas.

Fundamentalmente genera superficies de 4 maneras: Por un lado se pueden obtener superficies PLANAS tanto poligonales como con límites curvos; También se pueden obtener superficies en forma de MALLAS generadas a partir de sus directrices; ofrece la posibilidad de modelar una serie de SÓLIDOS BÁSICOS a partir de sus parámetros principales, y por último se pueden generar formas por su movimiento de GENERACIÓN.

Salvo los sólidos básicos donde los parámetros que se necesitan para su modelado los va solicitando el programa, el resto de superficies requieren del conocimiento previo de lo que se pretende conseguir para poder dibujar sus directrices o realizar el movimiento de generación oportuno.

En cuanto a las órdenes de edición son más escasas que en los siguientes programas

3dSTUDIO MAX Autodesk

MODELADO	ESTRUCTURAS PREDEFINIDAS	PRIMITIVAS ESTANDAR
		PRIMITIVAS EXTENDIDAS
		NURBS
	MODIFICADORES (DEFORMADORES PARAMÉTRICOS)	EDITH MESH (MODIFICADOR DE MALLAS)
		BEND
SHELL		
PUSH		
OPERACIONES	BOOLEANAS	TWIST
		STRECH...
	EXTRUDE (EXTRUSIÓN) LATHE (REVOLUCIÓN) LOFT (BARRIDO)	RESTA
		INTERSECCIÓN
		UNIÓN

El programa de modelado, renderizado y animación 3dstudio max permite crear geometrías básicas, lo que el programa denomina STANDARD PRIMITIVES (Primitivas estándar) o EXTENDED PRIMITIVES (Extendidas) como el prisma recto, cono, esfera, cilindro... de una manera similar a la de Autocad. También pueden modelarse formas al igual que en el Autocad con las operaciones de EXTRUSIÓN, REVOLUCIÓN y BARRIDO.

Posteriormente a su modelado pueden cambiarse los parámetros de creación. También pueden aplicarse a estas primitivas y formas generadas DEFORMADORES PARAMÉTRICOS de muy diversos tipos: Bend, Shell, Push... Con cada uno de ellos se consigue un efecto sobre el elemento mediante el cual se puede llegar a formas geométricas regulares o irregulares.

Un aspecto que incorpora es la creación de NURBS, non-uniform rational B-splines (B-splines racionales no uniformes), que consiste en un modelo matemático para generar curvas y superficies en diseño asistido por ordenador. Estas superficies generadas mediante NURBS pueden editarse con un modificador de mallas (EDITH MESH) pudiendo de esta manera modelarlas a voluntad de manera irregular.

Como anécdota comentar que el programa incorpora un potente motor de render y un editor de materiales con el que se pueden extraer imágenes fotorealísticas y animaciones.

RHINOCEROS

Robert Mcneel & associates

MODELADO	SUPERFICIES	PLANO
		TRANSICIÓN
		BARRIDO POR 1 O 2 CARRILES
		REVOLUCIÓN
		REVOLUCIÓN POR 1 CARRIL
	SÓLIDOS	CAJA
		ESFERA
		CILINDRO
		CONO
		CONO TRUNCADO
		PIRÁMIDE
		ELIPSOIDE
		PARABOLOIDE
		TUBO
TUBERÍA		
OPERACIONES	LOSA	
	TOROIDE	
	MALLA	PRIMITIVAS DE MALLA POLIGONAL
	EXTRUSIÓN	MEZCLAR
	EXTENDER	APLASTAR
	EMPALMAR	CONCETAR
BOOLEANAS	ACHAFLANAR	
DESPLEGAR	DESFASE	

Es el programa más joven dentro de los que actualmente se utilizan para el modelado de superficies y sólidos. No por ello es el menos utilizado, sino que se está imponiendo sobre los anteriores por tres motivos fundamentales.

En primer lugar tiene la sencillez y la libertad de manejo del autocad, heredando además en parte su interfaz, lo que hace que no suponga mucho esfuerzo para el usuario pasarse a él.

Además, tiene herramientas potentes de modelado al igual que el 3ds max, incluso algunas de ellas más prácticas que las que veíamos antes.

El motor de render y el editor de materiales tienen la misma potencia (o más) que el anterior programa pero con unas herramientas mucho más sencillas.

Y para terminar de enumerar sus ventajas, comentar que es un programa que absorbe gran tipo de formatos, lo cual resulta de mucha ayuda.

CONCLUSIONES - DIBUJO ASISTIDO POR ORDENADOR

Los programas informáticos de diseño asistido por ordenador constituyen una gran ayuda para el modelado de superficies.

A pesar de este hecho cabe destacar que, salvo las superficies primitivas básicas, las cuales tienen unos parámetros que el programa nos va solicitando y con ellas las modela, el resto de superficies hay que generarlas a partir de su movimiento generador, sus directrices, o mediante alguna modificación de las básicas.

Es más, para poder conseguir una geometría bien definida, es necesario cuidar mucho el trazado de las directrices, la dirección de extrusión, el eje de revolución... ya que si no se hace, el resultado puede no ser el esperado.

Es por esto que no tiene sentido establecer una clasificación basándonos en las órdenes de los programas. Cualquier modelado estará fundamentado en los criterios que hemos visto anteriormente.

3.3 | ESTUDIO DETALLADO: FICHAS Y EJEMPLOS

A continuación se va a realizar un estudio detallado de las superficies geométricas de mayor aplicación en el campo de la arquitectura.

El estudio se ha ordenado mediante unas fichas de tres tipos:

1_Fichas teóricas de las superficies donde aparece un cuadro con la clasificación acorde a lo establecido en el apartado 3.2, las secciones planas posibles y algunas propiedades importantes. También incluyen una representación de la superficie en perspectiva axonométrica, un esquema axonométrico de los elementos más significativos y una representación diédrica.

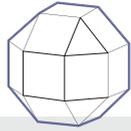
2_Anexo a las fichas de las superficies con algunas aplicaciones que de estas se hacen en arquitectura. Depende del tipo de superficie y de la aplicabilidad de la misma esta parte puede ser más extensa o menos. Se ha intentado mediante esquemas axonométricos y proyecciones en sistema diédrico que se vea la aplicación constructiva de las superficies.

3_Ejemplos de aplicación de las superficies. Se ha seleccionado un total de 46 ejemplos en los que el empleo de las superficies sea significativo en el diseño del edificio. Se ha procurado seleccionar edificios de todas las épocas, desde la Roma antigua hasta el siglo XXI, al igual que se han incluido construcciones realizadas con los más diversos materiales. Estas fichas contienen una imagen del edificio, una ficha con los datos básicos, unos planos de planta alzado y/o sección, los trazados reguladores que generan la superficie, el proceso generador de la forma hasta llegar al diseño final y una breve descripción del edificio. La intención es que resulten muy explicativas y que el proceso de generación se aprecie por sí solo.

No se pretende hacer un análisis en detalle de los edificios, sino que lo que se pretende es dar una colección de ejemplos de aplicación para ver la importancia del uso de las superficies geométricas en el diseño de la arquitectura.

En la siguiente página se muestra un cuadro resumen de las superficies estudiadas y de todos los ejemplos analizados.

01 POLIÉDROS

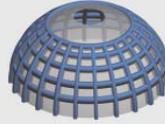
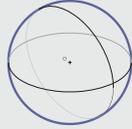


01 1989 - París (Francia)
PIRAMIDE DEL LOUVRE



02 2001 - Granada (España)
CAJA GRANADA

02 ESFERA

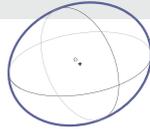


01 25a.C. - Roma (Italia)
PANTEÓN DE AGRIPA

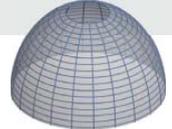


02 1868 - París (Francia)
BIBLIOTECA NACIONAL

03 ELIPSOIDE

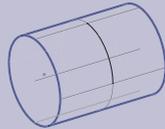


01 1668 - Turin (Italia)
IGLESIA DE SAN LORENZO



02 1995 - Berlín (Alemania)
CÚPULA DEL REICHSTAG

04 CILINDRO

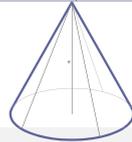


01 1935 - Madrid (España)
FRONTÓN DE RECOLETOS



02 1943 - Pampulha (Brasil)
IGLESIA DE SAN FRANCISCO DE ASSIS

05 CONO



01 1952 - México DF (México)
AUDITORIO DE CIENCIAS QUÍMICAS

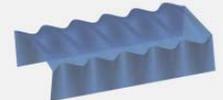


02 1988 - Texas (EEUU)
INVERNADERO LUCILE HALSELL

06 CONOIDE



01 1909 - Barcelona (España)
ESCUELAS DE LA SAGRADA FAMILIA



02 1952 - Atlántida (Uruguay)
IGLESIA DEL CRISTO OBRERO

07 PARABOLOIDE HIPERBÓLICO



01 1952 - México DF (México)
PARAGUAS INVERTIDO



02 1951 - Coahuila (México)
IGLESIA NUESTRA SEÑORA DE LA SOLEDAD

08 HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO

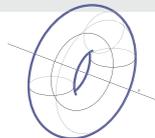


01 1935 - Madrid (España)
HIPODROMO DE LA ZARZUELA



02 1952 - Fedala (Marruecos)
DEPÓSITO DE FEDALA

09 TOROIDE



01 1997 - Cambridge (Inglaterra)
AMERICAN AIR MUSEUM



02 1995 - Bilbao (España)
METRO BILBAO

10 HELICOIDE



01 1570 - Tratado de arquitectura
GRABADO PALLADIO



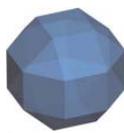
02 1989 - París (Francia)
AMPLIACIÓN DEL MUSEO LOUVRE



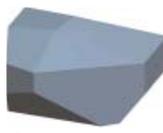
03 1999 - Hong Kong (China)
BANCO DE CHINA



04 2002 - New York (EEUU)
PROP WORLD TRADE CENTER



05 2006 - Minsk (Bielorrusia)
BIBLIOTECA NACIONAL



06 2005 - Oporto (Portugal)
CASA DA MÚSICA



03 1935 - Algeciras (España)
MERCADO DE ALGECIRAS



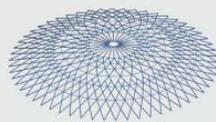
04 1973 - Sidney (Australia)
ÓPERA DE SYDNEY



05 1955 - Massachusetts (EEUU)
AUDITORIO KRESGE



06 1992 - Madrid (España)
ESTACIÓN DE ATOCHA



07 2011 - Barcelona (España)
CENT COM LAS ARENAS



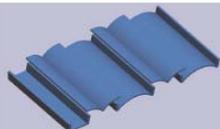
03 2005 - Halstenbek (Alemania)
HALSTENBEK SPORTSHALLE



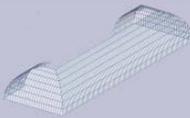
04 1998 - Valencia (España)
L'HEMISFÈRIC



05 2006 - Valencia (España)
PALAU DE LES ARTS



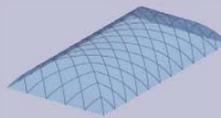
03 1955 - Mallorca (España)
VIVIENDA-TALLER DE JOAN MIRO



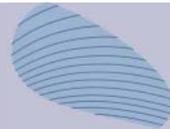
04 1987 - Valencia (España)
PALAU DE LA MÚSICA



05 1998 - Cambridge (Inglaterra)
BIBLIOTECA FACULTAD DERECHO



06 2001 - Londres (Inglaterra)
PORTCULLIS HOUSE



07 1998 - Valencia (España)
PALAU DE CONGRESSOS



03 2001 - Gangzhou (China)
GANGZHOU SPORTS COMPLEX



04 2000 - Valencia (España)
ESCALERAS DE L'UMBRACLE



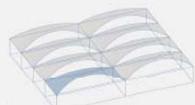
05 2006 - Valencia (España)
PALAU DE LES ARTS



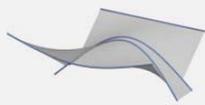
06 2000 - Valencia (España)
MUSEU DE LES CIÈNCIES



07 2010 - Valencia (España)
L'AGORA DE LA CACV



03 1950 - San Bartolo (México)
FÁBRICA FERNÁNDEZ



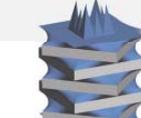
04 1958 - París (Francia)
SEDE DE LA UNESCO



05 2001 - La Guardia (España)
BODEGAS YSIOS



03 1958 - Xochimilco (México)
RESTAURANTE LOS MANTALES



04 1967 - Madrid (España)
LABORATORIOS JORIBA



05 2008 - Berlín (Alemania)
EMBAJADA DE MÉXICO



06 1995 - Valencia (España)
PARADA METRO ALAMEDA



07 2006 - Valencia (España)
PARC OCEANOGRÀFIC UNIVERSAL



03 1970 - Brasilia (Brasil)
CATEDRAL DE BRASÍLIA



04 1999 - Manchester (Inglaterra)
ALMACENES MARKS & SPENCER



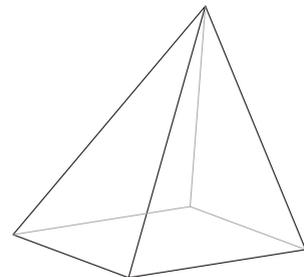
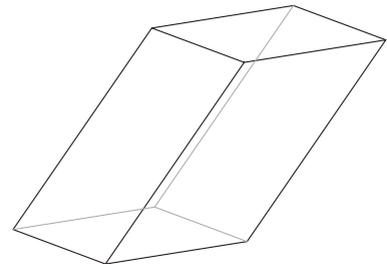
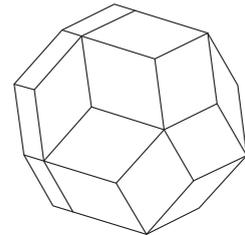
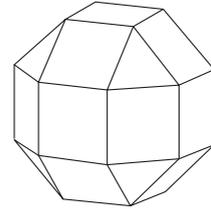
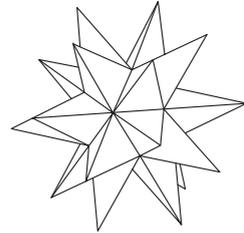
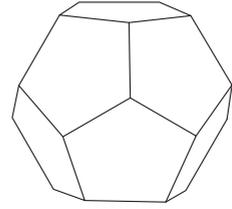
03 2005 - Malmö (Suecia)
TURNING TORSO



04 2000 - Valencia (España)
ESCALERAS DE L'UMBRACLE

01 | POLIEDROS

CLASIFICACIÓN			
POLIEDROS	REGULARES	CONVEXOS	TETRAEDRO HEXAEDRO OCTAEDRO DODECAEDRO ICOSAEDRO
		ESTRELLADOS	DODECAEDRO ICOSAEDRO
	SEMIRREGULARES	ARQUIMEDIANOS	
		ESTRELLADOS	
	DE CATALÁN		
	IRREGULARES		



01A | TETRAEDRO

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE POLIÉDRICA REGULAR CONVEXA

GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR

TRASLACIÓN | RECTA

CURVATURA | TIPO

CURVATURA CERO | SUPERFICIE PLEGADA

SECCIONES PLANAS

POLÍGONOS | TRIÁNGULOS y CUADRILÁTEROS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

4 CARAS = TRIÁNGULOS EQUILÁTEROS - 4 VÉRTICES - 6 ARISTAS

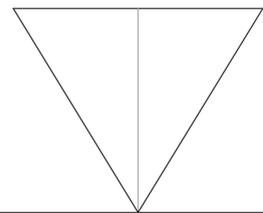
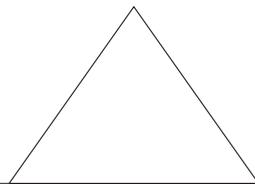
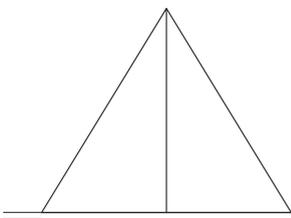
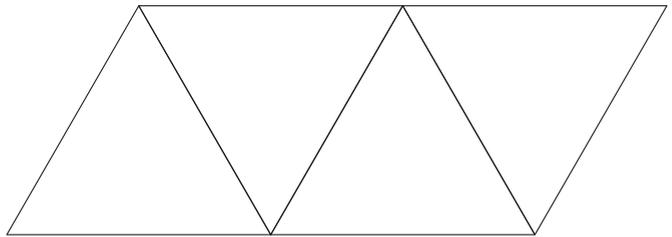
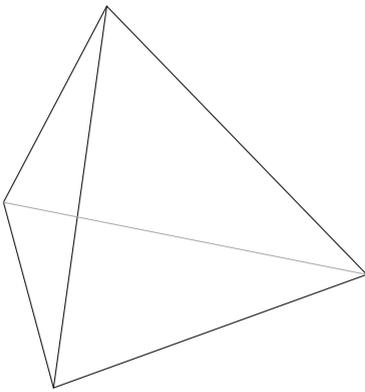
ARISTAS OPUESTAS PERPENDICULARES CRUZÁNDOSE

CENTRO GEOMÉTRICO:

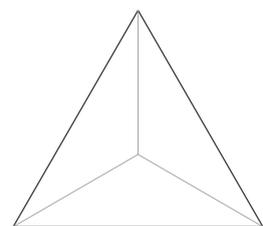
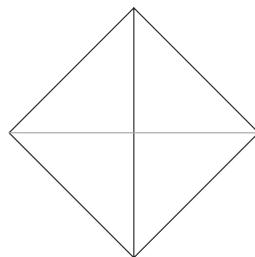
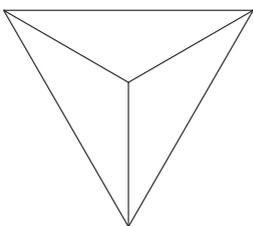
PUNTO DE CORTE DE LAS ALTURAS

SOBRE LAS ALTURAS A 1/4 H DE LAS CARAS

PUNTO MEDIO DE LOS SEGMENTOS MÍNIMA DISTANCIA



PV
PH



01B | HEXAEDRO O CUBO

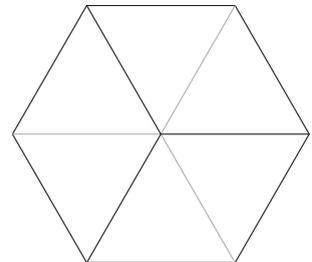
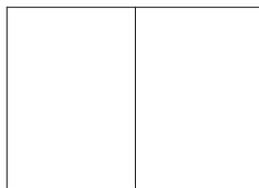
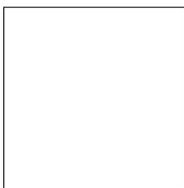
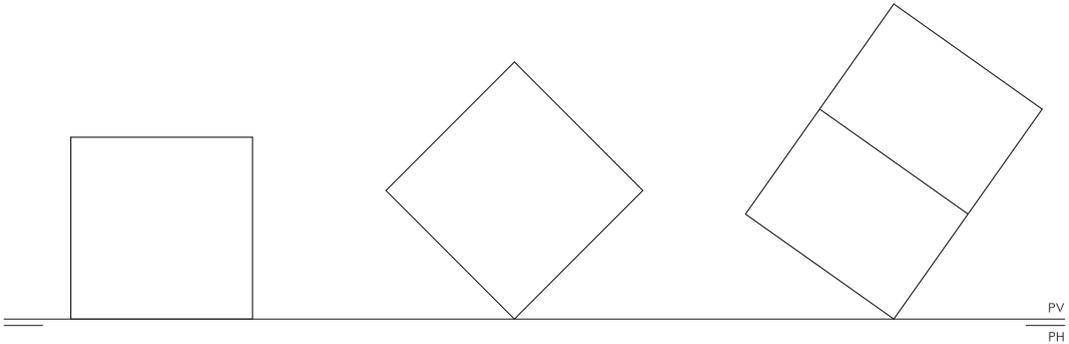
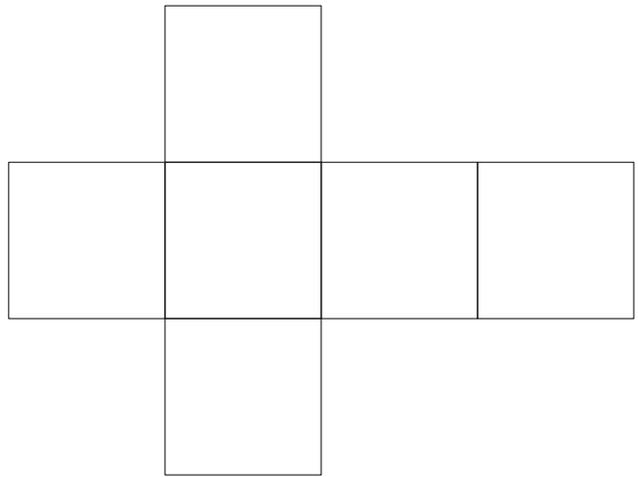
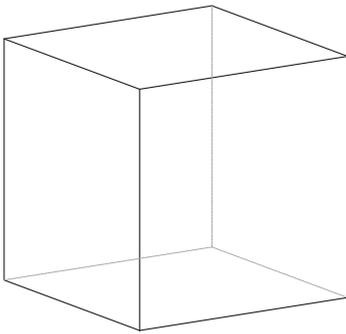
CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE POLIÉDRICA REGULAR CONVEXA

GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR
TRASLACIÓN | RECTA

CURVATURA | TIPO
CURVATURA CERO | SUPERFICIE PLEGADA

SECCIONES PLANAS
POLÍGONOS | TRIÁNGULOS y HEXÁGONOS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
6 CARAS = CUADRADOS - 8 VÉRTICES - 12 ARISTAS
LAS ARISTAS FORMAN TRIEDROS TRIRRECTÁNGULOS
LAS ARISTAS OPUESTAS DE UNA CARA SON PARALELAS
LAS ARISTAS DE CARAS OPUESTAS QUE NO SON PARALELAS SE CRUZAN PERPENDICULARMENTE



01C | OCTAEDRO

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE POLIÉDRICA REGULAR CONVEXA

GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR

TRASLACIÓN | RECTA

CURVATURA | TIPO

CURVATURA CERO | SUPERFICIE PLEGADA

SECCIONES PLANAS

POLÍGONOS | CUADRILÁTEROS y HEXÁGONOS

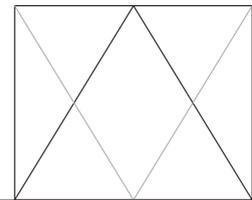
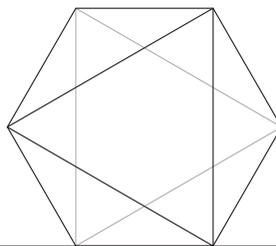
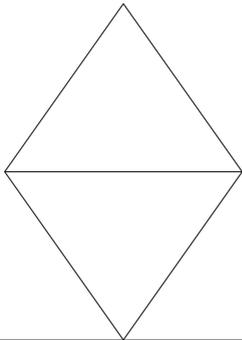
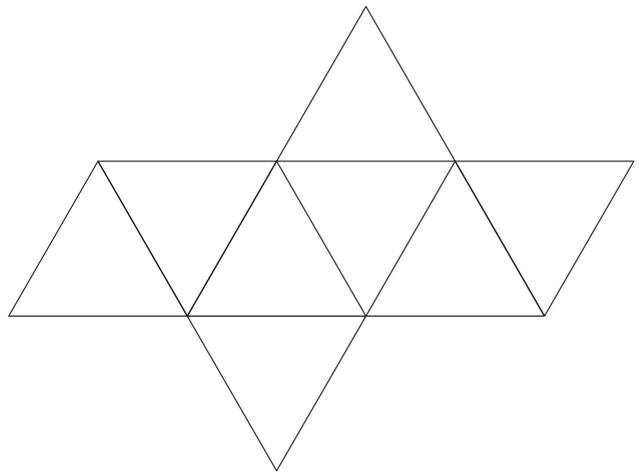
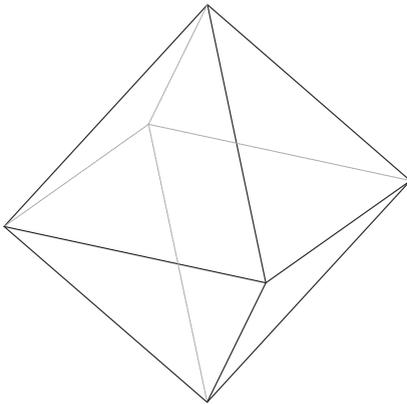
PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

8 CARAS = TRIÁNGULOS EQUILÁTEROS - 6 VÉRTICES - 12 ARISTAS

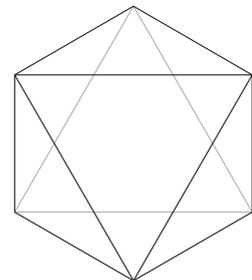
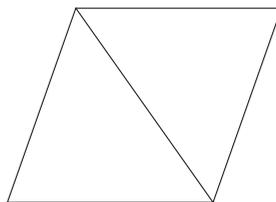
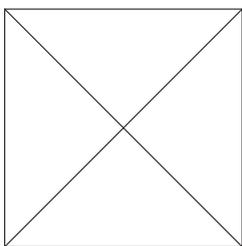
LAS ARISTAS OPUESTAS RESPECTO EL CENTRO SON PARALELAS

EL RESTO DE ARISTAS SON PERPENDICULARES

LAS CARAS OPUESTAS SON PARALELAS



PV
PH



01D | DODECAEDRO

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE POLIÉDRICA REGULAR CONVEXA

GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR

TRASLACIÓN | RECTA

CURVATURA | TIPO

CURVATURA CERO | SUPERFICIE PLEGADA

SECCIONES PLANAS

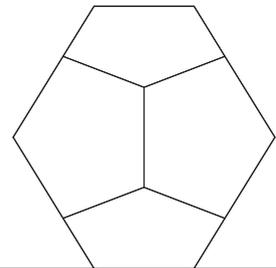
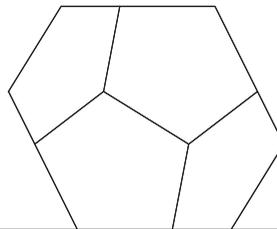
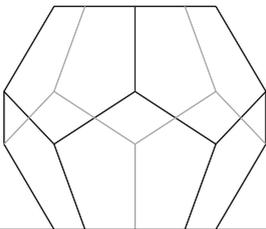
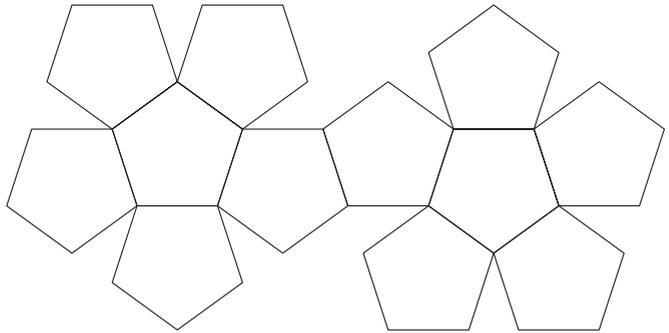
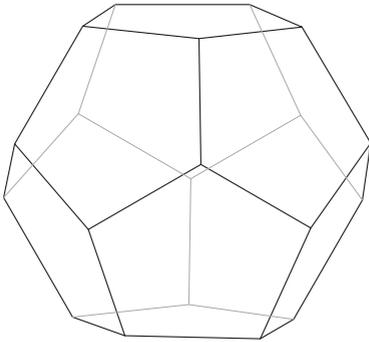
POLÍGONOS | CUADRILÁTEROS y HEXÁGONOS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

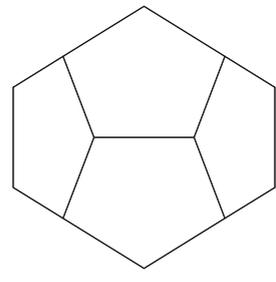
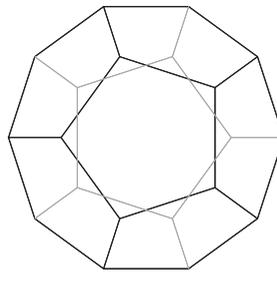
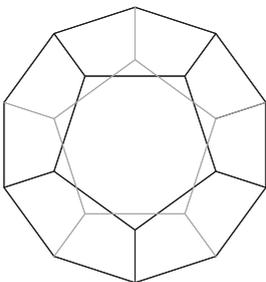
INFINITOS PLANOS Y EJES DE SIMETRÍA

PUNTOS EQUIDISTANTES DEL CENTRO

CURVATURA CONSTANTE



PV
PH



01E | ICOSAEDRO

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE POLIÉDRICA REGULAR CONVEXA

GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR

TRASLACIÓN | RECTA

CURVATURA | TIPO

CURVATURA CERO | SUPERFICIE PLEGADA

SECCIONES PLANAS

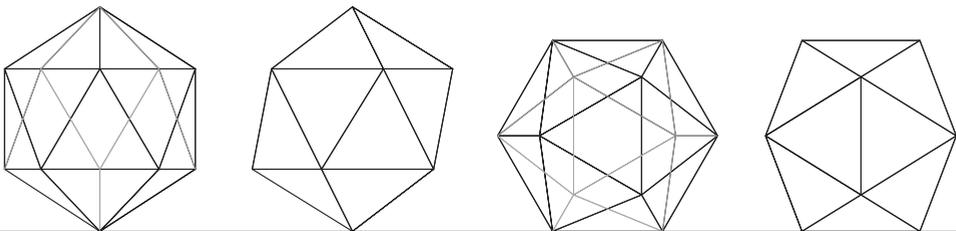
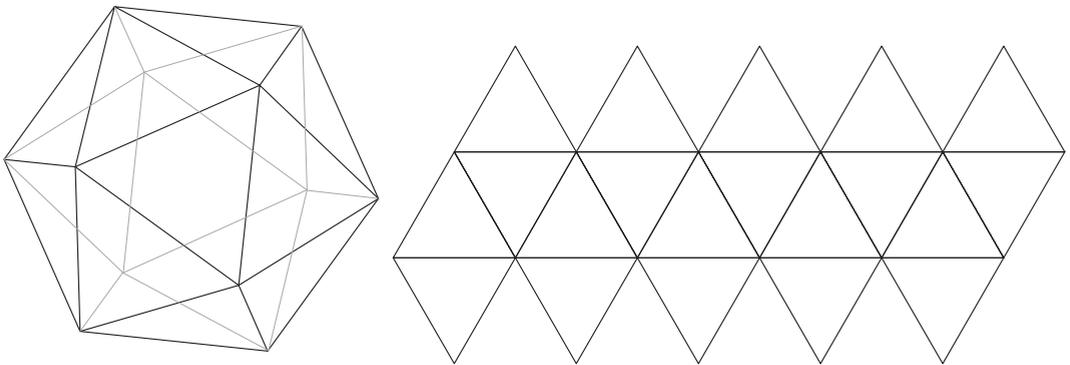
POLÍGONOS | CUADRILÁTEROS y HEXÁGONOS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

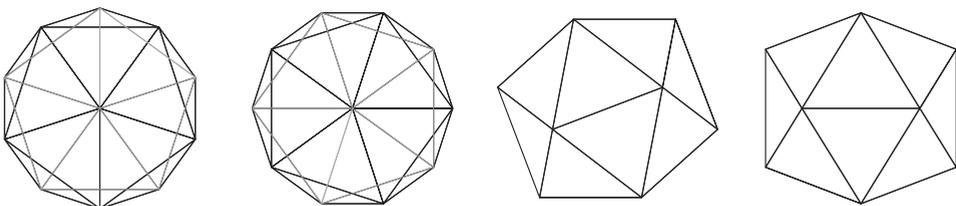
INFINITOS PLANOS Y EJES DE SIMETRÍA

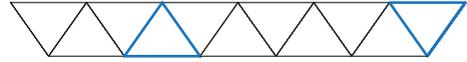
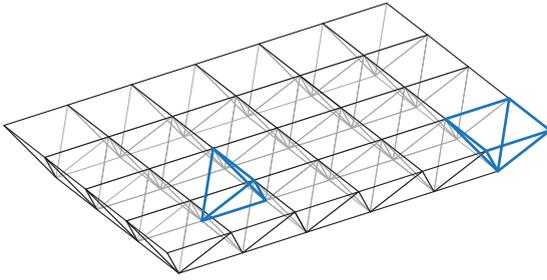
PUNTOS EQUIDISTANTES DEL CENTRO

CURVATURA CONSTANTE

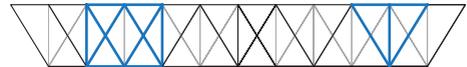
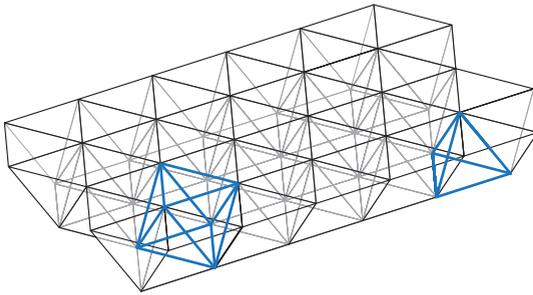
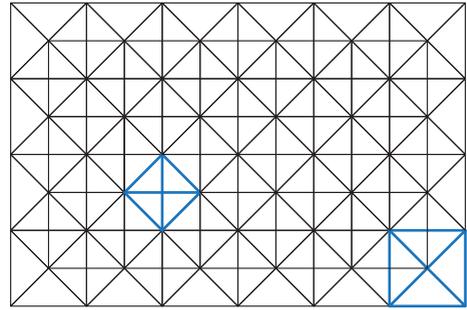


PV
PH

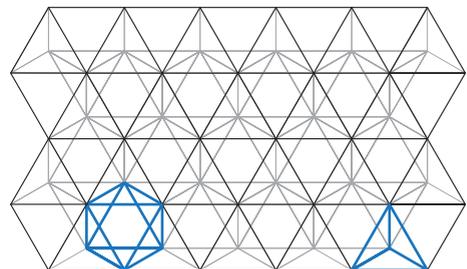




PV
PH



PV
PH



En arquitectura es difícil encontrar aplicaciones puras de los poliedros regulares. Uno de los usos más habituales son las estructuras espaciales de barras, en donde podemos encontrarnos fundamentalmente tetraedros y octaedros formando los entramados de barras. En esta página se muestran dos ejemplos de los más utilizados, aunque las combinaciones pueden ser diversas.

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE POLIÉDRICA IRREGULAR

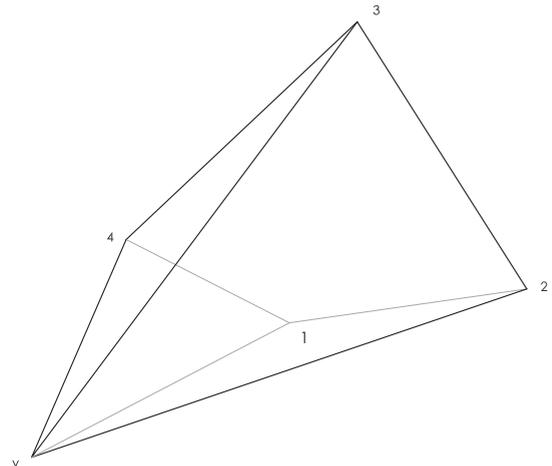
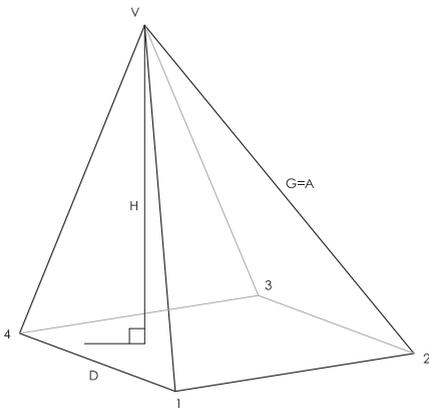
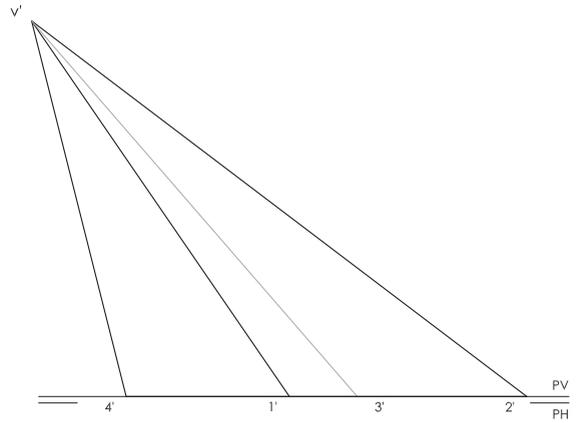
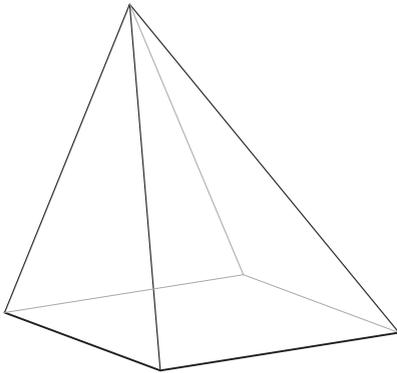
GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR
TRASLACIÓN o RADIACIÓN | RECTA

CURVATURA | TIPO
CURVATURA CERO | SUPERFICIE PLEGADA

SECCIONES PLANAS
POLÍGONOS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
DIRECTRIZ POLIGONAL (BASE) - VÉRTICE PUNTO PROPIO
RADIACIÓN DESDE EL VÉRTICE - CARAS TRIANGULARES
GENERATRICES = RECTAS SOBRE LAS CARAS

CLASIFICACIÓN:
RECTA - PIE DE LA ALTURA EN EL CENTRO DE LA BASE
REGULAR - DIRECTRIZ POLÍGONO REGULAR
NÚMERO DE LADOS DE LA DIRECTRIZ



CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE POLIÉDRICA IRREGULAR

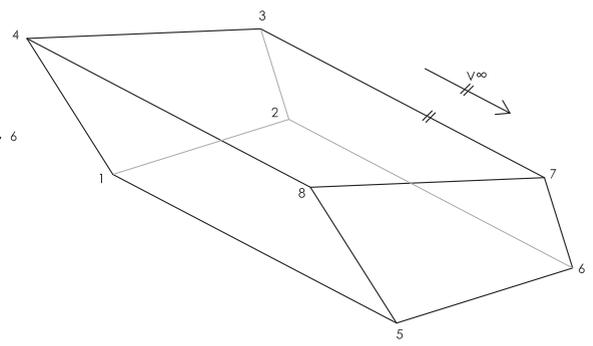
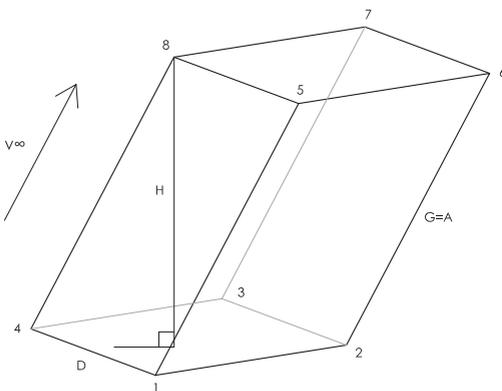
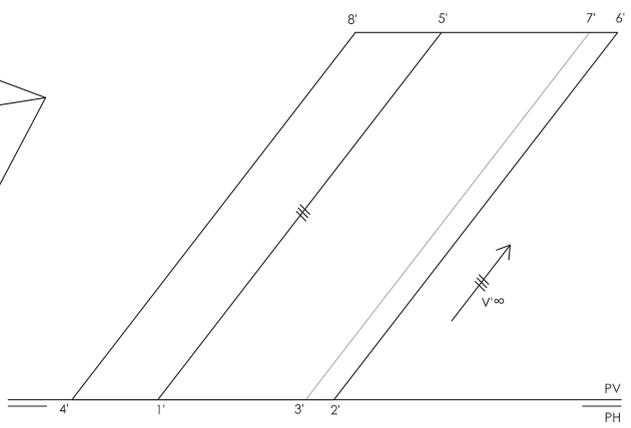
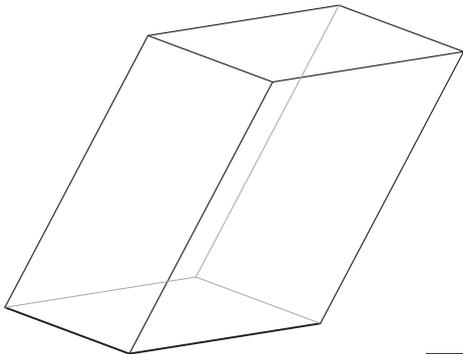
GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR
TRASLACIÓN o RADIACIÓN | RECTA

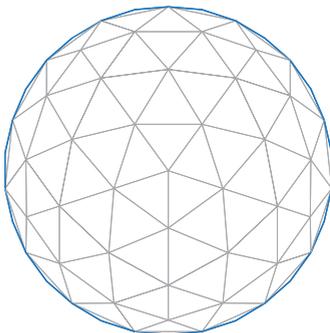
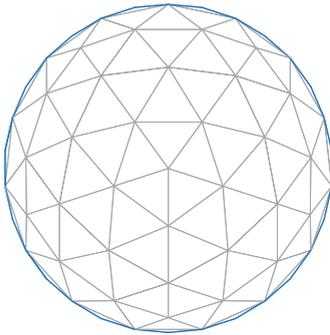
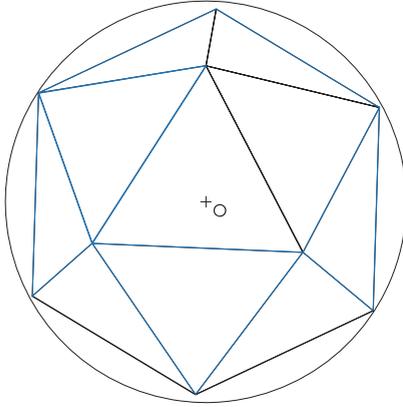
CURVATURA | TIPO
CURVATURA CERO | SUPERFICIE PLEGADA

SECCIONES PLANAS
POLÍGONOS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
 DIRECTRIZ POLIGONAL (BASE) - VÉRTICE PUNTO IMPROPIO
 RADIACIÓN DESDE EL VÉRTICE - CARAS CUADRILÁTERAS
 GENERATRICES = RECTAS SOBRE LAS CARAS

CLASIFICACIÓN:
 RECTA - ARISTAS PERPENDICULARES AL PLANO DE LA BASE
 REGULAR - DIRECTRIZ POLÍGONO REGULAR
 NÚMERO DE LADOS DE LA DIRECTRIZ





Las esferas geodésicas son una de las aplicaciones más importantes de las superficies poliédricas.

La generación de estas esferas se realiza a partir de los poliedros regulares convexos, fundamentalmente del DODECAEDRO y el ICOSAEDRO.

La generación se realiza subdividiendo los lados del poliedro base en partes iguales y lanzando desde el centro de la esfera rayos hasta que corten a esta. Los puntos de intersección serán los nuevos vértices de la esfera geodésica.

Todos los vértices de las esferas geodésicas están por tanto apoyados en la esfera circunscrita al poliedro regular a partir del cual se genera.

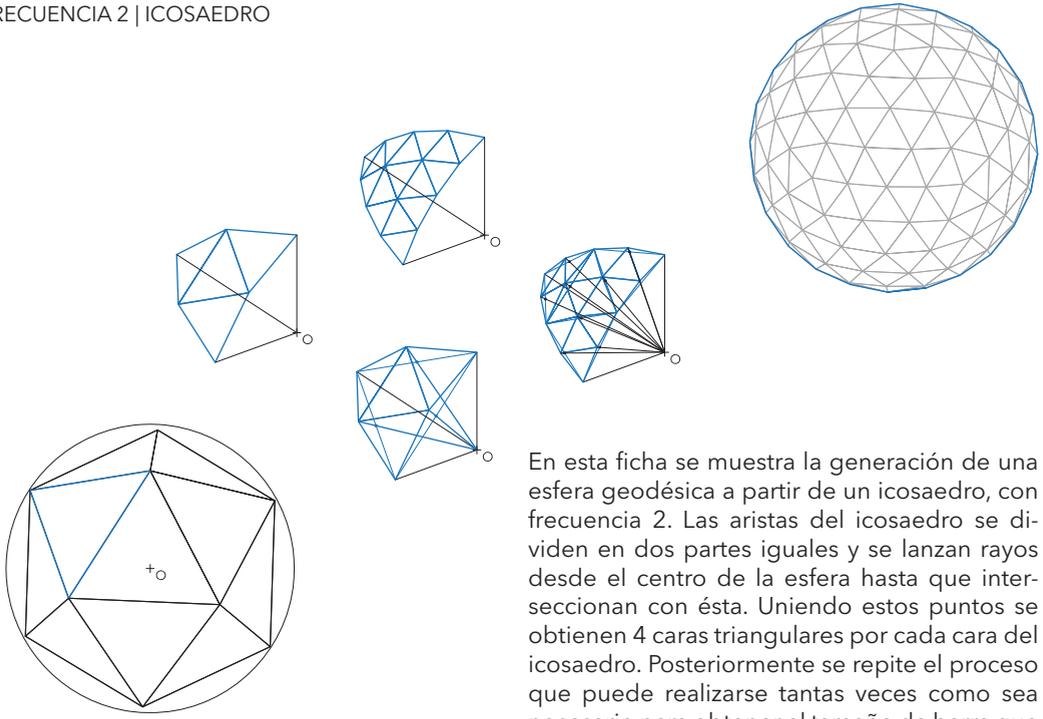
Según el número de subdivisiones que se haga del lado del polígono original, se clasificará la esfera en FRECUENCIA 2, 3, 4...

Las caras de una esfera geodésica son TRIÁNGULOS, aunque en ocasiones pueden ser otro tipo de polígonos.

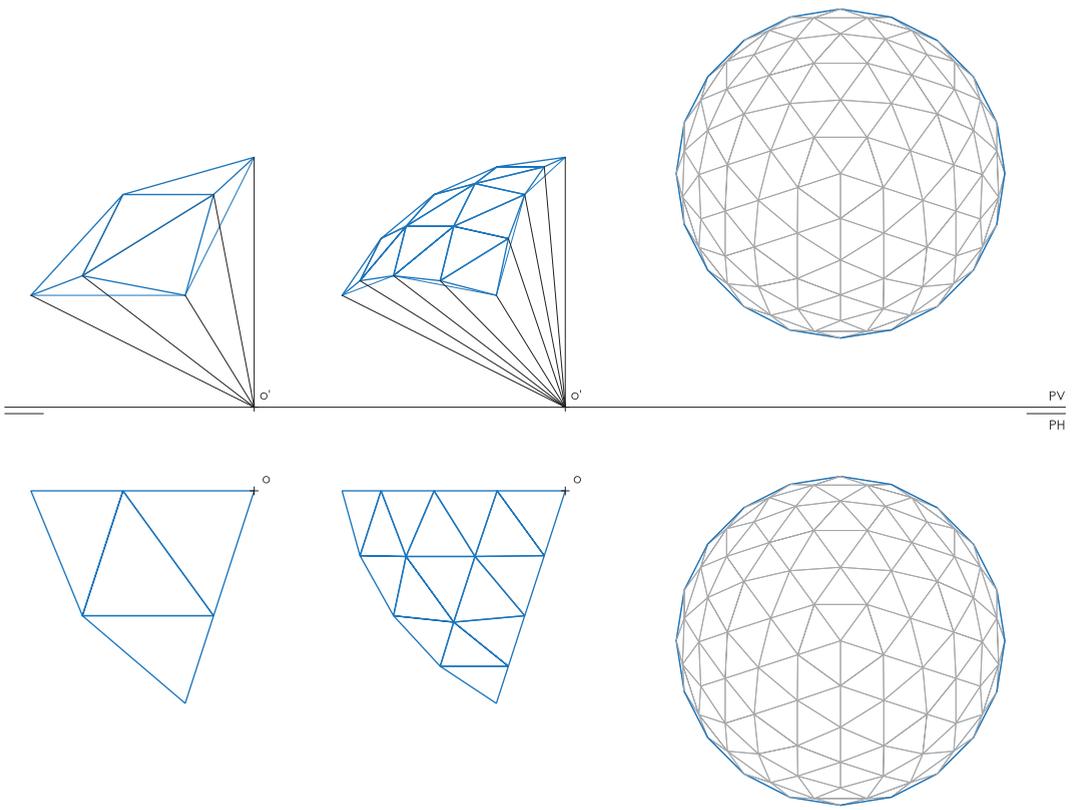
A pesar de su generación, completamente procedimental, las esferas geodésicas constituyen poliedros irregulares ya que sus aristas tienen diferentes medidas y sus caras planas forman triángulos no equiláteros.

La construcción de este tipo de estructuras se suele realizar con materiales metálicos en las aristas y cubierta por vidrio o materiales ligeros tipo chapa metálica o PVC en las caras.

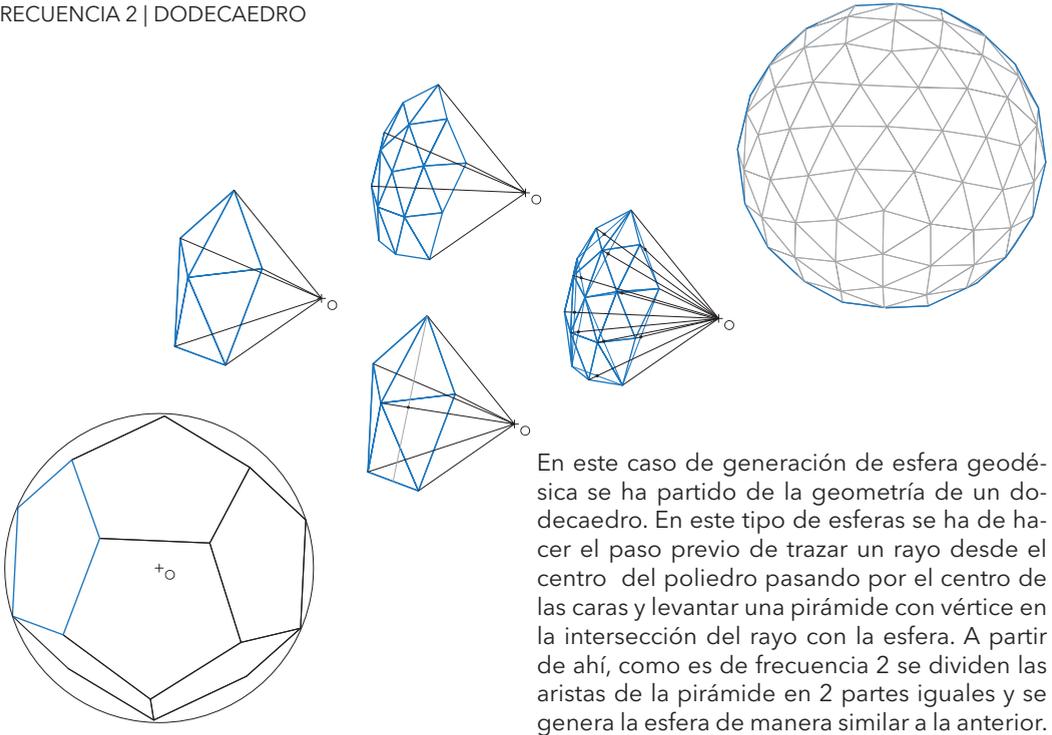
PV
PH



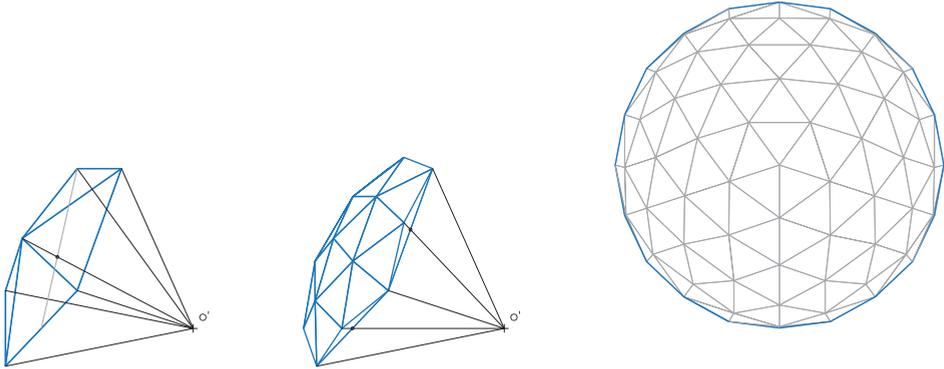
En esta ficha se muestra la generación de una esfera geodésica a partir de un icosaedro, con frecuencia 2. Las aristas del icosaedro se dividen en dos partes iguales y se lanzan rayos desde el centro de la esfera hasta que interseccionan con ésta. Uniendo estos puntos se obtienen 4 caras triangulares por cada cara del icosaedro. Posteriormente se repite el proceso que puede realizarse tantas veces como sea necesario para obtener el tamaño de barra que se quiera.



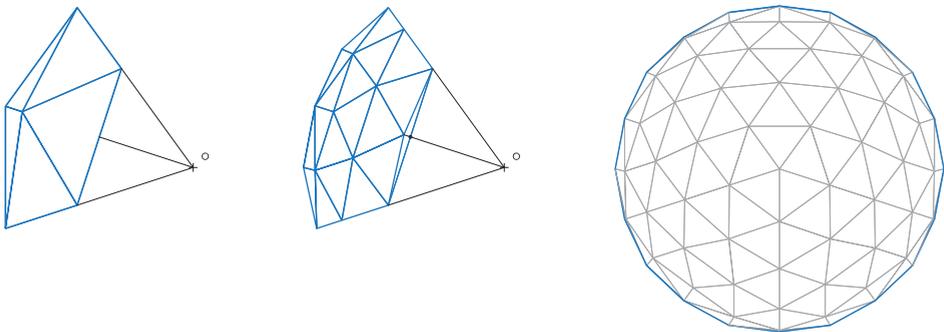
PV
PH

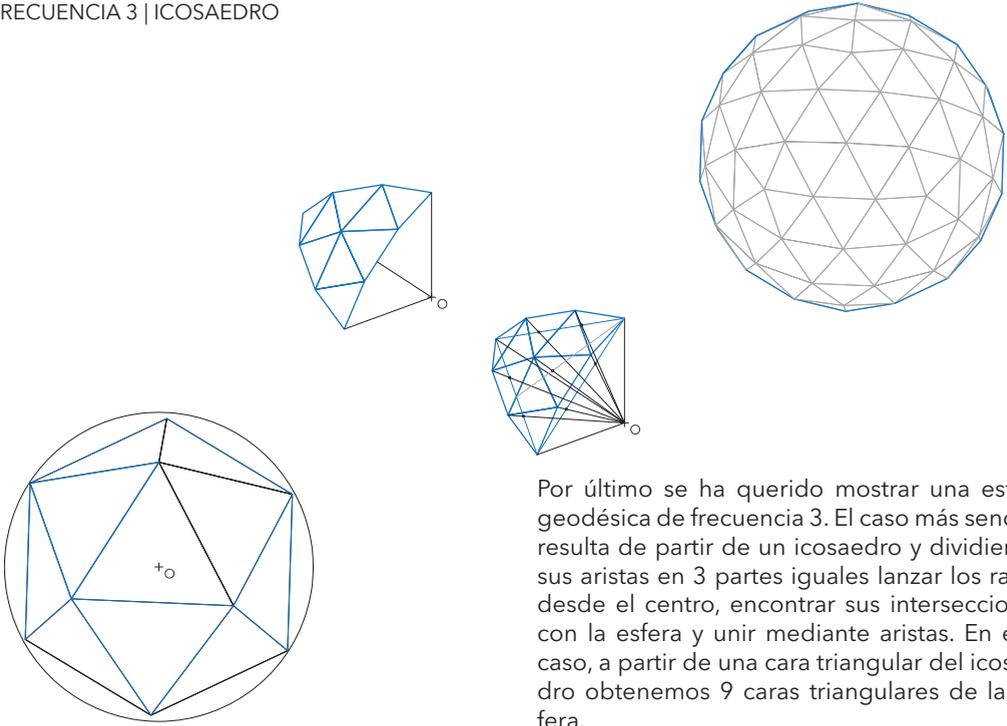


En este caso de generación de esfera geodésica se ha partido de la geometría de un dodecaedro. En este tipo de esferas se ha de hacer el paso previo de trazar un rayo desde el centro del poliedro pasando por el centro de las caras y levantar una pirámide con vértice en la intersección del rayo con la esfera. A partir de ahí, como es de frecuencia 2 se dividen las aristas de la pirámide en 2 partes iguales y se genera la esfera de manera similar a la anterior.

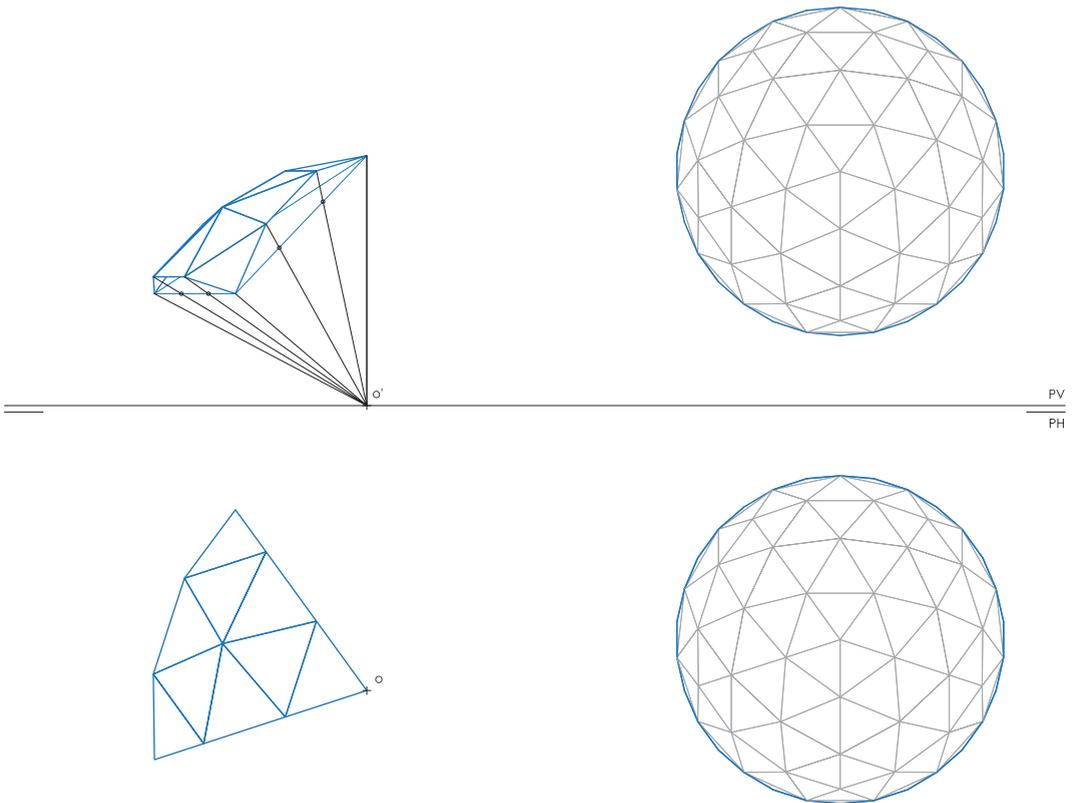


PV
PH





Por último se ha querido mostrar una esfera geodésica de frecuencia 3. El caso más sencillo resulta de partir de un icosaedro y dividiendo sus aristas en 3 partes iguales lanzar los rayos desde el centro, encontrar sus intersecciones con la esfera y unir mediante aristas. En este caso, a partir de una cara triangular del icosaedro obtenemos 9 caras triangulares de la esfera.



ARQUITECTO

IEOH MING PEI

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1989

LOCALIZACIÓN

PARIS | FRANCIA

ELEMENTO ANALIZADO

EDIFICIO DE ACCESO

TIPO DE SUPERFICIE

PIRÁMIDE RECTA DE BASE CUADRADA

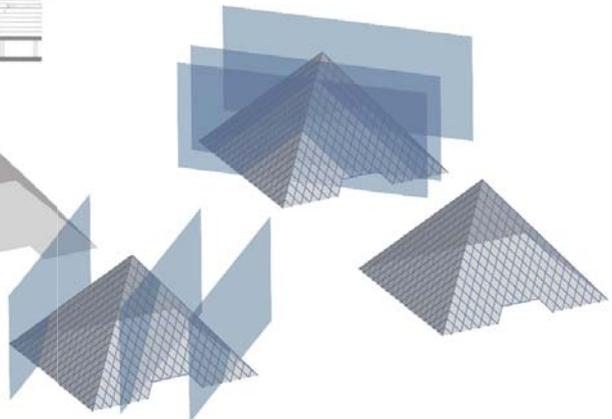
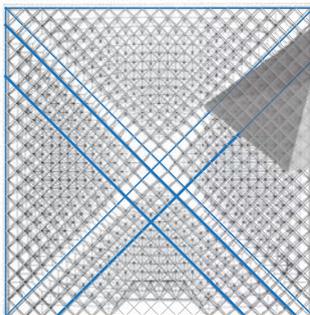
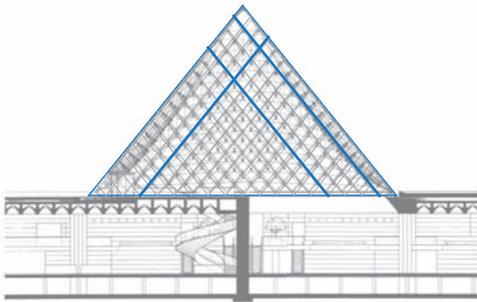


El acceso al Museo Luovre en París diseñado por el arquitecto leo Ming Pei, está situado en el patio del edificio y materializado mediante una pirámide recta de base cuadrada.

La longitud del lado de la base es de 35 metros y la altura del vértice de 20,6 metros.

Está construida con una estructura metálica que exteriormente corresponde a las secciones de la pirámide por planos paralelos a sus caras. Estas secciones dejan entre si un espacio que se completa con unos 673 paneles de vidrio, de los cuales 603 tienen forma de rombo y 70 son triangulares.

Para configurar el acceso, se emplea el recurso de eliminar una serie de paneles de vidrio en la parte inferior, sin alterar de esta forma la geometría del conjunto



ARQUITECTO

ALBERTO CAMPO BAEZA

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

2001

LOCALIZACIÓN

GRANADA | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN EXTERIOR

TIPO DE SUPERFICIE

PRISMA RECTO DE BASE CUADRADA

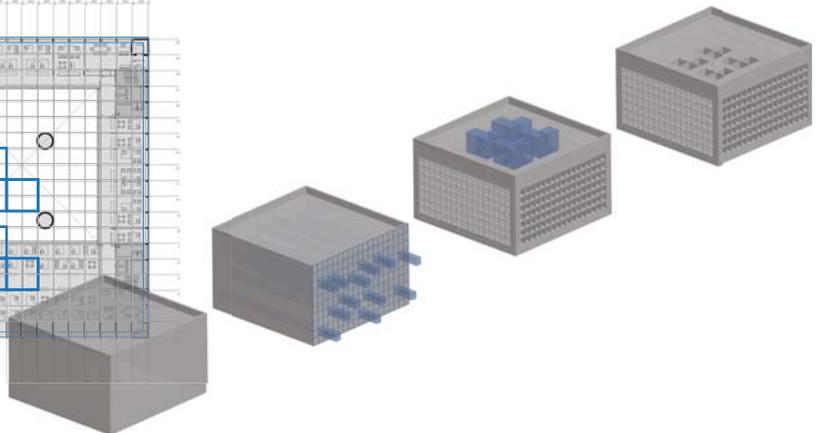
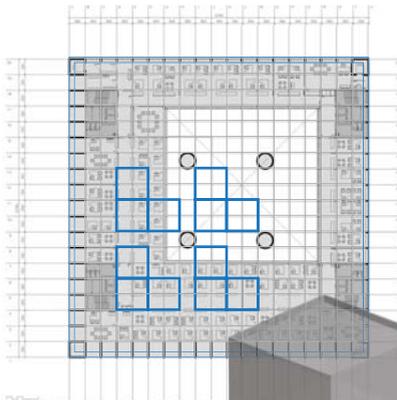
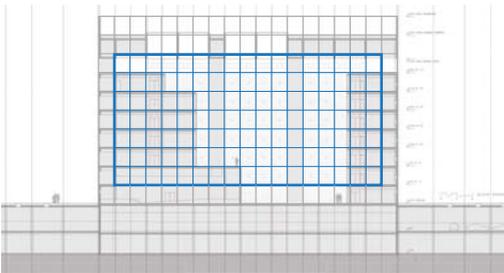


Alberto Campo Baeza diseña este edificio con un rotundo volumen prismático, casi cúbico, apoyándose en una cuadrícula de módulo 3 metros.

En planta el edificio describe un cuadrado de 57 metros de lado, mientras que en sección se puede apreciar una altura menor, de unos 36 metros.

Para la composición de fachada, el arquitecto sigue utilizando el módulo de 3 metros ya que realiza los huecos restando al volumen anterior unos cubos de 3x3x3 metros. De esta forma consigue una composición en rejilla con una cuadrícula regular en el plano de fachada, mientras que la profundidad de los huecos le permiten un control de entrada de la luz a modo de "brise soleil".

En cubierta también realiza esta operación creando de esta manera un "impluvium de luz" (tal y como él lo denomina) en el interior del edificio.



ARQUITECTO

IEOH MING PEI

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1989

LOCALIZACIÓN

HONG KONG | CHINA

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN EXTERIOR

TIPO DE SUPERFICIE

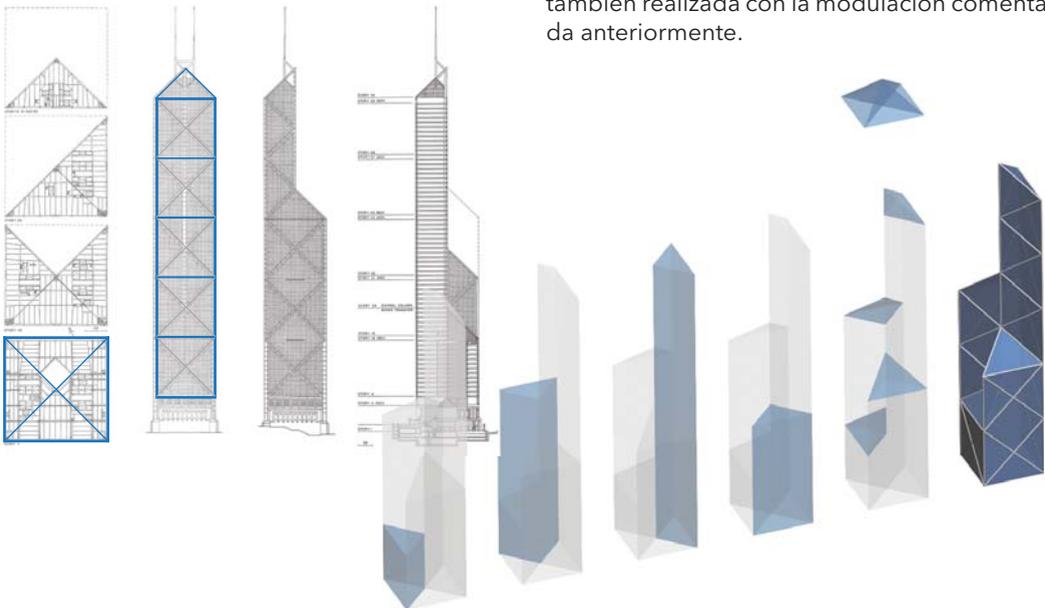
PRISMAS Y PIRÁMIDES DE BASE TRIANGULAR



Para la sede central del Banco de China en Honk Kong, el arquitecto leo Ming Pei diseña un edificio en altura modulado a partir de la dimensión del lado del cuadrado en planta.

El edificio consta de 72 plantas y alcanza una altura de 315 metros, que llegan a los 367,4 metros si se tienen en cuenta las antenas.

La base cuadrada tiene 58 metros de lado y se divide en cuatro mediante las diagonales del cuadrado. Esto da lugar a las 4 torres de base triangular correspondientes a los cuadrantes de la base. En los alzados también se puede observar la modulación del cuadrado y las diagonales que se traducen en unos elementos estructurales diagonales que caracterizan el edificio. Los prismas de base triangular se van escalonando en altura y se culminan con lo que correspondería a un cuarto de pirámide también realizada con la modulación comentada anteriormente.



01.04 | PROPUESTA PARA EL WORLD TRADE CENTER TRADE CENTER

ARQUITECTO

NORMAN FOSTER + PARTNERS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

2002

LOCALIZACIÓN

NEW YORK | EEUU

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN

TIPO DE SUPERFICIE

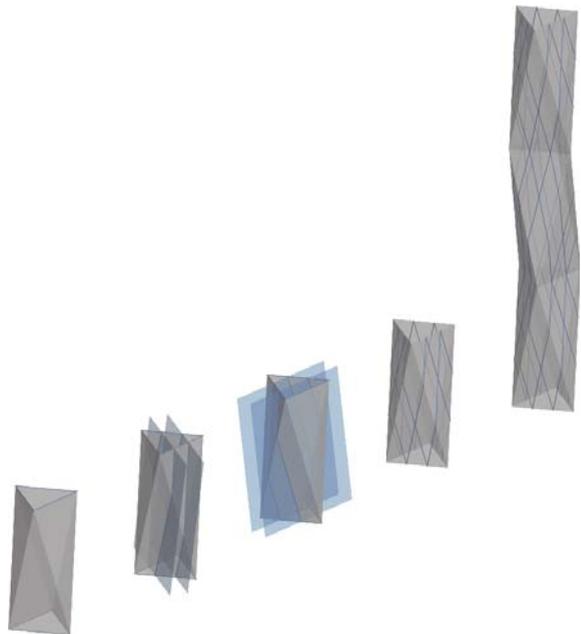
COMBINACIÓN DE ANTIPRISMAS DE BASE TRIANGULAR



Norman Foster en su propuesta de reconstrucción del World Trade Center de Nueva York realiza una reinterpretación de las "torres gemelas" mediante la combinación de 3 antiprismas de base triangular por torre.

Estas formas consisten en la creación de un poliedro con bases triángulos equiláteros que se giran 180° , se desplazan la altura del antiprisma y se cubren en las caras laterales uniendo mediante planos triangulares que unen los vértices.

Los triángulos de la base tienen un lado de 80 metros. Los antiprismas tienen 180 metros de altura y las torres compuestas por 3 antiprismas alcanzan una altura total de 538 metros.



01.05 | BIBLIOTECA NACIONAL DE BIELORRUSIA

ARQUITECTO

MIHAIL VINOGRDOV y VICTOR KRAMARENKO

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

2006

LOCALIZACIÓN

MINSK | BIELORRUSIA

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN EXTERIOR

TIPO DE SUPERFICIE

POLIEDRO SEMIRREGULAR | PEQUEÑO

ROMBICUBOCTAEDRO

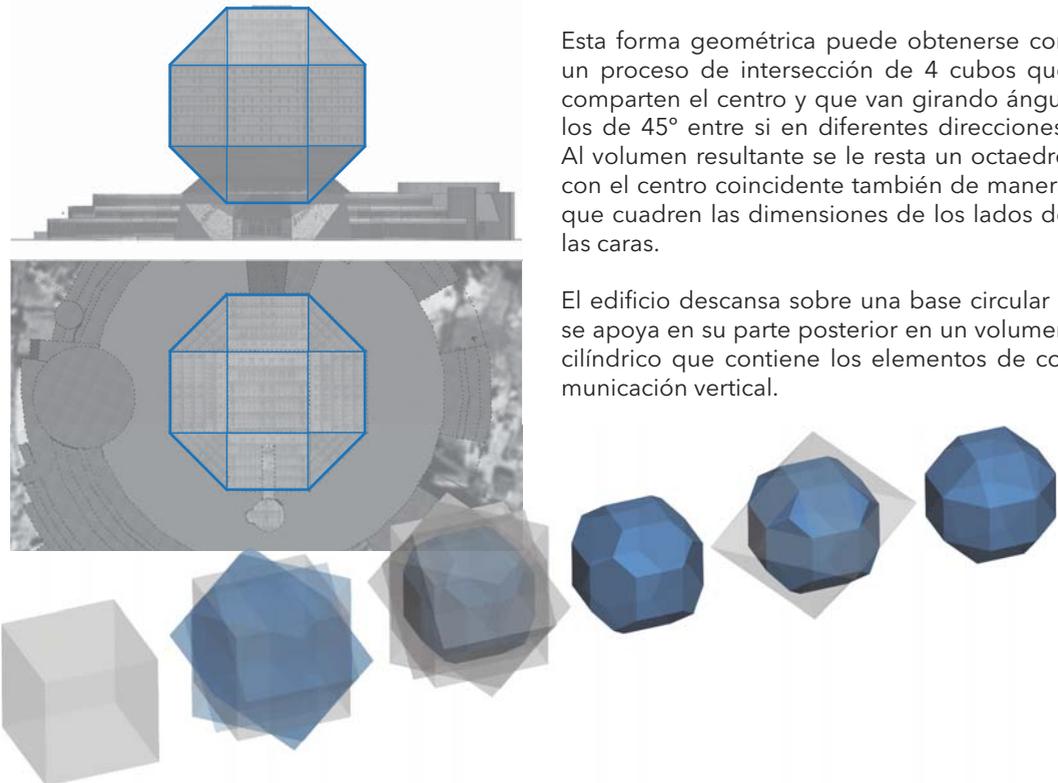


La Biblioteca Nacional de Bielorrusia es uno de los edificios donde el uso de las superficies poliédricas es más evidente. Con este edificio de 22 plantas y 73,67 metros de altura se pretendía crear un complejo singular. Los arquitectos Vinogradov y Kramarenko ganaron el concurso con lo que se ha denominado el "diamante bielorruso".

Su cuerpo principal está diseñado a partir de la geometría de un pequeño rombicuboctaedro, que es un poliedro semirregular arquimediado. Las caras de este volumen son cuadrados y triángulos equiláteros de 25 metros de lado.

Esta forma geométrica puede obtenerse con un proceso de intersección de 4 cubos que comparten el centro y que van girando ángulos de 45° entre si en diferentes direcciones. Al volumen resultante se le resta un octaedro con el centro coincidente también de manera que cuadren las dimensiones de los lados de las caras.

El edificio descansa sobre una base circular y se apoya en su parte posterior en un volumen cilíndrico que contiene los elementos de comunicación vertical.



ARQUITECTO

REM KOOLHAAS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

2005

LOCALIZACIÓN

OPORTO | PORTUGAL

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN | DESARROLLO CERRAMIENTO

TIPO DE SUPERFICIE

POLIEDRO IRREGULAR

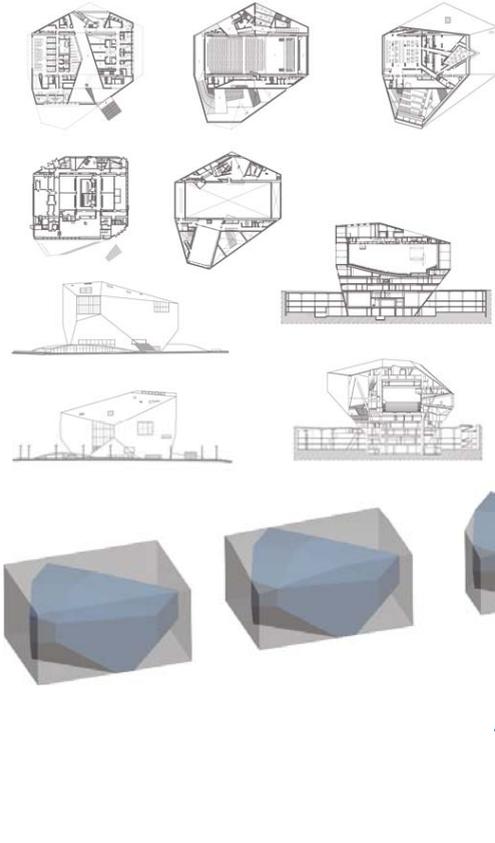


Este edificio situado en la avenida de Boavista junto al jardín del mismo nombre en Oporto es uno de los referentes de la arquitectura contemporánea. Rem Koolhaas diseñó este edificio con una forma poliédrica irregular. Ove Arup, conocido también por su intervención en la Ópera de Sidney también participó en el proyecto.

La característica forma del edificio hace difícil extraer unos trazados reguladores de la misma, por lo que para su estudio se ha optado por la realización de un desarrollo, obtenido a partir de las verdaderas magnitudes de las caras. Para ello se han utilizado los métodos clásicos de la geometría como son el abatimiento y el cambio de plano a partir de las plantas, alzados y secciones del edificio

Posteriormente, y a partir de la geometría de un prisma, se ha procedido a ir modelando a modo de "piedra preciosa", cortando por diferentes planos, hasta conseguir la forma.

La singular geometría del edificio se ha convertido en un icono de la ciudad portuguesa.



CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
 SUPERFICIE CURVA DE REVOLUCIÓN | CUÁDRICA
 ELÍPTICA

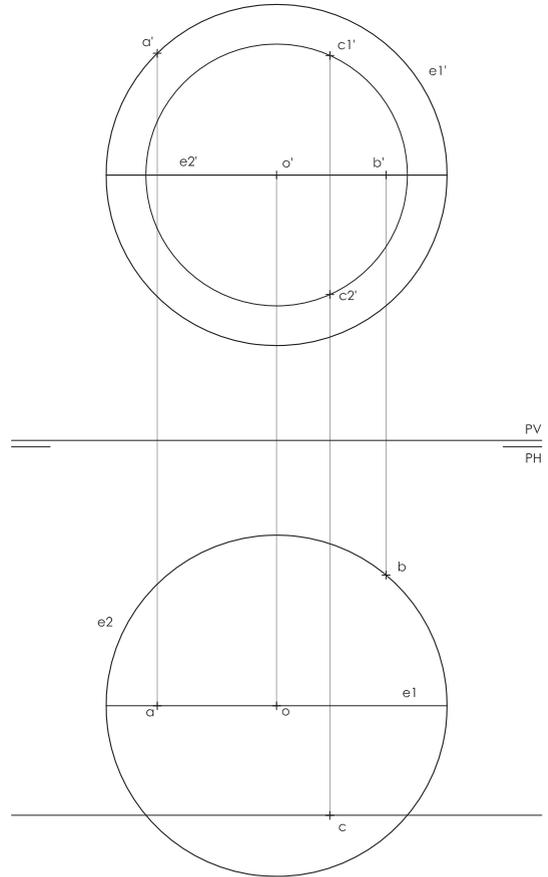
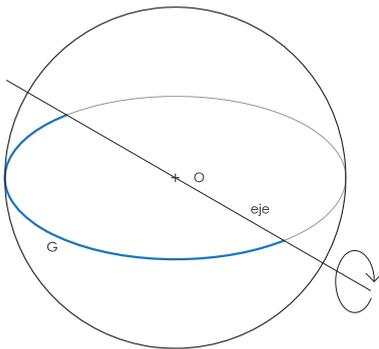
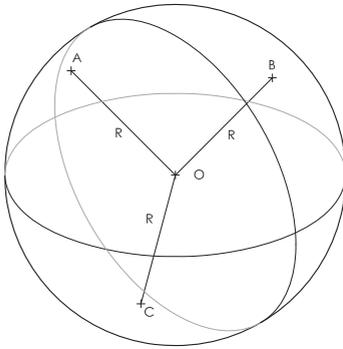
GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR | EJE
 ROTACIÓN | CIRCUNFERENCIA | DIÁMETRO

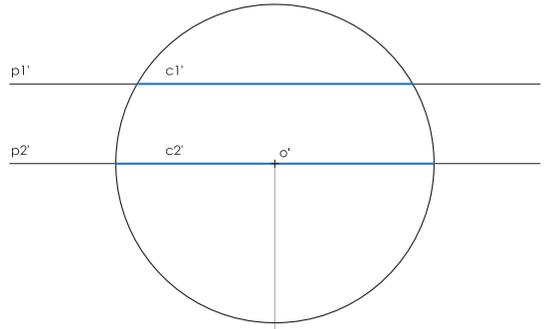
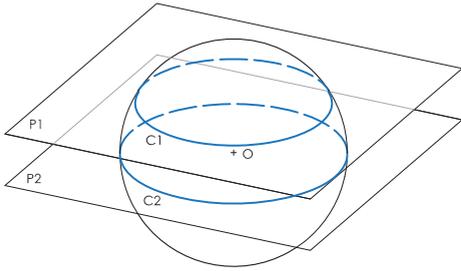
CURVATURA | TIPO
 DOBLE CURVATURA | SINCLÁSTICA

ECUACIÓN
 $x^2+y^2+z^2=r^2$, siendo r el radio de las esfera

SECCIONES PLANAS
 CIRCUNFERENCIAS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
 INFINITOS PLANOS Y EJES DE SIMETRÍA
 PUNTOS EQUIDISTANTES DEL CENTRO
 CURVATURA CONSTANTE

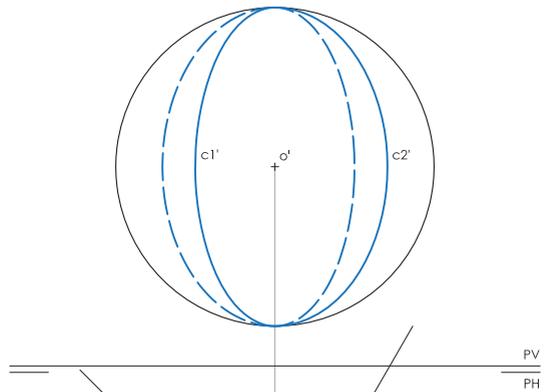
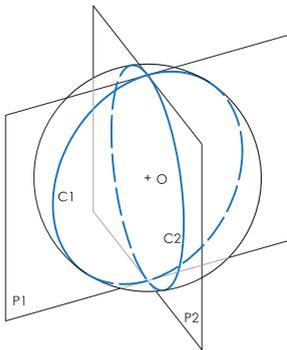
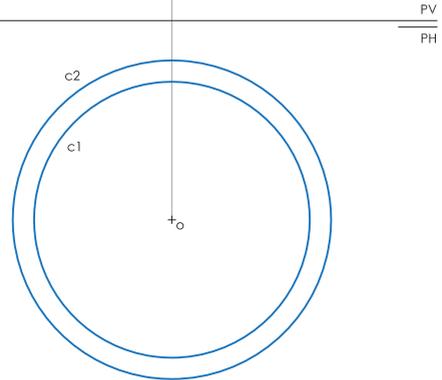




Todas las secciones planas de una esfera son circunferencias. En arquitectura suelen realizarse dos tipos de secciones a la esfera:

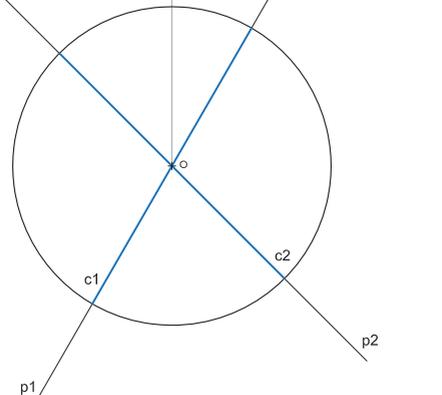
Si las secciones se hacen por planos paralelos, habitualmente horizontales, a estas se les denomina PARALELOS.

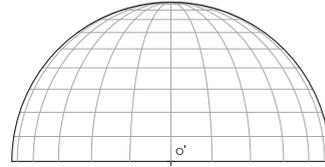
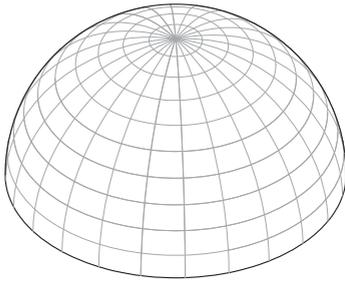
Si se hacen por planos que contienen al centro y que son perpendiculares al plano horizontal, se les llama MERIDIANOS.



Estas secciones posteriormente se traducen en barras metálicas o en juntas de despiece de elementos pétreos.

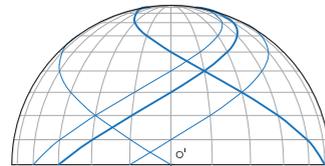
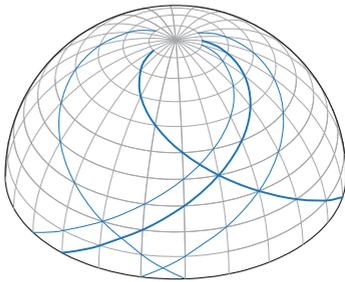
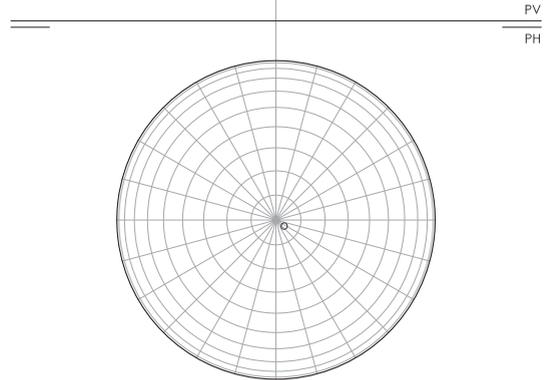
En la página siguiente se puede observar una de las soluciones más habituales de trabajo con una esfera, combinando las secciones paralelo y meridiano.





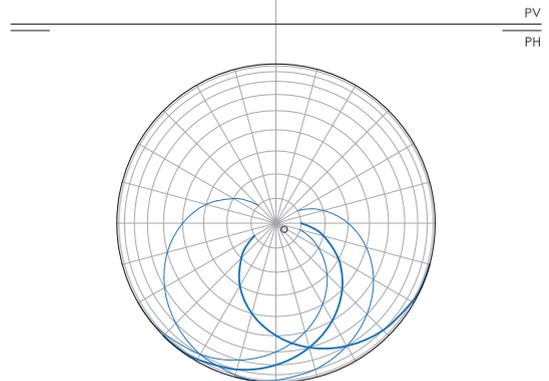
Esta subdivisión de la esfera en secciones puede hacerse de diferentes maneras. Normalmente para conseguir una mayor homogeneidad en la dimensión de las barras suele dividirse en partes iguales un meridiano y se secciona por estas partes mediante planos paralelos. A mayor número de partes mayor aproximación.

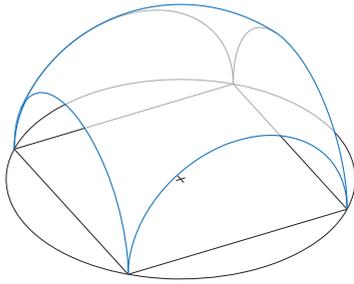
A diferencia de las esferas geodésicas vistas anteriormente, las secciones van creando trapecios en lugar de triángulos.



En muchas ocasiones se utiliza para el diseño de estructuras esféricas lo que se denomina HÉLICE ESFÉRICA, que no es más que la curva que se va apoyando en la esfera y se genera por un movimiento de rotación constante alrededor del eje que pasa por el centro de la esfera y otro de desplazamiento constante paralelo a este eje.

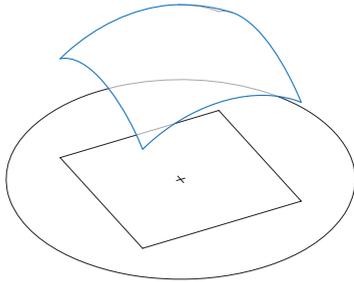
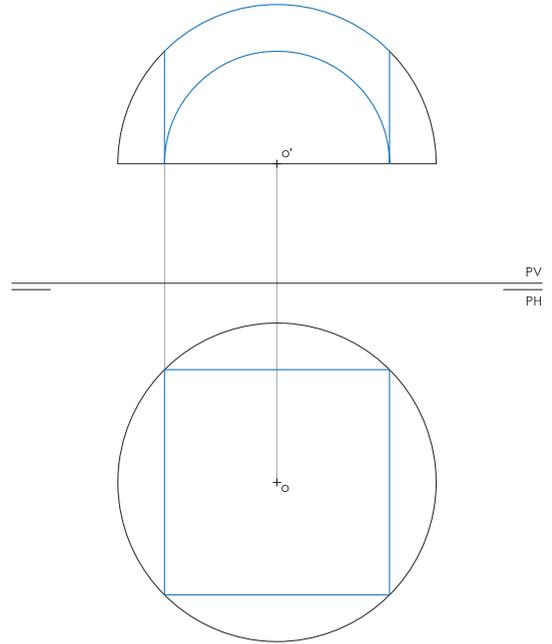
De esta manera se consigue ir arriostando los trapecios generados por las secciones anteriores, formando paños triangulares.





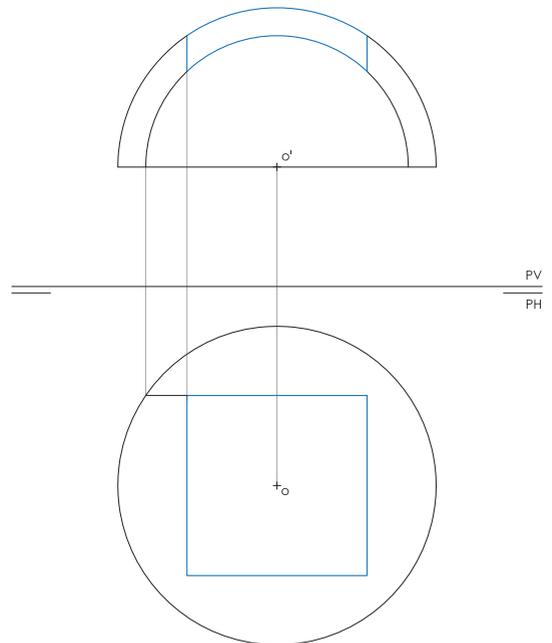
Una de las aplicaciones que más se ha dado en la historia de la arquitectura es la BÓVEDA VAÍDA. Consiste en una cúpula esférica seccionada por 4 planos apoyados en los lados de un cuadrado inscrito en la circunferencia de la planta.

De las 4 secciones circulares, llamadas ARCOS FAJONES, habitualmente nacen bóvedas de cañón cilíndricas. También pueden combinarse generando composiciones como veremos en los ejemplos siguientes.



Otra posibilidad que se ha utilizado también es la BÓVEDA VAÍDA REBAJADA, que básicamente es igual que la anterior con la diferencia de que el cuadrado en el que se apoyan los planos de sección ya no está inscrito.

Es una superficie de doble curvatura con una buena resistencia a compresión y que se ha construido tradicionalmente con ladrillo dando lugar a un tipo concreto de BÓVEDAS TABICADAS.



02.01 | PANTEÓN DE AGRIPA

ARQUITECTO

MARCO VIPSANIO AGRIPA

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

25 a.C.

LOCALIZACIÓN

ROMA | ITALIA

ELEMENTO ANALIZADO

CÚPULA INTERIOR

TIPO DE SUPERFICIE

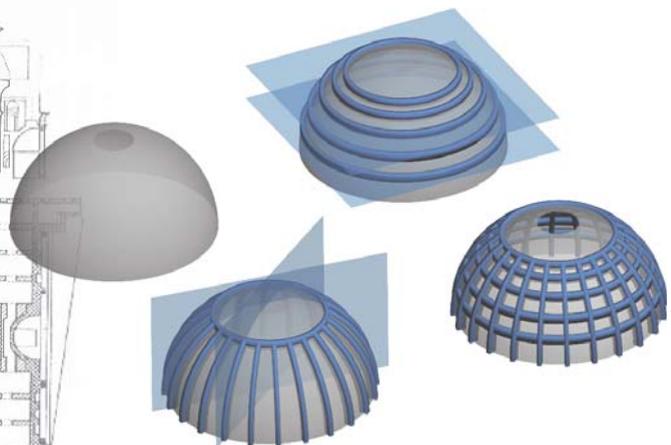
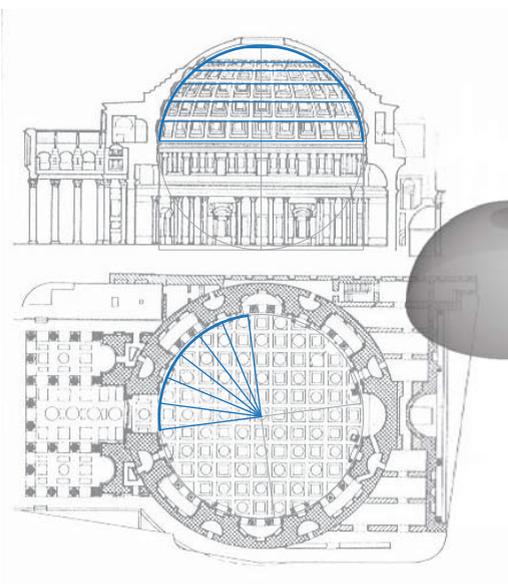
ESFERA



El Panteón de Roma es el ejemplo por excelencia de cúpula esférica en la historia de la arquitectura.

Construido en el año 25 a.C. por orden del emperador Augusto. En sección podemos observar como el espacio interior del edificio alberga una esfera de 43,44 metros (150 pies) de diámetro en su totalidad, de la que solo vemos materializada la mitad superior.

Debido a las características de los materiales existentes en la época, el opus caementicium (llamado también "hormigón romano"), Marco Vipsanio Agripa utilizó la geometría de la esfera, y más concretamente los espacios entre las secciones paralelos y meridianos, para componer el interior y aligerar de peso la estructura. En la parte superior se dejó el óculo sin cubrir, seguramente también por este motivo, pero que ha resultado ser uno de los iconos de la arquitectura de todos los tiempos.



02.02 | BIBLIOTECA NACIONAL DE FRANCIA

ARQUITECTO

HENRI LABROUSTE

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1868

LOCALIZACIÓN

PARÍS | FRANCIA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA SALA DE LECTURA

TIPO DE SUPERFICIE

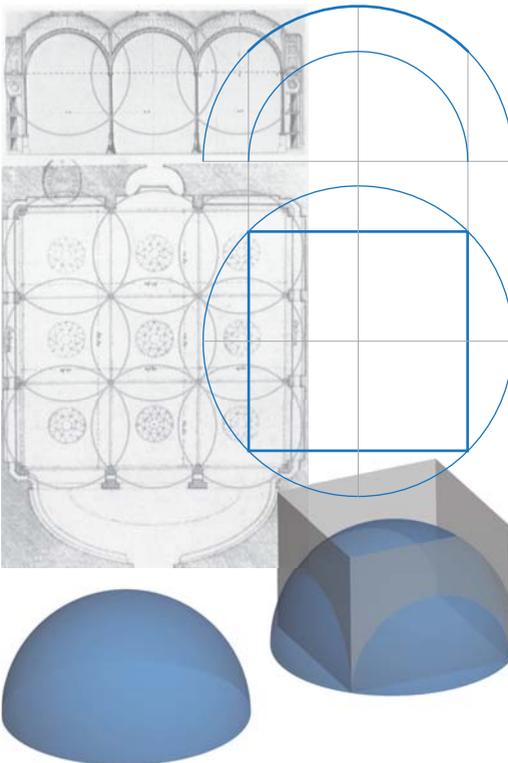
ESFERA | BÓVEDA VAÍDA



La denominada "sala Labrouste", en honor a su arquitecto, de la Biblioteca Nacional de Francia, es uno de los ejemplos de utilización de una forma geométrica ya utilizada en arquitecturas más antiguas pero adaptada a un nuevo material, el hierro.

Para la cubrición de esta gran sala de lectura, Henri Labrouste utilizó una combinación de bóvedas vaídas en matriz de 3x3 que apoyan en unas esbeltas columnillas metálicas. De esta forma conseguía un gran espacio cubierto prácticamente libre de apoyos estructurales.

Además, aprovechando la geometría de la esfera, y más concretamente sus secciones paralelas, materializa la estructura metálica y su recubrimiento, a la vez que abre un lucernario en la parte superior. De esta forma consigue una gran iluminación en el interior de la sala.



02.03 | MERCADO DE ALGECIRAS

INGENIERO | ARQUITECTO

EDUARDO TORROJA MIRET | MANUEL SÁNCHEZ
ARCAS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1935

LOCALIZACIÓN

ALGECIRAS | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA Y BÓVEDAS DE ACCESO

TIPO DE SUPERFICIE

ESFERA | CILINDROS

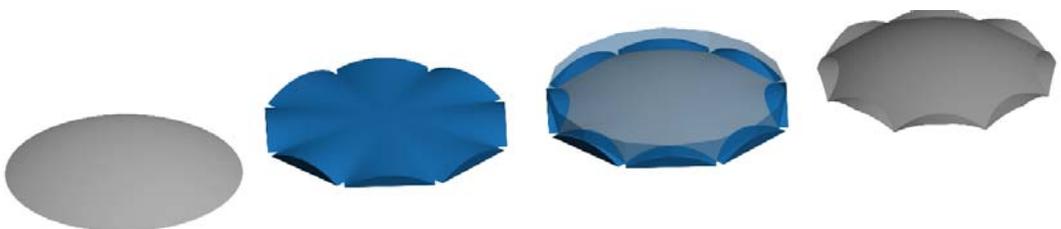
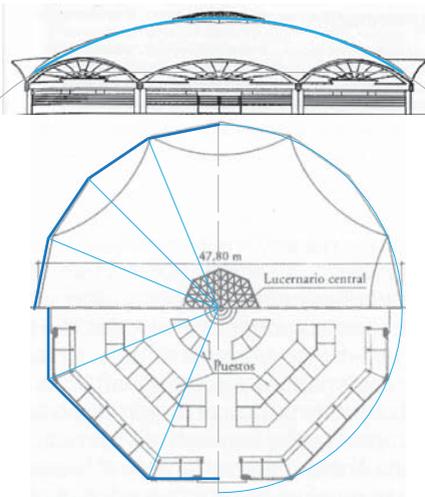


En la cubierta del mercado de Algeciras se percibe la inconfundible mano del ingeniero Eduardo Torroja. Esta gran bóveda esférica de hormigón armado fue en su tiempo, y durante 30 años, la más grande construida a nivel mundial.

La cúpula esférica tiene 44,10 metros de radio con un espesor de tan solo 9 centímetros de hormigón. Descansa sobre una circunferencia de 47.80 metros de diámetro. La cúpula a su vez, está limitada en planta por un octógono regular de 18,30 metros de lado, en cuyos vértices se encuentran los 8 pilares que la sustentan.

De los lados del octógono nacen 8 viseras cilíndricas limitadas en este caso por dos planos correspondientes a un polígono de 16 lados. En su parte interior estas bóvedas intersectan con la superficie esférica otorgándole rigidez y ayudando en la transmisión de esfuerzos.

La cubierta está coronada por un lucernario octogonal que recuerda el óculo del panteón de Roma.



02.06 | SIDNEY OPERA HOUSE

ARQUITECTO | INGENIERO

JORN UTZON | OVE ARUP

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1973

LOCALIZACIÓN

SIDNEY | AUSTRALIA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

ESFERA | CASQUETES ESFÉRICOS

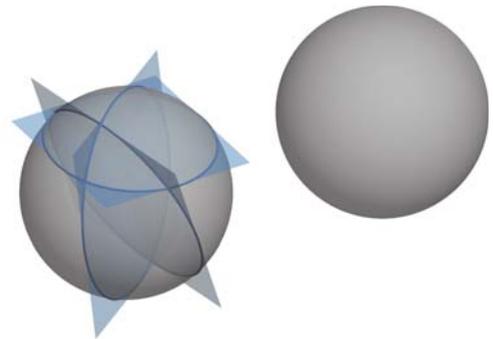
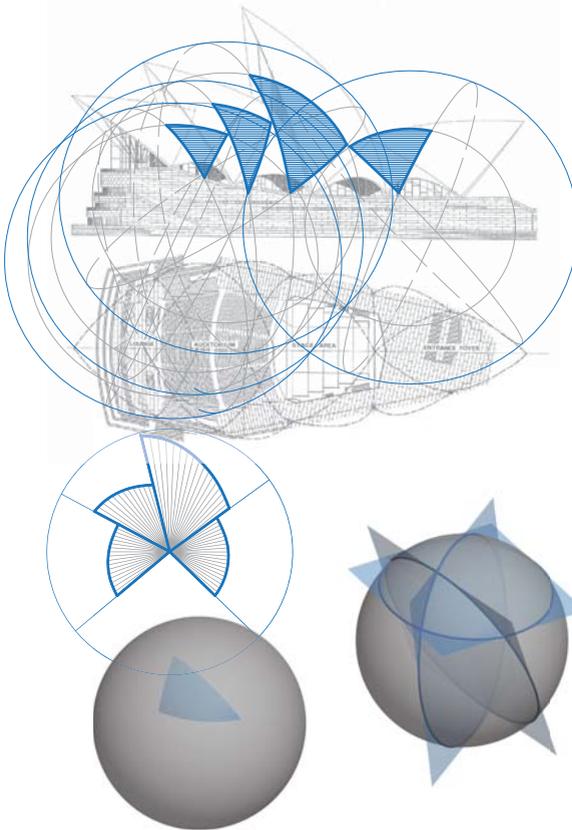


Tras un problema de indefinición en los planos del proyecto que ganó el concurso para la Ópera de Sidney, y después de la intervención de arquitectos como Rafael Moneo e ingenieros como Ove Arup, Jorn Utzon llegó a la solución para la cubierta de su edificio denominada "la esfera de Utzon".

Esta hábil solución consiste en la generación de la cubierta a partir de casquetes esféricos procedentes de la misma esfera, obtenidos por la sección de 3 planos, 2 radiales y otro inclinado.

De esta manera la construcción de las cubiertas pudo realizarse con cimbras con el mismo radio de curvatura, prefabricación de piezas idénticas, piezas de recubrimiento modulares...

Fue una fantástica solución geométrica a un grave problema constructivo.



02.05 | KRESGE AUDITORIUM

ARQUITECTO

EERO SAARINEN

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1955

LOCALIZACIÓN

MASSACHUSSETS | EEUU

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA AUDITORIO

TIPO DE SUPERFICIE

ESFERA | BÓVEDA BASE TRIANGULAR



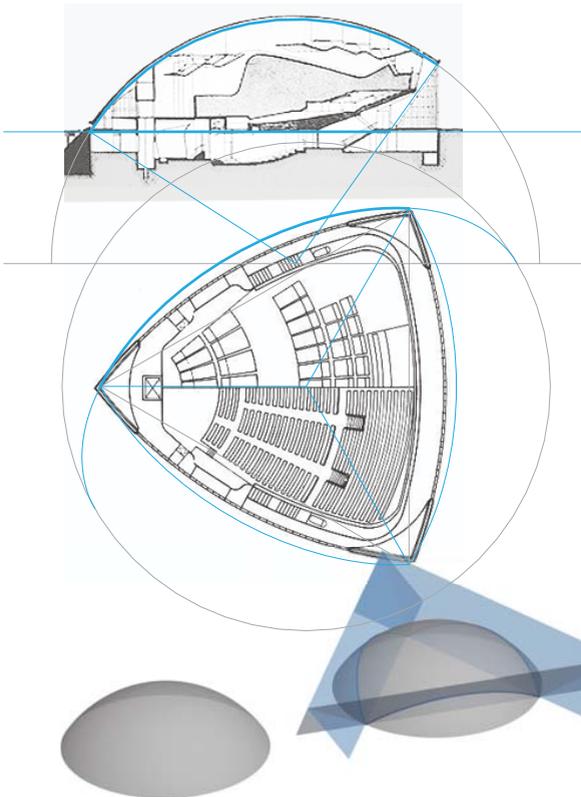
El denominado Auditorio Kresge se encuentra dentro del complejo del Massachusetts Institute of Technology diseñado por Eero Saarinen.

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

La esfera que genera la cúpula está limitada por la sección con 3 planos que pasan por su centro y por los 3 puntos de apoyo cogidos 2 a 2. De esta manera generan circunferencias máximas del mismo radio que el de la esfera.

Para mejor comprensión de la generación geométrica se puede imaginar 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 4 aristas del poliedro.

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



02.06 | AMPLIACIÓN DE LA ESTACIÓN DE ATOCHA DE ATOCHA

ARQUITECTO

RAFAEL MONEO

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1992

LOCALIZACIÓN

MADRID | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA APARCAMIENTO

TIPO DE SUPERFICIE

ESFERA | BÓVEDA VAÍDA REBAJADA

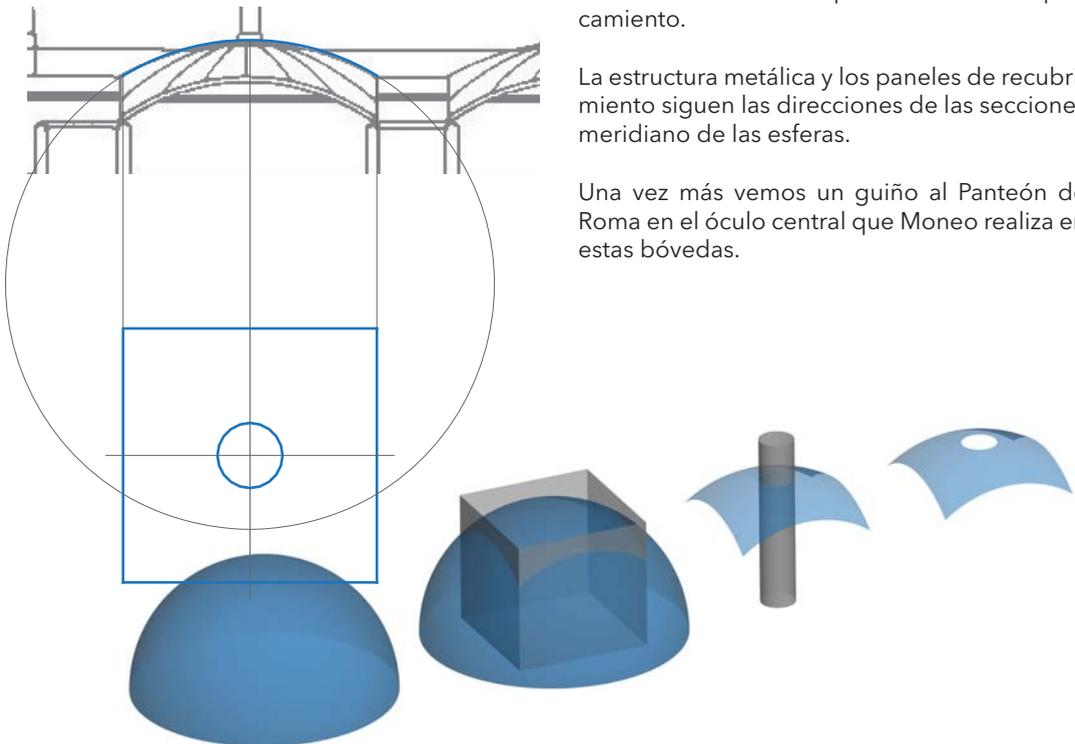


En la ampliación de la estación de Atocha en Madrid, Rafael Moneo utilizó multitud de formas geométricas puras en la composición de las diferentes partes del edificio. En concreto vamos a detenernos en las bóvedas vaídas rebajadas que utilizó para la cubierta del aparcamiento.

Tal y como se puede apreciar en la fotografía, utiliza una composición en forma de matriz de 14x5 módulos, separados entre sí. Cada uno de estos módulos es una bóveda vaída rebajada de estructura y cobertura metálica, que se apoya en los volúmenes correspondientes a los lucernarios de la parte inferior del aparcamiento.

La estructura metálica y los paneles de recubrimiento siguen las direcciones de las secciones meridiano de las esferas.

Una vez más vemos un guiño al Panteón de Roma en el óculo central que Moneo realiza en estas bóvedas.



02.07 | CENTRO COMERCIAL LAS ARENAS

ARQUITECTO

RICHARD ROGERS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

2011

LOCALIZACIÓN

BARCELONA | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

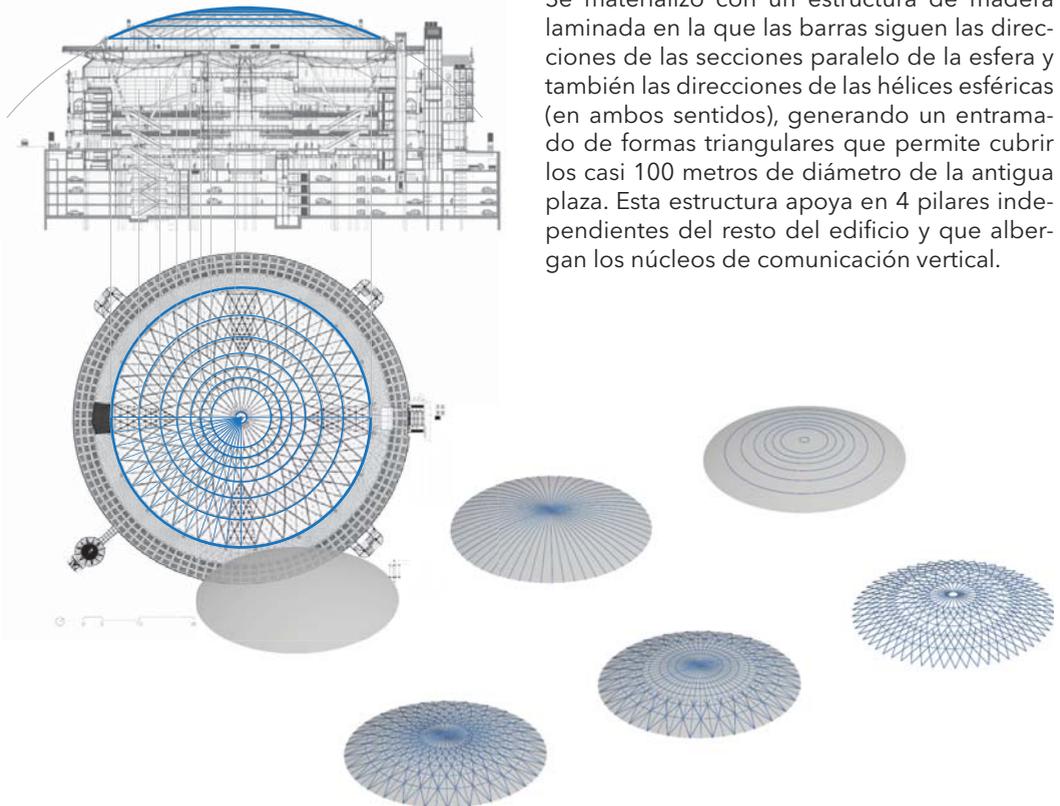
ESFERA | HÉLICES ESFÉRICAS



El centro comercial las Arenas en Barcelona es una intervención del arquitecto Richard Rogers en colaboración con los también arquitectos Alonso y Balaguer Asociados, sobre la plaza de toros de Barcelona, edificio de estilo mudéjar del s XIX.

La intervención consistente en la creación de un espacio comercial y de ocio para la ciudad requería de una cubrición nueva. Para ello se diseñó una cubierta con forma esférica, de 96 metros de diámetro.

Se materializó con un estructura de madera laminada en la que las barras siguen las direcciones de las secciones paralelo de la esfera y también las direcciones de las hélices esféricas (en ambos sentidos), generando un entramado de formas triangulares que permite cubrir los casi 100 metros de diámetro de la antigua plaza. Esta estructura apoya en 4 pilares independientes del resto del edificio y que albergan los núcleos de comunicación vertical.



03 | ELIPSOIDE

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE CURVA DE REVOLUCIÓN | CUÁDRICA
ELÍPTICA

GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR | EJE
ROTACIÓN | ELIPSE | DIÁMETRO

CURVATURA | TIPO

DOBLE CURVATURA | SINCLÁSTICA

ECUACIÓN

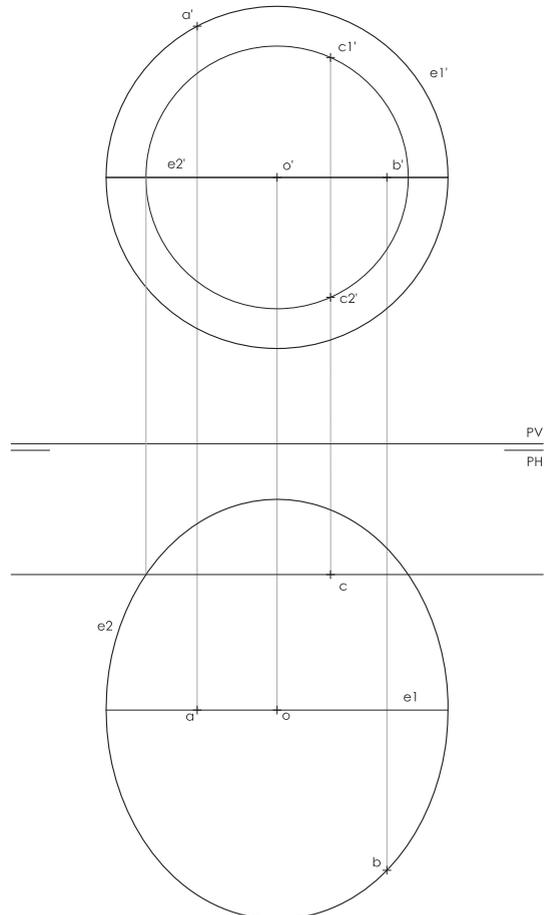
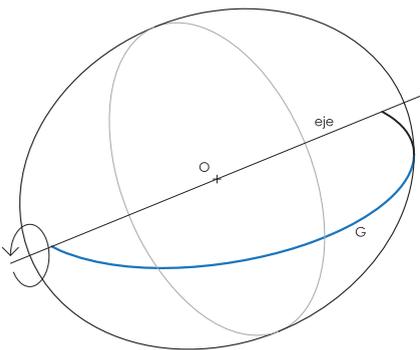
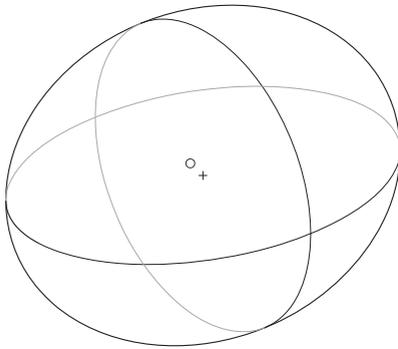
$x^2/a^2 + y^2/b^2 + z^2/c^2 = 1$, siendo a, b y c los semiejes.

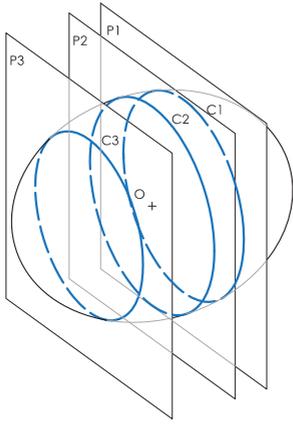
SECCIONES PLANAS

ELIPSES y CIRCUNFERENCIAS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

INFINITOS PLANOS Y EJES DE SIMETRÍA - CONTIENEN AL EJE

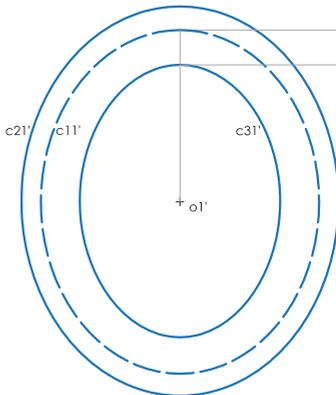
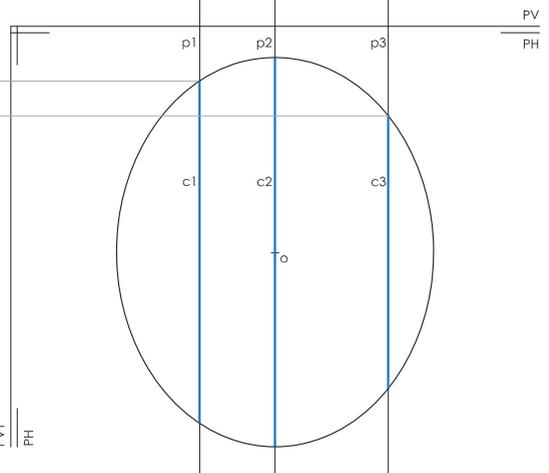
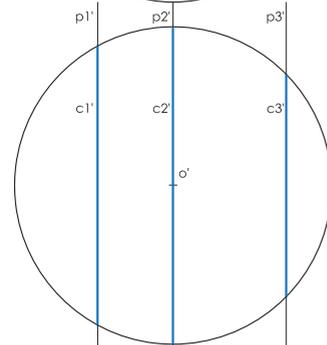
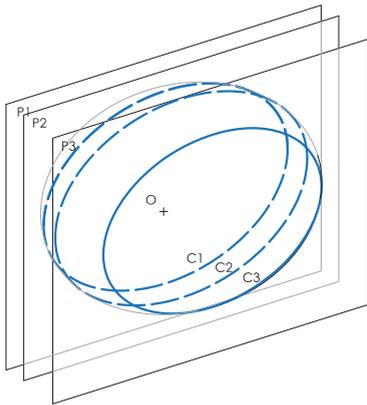
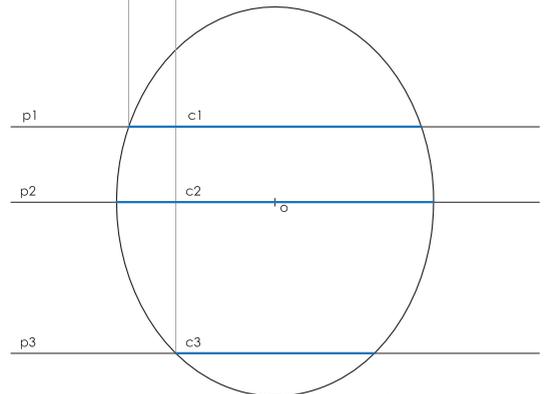
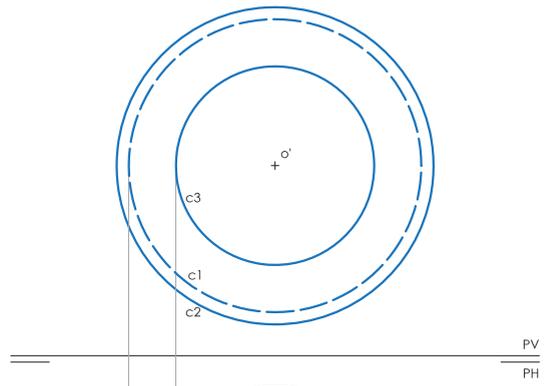


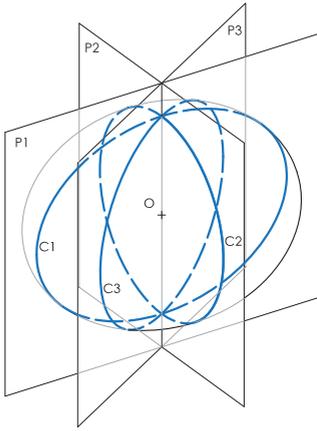


Todas las secciones planas de un elipsoide son elipses. Tan sólo si el elipsoide es de revolución y las secciones son perpendiculares al eje, estas son circunferencias.

En arquitectura al igual que en el caso de la esfera, suelen realizarse dos tipos de secciones:

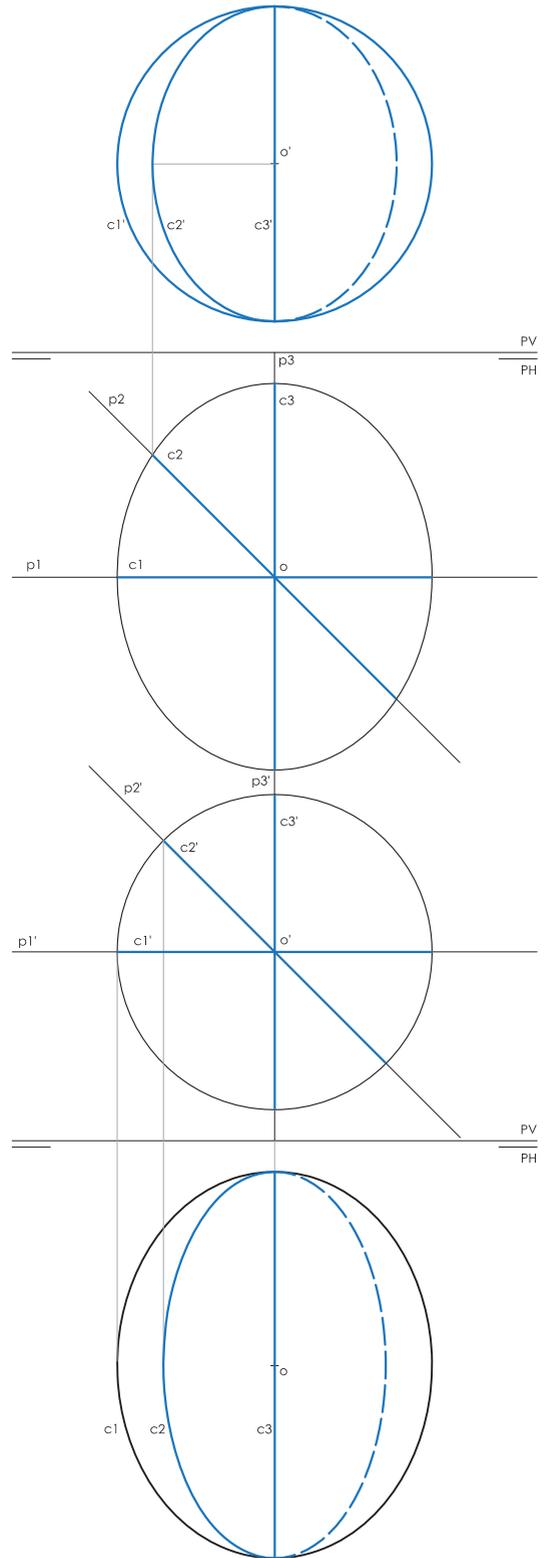
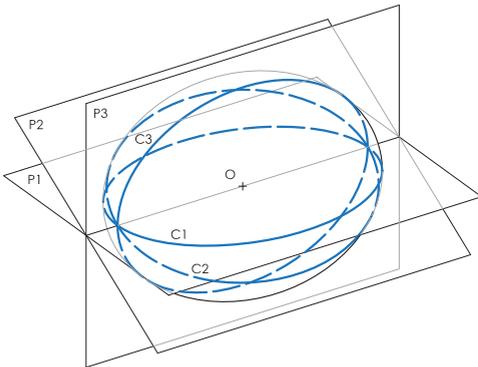
Si las secciones se hacen por planos paralelos, habitualmente horizontales, a estas se les denomina **PARALELOS**.

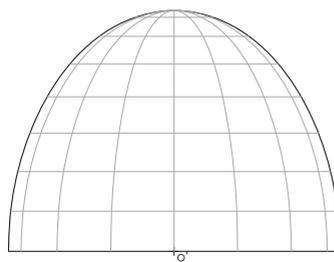
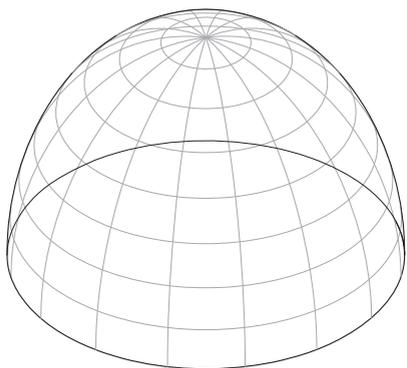




Si se hacen por planos que contienen al centro se les llama MERIDIANOS.

En el caso del elipsoide las secciones paralelo pueden ser tanto circunferencias como elipses y las meridianos siempre son elipses.

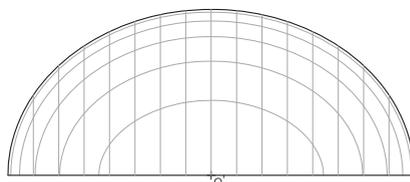
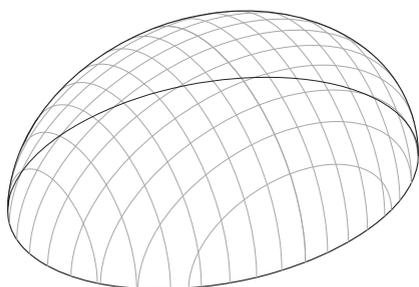
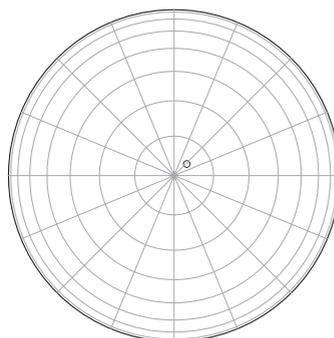




PV
PH

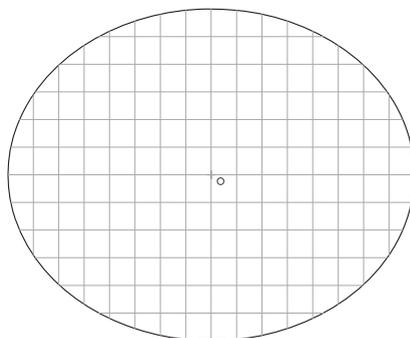
En esta página podemos ver dos de las soluciones que se suelen dar a las estructuras con forma de elipsoide.

En el primer caso la dimensión de altura es mayor por lo que la bóveda elisoidal tendrá un trabajo muy parecido a las bóvedas catenarias. Además, la materialización de las piezas mediante los meridianos hace que estos formen una buena aproximación a arcos catenarios iguales, arriostrados a su vez por los paralelos, y por tanto se consigue una buena distribución de los esfuerzos.



PV
PH

En este segundo caso, la superficie se materializa en forma de rejilla en planta. Los arcos elípticos en ambas direcciones dan buena respuesta a la distribución de los esfuerzos, pero quizá se echa en falta un arriostramiento horizontal de toda la estructura. Tiene un problema añadido en los bordes donde la dimensión de las piezas se incrementa debido a la curvatura de la superficie.



03.01 | IGLESIA DE SAN LORENZO

ARQUITECTO
GUARINO GUARINI

AÑO DE CONSTRUCCIÓN
1668

LOCALIZACIÓN
TURÍN | ITALIA

ELEMENTO ANALIZADO
CÚPULA

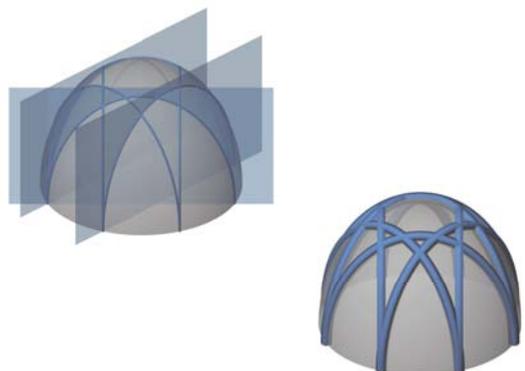
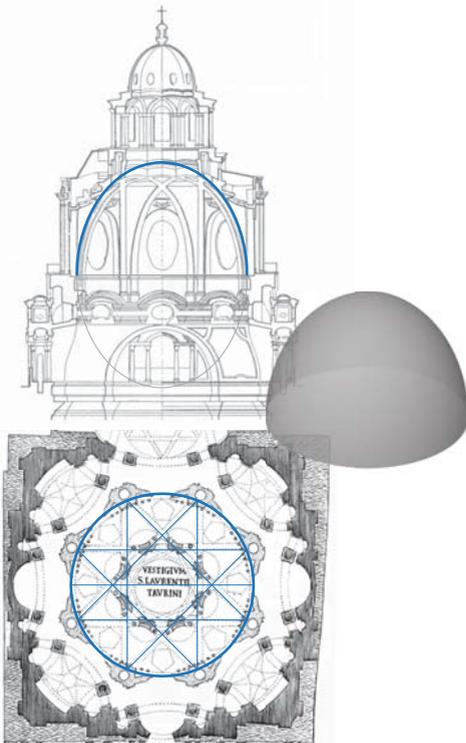
TIPO DE SUPERFICIE
ELIPSOIDE



La iglesia de San Lorenzo de Turín es un ejemplo claro del diseño de un elemento clásico como es la bóveda mediante una geometría poco habitual hasta el barroco.

La cúpula está generada por un elipsoide de revolución al cual se le han practicado 8 secciones excéntricas obteniendo de esta manera los 8 arcos elípticos que conforman la estructura de la misma. Estos arcos a su vez descansan en 8 columnas que forman una planta octogonal.

La planta centralizada (octogonal - cuadrada), en contraposición a la de cruz griega clásica, el uso de la elipse tanto en los ventanales de la cúpula como en los trazados en planta, la excentricidad de las nervaduras de la bóveda formando un cruce octogonal en la clave... hacen de esta iglesia un ejemplo de la innovación formal del barroco.



03.02 | REHABILITACIÓN DE LA CÚPULA DEL REICHSTAG_PARLAMENTO ALEMÁN

ARQUITECTO

NORMAN FOSTER

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1995

LOCALIZACIÓN

BERLÍN | ALEMANIA

ELEMENTO ANALIZADO

CÚPULA

TIPO DE SUPERFICIE

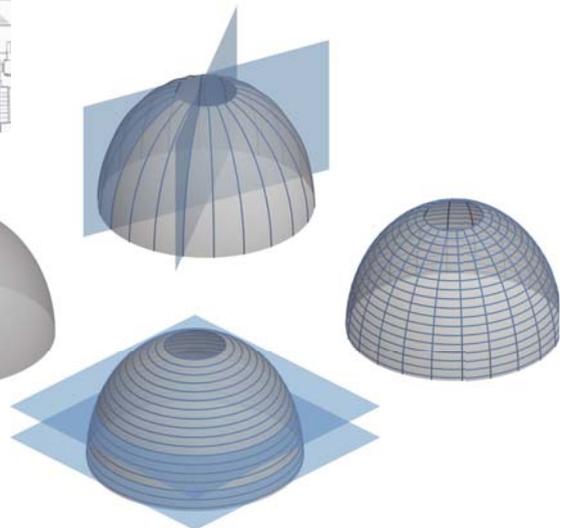
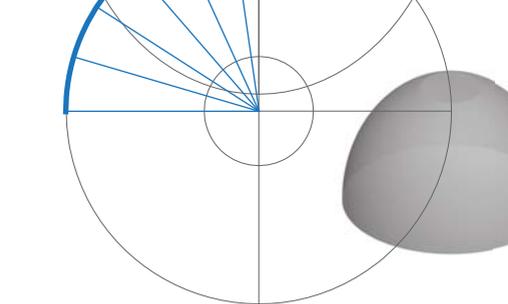
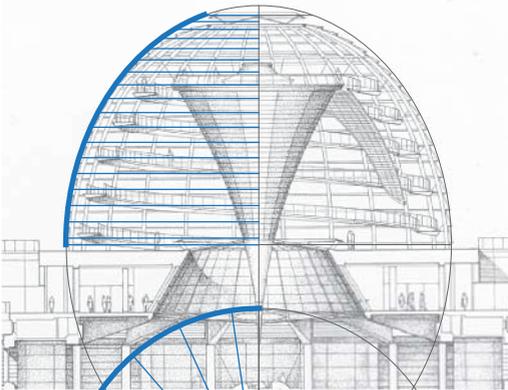
ELIPSOIDE



Tras el incendio sucedido en 1933 en el edificio del parlamento alemán, en los años 90 tiene lugar el concurso para su rehabilitación el cual es ganado por Norman Foster, pero al que se le impone el diseño de una cúpula acristalada, idea extraída de la propuesta de Santiago Calatrava, segunda en el concurso.

La cubierta construida por Foster tiene la geometría de un elipsoide de revolución seccionado por planos paralelos y meridianos para materializar la estructura metálica.

Interiormente posee dos rampas helicoidales para ascender a la parte superior y una porción de hiperboloide hiperbólico acristalado que introduce la luz del sol en la sala del parlamento.



03.03 | HALSTENBEK SPORTSHALLE

ARQUITECTO

ANDRÉ POITIERS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

2005

LOCALIZACIÓN

HALSTENBEK | ALEMANIA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

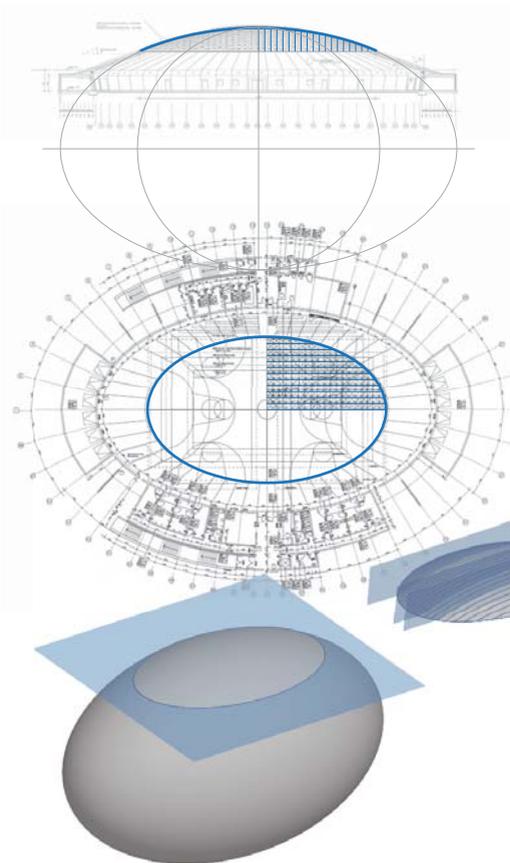
ELIPSOIDE



El pabellón de deportes en Halstenbek, obra del arquitecto Andre Poitiers, es un complejo deportivo enterrado con una cubierta de vidrio singular.

La cubierta tiene la geometría de un casquete de elipsoide de revolución. La estructura metálica corresponde a las secciones producidas por planos paralelos en 2 direcciones a la superficie.

Debido probablemente a un error en el cálculo de la estructura o a un mal diseño por la escasa curvatura de la misma, en 2007 la cubierta se hundió y tuvo que ser demolida. Es este un claro ejemplo de una utilización incorrecta de la geometría en el diseño de un edificio.



04 | CILINDRO

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE REGLADA RADIADA | CUÁDRICA
PARABÓLICA

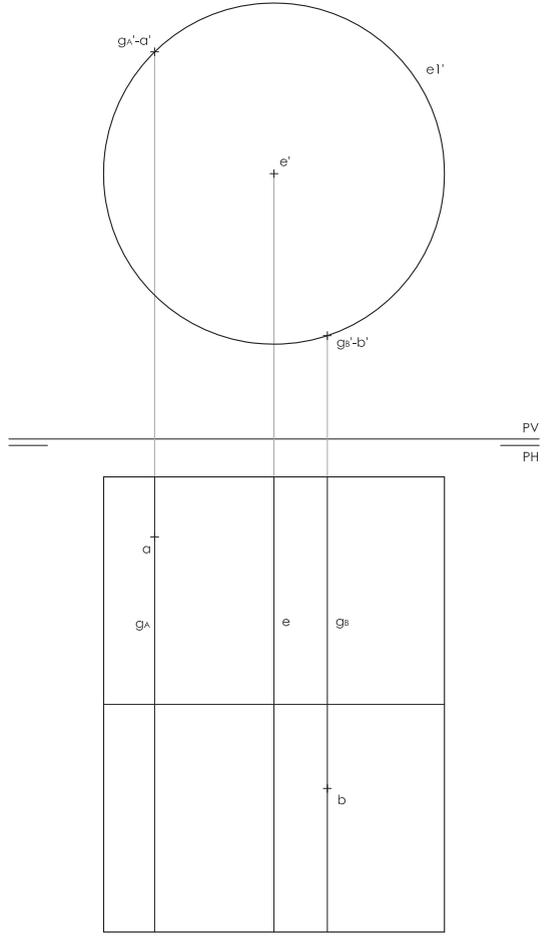
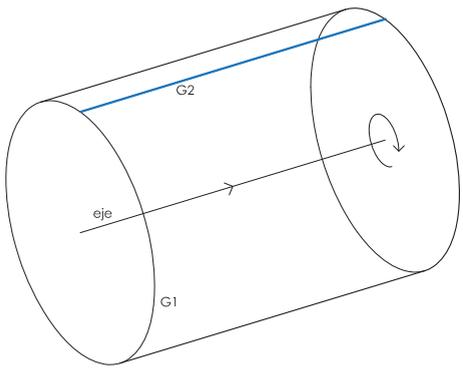
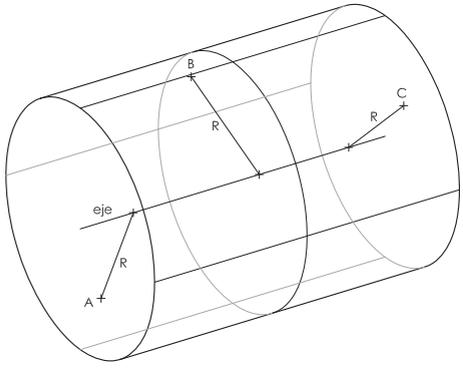
GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR | EJE
ROTACIÓN y RADIACIÓN | RECTA | EJE DEL CILINDRO

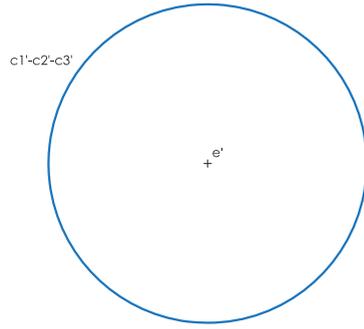
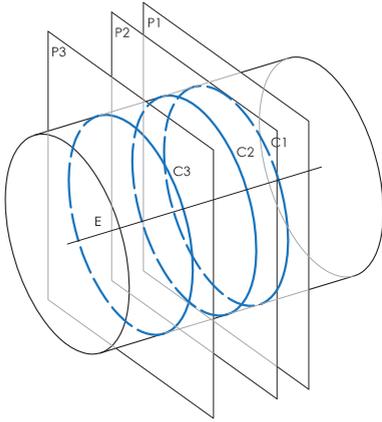
CURVATURA | TIPO
SIMPLE CURVATURA

ECUACIÓN
 $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$

SECCIONES PLANAS
CIRCUNFERENCIAS, ELIPSES y RECTAS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
INFINITOS PLANOS Y EJES DE SIMETRÍA
PUNTOS EQUIDISTANTES DEL EJE
CURVATURA CONSTANTE

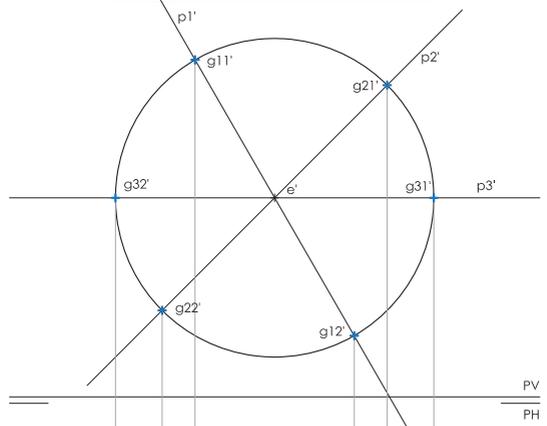
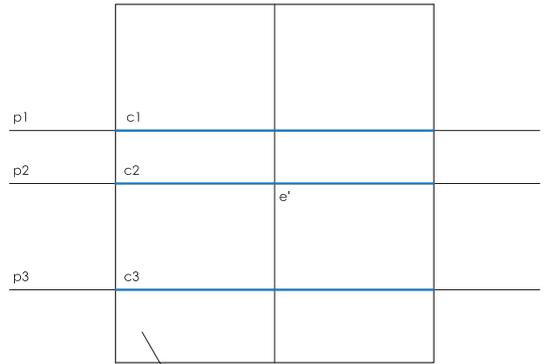
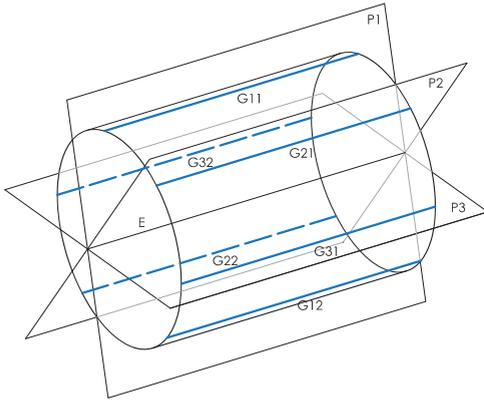




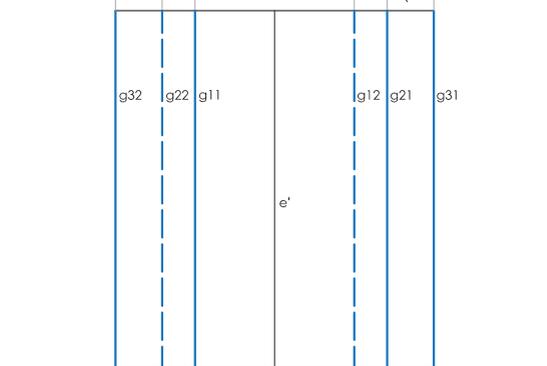
Las secciones planas de un cilindro no siempre son curvas. Nos podemos encontrar con 3 tipos de secciones:

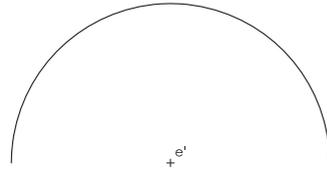
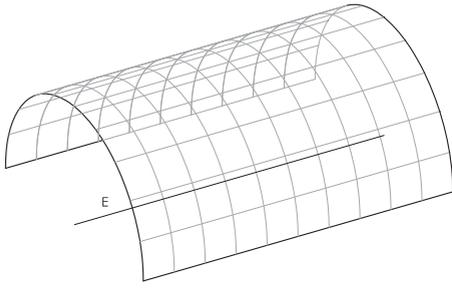
1_ Secciones por planos oblicuos, las cuales generarían ELIPSES. No se muestran en las figuras ya que no son habituales en arquitectura.

2_ Secciones por planos perpendiculares al eje, que generan CIRCUNFERENCIAS. Este caso si que es muy habitual.



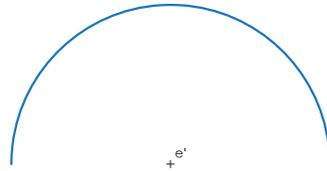
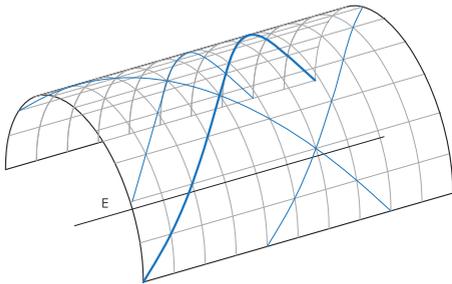
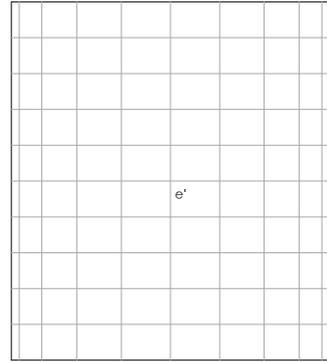
3_Por último tendríamos las secciones producidas por planos radiales que contienen al eje, lo que nos daría RECTAS. Esta es una de las propiedades más importantes de este tipo de superficies, ya que estas rectas son fáciles de ejecutar durante la construcción. Encofrados, cimbras, elementos estructurales... seguirán estas direcciones en muchos de los edificios que veremos a continuación.





PV
PH

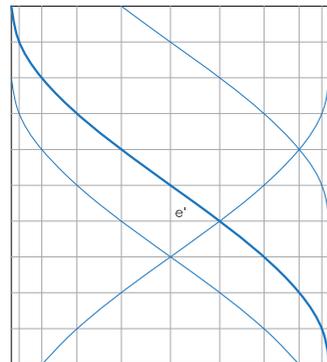
Una de las configuraciones habituales de trabajo con las superficies cilíndricas es la representada en la figura adjunta. Mediante las secciones por planos perpendiculares al eje y las que lo contienen se crea una retícula espacial que facilita tanto la ejecución como el trabajo de la estructura.

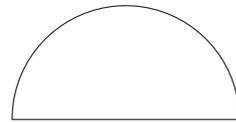
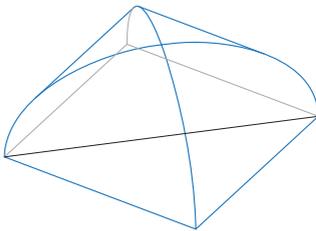
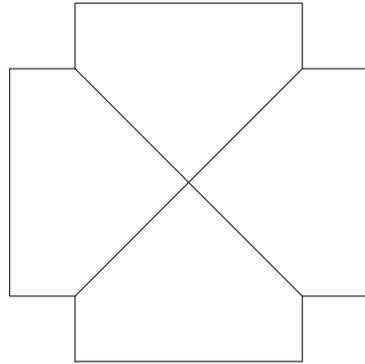
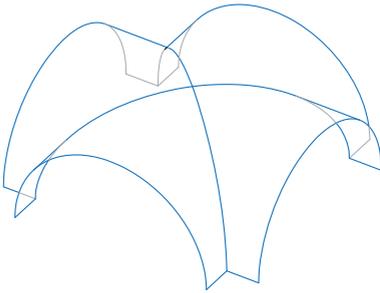
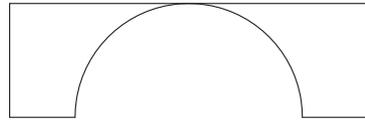
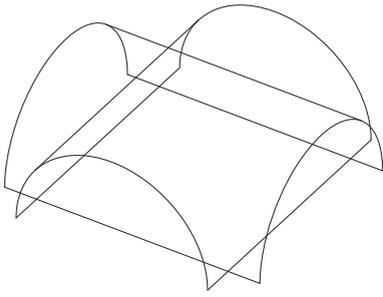


PV
PH

En ocasiones, también se utiliza la denominada HÉLICE CILÍNDRICA, fundamentalmente para arisotrar estructuras de barras cilíndricas, ya que con la configuración anterior los espacios intersticiales entre barras son cuadriláteros y de esta manera se convierten en triángulos.

También hay casos en los que una de las direcciones de secciones anteriores se elimina dejando la estructura con la hélice y las rectas por ejemplo.



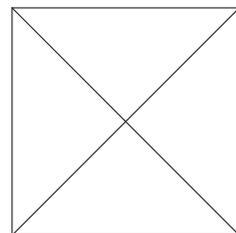


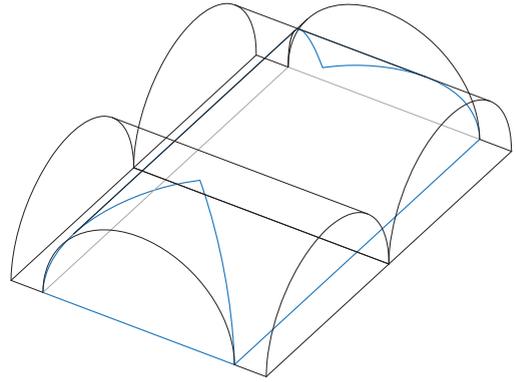
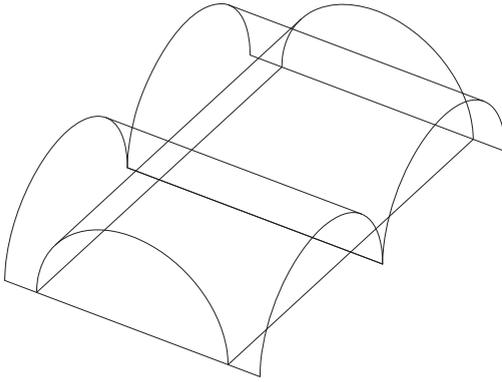
PV
PH

PV
PH

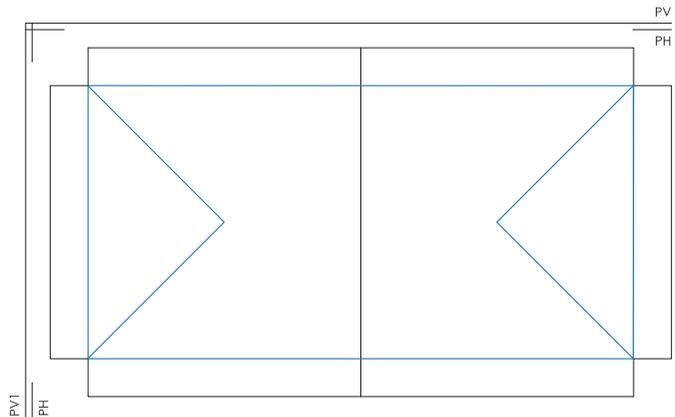
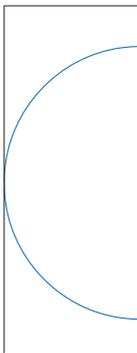
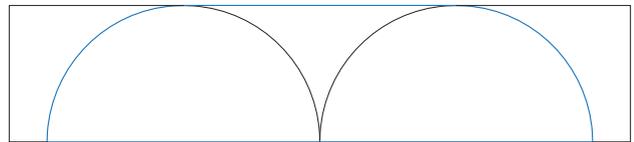
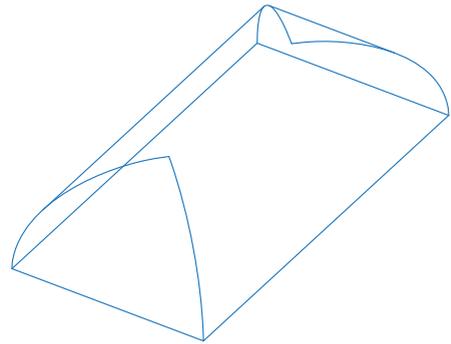
Una de las formas más clásicas de utilización de las superficies cilíndricas es la intersección de dos cilindros del mismo radio pero de direcciones perpendiculares. Es el caso de las BÓVEDAS DE ARISTA, correspondiente a la primera figura, y que nos podemos encontrar en multitud de edificios clásicos y renacentistas, no solo religiosos sino también civiles.

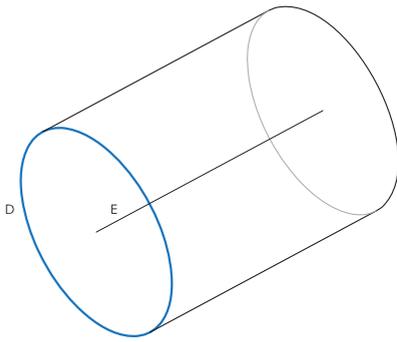
Por otro lado tenemos la BÓVEDA DE RINCÓN DE CLAUSTRO, que se podría entender como el negativo de la anterior.





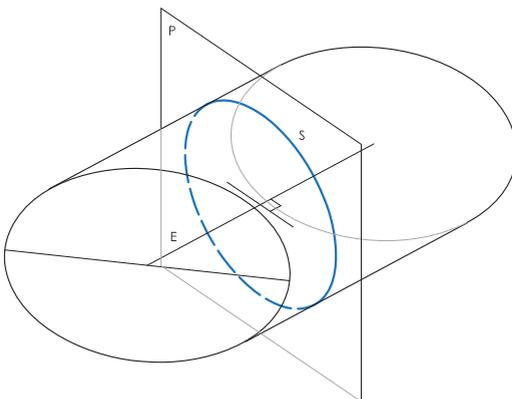
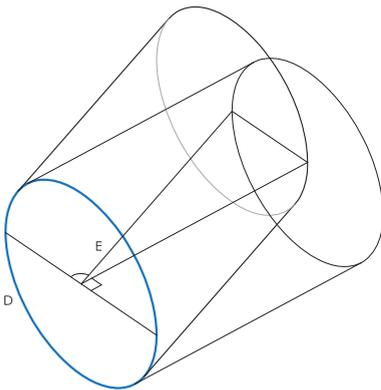
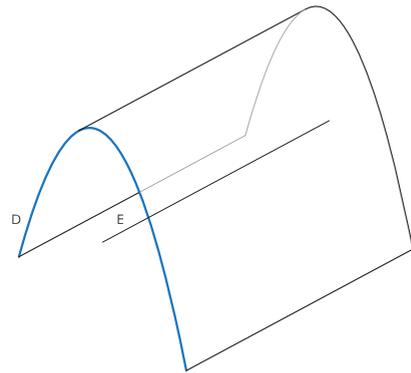
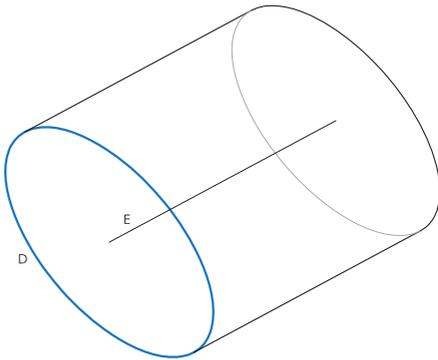
Otro ejemplo de utilización, tanto en arquitectura clásica como contemporánea, es la denominada **BÓVEDA ESQUIFADA**, que está formada por la intersección de 3 cilindros. Para la obtención de la misma cabe destacar que los 3 cilindros han de ser del mismo radio y que sus ejes coincidan a la misma altura, de no ser así las intersecciones entre ellos no resultan como en la figura adjunta.





En las páginas anteriores hemos estado comentando aspectos referentes al cilindro de revolución, pero existen más tipos de cilindros, aunque con menor aplicación en edificación.

Los cilindros se pueden clasificar según 3 criterios, que son compatibles entre sí:



1_Tipo de directriz (o base) - Pueden ser de directriz circular, elíptica, parabólica... estos últimos se han utilizado bastante en bóvedas por su aproximación al arco catenarior.

2_Dirección del eje - Según este criterio pueden ser rectos u oblicuos, dependiendo de si forman 90° o un ángulo diferente con la base.

3_De revolución - Si están generados por la revolución de una generatriz alrededor del eje. La forma de saber si un cilindro es de revolución es practicándole un sección perpendicular al eje. Ésta ha de ser una circunferencia.

04.01 | FRONTÓN DE RECOLETOS

INGENIERO | ARQUITECTO

EDUARDO TORROJA MIRET | SECUNDINO ZUAZO

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1935

LOCALIZACIÓN

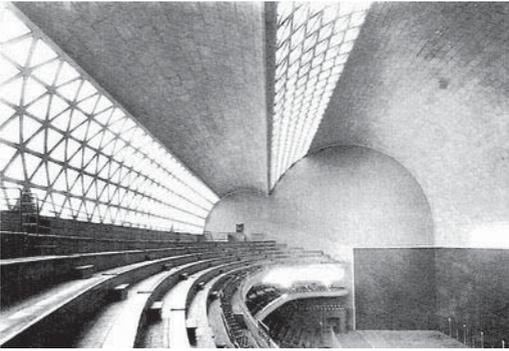
MADRID | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

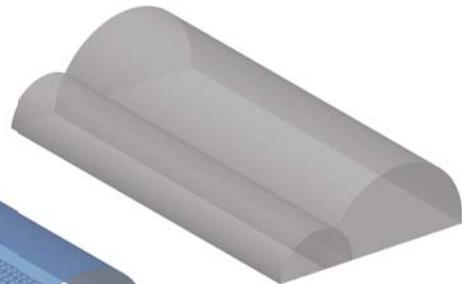
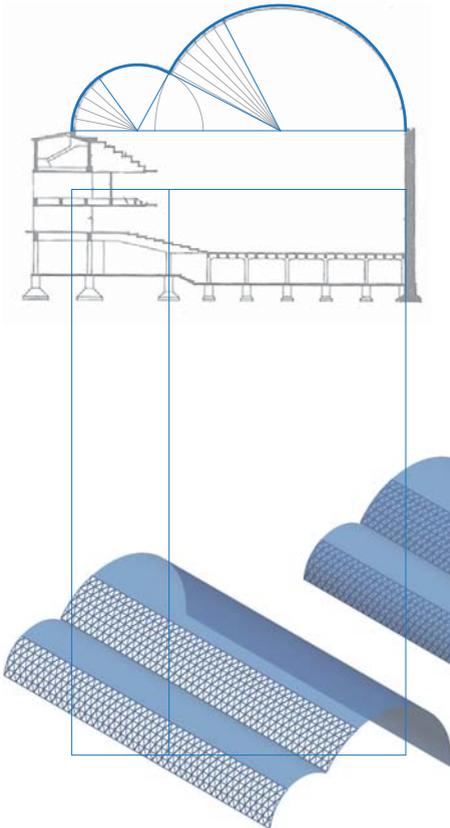
CILINDRO



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 formados por celosías constituidas por triángulos equiláteros de hormigón armado, de 140 cm de lado y 17 x 30 cm de sección.



04.02 | IGLESIA DE SAN FRANCISCO DE ASIS

ARQUITECTO

OSCAR NIEMEYER

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1943

LOCALIZACIÓN

PAMPULHA | BRASIL

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

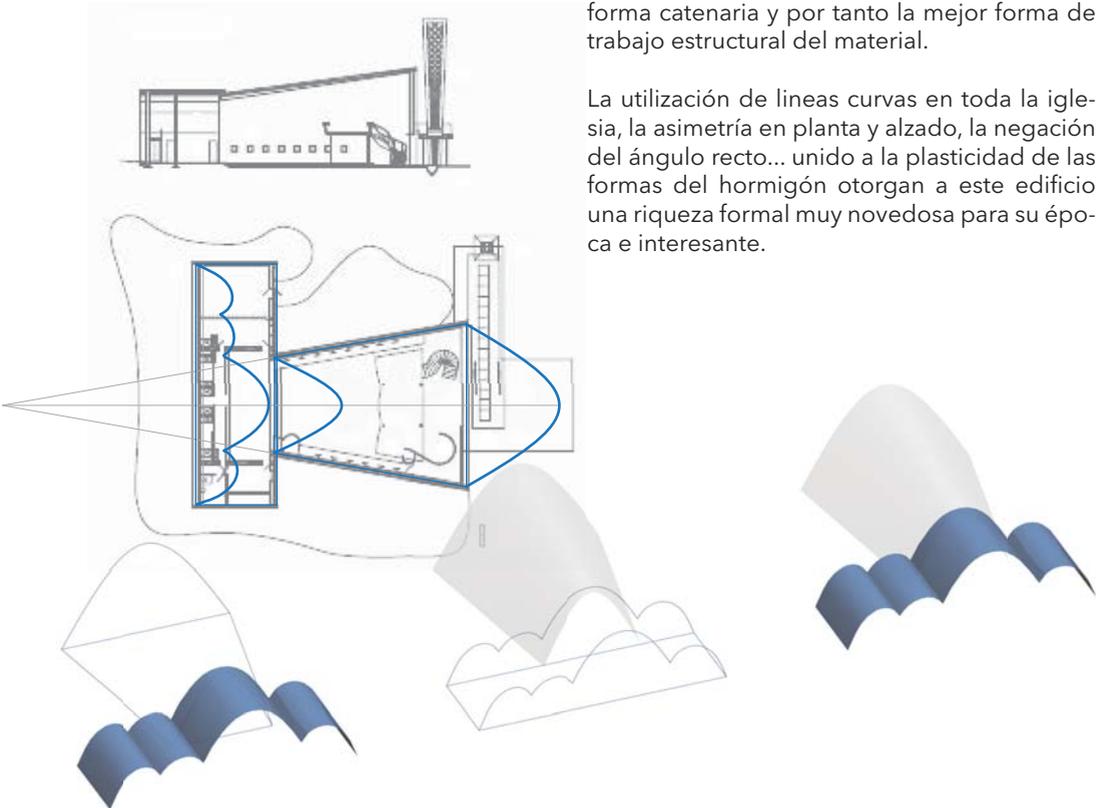
CILINDROS DE BASE PARABÓLICA



Uno de los primeros proyectos del arquitecto brasileño Oscar Niemeyer en los que ya se percibe su interés por romper la monotonía de la arquitectura tradicional y la búsqueda de nuevas formas.

La iglesia está formada por dos cuerpos uno de ellos tronco cónico y otro formado por la composición de 4 cilindros de directriz parabólica. El material utilizado para llevar a cabo su construcción fue el hormigón, lo que justifica la forma parabólica ya que esta aproxima la forma catenaria y por tanto la mejor forma de trabajo estructural del material.

La utilización de líneas curvas en toda la iglesia, la asimetría en planta y alzado, la negación del ángulo recto... unido a la plasticidad de las formas del hormigón otorgan a este edificio una riqueza formal muy novedosa para su época e interesante.



04.03 | VIVIENDA-TALLER DE JOAN MIRÓ

ARQUITECTO

JOSEP LLUIS SERT

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1955

LOCALIZACIÓN

MALLORCA | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

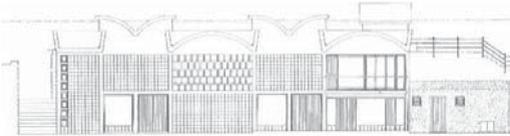
TIPO DE SUPERFICIE

CILINDRO

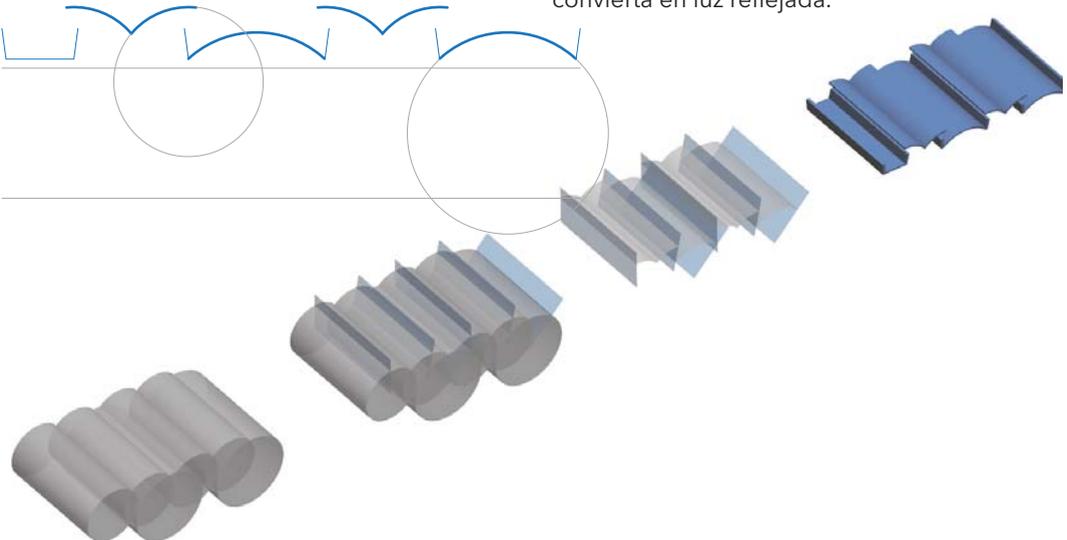


En la cubierta que Josep Lluís Sert realizó para la vivienda taller de Joan Miró en Mallorca, nos encontramos con un hábil juego compositivo mediante láminas cilíndricas.

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 este proyecto. Para evitar la luz directa, que sobre todo a determinadas horas del día puede ser demasiado potente, Sert la matiza mediante dos procedimientos: un sistema de lamas horizontales, 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.



04.04 | PALAU DE LA MÚSICA

ARQUITECTO

JOSÉ MARÍA GARCÍA PAREDES

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1987

LOCALIZACIÓN

VALENCIA | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA | VOLUMEN EXTERIOR

TIPO DE SUPERFICIE

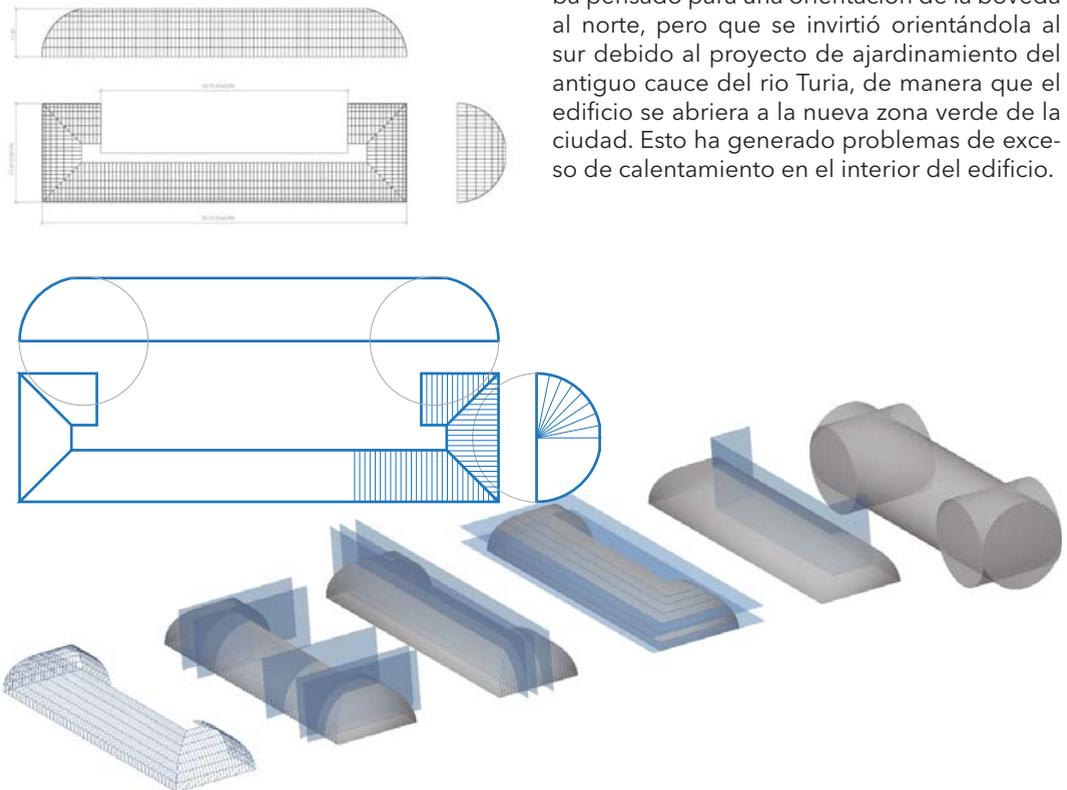
CILINDRO | BÓVEDA ESQUIFADA



La geometría escogida por José María García Paredes para diseñar el hall del Palau de la Música de Valencia es la bóveda esquifada.

Con el objetivo de introducir la mayor cantidad de luz en el interior del edificio, materializa esta bóveda con estructura metálica siguiendo las secciones producidas por planos paralelos y perpendiculares a los ejes de los cilindros, que completa con piezas de vidrio de forma rectangular.

Como anécdota comentar que el edificio estaba pensado para una orientación de la bóveda al norte, pero que se invirtió orientándola al sur debido al proyecto de ajardinamiento del antiguo cauce del río Turia, de manera que el edificio se abriera a la nueva zona verde de la ciudad. Esto ha generado problemas de exceso de calentamiento en el interior del edificio.



04.05 | BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE DERECHO DE CAMBRIDGE

ARQUITECTO

NORMAN FOSTER

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1998

LOCALIZACIÓN

CAMBRIDGE | INGLATERRA

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN EXTERIOR BIBLIOTECA

TIPO DE SUPERFICIE

CILINDRO | HÉLICE CILÍNDRICA

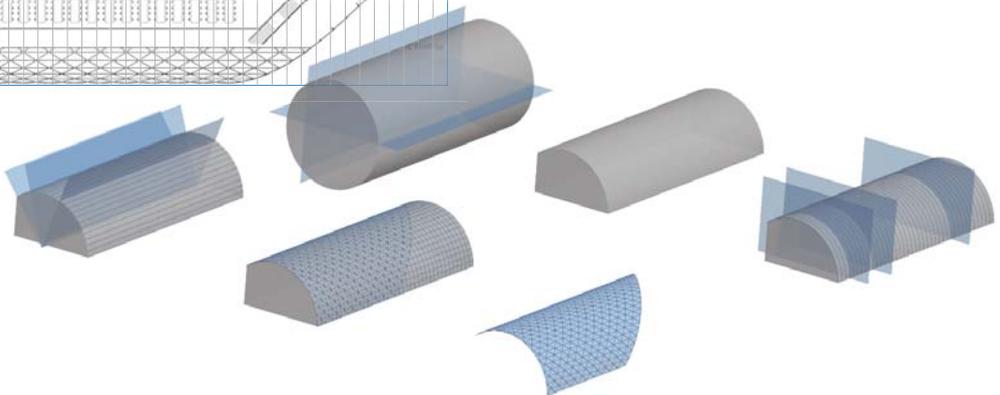
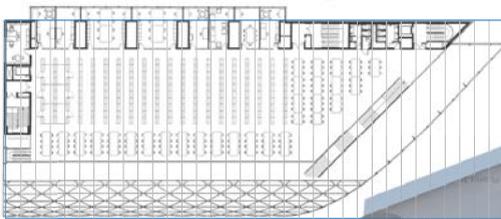
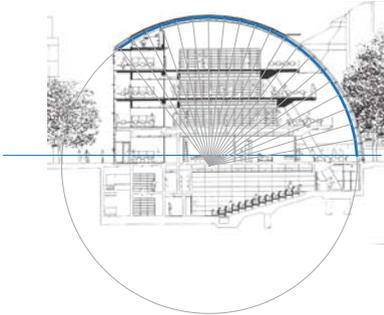


El cerramiento de la biblioteca de la facultad de derecho de Cambridge diseñada por Norman Foster, está diseñado a partir de la geometría de un cilindro de revolución.

La geometría del cilindro no es completa sino que se ha optado por un sector cilíndrico de aproximadamente 120° y que sirve tanto de cerramiento como de cubierta de todo el edificio, creando un espacio al que vuelcan las zonas de circulación de las diferentes plantas del edificio.

Tal y como se puede observar en las figuras adjuntas, es una estructura metálica que sigue las direcciones de las generatrices del cilindro y las hélices cilíndricas apoyadas en él. De la estructura se han eliminado las secciones circunferencia producidas por planos perpendiculares al eje del cilindro ya que no son necesarias para conseguir paños de vidrio triangulares.

Es interesante la finalización del edificio en uno de sus extremos siguiendo la forma de la hélice cilíndrica.



04.06 | PORTCULLIS HOUSE

ARQUITECTO

MICHAEL HOPKINS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

2001

LOCALIZACIÓN

LONDRES | INGLATERRA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA DEL PATIO

TIPO DE SUPERFICIE

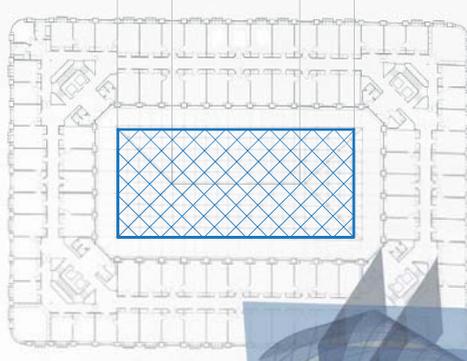
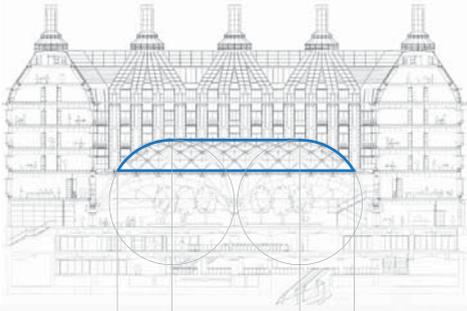
CILINDRO | BÓVEDA ESQUIFADA



En la cubrición del patio del nuevo parlamento inglés, el conocido como "Portcullis House", nos encontramos con otra aplicación con criterios actuales de la bóveda esquistada clásica.

Para este caso la estructura que define la bóveda se ha realizado haciendo coincidir las barras con las secciones que le provocan planos a 45° con el eje a los cilindros que la conforman.

En la planta se puede observar como las barras siguen estas direcciones paralelas formando una cuadrícula perfecta. Cabe destacar que las intersecciones entre cilindros coinciden con estas direcciones de manera que en planta no se perciben.



04.07 | PALAU DE CONGRESSOS

ARQUITECTO

NORMAN FOSTER + PARTNERS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1998

LOCALIZACIÓN

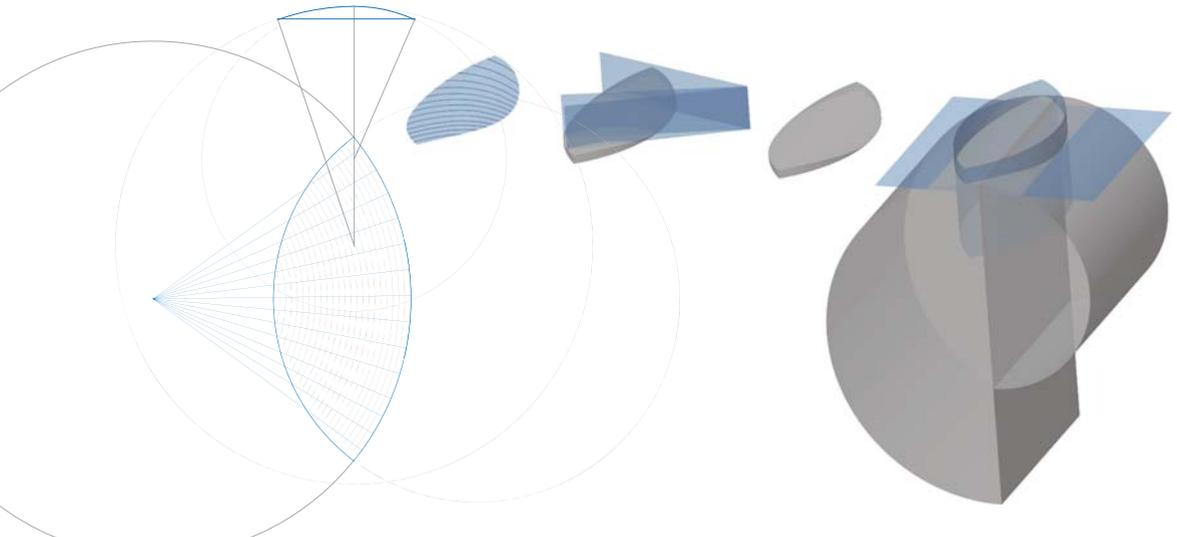
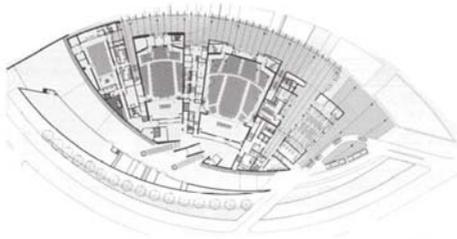
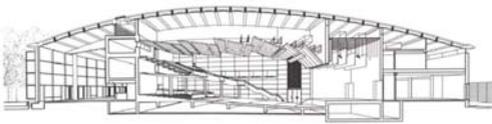
VALENCIA | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

CILINDROS



En el diseño de la cubierta del Palau de Congressos de Valencia, Norman Foster realiza una singular composición de cilindros que da como resultado una forma parecida a la hoja de un árbol.

La geometría de la cubierta está compuesta por dos cilindros tangentes en la parte superior de la misma. Ambos cilindros están limitados por otros dos cilindros de generatrices perpendiculares a los anteriores, lo que en planta le da la forma de elipse apuntada.

La forma obtenida por esta composición hace de la cubierta un elemento ligero a pesar de sus grandes dimensiones.

La estructura prefabricada de hormigón se organiza colocando las vigas de forma radial respecto de uno de los cilindros verticales.

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
 SUPERFICIE REGLADA RADIADA | CUÁDRICA
 PARABÓLICA

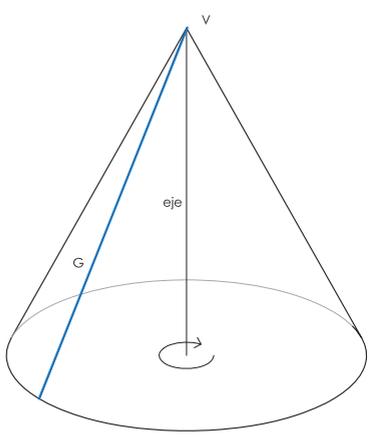
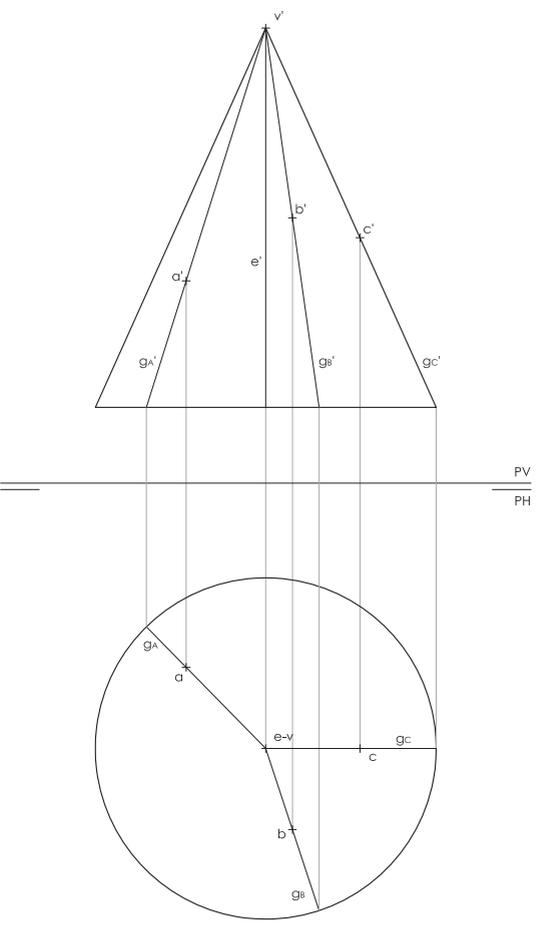
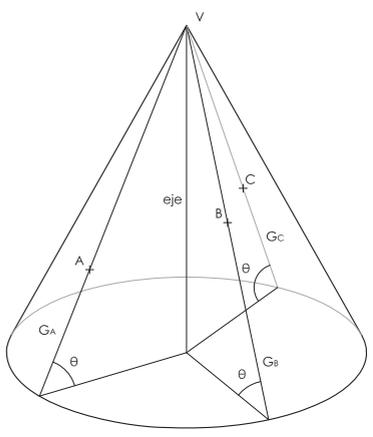
GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR | EJE
 ROTACIÓN y RADIACIÓN | RECTA | EJE DEL CONO

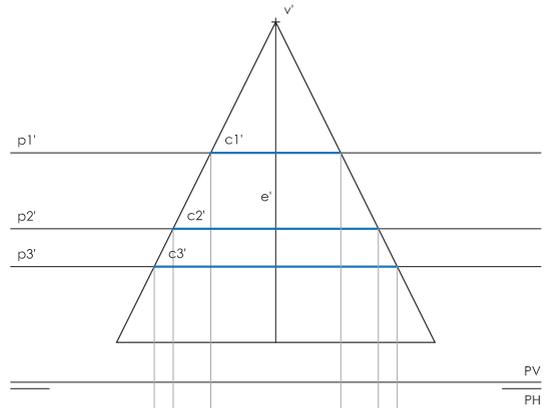
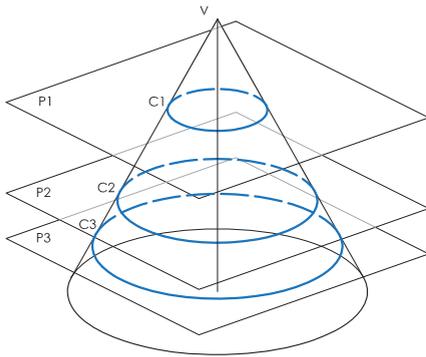
CURVATURA | TIPO
 SIMPLE CURVATURA

ECUACIÓN
 $x^2/a^2 + y^2/b^2 - z^2/c^2 = 0$

SECCIONES PLANAS
 CIRCUNFERENCIAS, ELIPSES, PARÁBOLAS, HI-
 PÉRBOLAS Y RECTAS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
 INFINITOS PLANOS DE SIMETRÍA
 ÁNGULO CONSTANTE: GENERATRICES-PLANO DIRECTRIZ
 CURVATURA CONSTANTE

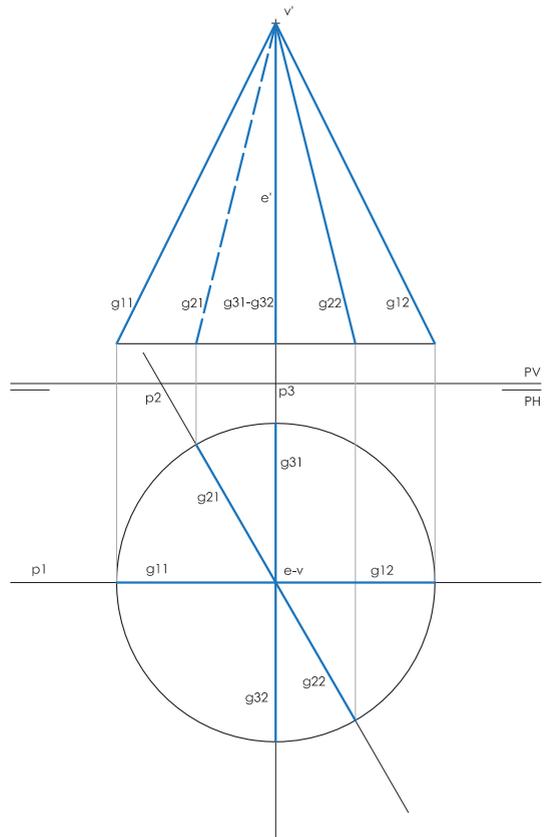
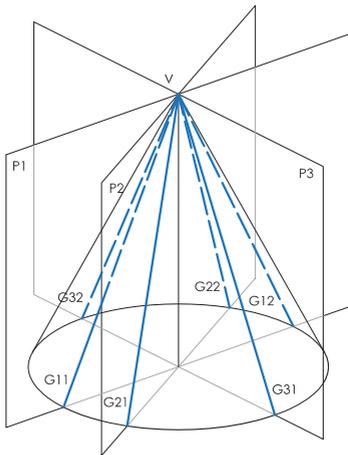
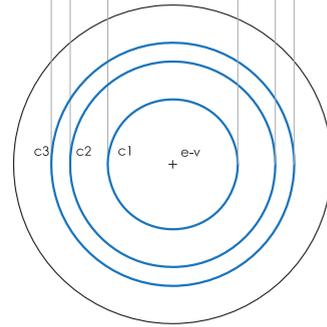




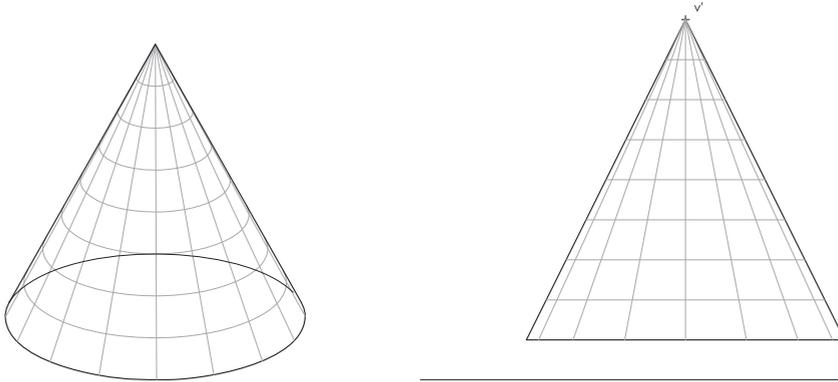
Las secciones planas de un cono no siempre son curvas. Nos podemos encontrar con 5 tipos de secciones:

1_Secciones por planos perpendiculares al eje, que generan CIRCUNFERENCIAS.

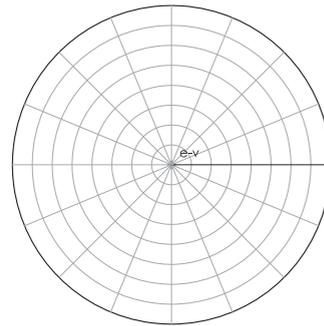
2_Secciones por planos oblicuos, las cuales dependiendo del ángulo respecto al eje generarían ELIPSES, PARÁBOLA E HIPÉRBOLAS. No se muestran en las figuras ya que no son habituales en arquitectura.



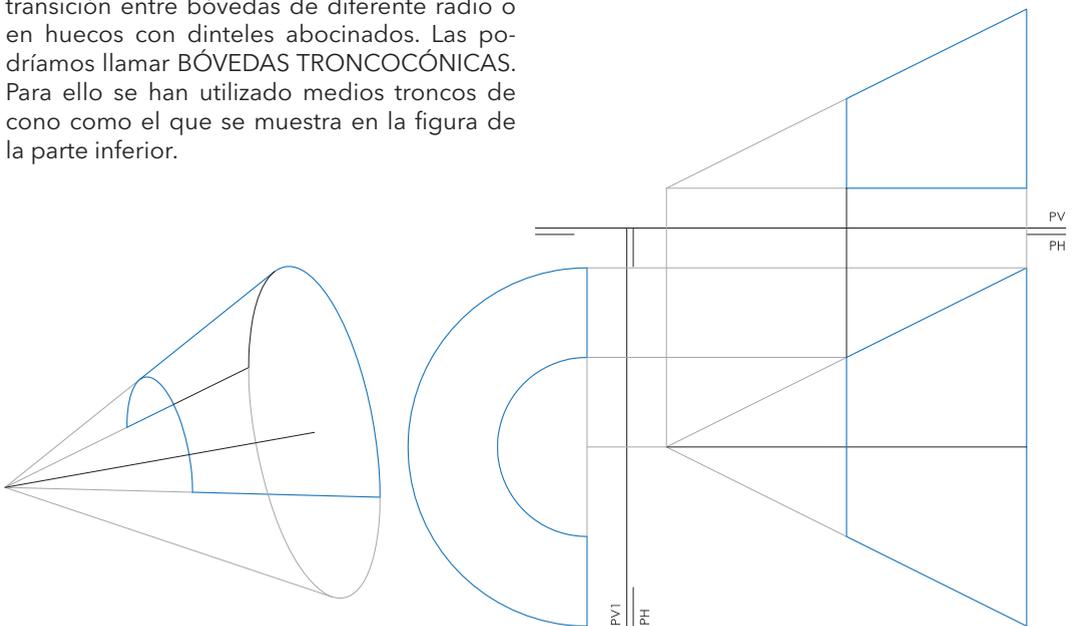
3_Secciones producidas por planos radiales que contienen al eje, lo que nos daría RECTAS. Esta es una de las propiedades más importantes de este tipo de superficies, ya que estas rectas son fáciles de ejecutar durante la construcción. Encofrados, cimbras, elementos estructurales... seguirán estas direcciones en muchos de los edificios que veremos a continuación.

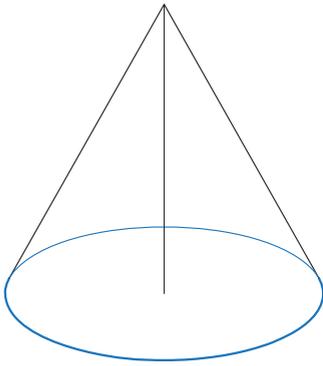


Una de las configuraciones habituales de trabajo con las superficies cónicas es la representada en la figura adjunta. Mediante las secciones por planos perpendiculares al eje y las que los contienen se crea una retícula espacial que facilita tanto la ejecución como el trabajo de la estructura.



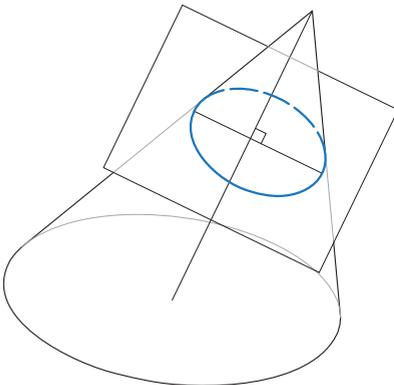
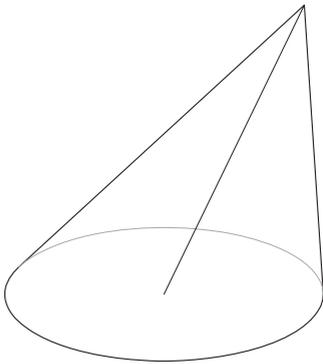
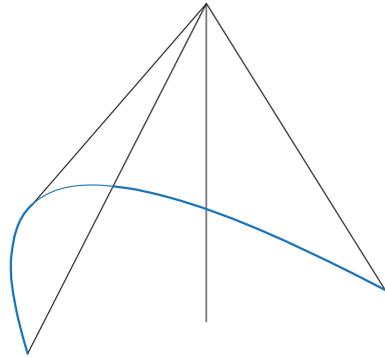
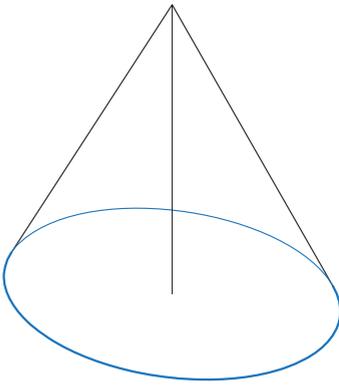
Además de esta configuración, las superficies cónicas han sido utilizadas como cubiertas de transición entre bóvedas de diferente radio o en huecos con dinteles abocinados. Las podríamos llamar **BÓVEDAS TRONCOCÓNICAS**. Para ello se han utilizado medios troncos de cono como el que se muestra en la figura de la parte inferior.





En las páginas anteriores hemos estado comentando aspectos referentes al cono de revolución, pero existen más tipos de conos, aunque con menor aplicación en edificación.

Los conos se pueden clasificar según 3 criterios, que son compatibles entre sí:



1_Tipo de directriz (o base) - Pueden ser de directriz circular, elíptica, parabólica...

2_Dirección del eje - Según este criterio pueden ser rectos u oblicuos, dependiendo de si forman 90° o un ángulo diferente con la base.

3_De revolución - Si están generados por la revolución de una generatriz alrededor del eje. La forma de saber si un cono es de revolución es practicándole un sección perpendicular al eje. Ésta ha de ser una circunferencia.

05.01 | AUDITORIO DE CIENCIAS QUÍMICAS

ARQUITECTO

FÉLIX CANDELA

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1952

LOCALIZACIÓN

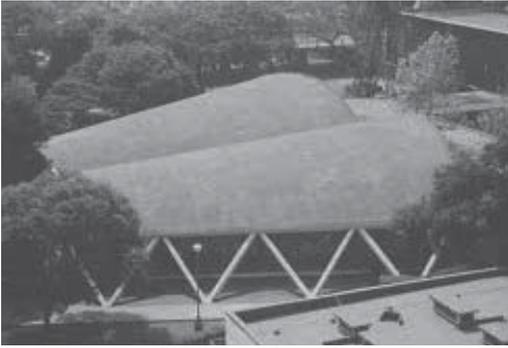
MÉXICO DF | MÉXICO

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

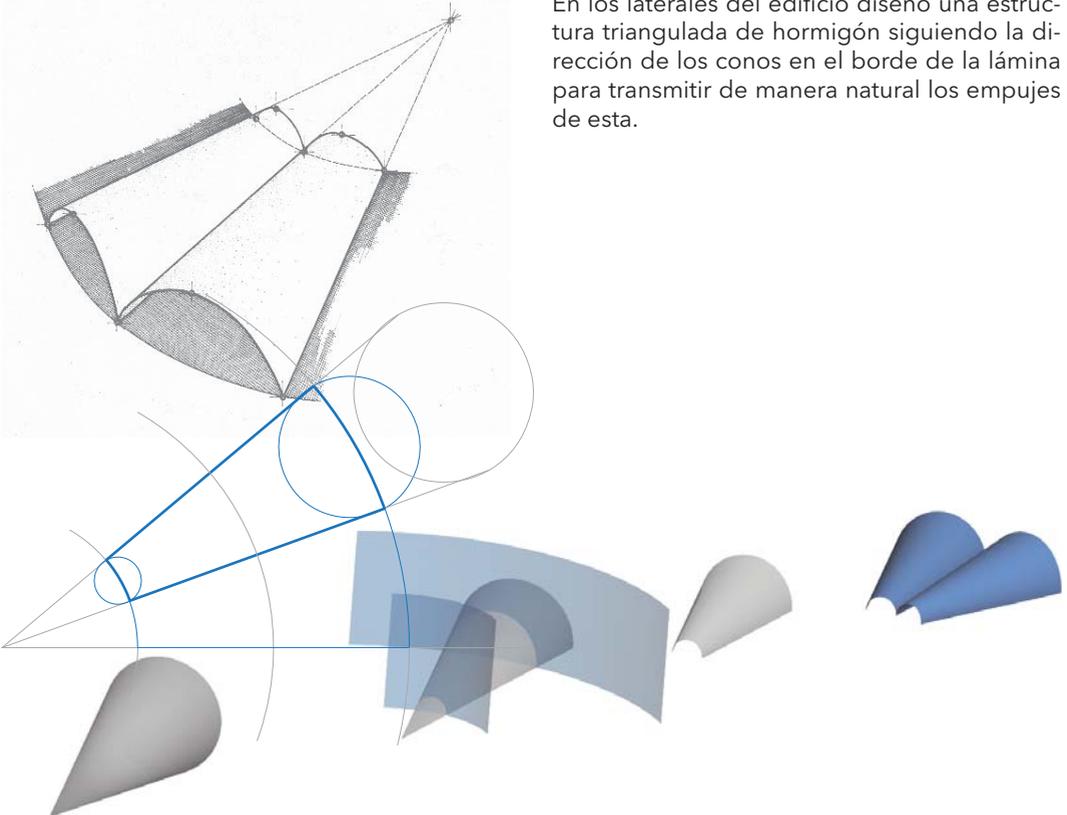
CONOS



Félix Candela es uno de los arquitectos que ha experimentado con las formas geométricas aprovechando su curvatura para diseñar edificios de hormigón de poco espesor.

En el auditorio de ciencias químicas de la universidad de México DF utilizó la geometría del cono para cubrir el gran espacio libre del interior. Para ello utilizó dos porciones de tronco de cono colocadas de forma radial compartiendo el vértice.

En los laterales del edificio diseñó una estructura triangulada de hormigón siguiendo la dirección de los conos en el borde de la lámina para transmitir de manera natural los empujes de esta.



05.02 | INVERNADERO LUCILE HALSELL

ARQUITECTO

EMILIO AMBASZ

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1988

LOCALIZACIÓN

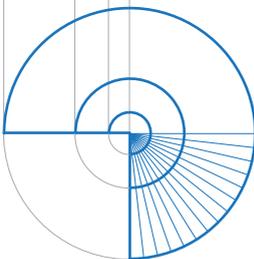
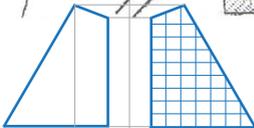
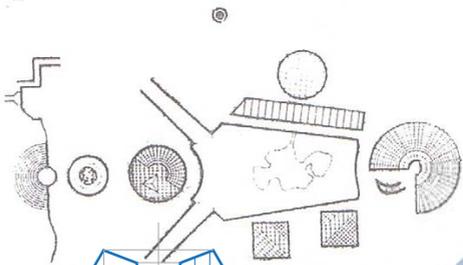
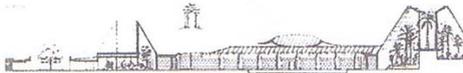
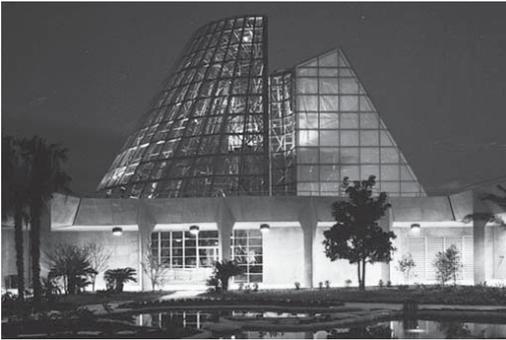
TEXAS | EEUU

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN EXTERIOR

TIPO DE SUPERFICIE

CONO

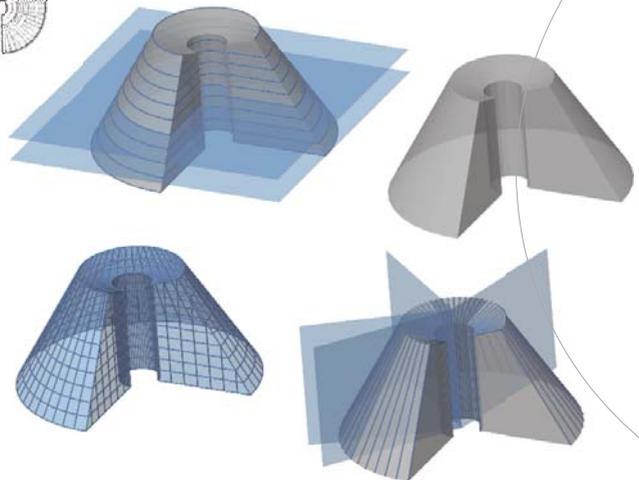


La composición del edificio central del complejo Lucile Halsell esta resuelta con una geometría pura de un cono.

Este cono se modela mediante la intersección de dos planos que permiten restarle un cuarto de su volumen, un cilindro interior que genera un patio y un cono invertido en la parte superior.

La estructura metálica del edificio se materializa mediante las secciones rectas y circulares del cono base, cubriendo los paños intersticiales con piezas trapezoidales de vidrio.

Es un ejemplo muy directo de la utilización del cono.



05.03 | GANGZHOU SPORTS COMPLEX

ARQUITECTO

ADP INGÈNERIE

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

2001

LOCALIZACIÓN

GANGZHOU | CHINA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

CONOS

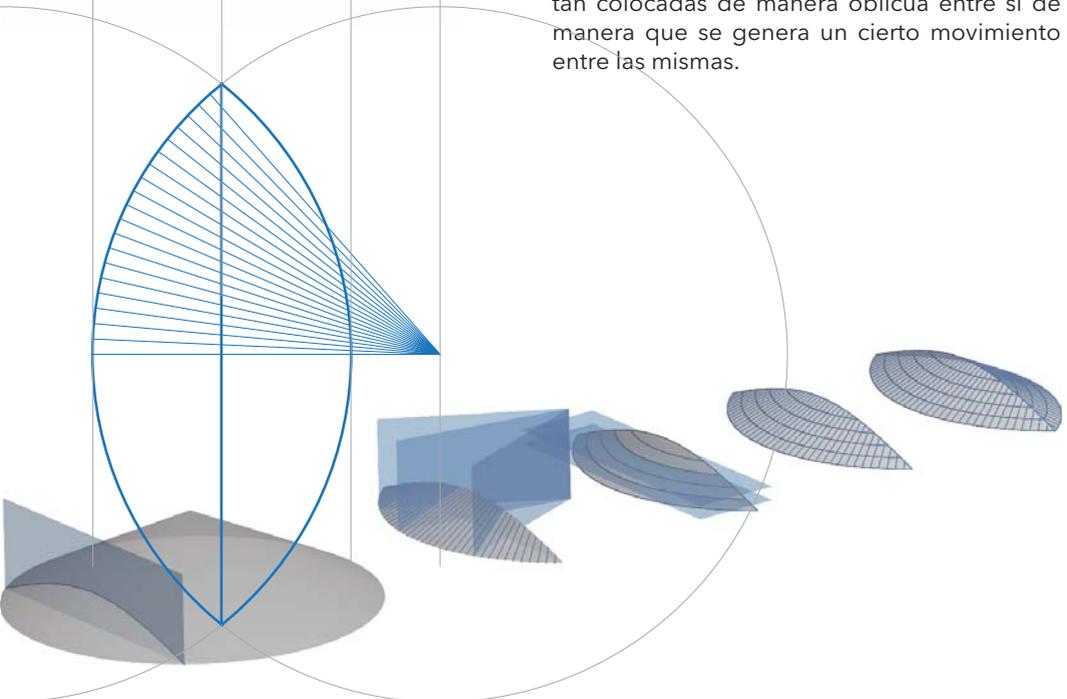


El complejo deportivo de Gangzhou en China está compuesto por diversas pistas deportivas cubiertas por tres estructuras diseñadas a partir de la composición de dos conos.

La geometría de estas cubiertas es difícil de comprender a primera vista. El diseño de las mismas corresponde a dos faldones de cono simétricos. En la sección podemos observar la inclinación de las generatrices respecto del plano horizontal y en planta la directriz de los conos.

La estructura metálica sigue las generatrices rectas de la superficie y las secciones circunferencia.

Tal y como se ve en la imagen, las cubiertas están colocadas de manera oblicua entre si de manera que se genera un cierto movimiento entre las mismas.



CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA

SUPERFICIE REGLADA DE PLANO DIRECTOR

GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR | DIRECTRICES

PLANO DIRECTOR | RECTA | RECTA y CIRCUNFERENCIA

CURVATURA | TIPO

SIMPLE CURVATURA

SECCIONES PLANAS

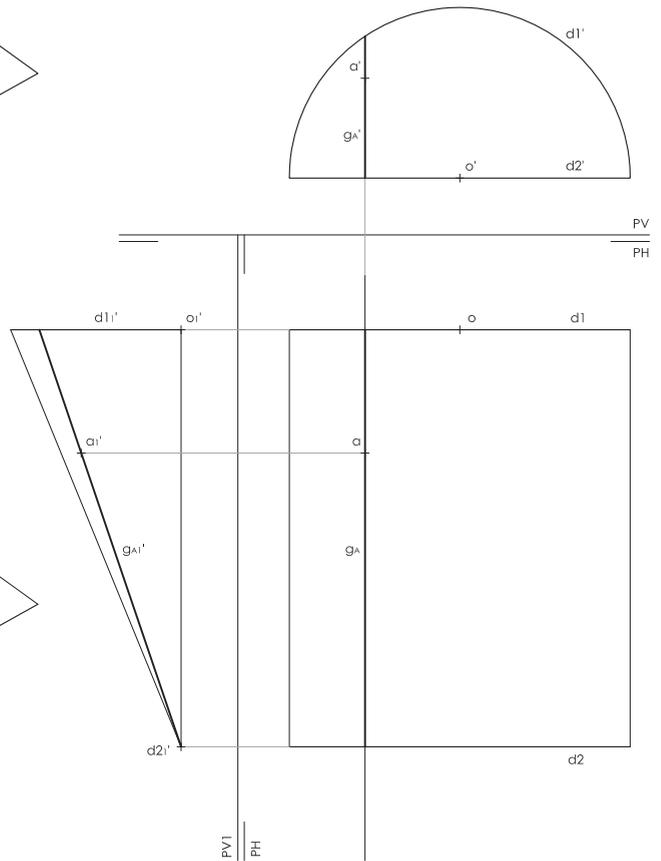
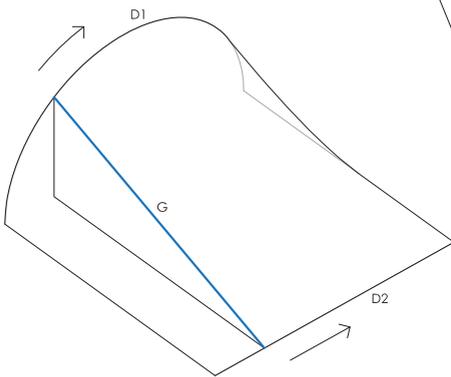
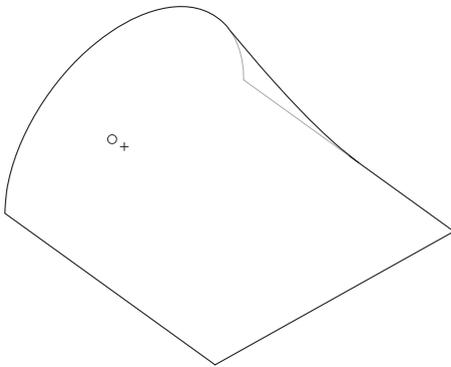
CIRCUNFERENCIAS

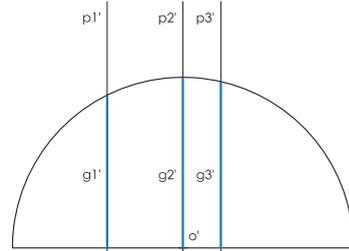
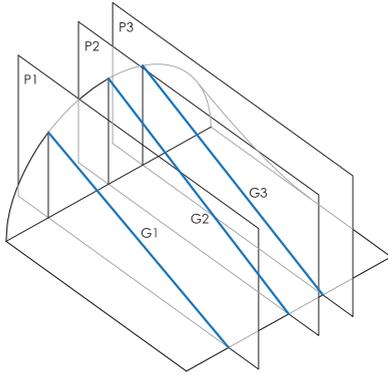
PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

GENERADO POR RECTAS = GENERATRICES

LAS GENERATRICES SE CRUZAN

CURVATURA VARIABLE - CURVATURA 0 EN DIRECTRIZ RECTA

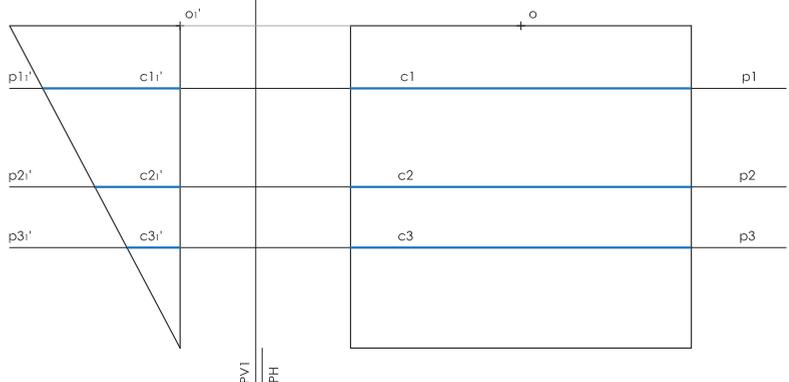
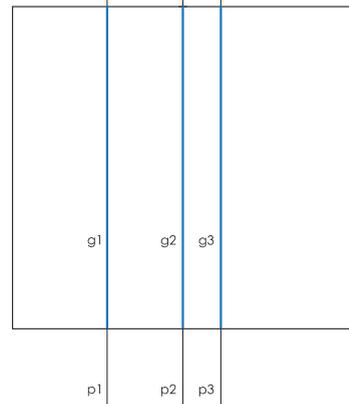
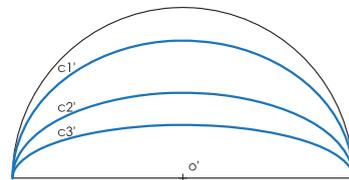
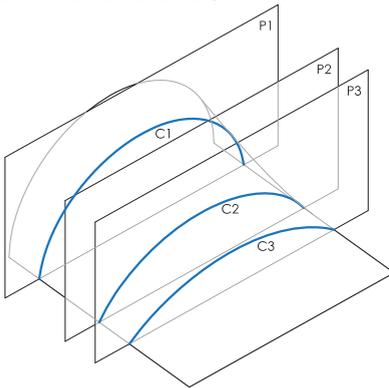


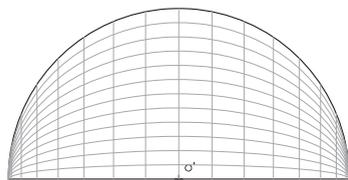
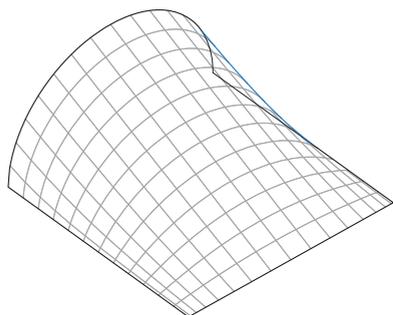


Las secciones planas de un conoide no siempre son curvas. Nos podemos encontrar fundamentalmente con 2 tipos de secciones:

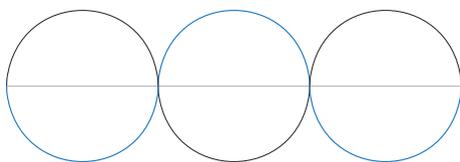
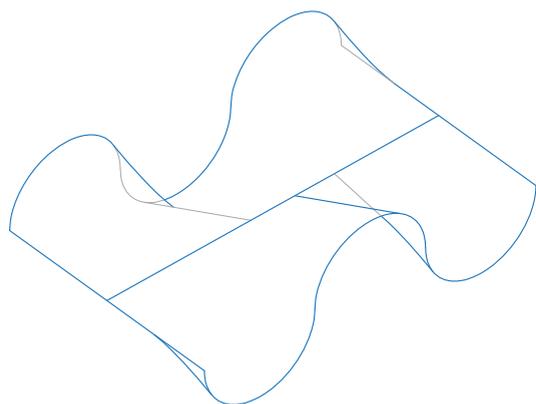
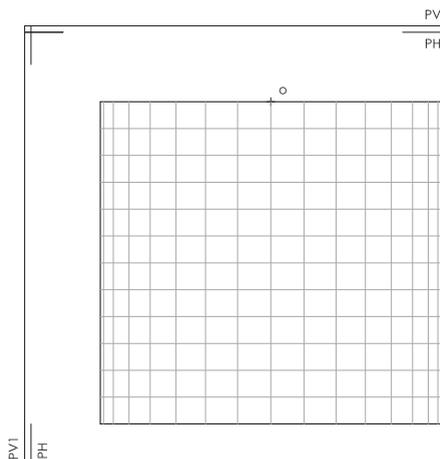
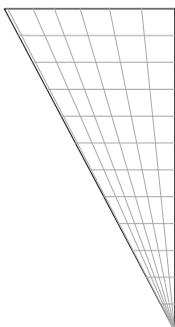
1_Secciones por planos perpendiculares a la directriz recta, que generan RECTAS. Estas se corresponden con las generatrices de la superficie.

2_Secciones por planos paralelos a las dos directrices, las cuales dependiendo de la distancia a estas generan ELIPSES que van desde la circunferencia reduciendo la magnitud de su eje menor hasta hacerlo 0.

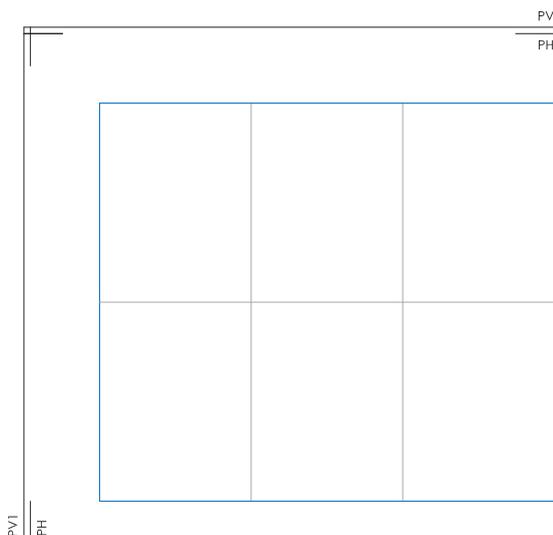
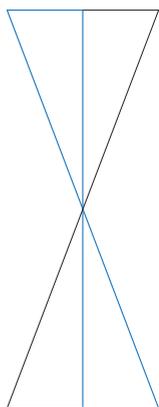




En la figura adjunta podemos apreciar una combinación de las secciones descritas anteriormente. Esta sería la manera de modelizar una estructura de este tipo para calcularla con los programas informáticos de elementos finitos.



La forma más habitual de utilización de los conoides en arquitectura ha sido la de combinación de varios de ellos opuestos. Con esto se consigue una correcta evacuación de las aguas en cubiertas y un aumento de la inercia en muros.



06.01 | ESCUELAS DE LA SAGRADA FAMILIA

FAMILIA

ARQUITECTO

ANTONI GAUDÍ

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1909

LOCALIZACIÓN

BARCELONA | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

CONOIDE

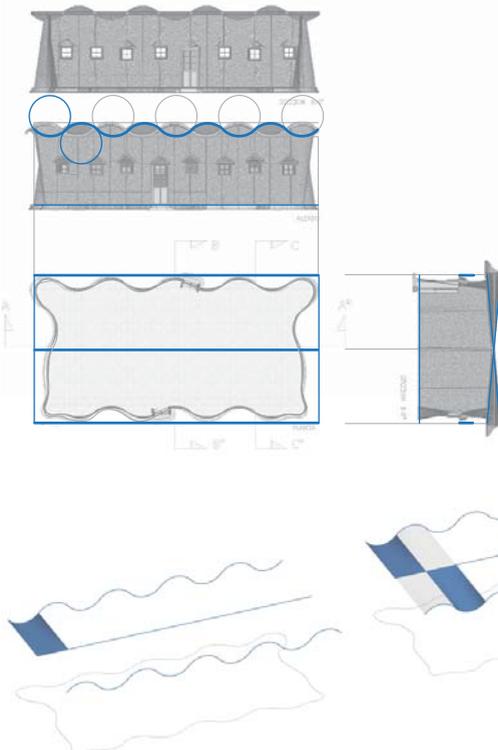


El edificio de las Escuelas de la Sagrada Familia de Gaudí pasa desapercibido al estar situado junto al templo, pero no por ello deja de ser interesante. De hecho, Le Corbusier, tras su visita a Barcelona, fue una de las construcciones que dibujó en su cuaderno de viaje.

Para la cubierta de este singular edificio, Gaudí utilizó una combinación de conoides contrapuestos apoyados en los muros laterales, también conoides, y en una viga central recta y metálica. En el trasdós de la cubierta se pueden apreciar las generatrices de la superficie materializadas en una serie de tablones de madera apoyados en la viga central.

La superficie de los conoides se realizó con tres capas de baldosa catalana, tal y como se utilizaban en las bóvedas tabicadas de la época.

El edificio ha sufrido múltiples reparaciones y traslados, pero la esencia y la geometría de la cubierta sigue apreciándose perfectamente.



06.02 | IGLESIA DEL CRISTO OBRERO

ARQUITECTO

ELADIO DIESTE

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1952

LOCALIZACIÓN

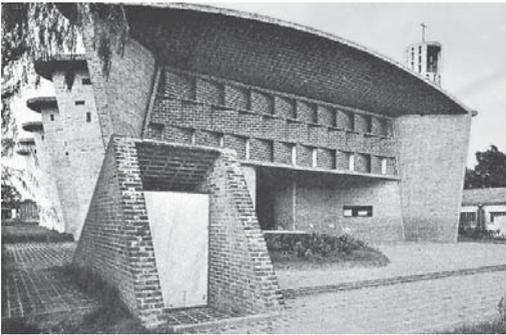
ATLÁNTIDA | URUGUAY

ELEMENTO ANALIZADO

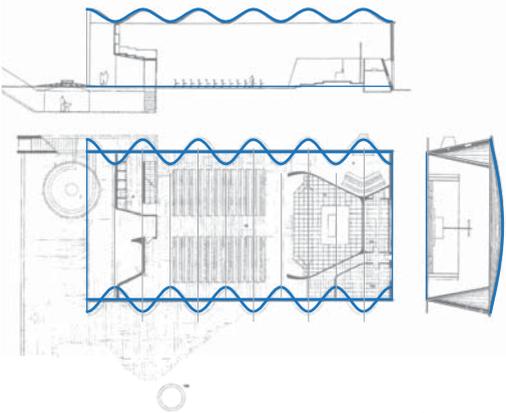
PAREDES LATERALES | CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

CONOIDE

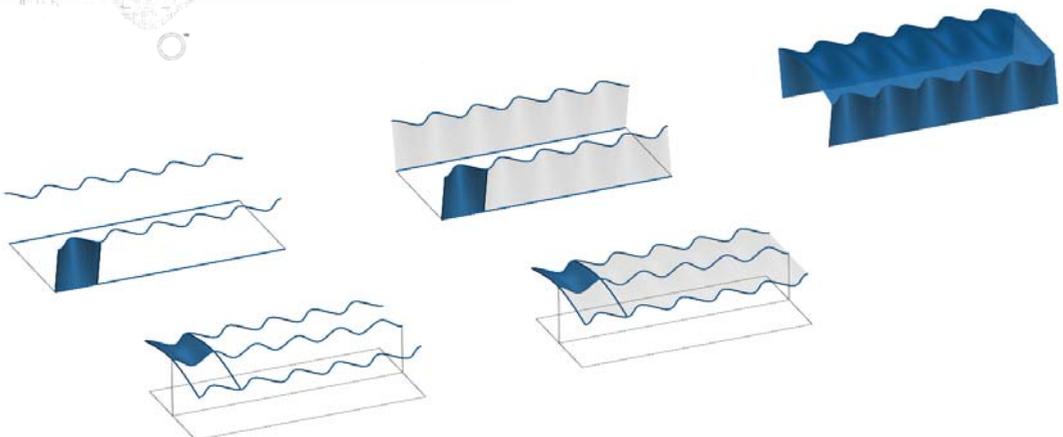


El arquitecto uruguayo Eladio Dieste es uno de los máximos exponentes de la técnica constructiva denominada "cerámica armada" y que consiste en realizar todo tipo de edificios con superficies geométricas muy diversas con ladrillos y armaduras metálicas. Para conseguir una mayor resistencia en determinados elementos, Dieste se apoya en la geometría para conseguir una mayor inercia de las fábricas de ladrillo aprovechando la curvatura que le ofrecen determinadas superficies.



En la Iglesia del Cristo Obrero, también conocida como la "Iglesia de la Atlantida", utiliza la geometría del conoide tanto en los muros de cerramiento estructurales como en la cubierta para construirlos con cerámica armada.

Los muros laterales son uno de los ejemplos más claros de aplicación del conoide, ya que se pueden intuir de manera muy sencilla sus directrices rectas, a nivel del suelo, y curvas, en la intersección con la cubierta.



ARQUITECTO

FÉLIX CANDELA

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1950

LOCALIZACIÓN

SAN BARTOLO | MEXICO

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

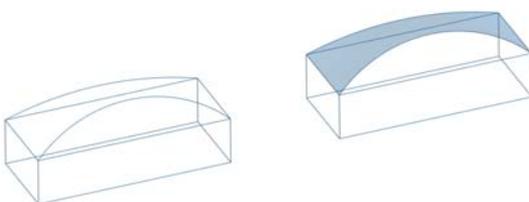
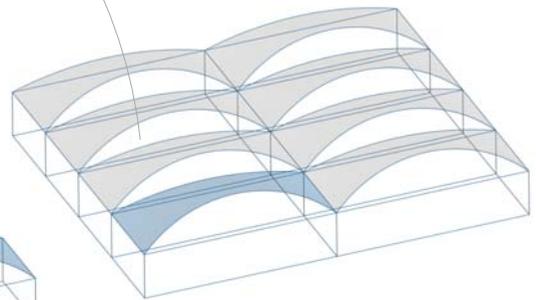
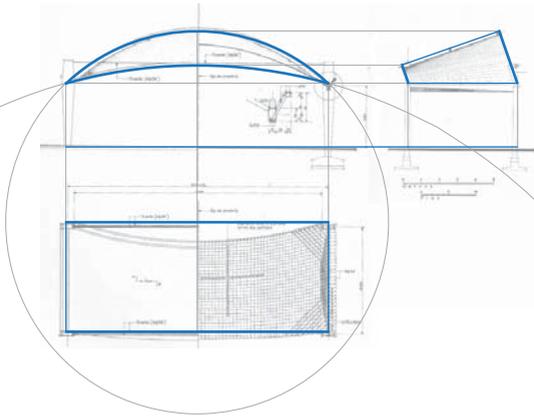
CONOIDE



En su investigación sobre la construcción de superficies de simple o doble curvatura con hormigón, Félix Candela diseñó diferentes sistemas constructivos con la intención de que pudieran ser extrapolables a diferentes casos.

Uno de estos sistemas es el de las cubiertas a base de conoides, que por un lado permitían la entrada de luz en el interior del espacio que cubrían, y por otro, debido a la curvatura de la superficie, permitía cubrir una gran distancia sin apoyos intermedios y con un espesor de hormigón mínimo.

En este caso he analizado uno de los ejemplos concretos de aplicación de este sistema, la "Fábrica Fernández" donde se puede apreciar la composición de cubiertas en forma de conoides.



ARQUITECTO

MARCEL BREUER y PIER LUIGI NERVI

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1958

LOCALIZACIÓN

PARÍS | FRANCIA

ELEMENTO ANALIZADO

MARQUESINA DE ACCESO

TIPO DE SUPERFICIE

CONOIDES | CILINDRO DE BASE ELÍPTICA

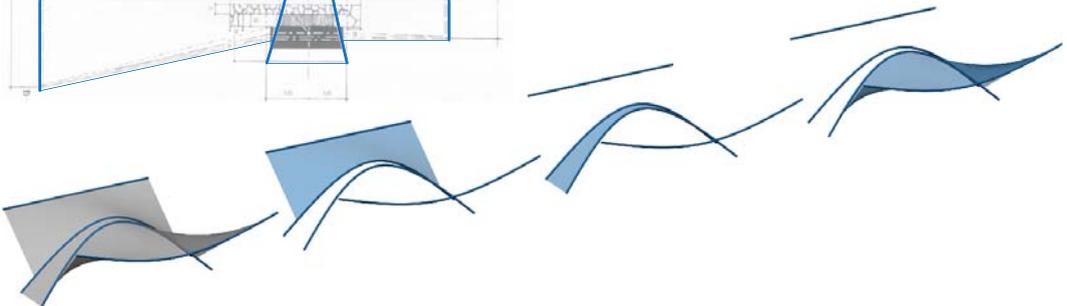
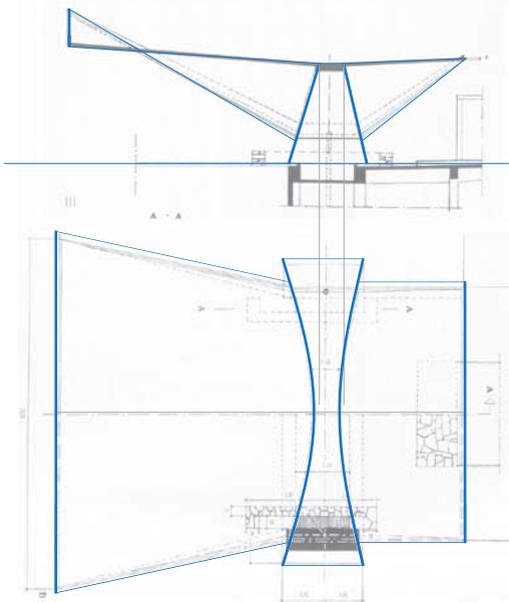


La sede de la Unesco en París es un complejo de tres edificios. Uno de ellos, el de oficinas, de planta estrellada en forma de Y, tiene marcando su acceso la marquesina que se aprecia en la imagen.

Este elemento de acceso, diseñado por Breuer y Nervi, resulta de la composición de 3 superficies: 2 conoides y un cilindro de base parabólica.

En el conoide de la parte posterior se pueden identificar las dos directrices, parabólica y recta, de la superficie, ya que está limitada por ellas. Sin embargo el conoide de la parte delantera se prolonga después de la generatriz recta, por lo que se aprecia un cambio de curvatura entre el apoyo y el borde libre de la superficie.

De los planos de planta y sección podemos extraer de manera sencilla las directrices de la superficie.



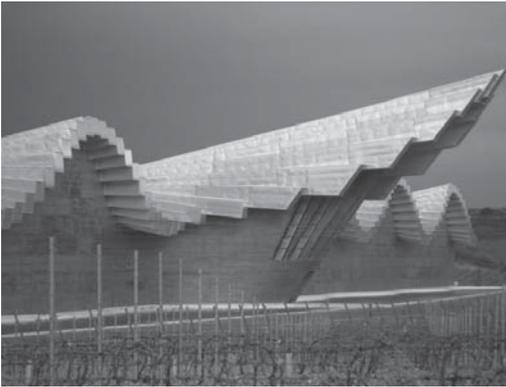
ARQUITECTO
SANTIAGO CALATRAVA VALLS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN
2001

LOCALIZACIÓN
LAGUARDIA | ESPAÑA

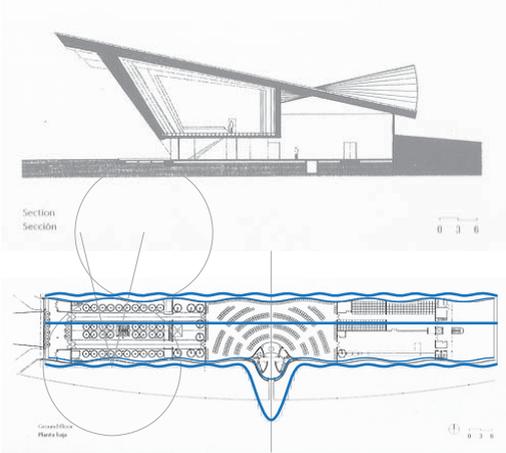
ELEMENTO ANALIZADO
CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE
CONOIDE

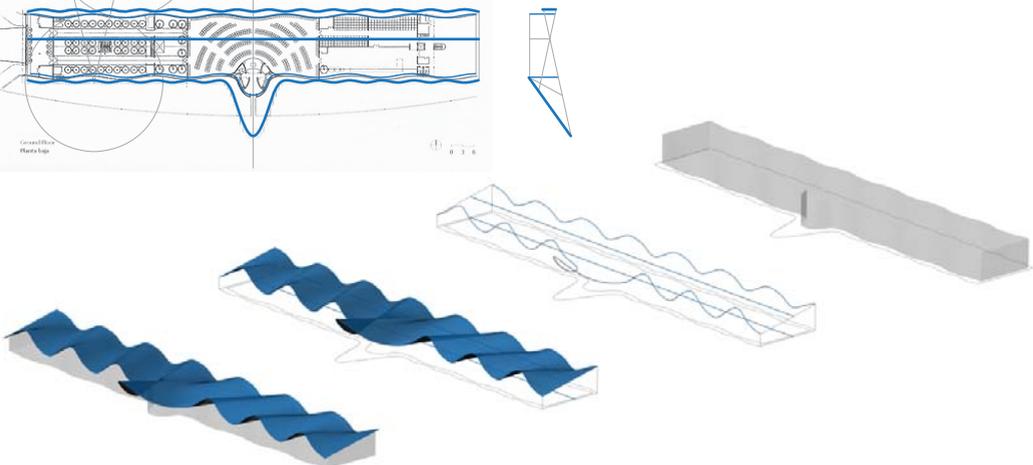


Las bodegas Ysios se emplazan en una zona llana rodeada de viñedos pero con contraste de fondo de la sierra de Cantabria. Calatrava en su diseño busca integrarse dentro de ese fondo montañoso, para ello utiliza la geometría del conoide.

Al igual que hiciera Gaudí en las Escuelas de la Sagrada Familia de Barcelona, Calatrava utiliza una composición de conoides contrapuestos para diseñar la cubierta de las bodegas. Igual que en el pequeño edificio barcelonés, la prolongación de la superficie de cubierta marca el acceso al edificio.



Además del cambio de escala de esta construcción respecto a la de Gaudí, una diferencia notable es la materialización de la superficie. En este caso las generatrices de la misma son evidentes desde el exterior ya que el arquitecto ejecuta la cubierta con unas grandes vigas prismáticas de madera recubiertas de aluminio.



07 | PARABOLOIDE HIPERBÓLICO

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE REGLADA ALABEADA DE PLANO DIRECTOR | CUÁDRICA HIPERBÓLICA

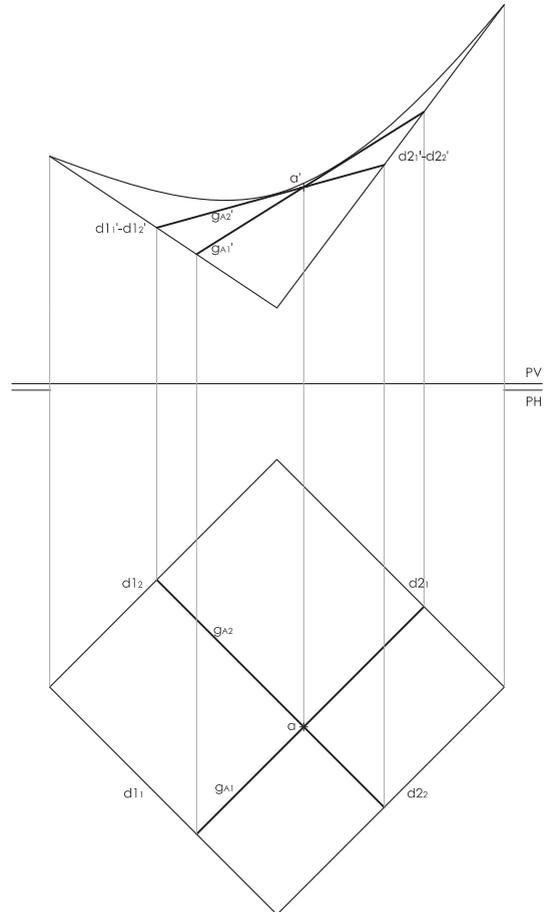
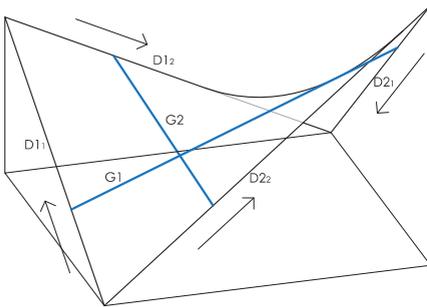
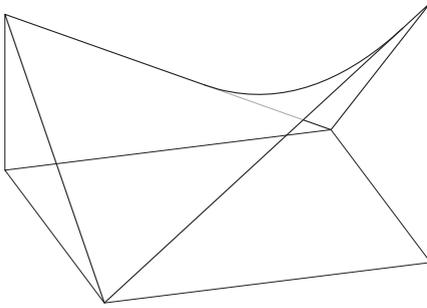
GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR | DIRECTRICES
PLANO DIRECTOR | RECTA | DOS RECTAS QUE SE CRUZAN

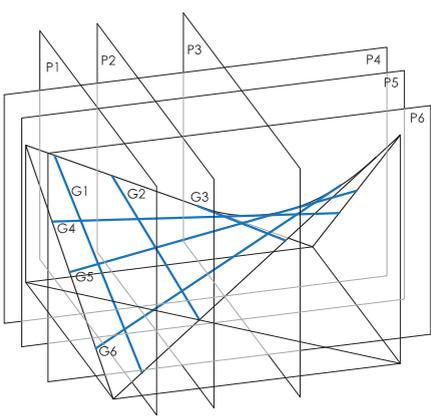
CURVATURA | TIPO
DOBLE CURVATURA | ANTICLÁSTICA

ECUACIÓN
 $x^2/a^2 - y^2/b^2 = z$

SECCIONES PLANAS
RECTAS, PARÁBOLAS e HIPÉRBOLAS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
DOBLE GENERACIÓN RECTA - GENERATRICES EN 2 DIRECCIONES
HABITUALMENTE SE REPRESENTA INCLUIDO EN UN CUADRILÁTERO ALABEADO

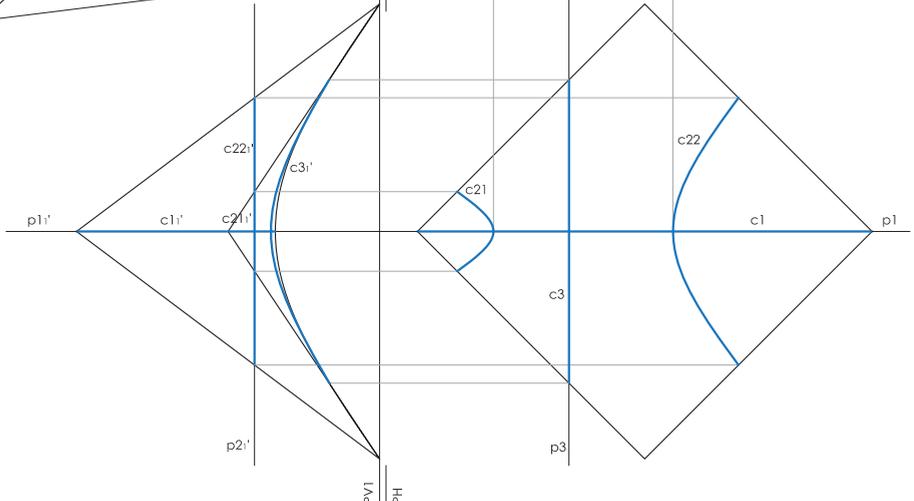
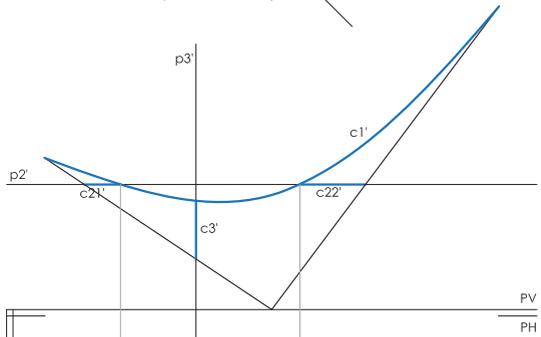
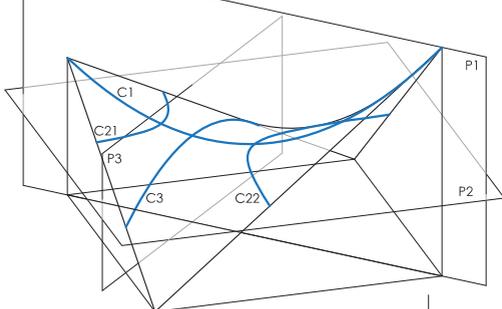
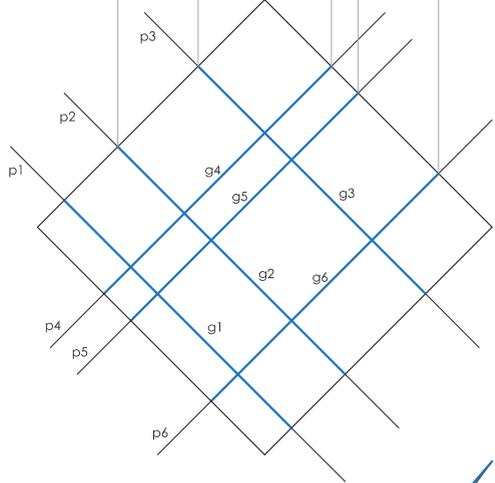
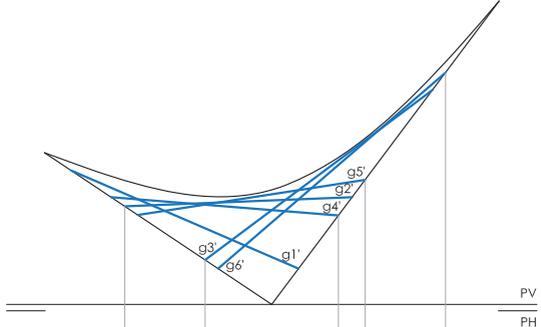




Las secciones planas de un paraboloid hiperbólico no siempre son curvas. Nos podemos encontrar fundamentalmente con 3 tipos de secciones:

1_ Secciones por planos paralelos a las directrices rectas, que generan RECTAS. Estas se corresponden con las generatrices de la superficie.

2_ Secciones por otros planos generan PARÁBOLAS e HIPERBOLAS dependiendo la posición relativa entre el paraboloid y el plano.



07.01 | PARAGUAS INVERTIDO

ARQUITECTO

FELIX CANDELA

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1952

LOCALIZACIÓN

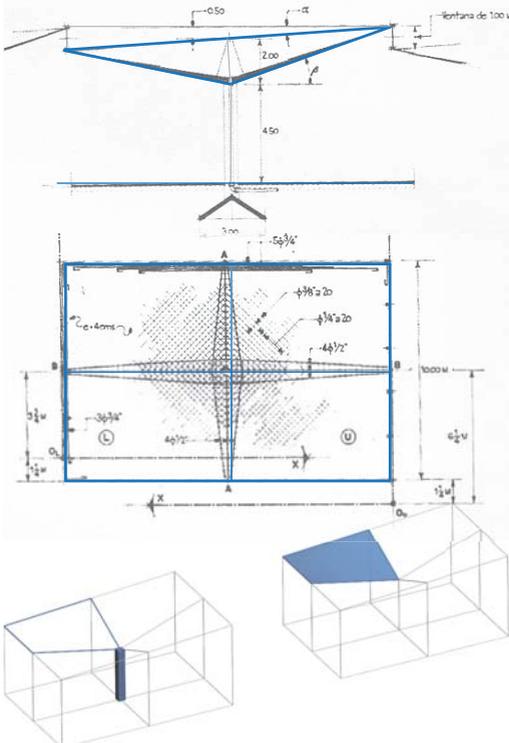
MÉXICO DF | MÉXICO

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

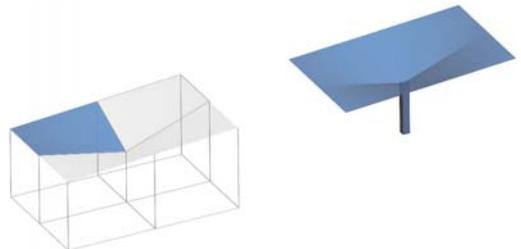
PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS



En sus investigaciones sobre superficies alabeadas, Félix Candela diseñó y construyó el primer paraguas invertido de hormigón formado por cuatro tímpanos de paraboloides hiperbólico. Éstos tenían unas dimensiones de 10 x 10 metros, un peralte de 1 metro y un espesor de 4 centímetros.

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.



07.02 | IGLESIA DE NUESTRA SEÑORA DE LA SOLEDAD

ARQUITECTO

FÉLIX CANDELA

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1951

LOCALIZACIÓN

COYOACÁN | MEXICO

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

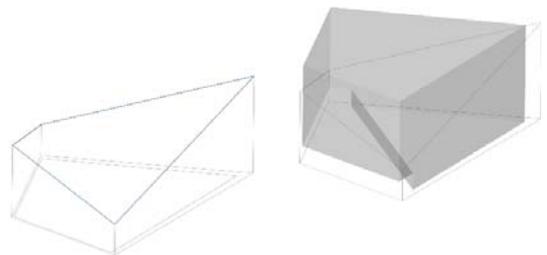
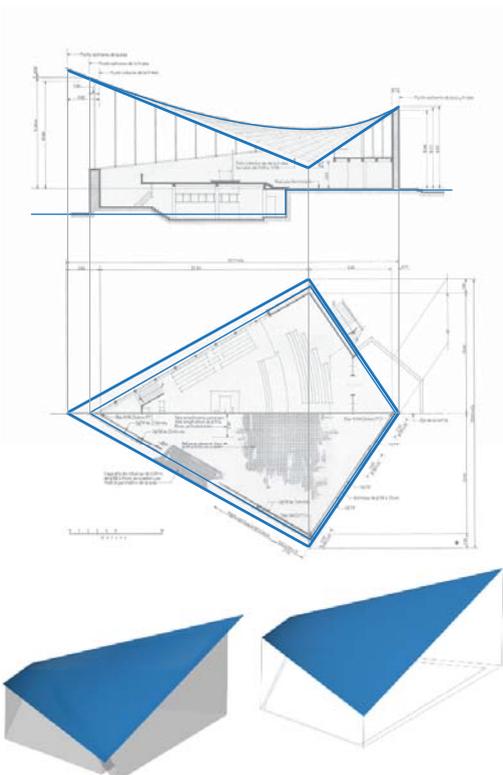
PARABOLOIDE HIPERBÓLICO



La Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad, también conocida como “la Capilla del Altillo”, 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 paraboloides hiperbólico apoyado en un cuadrilátero alabeado.

La proyección en planta de este cuadrilátero es un romboide cuyas diagonales miden 35,77 y 29,00 metros. El eje del paraboloides 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 de muy poco espesor fue la precursora de otras como la cubierta del restaurante Los Manantiales en Xoximilco, en las que Candela desarrolló su teoría del “borde libre”.



07.03 | RESTAURANTE LOS MANANTIALES

ARQUITECTO

FÉLIX CANDELA

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1958

LOCALIZACIÓN

XOCHIMILCO | MÉXICO

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

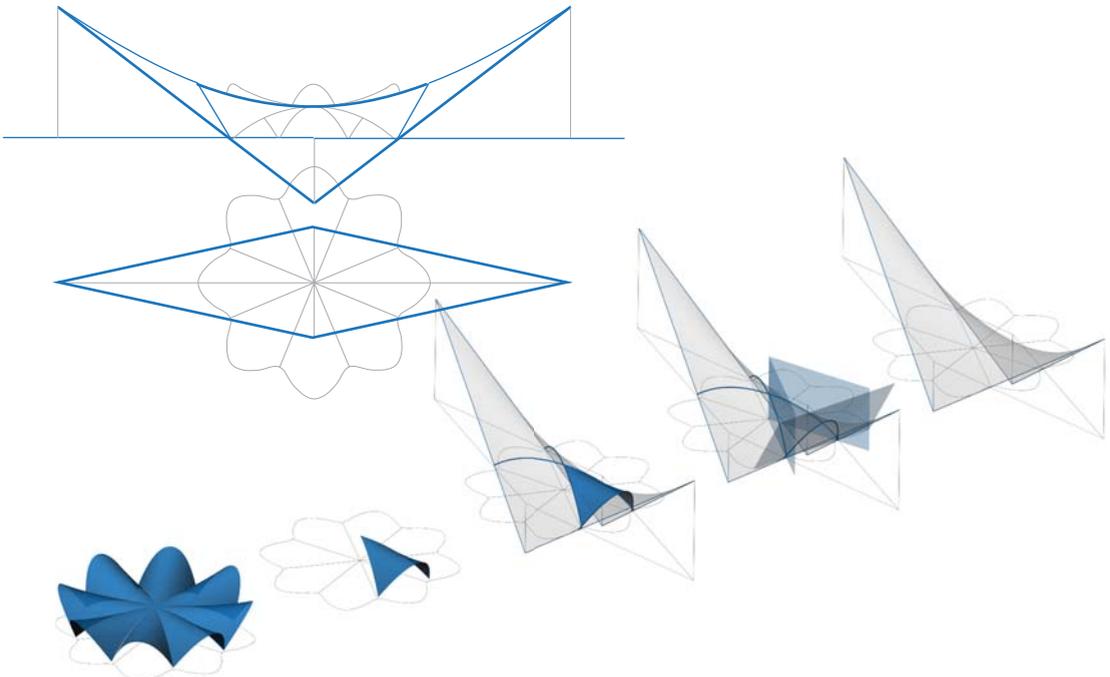
PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS



Uno de los edificios más reconocidos del arquitecto Félix Candela es sin duda el restaurante Los Manantiales en Xoximilco.

El diseño de la cubierta de este edificio consta de 8 lóbulos de paraboloides hiperbólicos, con 8 apoyos salvando una luz de 30 metros y con unos espesores en la gran parte de su superficie de 5 centímetros en la mayor parte de la superficie. La altura libre en la zona central es de 5,90 metros y en el extremo de los voladizos llega hasta los 8,25 metros.

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



ARQUITECTO

MIGUEL FISAC SERNA

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1967

LOCALIZACIÓN

MADRID | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CERRAMIENTO

TIPO DE SUPERFICIE

PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS

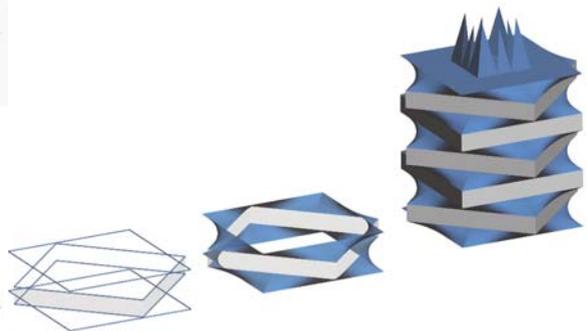
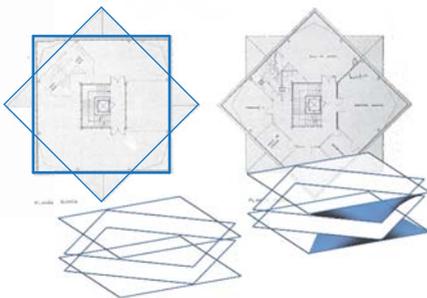
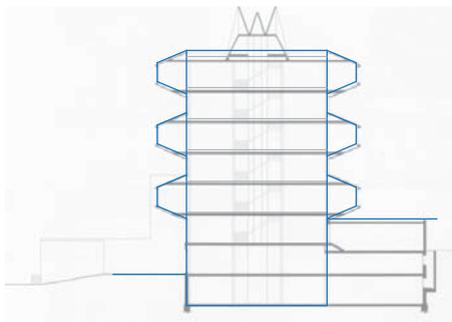


Miguel Fisac diseñó y ejecutó una gran cantidad de edificios, pero sin duda el que más popular le hizo fue la sede de los Laboratorios Jorba, conocida como “La Pagoda”.

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 metros 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 alféizar 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 terminaron derribándolo.



07.05 | EMBAJADA DE MÉXICO

ARQUITECTO

TEODORO GONZÁLEZ Y FRANCISCO SERRANO

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

2000

LOCALIZACIÓN

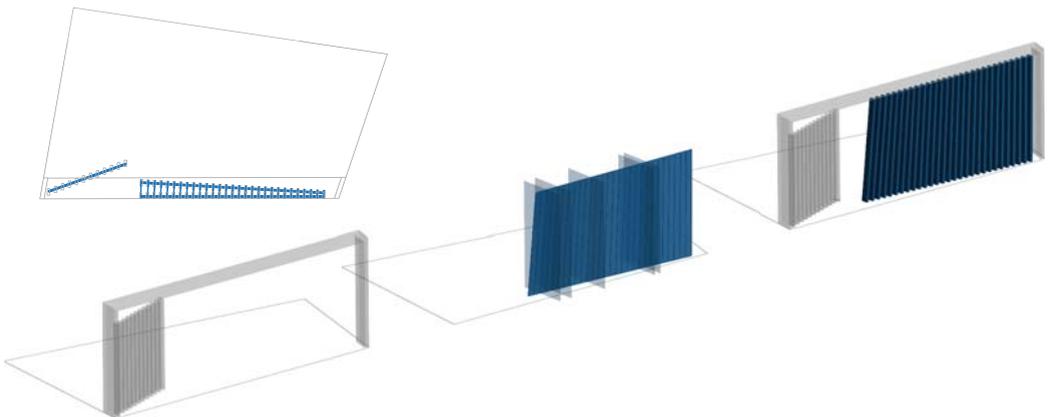
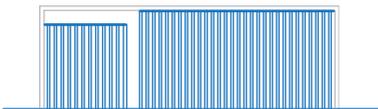
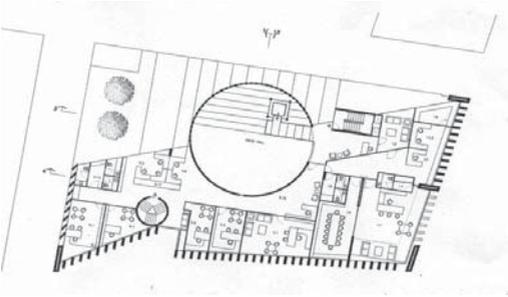
BERLÍN | ALEMANIA

ELEMENTO ANALIZADO

FACHADA

TIPO DE SUPERFICIE

PARABOLOIDE HIPERBÓLICO



Los arquitectos mexicanos Teodoro González y Francisco Serrano diseñaron un edificio para albergar la embajada de México en Alemania donde la composición de fachada cobra una relevante importancia.

El elemento predominante en la composición del edificio es una gran pieza vertical de hormigón que por repetición conforma la imagen del edificio. En un hábil gesto y con la excusa de la incorporación de la rampa de acceso para discapacitados, estos elementos verticales retroceden de manera progresiva a nivel de la calle manteniendo su posición en la línea de cornisa. Esto hace que se configure una superficie paraboloides hiperbólico donde los elementos verticales se configuran como sus generatrices.

Este es uno de los ejemplos más claros, y sencillos de realizar, de la utilización de superficies alabeadas a partir de elementos convencionales, obteniendo resultados interesantes con el mínimo esfuerzo.

07.05 | PARADA METRO ALAMEDA

ARQUITECTO

SANTIAGO CALATRAVA VALLS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1995

LOCALIZACIÓN

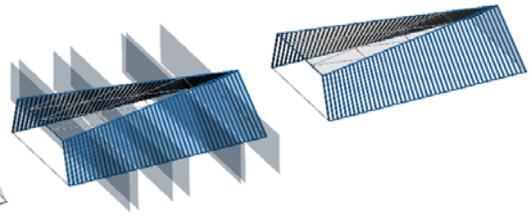
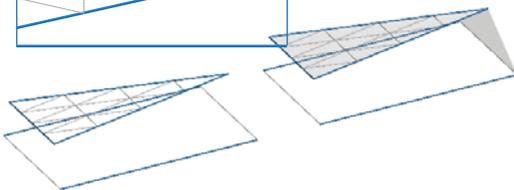
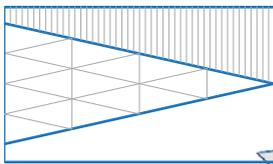
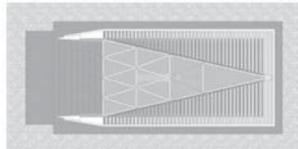
VALENCIA | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

PUERTA ACCESO A LA ESTACIÓN

TIPO DE SUPERFICIE

PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS | PLANOS



Una de las características más interesantes en toda la obra de Calatrava es el movimiento que da a algunas de las piezas de sus edificios. No en vano su tesis doctoral versa sobre este aspecto. Su formación como ingeniero contribuye a este hecho también.

Otro aspecto que cabe destacar del arquitecto valenciano es como convierte elementos funcionales, en la mayoría de ocasiones marginados por los arquitectos, en ingeniosos diseños que tienen relevancia por ellos mismos.

En la parada de metro de la Alameda en Valencia tenemos uno de los ejemplos de este movimiento en un elemento funcional como es la puerta de acceso a la estación. Esta puerta puede cerrarse, de manera que se confunde con el plano del suelo, pudiéndose andar por encima de ella, y al abrirse y dar paso a los usuarios del metro, forma dos paraboloides hiperbólicos en sus laterales materializados por las barras de la propia estructura de la puerta.

Es interesante consultar el estudio de dimensiones que hace Calatrava para permitir la apertura y el cierre del elemento.

08 | HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA

SUPERFICIE REGLADA ALABEADA | CUÁDRICA
HIPERBÓLICA

GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR | EJE

ROTACIÓN | RECTA e HIPÉRBOLA | EJE HIPÉRBOLA

CURVATURA | TIPO

DOBLE CURVATURA | ANTICLÁSTICA

ECUACIÓN

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 - z^2/c^2 = 1$$

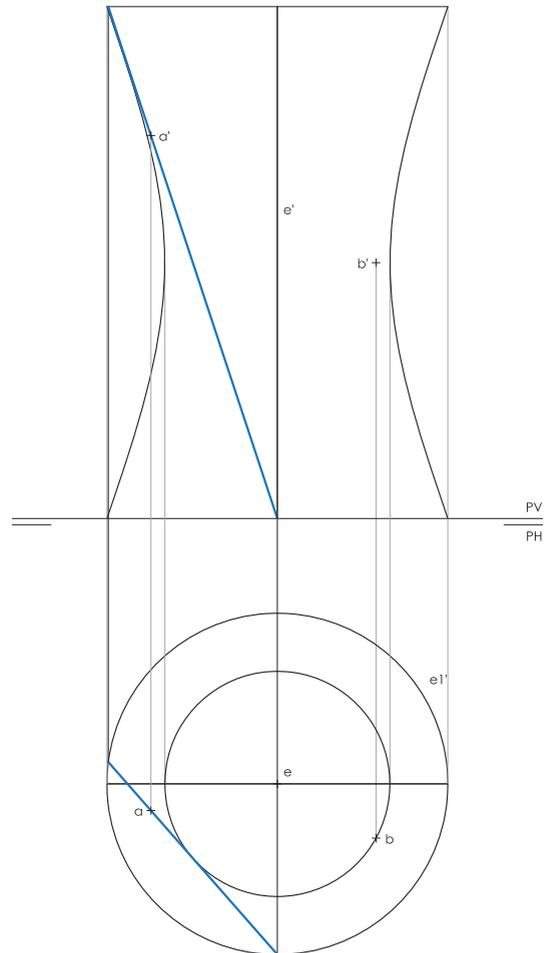
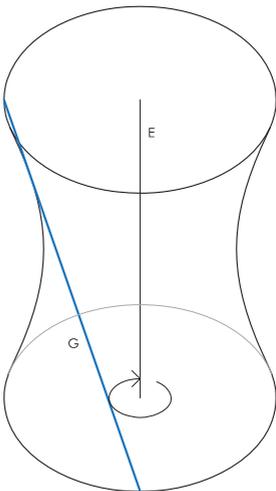
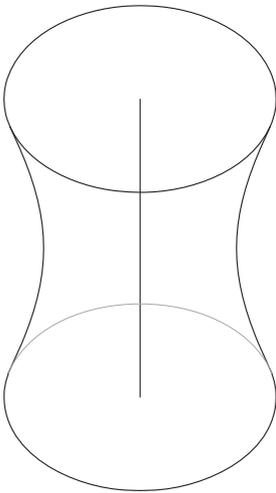
SECCIONES PLANAS

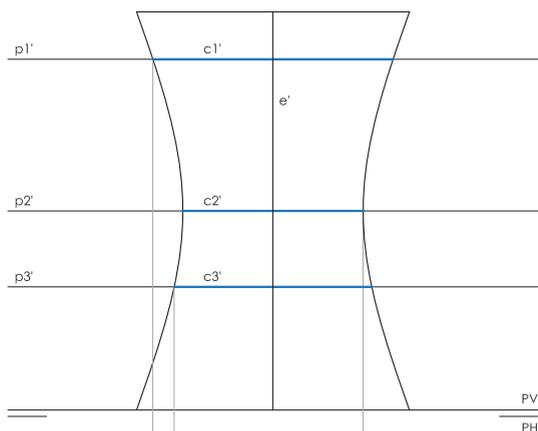
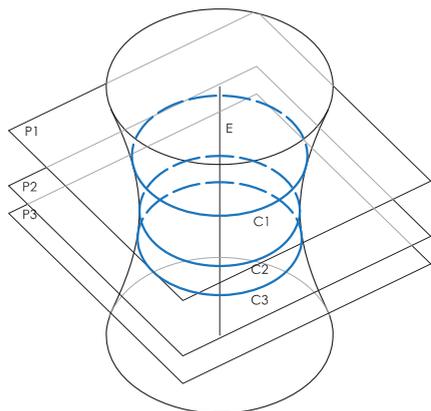
RECTAS, CIRCUNFERENCIAS e HIPÉRBOLAS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

INFINITOS PLANOS

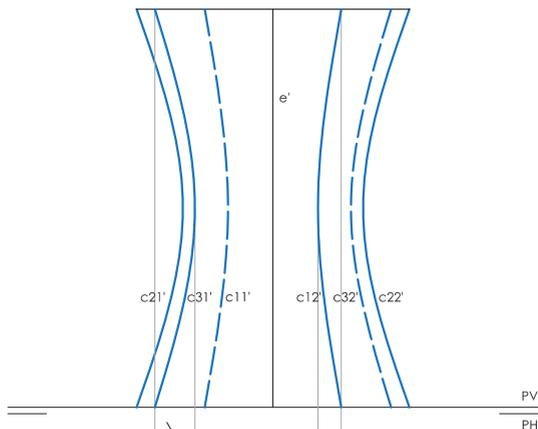
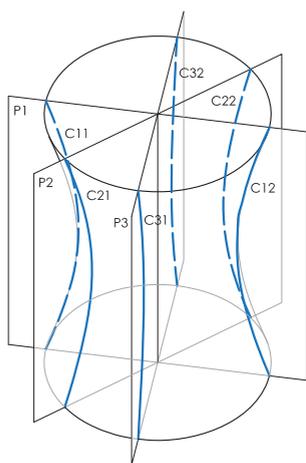
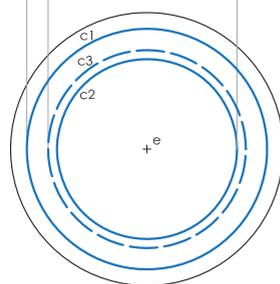
CURVATURA CONSTANTE



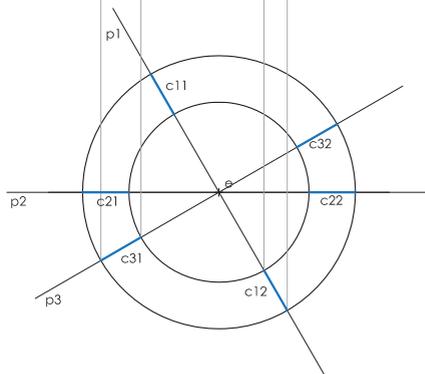


Las secciones planas de un hiperboloide hiperbólico no siempre son curvas. Es difícil definir la dirección de los planos que generan RECTA, ya que dependen de cada superficie. Entre otras posibilidades nos podemos encontrar fundamentalmente con 2 tipos de secciones:

1_Secciones por planos perpendiculares al eje de revolución, las cuales generan CIRCUNFERENCIAS de radio variable.



2_Secciones por planos que contienen al eje de revolución, radiales, que generan HIPÉRBOLAS siempre iguales.



08.01 | HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA

ARQUITECTO

EDUARDO TORROJA, C. ARNICHES y I. DOMÍNGUEZ

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1935

LOCALIZACIÓN

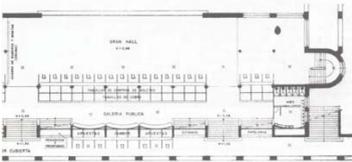
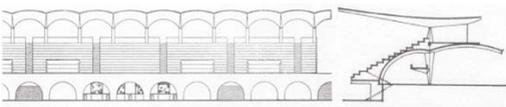
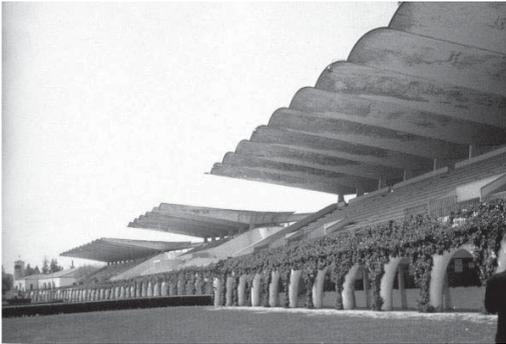
MADRID | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

CUBIERTA

TIPO DE SUPERFICIE

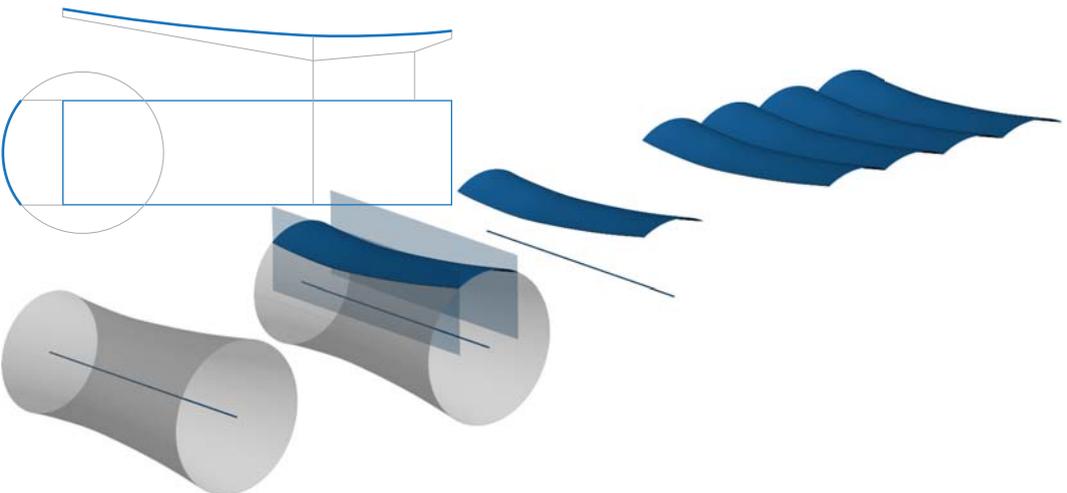
HIPERBOLOIDES HIPERBÓLICOS



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.

Alcanza 12 metros de vuelo y 5 centímetros 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.



08.02 | DEPÓSITO DE FEDALA

ARQUITECTO

EDUARDO TORROJA MIRET

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1952

LOCALIZACIÓN

FEDALA | MARRUECOS

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN EXTERIOR

TIPO DE SUPERFICIE

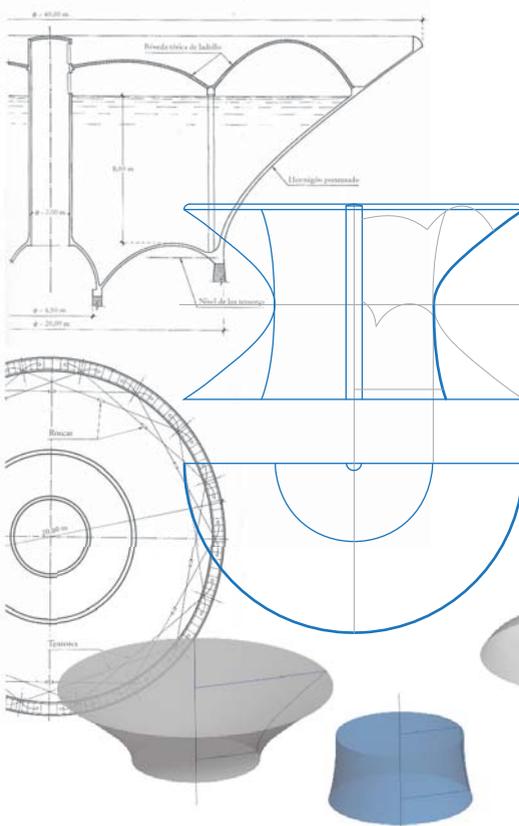
HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO



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 metros aproximadamente, un radio inferior de 17,74 metros y un diámetro superior de 40 metros.

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.



08.03 | CATEDRAL DE BRASILIA

ARQUITECTO

OSCAR NIEMEYER

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1970

LOCALIZACIÓN

BRASILIA | BRASIL

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN EXTERIOR

TIPO DE SUPERFICIE

HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO

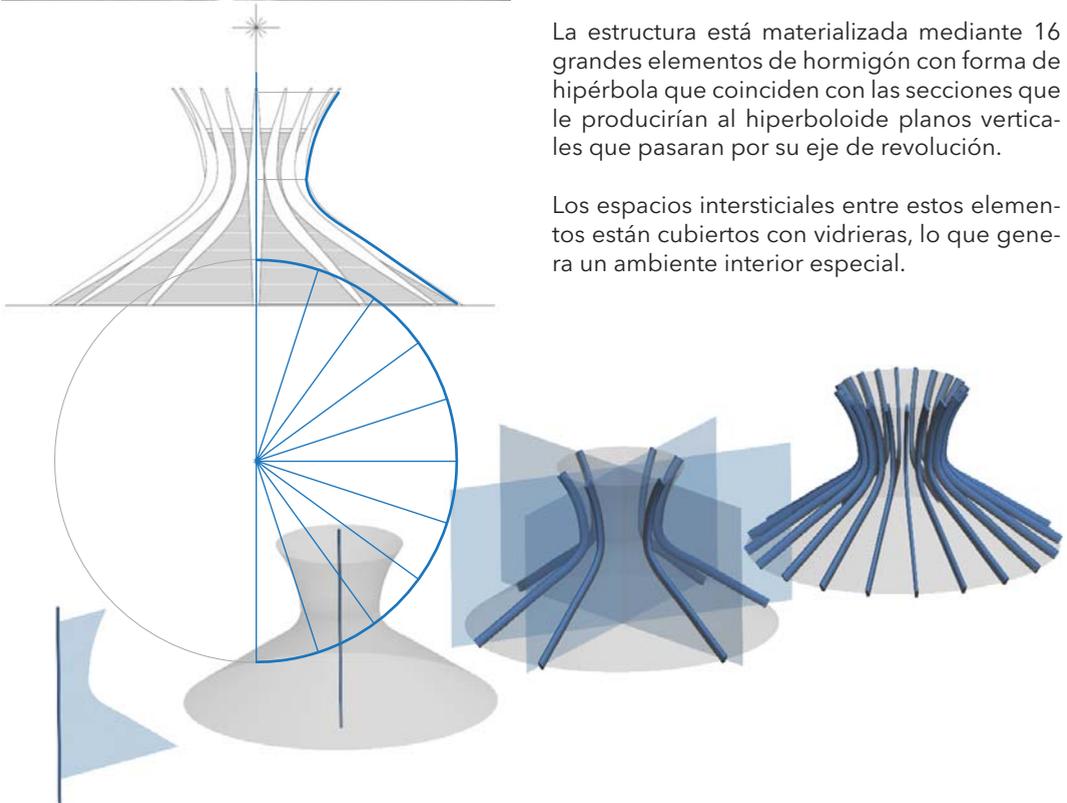


Probablemente una de las obras más reconocibles del arquitecto brasileño Oscar Niemeyer. Al plantearse hacer una catedral para la nueva ciudad de Brasilia, diseñó un edificio sobre la base del hiperboloide hiperbólico de revolución de forma que no tuviera una fachada principal, sino que se viera desde todos los puntos de vista con la misma imagen.

La catedral tiene 40 metros de altura. La circunferencia de la base mide unos 60 metros de diámetro. La nave de la iglesia está hundida respecto del nivel de la calle.

La estructura está materializada mediante 16 grandes elementos de hormigón con forma de hipérbola que coinciden con las secciones que le producirían al hiperboloide planos verticales que pasaran por su eje de revolución.

Los espacios intersticiales entre estos elementos están cubiertos con vidrieras, lo que genera un ambiente interior especial.



08.05 | ALMACENES MARKS&SPENCER

ARQUITECTO

HODDER ASSOCIATES

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1999

LOCALIZACIÓN

MANCHESTER | INGLATERRA

ELEMENTO ANALIZADO

PASARELA

TIPO DE SUPERFICIE

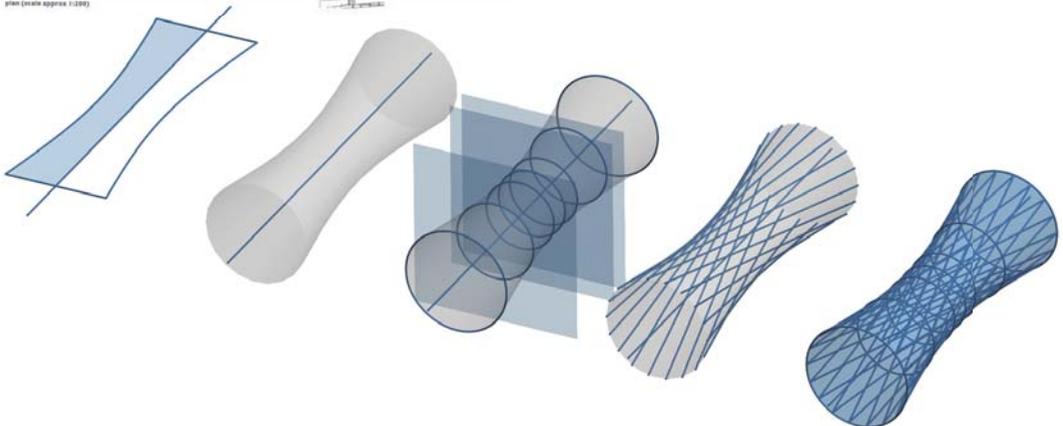
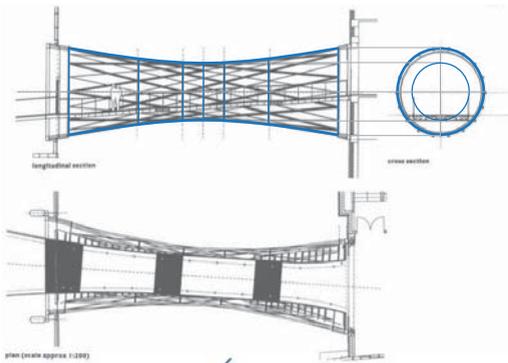
HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO



Un uso singular del hiperboloide hiperbólico es el que se ha utilizado para unir los edificios de los almacenes Marks & Spencer en Manchester.

La pasarela de conexión se resuelve encerrándola en esta superficie hiperbólica que podemos ver materializada mediante elementos metálicos que siguen la dirección de sus generatrices.

Estas barras a su vez están arriostradas por unos aros circulares que se corresponderían con las secciones producidas por planos perpendiculares al eje de revolución.



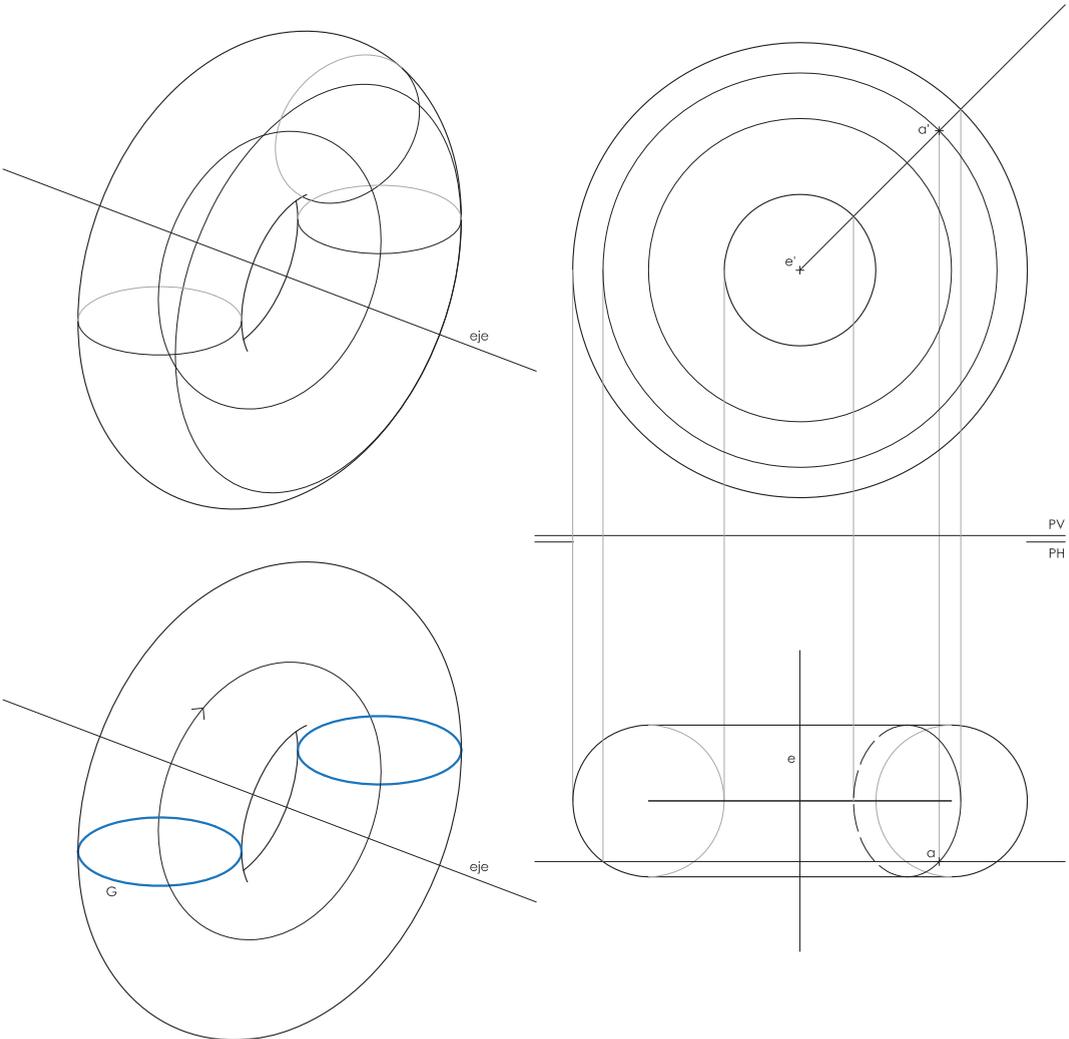
CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA
SUPERFICIE CURVA DE REVOLUCIÓN

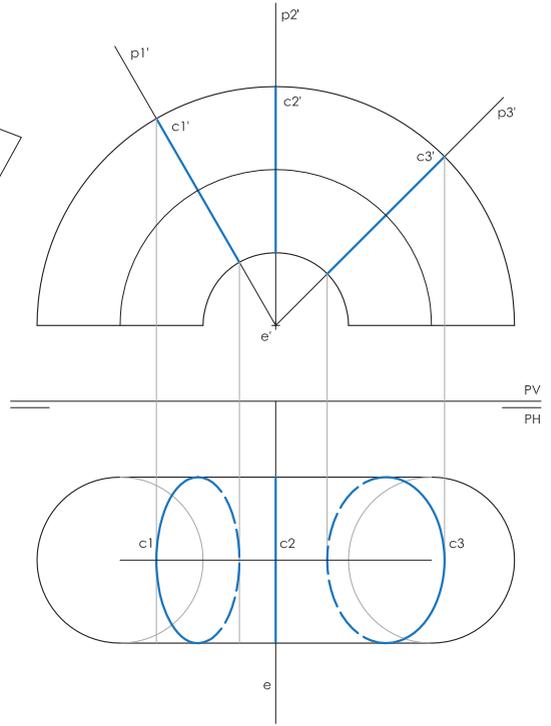
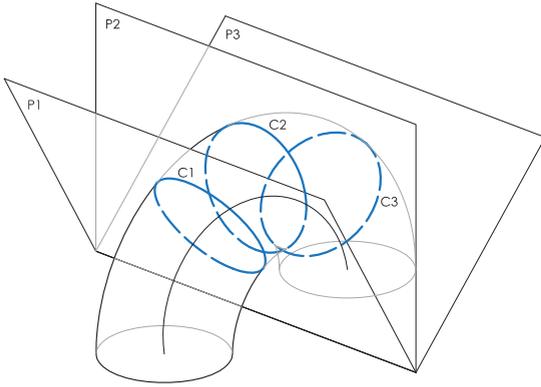
GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR | EJE
ROTACIÓN | CIRCUNFERENCIA | RECTA EXTERIOR

CURVATURA | TIPO
DOBLE CURVATURA | SINCLÁSTICA y ANTICLÁSTICA

SECCIONES PLANAS
CIRCUNFERENCIAS y OTRAS CURVAS

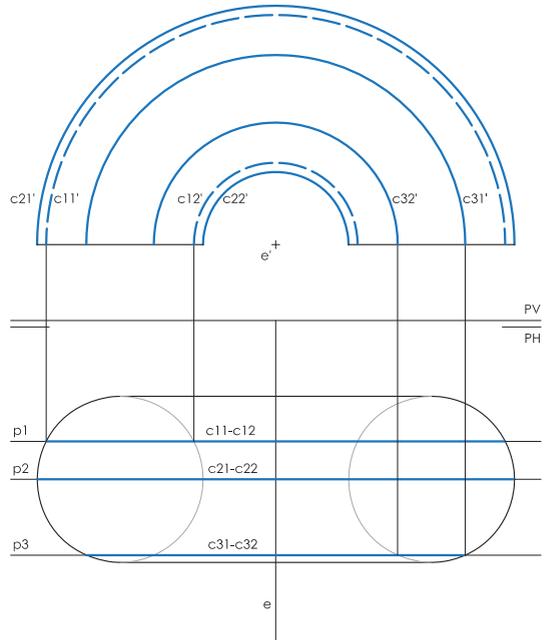
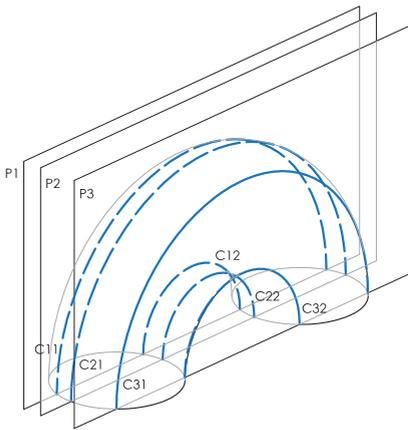
PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
INFINITOS PLANOS Y EJES DE SIMETRÍA



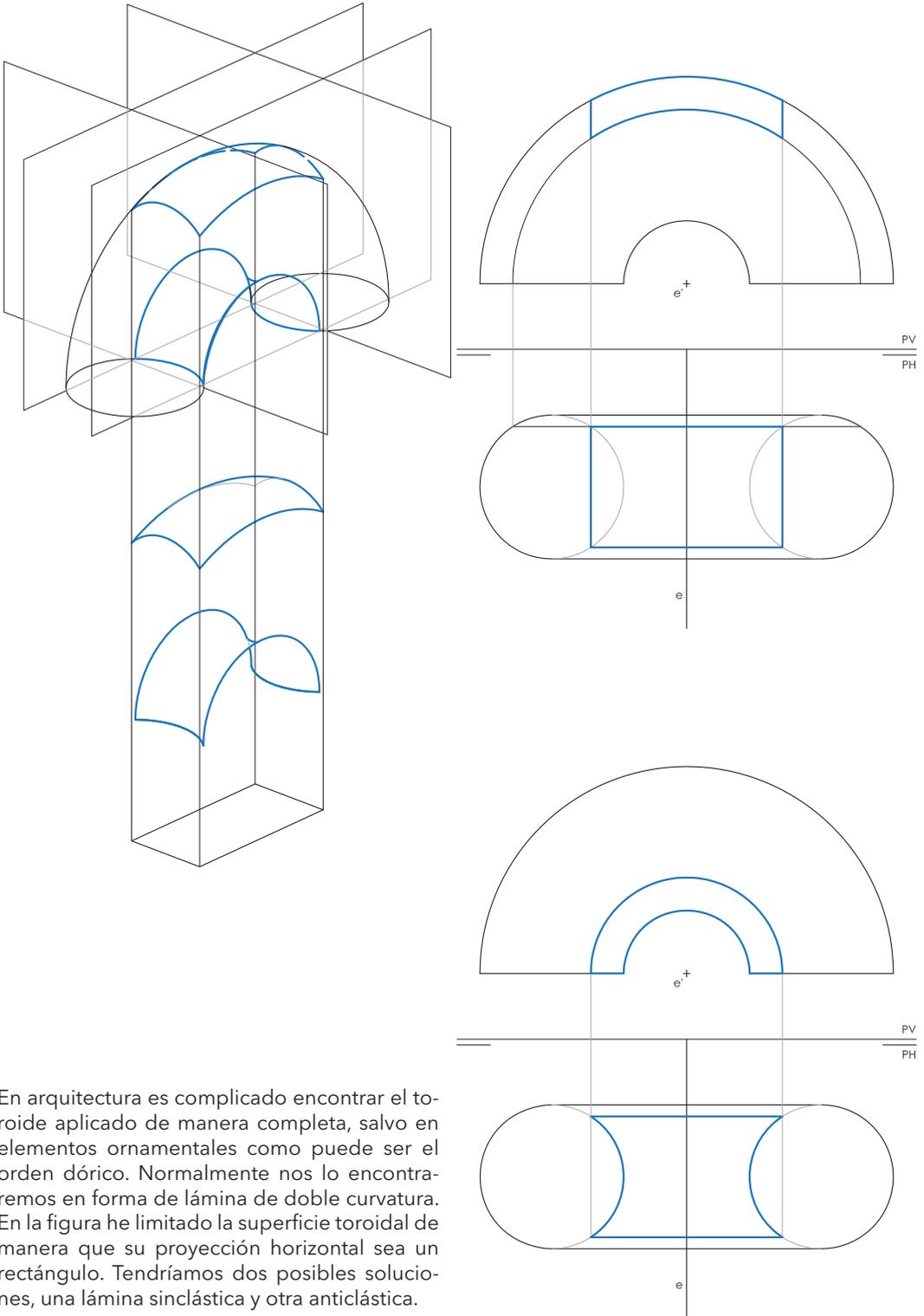


Las secciones planas de un toroide siempre son curvas. Entre otras posibilidades nos podemos encontrar fundamentalmente con 2 tipos de secciones:

1_Secciones por planos que contienen al eje de revolución, las cuales generan CIRCUNFERENCIAS iguales a la generatriz de la superficie.



2_Secciones por planos perpendiculares al eje de revolución, que generan CIRCUNFERENCIAS de dimensión variable.



En arquitectura es complicado encontrar el toroide aplicado de manera completa, salvo en elementos ornamentales como puede ser el orden dórico. Normalmente nos lo encontraremos en forma de lámina de doble curvatura. En la figura he limitado la superficie toroidal de manera que su proyección horizontal sea un rectángulo. Tendríamos dos posibles soluciones, una lámina sinclástica y otra anticlástica.

ARQUITECTO

NORMAN FOSTER + PARTNERS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1997

LOCALIZACIÓN

CAMBRIDGE | INGLATERRA

ELEMENTO ANALIZADO

VOLUMEN EXTERIOR

TIPO DE SUPERFICIE

TOROIDE

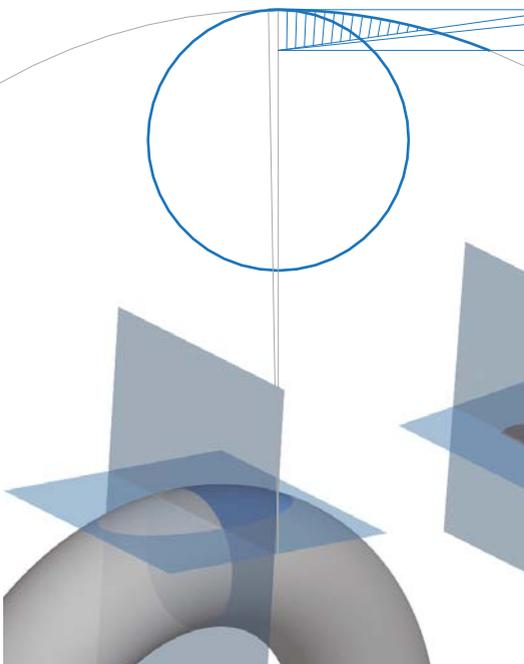
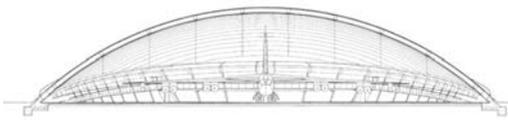


En el American Air Museum, Norman Foster se encontraba con el problema de tener que diseñar un edificio capaz de albergar aviones de grandes dimensiones. Para resolverlo aprovecha la geometría del toroide.

Tal y como se puede ver en el esquema de trazados, la cubierta del museo la resuelve con una porción sinclásica de toroide. Esta la limita por un plano horizontal y otro casi vertical.

El despiece estructural y de acabado lo realiza mediante secciones radiales y perpendiculares al eje de revolución.

Al aprovecharse de la doble curvatura de la superficie consigue generar un espacio de grandes dimensiones sin apoyos intermedios, capaz de albergar los aviones de la exposición.



ARQUITECTO

NORMAN FOSTER + PARTNERS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1995

LOCALIZACIÓN

BILBAO | ESPAÑA

ELEMENTO ANALIZADO

ACCESO A LAS ESTACIONES

TIPO DE SUPERFICIE

TOROIDE | CILINDRO

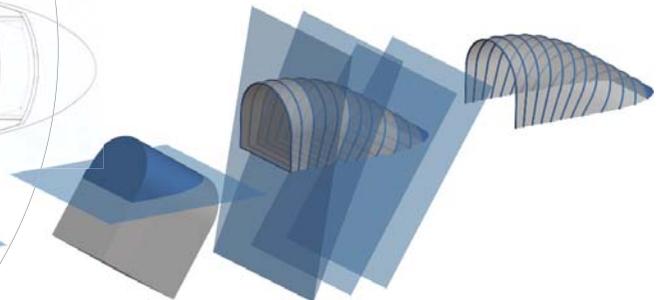
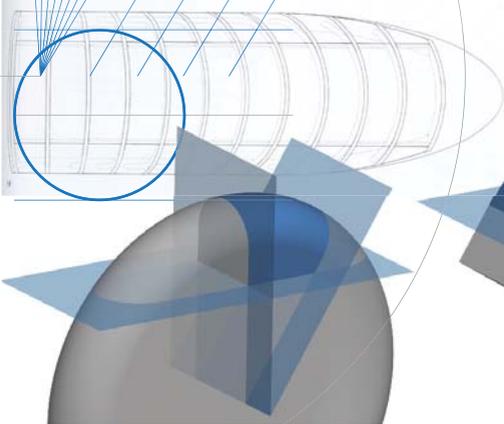
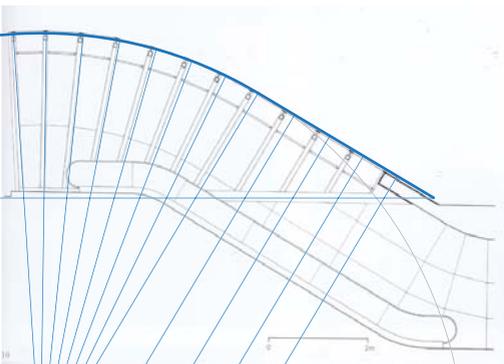


Al igual que Calatrava en la parada de metro de la Alameda, Foster convierte un elemento funcional como es el acceso a las estaciones de metro de Bilbao en un elemento de diseño a partir de superficies geométricas.

Las paradas están compuestas por un toroide en la parte superior y un cilindro tangente en la posterior.

La estructura se materializa con una estructura tubular que coincide con las secciones radiales en el caso del toroide y son secciones perpendiculares al eje en el cilindro.

Este elemento escultórico-arquitectónico se convierte en un icono reconocible en toda la ciudad vasca ya que todos los accesos a las estaciones del metro lo utilizan.



10 | HELICOIDE

CLASIFICACIÓN GEOMÉTRICA | MATEMÁTICA

SUPERFICIE REGLADA

GENERACIÓN | ELEMENTO GENERADOR | EJE

MOVIMIENTO HELICOIDAL | RECTA | EJE DE LA HÉLICE

CURVATURA | TIPO

DOBLE CURVATURA | SINCLÁSTICA

ECUACIÓN

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$$

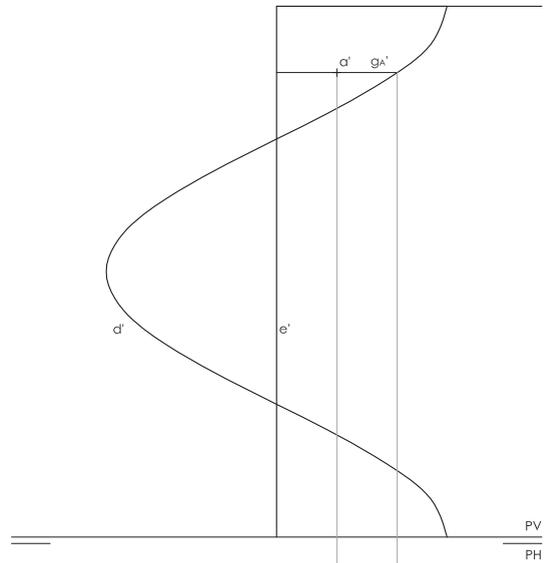
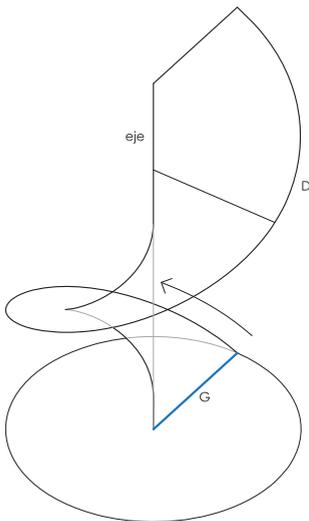
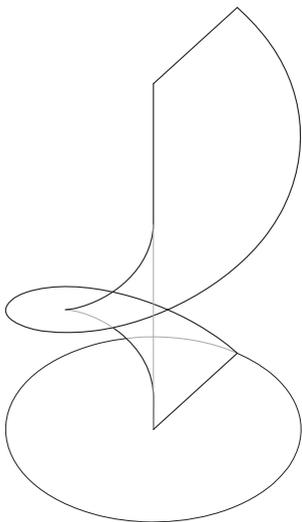
SECCIONES PLANAS

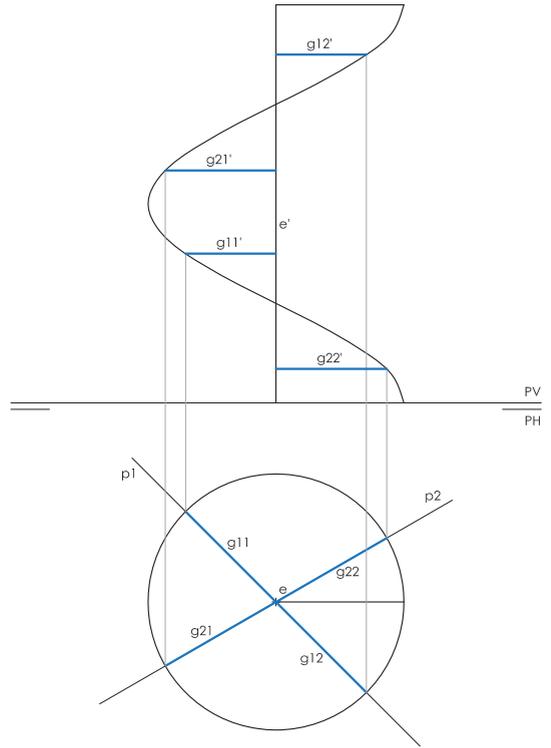
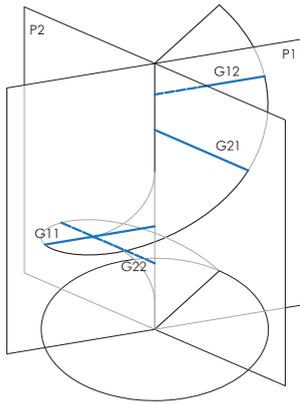
RECTAS y CURVAS VARIAS

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

GENERADA POR UN MOVIMIENTO HELICOIDAL

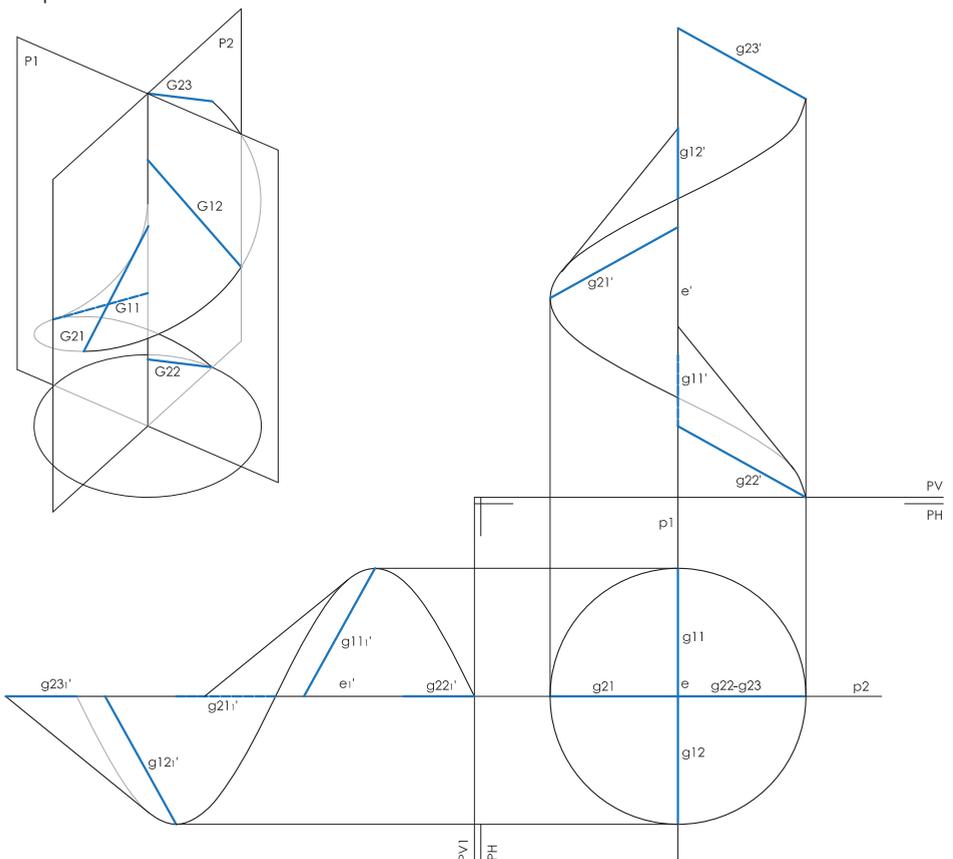
CURVATURA CONSTANTE





En arquitectura, el helicoide más utilizado es el denominado HELICOIDE REGLADO AXIAL RECTO, ya que se utiliza tanto en el diseño de escaleras de caracol como de rampas helicoidales.

Existen otros tipos de helicoide pero que tienen menos aplicación en nuestro campo como son por ejemplo el HELICOIDE REGLADO AXIAL OBLÍCUO, u otros generados no por una recta sino por una curva.



ARQUITECTO

ANDREA PALLADIO

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1999

LOCALIZACIÓN

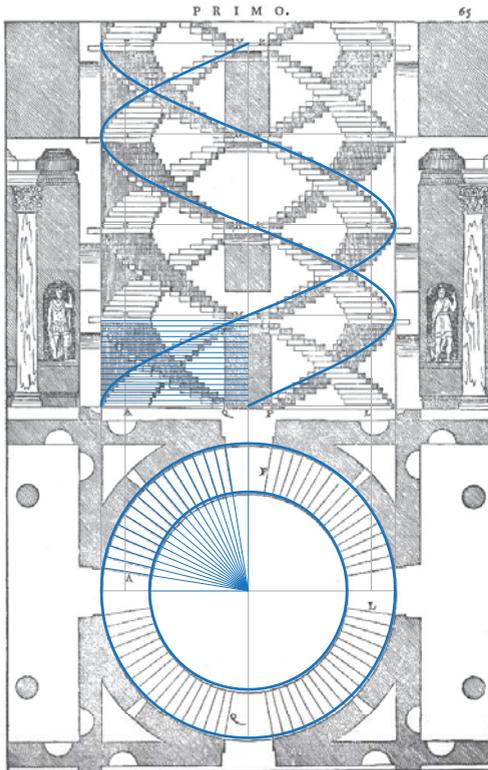
TRATADO DE ARQUITECTURA

ELEMENTO ANALIZADO

ESCALERAS

TIPO DE SUPERFICIE

HELICOIDES AXIALES RECTOS

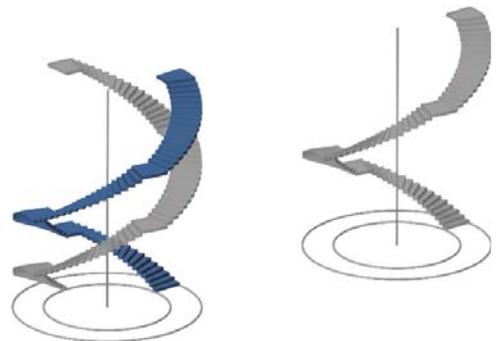
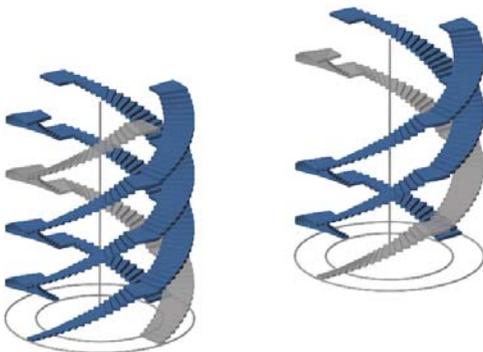


Ya desde antiguo, la geometría del helicoide se ha utilizado para el diseño de escaleras ya fuera por su elegante aspecto o su funcionalidad.

En el tratado de arquitectura de Palladio nos encontramos con este grabado en el que se representan 4 escaleras helicoidales enroscadas entre si.

Se puede observar como las generatrices de la superficie se han hecho coincidir con los peldaños de la escalera, representados por cuñas prismáticas.

Cabe destacar también la simetría del conjunto y la repetición, probablemente innecesaria, de las 4 escaleras de manera que ocupen todo el espacio diseñado por el arquitecto.



10.02 | AMPLIACIÓN DEL MUSEO LOUVRE

ARQUITECTO

IEOH MING PEI

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1989

LOCALIZACIÓN

PARÍS | FRANCIA

ELEMENTO ANALIZADO

ESCALERA DE ACCESO

TIPO DE SUPERFICIE

HELICOIDE REGLADO AXIAL RECTO | OBLICUO



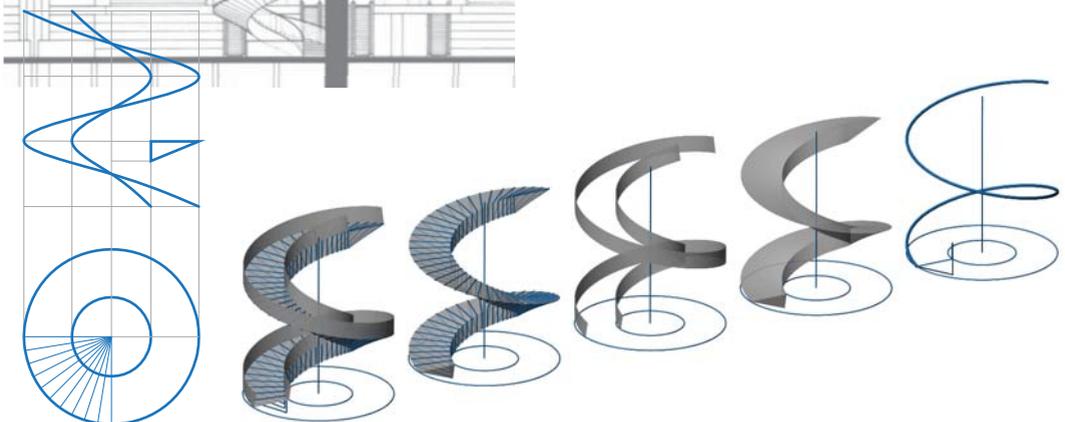
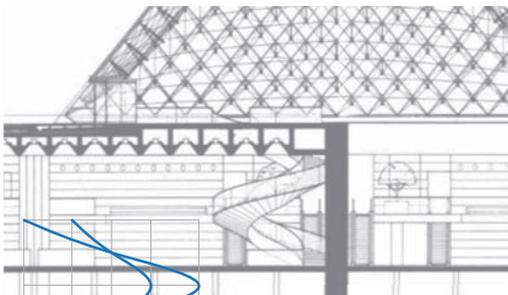
Probablemente una de las escaleras más atractivas de la arquitectura contemporánea. El arquitecto Ieoh Ming Pei resuelve el acceso al Museo Louvre por medio de una pirámide acristalada estudiada anteriormente, que alberga una escalera helicoidal en la que oculta la zanca de la escalera mediante una superficie helicoidal.

Este recurso lo consigue utilizando un helicoide axial oblicuo cuyas generatrices podemos intuir las en las juntas de las placas de aluminio que utiliza como acabado.

El peldañeado describe un helicoide axial recto cuyas generatrices coinciden con sus aristas.

Cabe destacar la plataforma elevadora central para facilitar el acceso a discapacitados, y que tiene forma cilíndrica y cuyo eje coincide con el de los helicoides de la escalera.

Es un ejercicio de diseño geométrico para un elemento funcional hábil y efectivo.



10.03 | TURNING TORSO

ARQUITECTO
SANTIAGO CALATRAVA VALLS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN
2005

LOCALIZACIÓN
MALMO | SUECIA

ELEMENTO ANALIZADO
VOLUMEN EXTERIOR

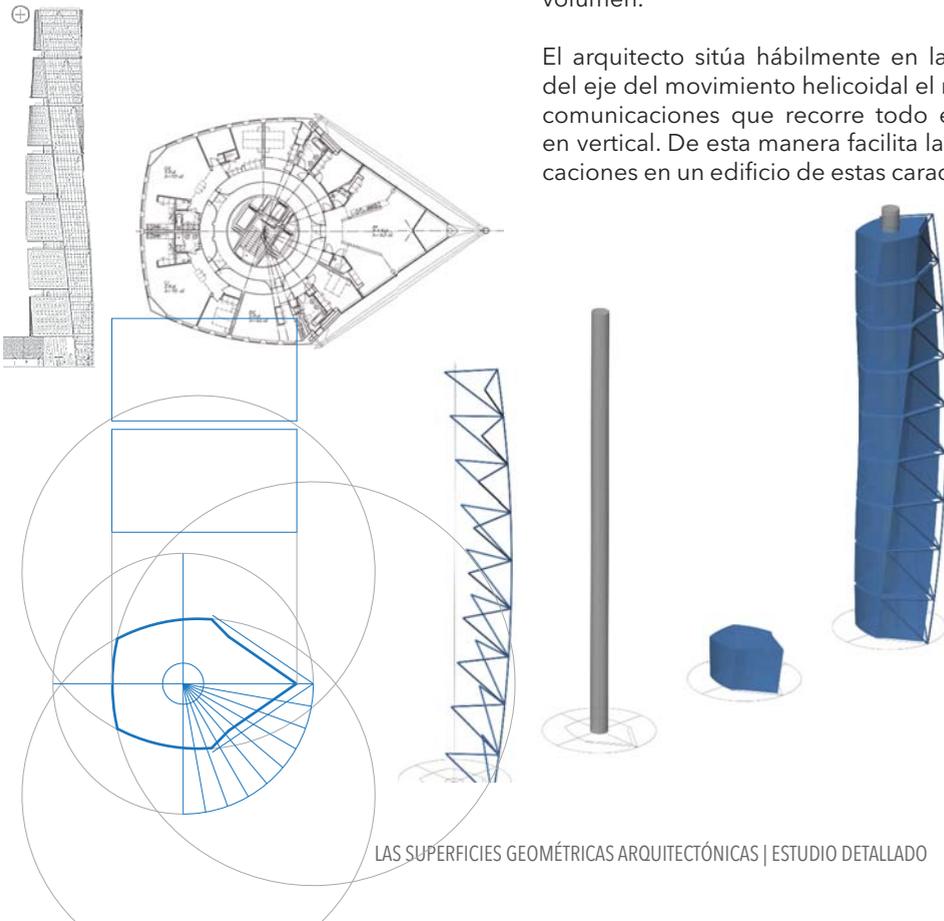
TIPO DE SUPERFICIE
HELICOIDES



Al hablar de superficies helicoidales, no podíamos pasar por alto el edificio Turning Torso de Santiago Calatrava. No es un helicoide al uso como los que hemos visto aplicados a escaleras o rampas.

Para el diseño del volumen del edificio, Calatrava utiliza un juego de superficies helicoidales cuyas directrices podemos observarlas en cualquiera de las plantas del edificio. Circunferencias y rectas van describiendo en su recorrido vertical las superficies helicoidales curvas y regladas no axiales que conforman el volumen.

El arquitecto sitúa hábilmente en la posición del eje del movimiento helicoidal el núcleo de comunicaciones que recorre todo el edificio en vertical. De esta manera facilita las comunicaciones en un edificio de estas características.





4 | ANÁLISIS FORMAL GEOMÉTRICO DE LA CACV

4.1 | JUSTIFICACIÓN

1 | "Control gráfico de formas y superficies de transición", Isabel Crespo Cabillo, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.

2 | "Valor Barroco en la arquitectura Valenciana" - Francisco Juan Vidal

Tras lo expuesto en los apartados anteriores y los análisis realizados en diversos edificios de todas las épocas, corrientes y construidos con los mas variados materiales, parece demostrado que el uso de las superficies geométricas en la arquitectura actual se ha convertido en la herramienta de la que dispone el arquitecto para luchar contra el minimalismo impuesto durante las primeras décadas del siglo XX.

*"Liberada la arquitectura del recurso del ornamento, la geometría se convierte de ésta manera en la responsable de la expresión arquitectónica."*¹

Mi interés se centra en estudiar la arquitectura contemporánea donde la geometría haya sido importante en su etapa de ideación y diseño. Analizar esta geometría y estudiar las consecuencias que un buen o mal diseño puede tener en el aspecto estructural y constructivo es el objetivo de mi investigación.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, y tal y como indica el profesor Francisco Juan², en la ciudad de Valencia tenemos uno de los ejemplos de arquitectura contemporánea donde se aprecia, entre otras consideraciones, el uso de esta geometría como recurso compositivo de la arquitectura, lo que él llega a definir como el "nuevo barroco valenciano".

Esto es lo que justifica el análisis de la "Ciutat de les Arts i de les Ciències de València" (a partir de ahora CACV), en primer lugar por su proximidad y facilidad de acceso a la información necesaria para su estudio y en segunda lugar ya que constituye un fantástico ejemplo de arquitectura contemporánea en la que se deja el peso de la expresión arquitectónica a las superficies geométricas.

El presente apartado se va a estructurar haciendo una aproximación progresiva a la CACV, necesaria para la comprensión de su totalidad. En primer lugar se va a exponer la metodología seguida para el análisis de los diferentes edificios y superficies. A continuación se realizará una introducción histórica muy breve a los motivos que llevan a la ubicación de la CACV en el antiguo cauce del río Turia. Se comentará también de forma resumida la evolución de los proyectos desarrollados. Y para finalizar

página anterior | Imagen de la cubierta del restaurante del "Parc Oceanogràfic Universal" que forma parte del complejo de la Ciutat de les Arts i de les Ciències de Valencia, España, 2006 - Civis Project Management

se irán analizando uno por uno los edificios que componen el complejo CACV haciendo especial incapié en aquellas superficies geométricas que definen la forma de los edificios y que resultan de interés para su estudio.

La información planimétrica con la que se ha trabajado ha sido la correspondiente a los planos y memorias de los proyectos de ejecución obtenidos de las empresas constructoras, despachos de gestión de proyectos, diferentes contratas... a diferencia de otras investigaciones realizadas en este y otros trabajos, el problema no ha residido en la falta de información, sino más bien en todo lo contrario.

Cabe destacar que se ha intentado entrar en contacto con los despachos de arquitectura que ha realizado los proyectos y tan solo nos han prestado su colaboración los ingenieros que desarrollaron el proyecto de la cubierta del restaurante del Oceanográfico, compañeros profesores de la UPV, Carlos Lázaro y Alberto Domingo.

CACSA, la empresa que lleva la gestión del complejo de la CACV me ha facilitado el acceso a los diferentes edificios para poder tomar los datos y sacar las imágenes necesarias para el estudio.

Agradecer una vez más a todos los que me han facilitado mi trabajo su ayuda.

4.2 | METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

La metodología de trabajo se ha desarrollado de manera muy detallada en el apartado 1.3 del presente trabajo. En este apartado lo que se va a exponer es la organización de los siguientes análisis de los edificios y de las superficies de la CACV.

Los análisis comienza con una descripción del edificio en la que se adjunta una tabla con los datos básicos. A esta descripción se adjuntan imágenes generales, exteriores e interiores, que reflejen la composición global y el uso del edificio. En este apartado se indicarán las diferentes superficies a analizar de cada uno de los edificios.

A continuación se expone un resumen de planos a escala necesaria para su inserción en el trabajo. La información planimétrica completa, desglosada en el apartado de anexos, se adjunta en soporte informático junto con el trabajo. Por motivos obvios de espacio y dimensión de los edificios se ha estimado conveniente presentar tan solo un resumen suficiente que ayude a la comprensión del edificio.

Una vez presentado cada uno de los edificios se procede a analizar las superficies seleccionadas. Cada una de estos análisis consta en primer lugar de una presentación de la superficie con imágenes de detalle.

En segundo lugar se pasa a analizar los trazados y su generación geométrica. Para ello se ha tenido en cuenta lo indicado por el profesor Carlos Montes:

*"Tan solo llegamos a recordar ese edificio si logramos reducirlo o simplificarlo mediante esquemas que funcionan como sustitutivos del mismo. Esquemas que, por la simplificación de sus elementos y las reglas básicas de su articulación - basadas en formas geométricas conocidas - pueden ser aprehendidos y memorizados sin excesivo esfuerzo; pudiendo así ser recordados con una gran comodidad y aplicados al análisis o memorización de obras o estructuras formales más complejas."*³

Es por este motivo, por lo que se ha pretendido que los trazados sean lo mas simplificados posibles y con formas geométricas reconocibles

para que puedan ser entendidos sin problemas. La generación de las diferentes superficies se ha realizado de manera que se entienda como una sucesión de operaciones sencillas de modificación de las superficies geométricas básicas que componen el diseño del elemento. Para ello se han utilizado diferentes recursos como planos, transparencias, líneas de sección...

No podemos pasar por alto las consecuencias que el uso de las superficies geométricas tienen en la estructura y en la construcción. Para finalizar el análisis de cada una de las superficies se incorporan una serie de consideraciones acerca de estos dos aspectos acompañadas de esquemas e imágenes de obra.

*"La construcción, 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; deben por tanto, poderse lograr sin adiciones ni ornamentaciones externas. 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."*⁴

4 | "Razón y ser de los tipos estructurales" - Eduardo Torroja Miret

4.3 | ANÁLISIS DE LA CACV

VALENCIA Y EL RIO TURIA

Para poder entender el porqué y la situación de la CACV es necesario, aunque de manera muy somera, el conocimiento de la historia de la ciudad en la que se encuentra.

La historia de Valencia, originalmente y durante el paso del tiempo ha ido ligada al río Turia, que antiguamente bordeaba la ciudad y en la actualidad se encuentra integrado en ella. Como no es el objetivo del presente trabajo y para hacer más ameno este repaso histórico, se va a hacer un recorrido cronológico por aquellos aspectos de interés para el mismo:

138 aC_ Acta fundacional de Valentia Edetanorum. Se considera esta fecha como la fundación de Valencia como ciudad republicana romana.

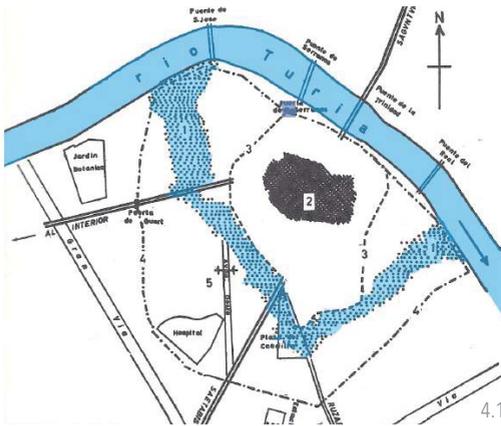
Se funda entre cuatro ciudades ya existentes: Arse (Sagunto), Edeta (Liria), Saetabis (Játiva) y Dianium (Denia), como centro administrativo de la zona.

Se ubicó en una isla fluvial del río Turia (denominado anteriormente río Guadalaviar). Este tipo de asentamiento era habitual en ciudades romanas debido a dos motivos: Asegurarse la provisión de agua, pesca y terrenos fértiles cercanos, y porque constituían un lugar estratégico militar ya que se accedía a ellas mediante puentes.

En esta época la ciudad carece de murallas, ya que el poder del imperio romano disuadía cualquier intento de ataque a sus núcleos de población.

S II dC_ Refundación de la ciudad como Valentia Imperial después de su destrucción en las guerras civiles entre Pompeyo y Sertorio (260-270 dC). Se desarrolla un amplio programa urbanístico con multitud de edificios públicos.

SV dC_ La Iglesia pasa a controlar la ciudad. Se transforman los templos romanos en edificios de culto cristiano.



5 VII dC_ Valencia pasa a manos musulmanas tras un pacto firmado en el 711 donde se acepta una capitulación de la ciudad bastante ventajosa.

1088 dC_ Tiene lugar la primera gran riada que causó grandes pérdidas, arrasó los dos puentes de la ciudad y alguna de las torres.

Las riadas eran habituales, pero vamos a comprobar como a lo largo del tiempo han habido algunas con consecuencias especialmente graves para la ciudad.

S XIII dC_ En 1238 Jaume I de Aragón conquista la ciudad de Valencia, la cual vuelve a manos cristianas. La muralla árabe no se destruyó pero se le practicaron varios accesos para mejorar la comunicación. Se construyó otra muralla cristiana para ampliar la población que fue terminada en 1370.

1328 dC_ Se produce otra gran riada con consecuencias muy negativas para la ciudad. Para la reconstrucción de los daños ocasionados se crea la Fábrica de Murs e Valls. La mayoría de las construcciones importantes en los años posteriores a su creación fueron llevadas a cabo por esta empresa.

1398 dC_ Se construyen las denominadas Torres de Serranos, símbolo de la ciudad. Estas fueron obra del maestro cantero Pere Balaguer.

1402 dC_ Culmina la reconstrucción del puente de la Trinidad, todavía hoy en pie, que había sido destruido por una de las riadas.

1517 dC_ Tiene lugar otra gran riada que destruye parte de los puentes existentes. Como consecuencia en 1518 se reconstruye el puente de Serranos, uno de los desaparecidos con la citada riada.

1589 dC_ Tras otra gran riada se decidió la construcción de pretils en el río, así como varios puentes como el de la Trinidad, el del Real y el de San José.

1729 dC_ Se termina de construir el pretil norte entre el puente de San

4.1 | Esquema del primer asentamiento romano en la isla fluvial del río Guadalaviar (actualmente el Turia)

4.2 | En azul el área protegida por las antiguas murallas árabes, y en gris la zona de ampliación cristiana, rodeadas por sus nuevas murallas en 1370. Como se puede observar la ciudad no creció en la dirección del río, ajustando el trazado de sus nuevas murallas a su cauce.



4.3 | Imagen de la riada de 1957 en la ciudad de Valencia. En ella se puede observar uno de los puentes provisionales que construyó el ejército para poder cruzar el río Turia.

4.4 | Maqueta del denominado "Plan Sur" que desvió el cauce del río Turia por el sur de la ciudad de Valencia.



José y el del Mar.

1865 dC_ Se derriban las antiguas murallas de la ciudad y con ello el cinturón que impedía su crecimiento fuera de ellas.

Empieza una nueva época de crecimiento para la ciudad con varios planes urbanísticos de reforma interior, como el de Federico Aymami, que dio lugar a la calle de la Paz y la avenida del Oeste, y otros planes de ensanche y crecimiento extramuros.

Después de este fugaz recorrido por la historia de la ciudad ligado al río, llegamos a un momento fundamental para entender la historia reciente de Valencia.

1957 dC_ Tiene lugar la gran riada. Durante la madrugada del 14 de octubre la ciudad se convirtió en una gran balsa de agua, la cual entró en tromba llevándose por delante los puentes de más reciente construcción, algunas casas y dejando sin hogar a miles de ciudadanos.

Los valencianos empezaron pronto a trabajar para recuperar el estado de su ciudad pero las ayudas no llegaron con la suficiente velocidad. En junio de 1958 un nuevo temporal provocó otra riada que inundó algunos barrios de la ciudad como el marítimo.

Ya a principios de 1958 se empezó a hablar del denominado "**Plan Sur**" que consistía en desviar el cauce del río por el sur de la ciudad. Fue en 1961 cuando definitivamente se aprobó. Los encargados de redactar el proyecto fueron el arquitecto Fernando Martínez García-Ordoñez y el ingeniero de caminos Claudio Gómez Perreta.

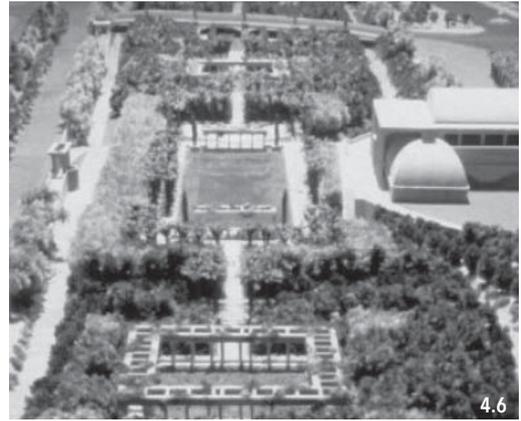
1965 dC_ Comienzan las obras del Plan Sur que se culminan en 1969.

1972 dC_ Tiene lugar una riada el 18 de junio que llena el nuevo cauce de orilla a orilla.

Hasta este momento y desde la riada de 1957 la ciudad se había acostumbrado a vivir de espaldas al río, probablemente por el miedo y el



4.5



4.6

respeto que este les generaba. El viejo cauce por aquel entonces era propiedad del estado.

En una primera propuesta, el ministerio de Obras Públicas proyectó ocupar el antiguo cauce con una autopista de 28 metros de ancho para distribuir el tráfico de la ciudad.

1976 dC_ Se crea una comisión "Pro Cauce" que bajo el lema "El llit del Turia es nostre y el volem verd" (el cauce del Turia es nuestro y lo queremos verde) se opuso a la creación de la autopista proponiendo crear un eje verde a lo largo de todo el cauce seco.

El 1 de diciembre de ese mismo año sucede un hecho muy importante y es la cesión de los terrenos del antiguo cauce a la ciudad de Valencia por parte del Rey Don Juan Carlos. Tan solo unos 170.000 metros cuadrados cerca de la desembocadura son reservados para el estado.

1978 dC_ Se convoca un concurso de ideas para la redacción del Plan Especial del Parque Urbano del río Turia.

El año siguiente y tras la celebración de las primeras elecciones municipales democráticas se declara desierto el primer premio.

1981 dC_ El Ayuntamiento firma un contrato con Ricardo Bofill para desarrollar todo el plan urbanístico del viejo cauce. El proyecto fue presentado en 1982.

Ricardo Bofill tan solo termina llevando a cabo la zona correspondiente al denominado "Palau de la Música", pero el espíritu de su plan se lleva a cabo con diferentes proyectos a lo largo de todo el río. Hoy en día tan solo queda por finalizar la conexión con el puerto llamado "Jardín del Turia con el Puerto y el mar".

En la actualidad el antiguo cauce del Turia dota a la ciudad de Valencia de un gran pulmón verde y una zona de esparcimiento y actividades para toda la población. Entre otras zonas nos podemos encontrar con las siguientes:

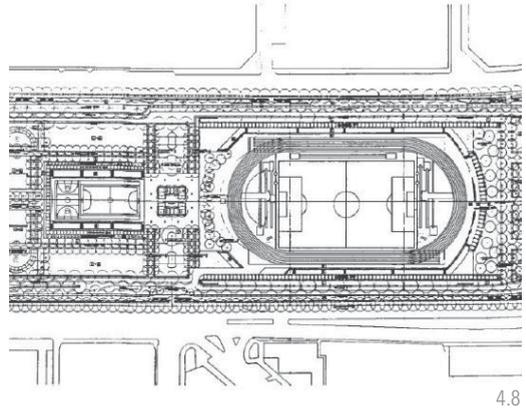
4.6 | Plano y maqueta de la propuesta de autovía para el viejo cauce del Turia.

4.7 | Maqueta del proyecto de Ricardo Bofill para los Jardines del Palau de la Música, una zona del antiguo cauce finalmente ejecutada por el arquitecto.



4.7 | El denominado Parque de Cabecera es un ejemplo de los jardines urbanos que se han creado en el viejo cauce. Esta gran zona verde se sitúa en el principio del cauce seco y posee un gran lago navegable.

4.8 | Plano de proyecto del estadio de atletismo que sirve de muestra de los equipamientos deportivos construidos en el cauce fluvial.



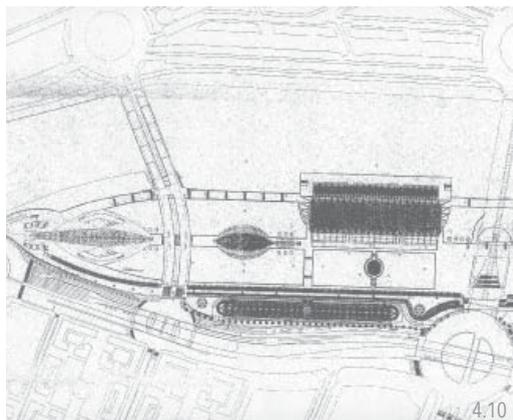
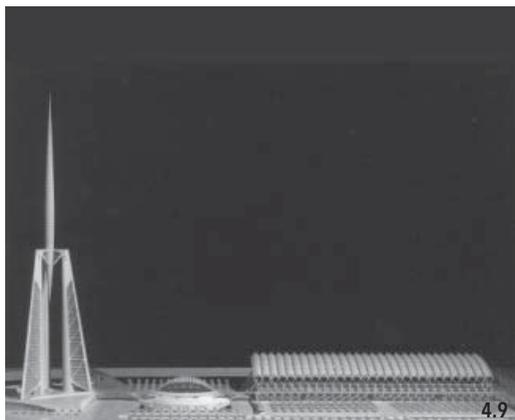
- El Bioparc, un gran y moderno parque zoológico.
- Varias zonas ajardinadas con diferentes vegetaciones y estilos: El parque de cabecera, la zona conocida como "Vetges tu!" (¡Ya ves!), zonas de bosque urbanos, los jardines del "Palau de la Música", el parque infantil del "Gulliver"...
- Diversas zonas deportivas: Un estadio de atletismo, campos de futbol, besibol, rugby, minigolf...
- Edificios culturales: Palau de la Música y Ciutat de les Arts i de les Ciències.
- Diversos e interesantes puentes urbanos...

Existen tres cosas que vinculan todas estas actuaciones en el antiguo cauce. En todas ellas se mantiene la idea original de Ricardo Bofill:

Una de ellas es el diseño dedicado a la ciudad y sus habitantes.

Otra sería la de generar zonas verdes a una ciudad que por el mantenimiento de las murallas hasta el siglo XIX tenía una gran carencia de parques y jardines.

Y por último, pero que resulta muy interesante para entender en parte la CACV, el agua como hilo conductor del viejo cauce y como recuerdo de lo que un día fue.



LA CIUTAT DE LES ARTS I DE LES CIÈNCIES DE VALENCIA

1989_ Surge la idea de crear en la zona del Jardín del Turia que lindaba con el camino de las Moreras un complejo que albergara un museo científico. Esta originaria idea se vino a llamar la "Ciudad de las Ciencias", y su ideólogo fue el catedrático de Historia de la Ciencia de la Universitat de València José María López Piñero.

Este complejo, mitad turístico y mitad cultural pretendía "hacer de Valencia un lugar emblemático", tal y como afirmó el entonces presidente de la Generalitat Valenciana Joan Lerma. La "Ciudad de las Ciencias" constaría de tres edificios: Una torre de telecomunicaciones de 370 metros de altura (la tercera más alta del mundo en aquellos momentos), un planetario y un museo de carácter científico.

1991_ El Consell aprueba la cesión de los terrenos. Cuatro meses después se presenta el proyecto diseñado por Santiago Calatrava. A finales de este año se constituye una empresa pública para la gestión de las obras.

1994_ Comienzan las obras.

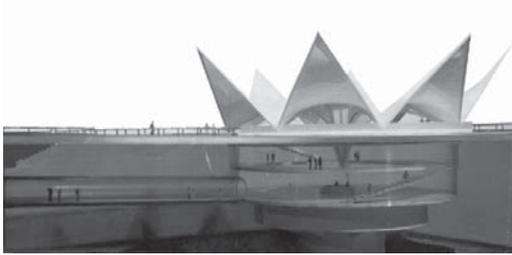
1995_ Hay un cambio de gobierno en la Generalitat. Por entonces las obras están ya adjudicadas y la cimentación de la torre de comunicaciones ya está ejecutada. Se paralizan las obras por orden del consejero de Economía y Hacienda y se anuncia por parte del gobierno autonómico un "cambio de filosofía" en el proyecto.

Se redefine el proyecto y pasa a llamarse la "Ciudad de las Artes y de las Ciencias", manteniendo dos de los edificios originales, el Museo y el Planetario, pero sustituyendo la Torre de telecomunicaciones (que se había convertido en un hito político del bando contrario al gobierno) por un Palacio de la Ópera. Además se decidió añadir un nuevo elemento al complejo, el Parque Oceanográfico.

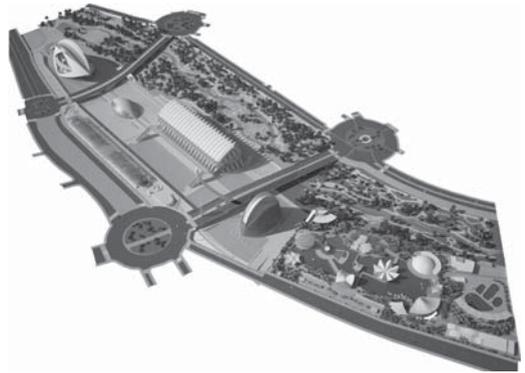
1996_ Calatrava rediseña su trabajo inicial y presenta el proyecto de tres de los edificios antes indicados: Palacio de las Artes, Museo de las Ciencias y lo que pasa a denominar l'Hemisféric (el anterior planetario).

4.9 | Maqueta de la original "Ciudad de las Ciencias" en la que se pueden ver los tres edificios que componían el complejo en un primer momento: la torre de telecomunicaciones, el planetario y el museo de las ciencias. Cabe destacar que el diseño original del planetario era diferente al que finalmente se ha construido y que actualmente conocemos como "l'Hemisféric".

4.10 | Plano de ordenación del proyecto de la "Ciudad de las Artes y de las Ciencias" donde ya podemos observar el edificio del "Palacio de las Artes." También se incluye en este plano el edificio funcional de aparcamiento coronado con el conocido "Umbracle".



4.11



4.12

4.11 | Maqueta de las primeras ideas de Félix Candela para el "Parque Oceanográfico". El edificio que se ve en la imagen correspondería con el de acceso. El diseño ideado por el arquitecto para este y los demás edificios es diferente del que se ejecutó al final tras su fallecimiento. En conversación con los ingenieros Domingo y Lázaro, "lo que se pretendió finalmente es dar un homenaje póstumo a Félix Candela, haciendo una reinterpretación de alguna de sus obras".

4.12 | Imagen tridimensional de la configuración final de la "Ciutat de les Arts i de les Ciències" de Valencia.

El diseño del Parque Oceanográfico se encarga a Félix Candela, arquitecto español exiliado a México después de la guerra civil y que ha desarrollado multitud de obras en toda latino américa en las que utiliza lo que denomina "cascarones de concreto" (láminas de doble curvatura de hormigón armado). Lamentablemente Candela falleció durante la fase de ideación del proyecto dejando algunos diseños sin terminar.

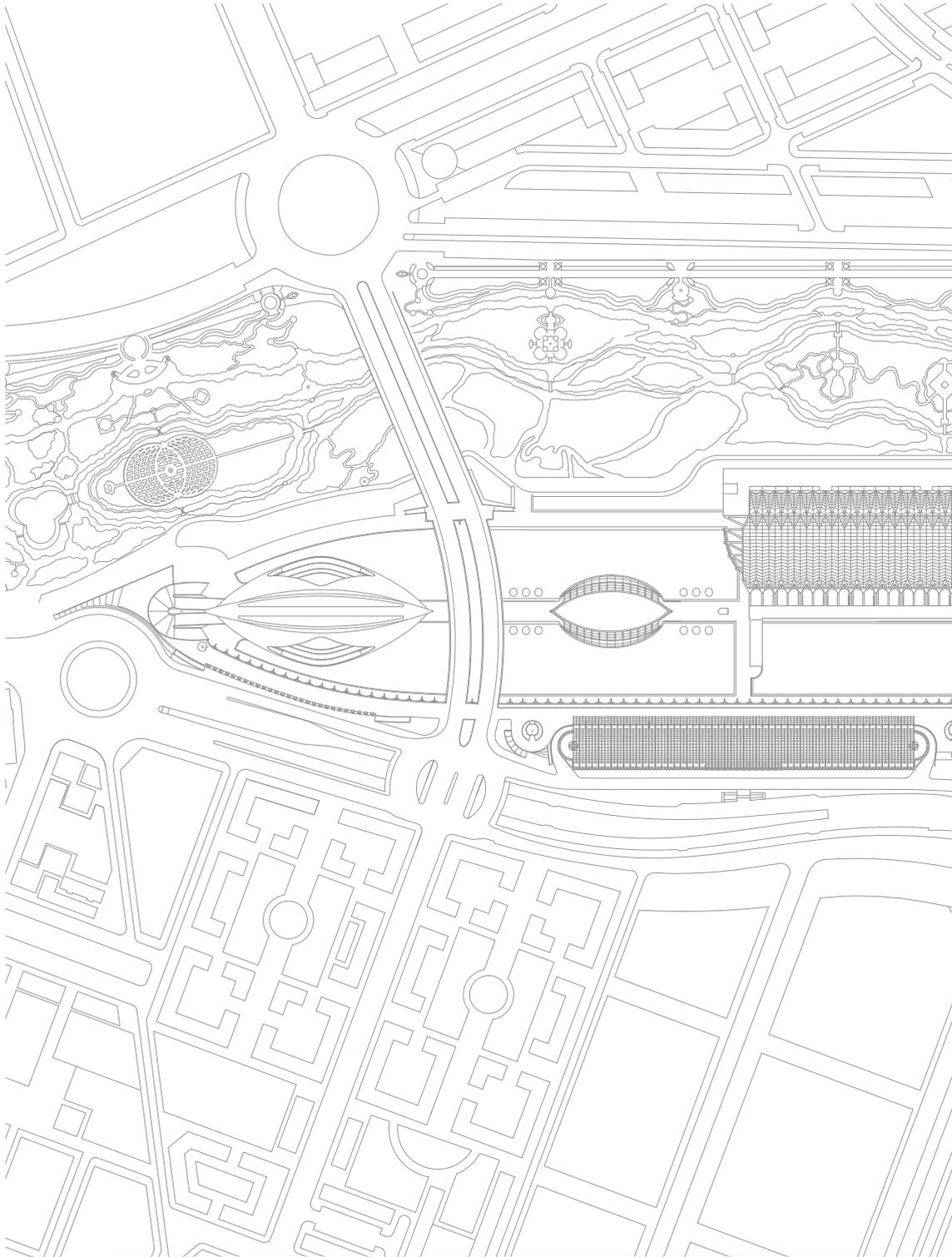
Posteriormente pasó a hacerse cargo del proyecto del Parc Oceanogràfic una empresa de gestión de proyectos creada al efecto, "Civis Project Management SLC", la cual fue encargando los proyectos de manera parcial a diferentes despachos de arquitectura e ingeniería, entre los que se encuentra "CMD ingenieros", con Alberto Domingo y Carlos Lázaro al frente, y que diseñaron la cubierta del restaurante.

Los diferentes edificios han ido terminándose progresivamente y aún hoy en día, y debido a la crisis económica y del sector de la construcción, hay alguno de ellos que no ha concluido su ejecución a pesar de que ya se ha inaugurado y está en funcionamiento.

El sobrecoste de las obras, los enfrentamientos políticos que han utilizado el complejo como instrumento para sus disputas, la controvertida personalidad de Santiago Calatrava y de sus obras, la crisis económica... han situado la "Ciutat de les Arts i de les Ciències" en el ojo del huracán de todas las críticas.

Lo bien cierto es que, sin entrar en estimaciones económicas ni políticas, el complejo ha puesto en valor la ciudad de Valencia, la ha situado en el mapa internacional y hay que reconocer, que aunque a los técnicos en general no les agrada el tipo de edificio diseñado por Calatrava, al público en general les resulta muy atractivo. Esto se puede comprobar con el alto número de visitas que recibe al cabo del año.

Por lo que afecta a mi investigación, sin tener en cuenta nada de lo anterior, supone un gran laboratorio de formas geométricas singulares que me permiten de una manera cercana tener acceso a ellas, poder estudiarlas, ver su evolución con el paso del tiempo...

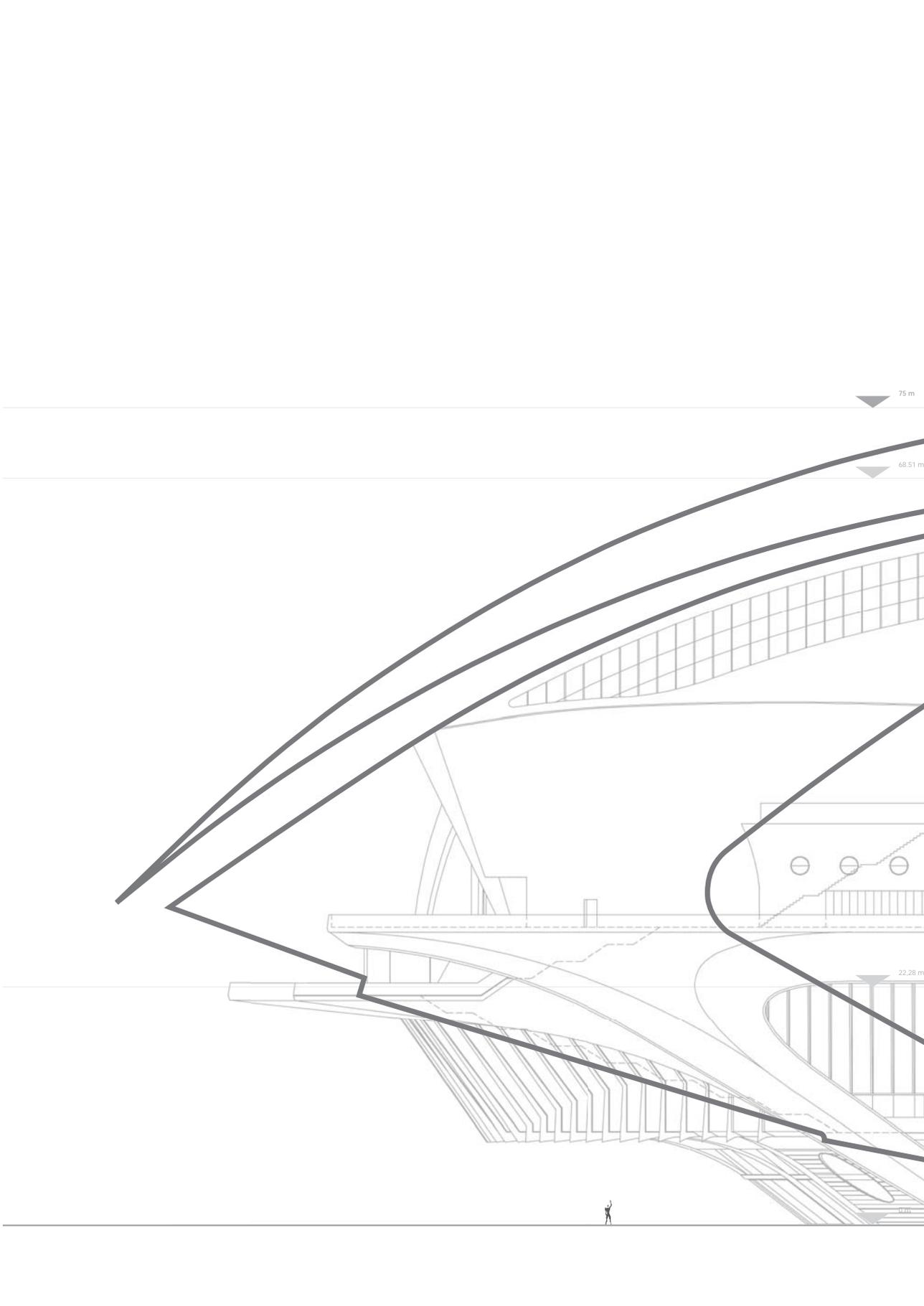


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro

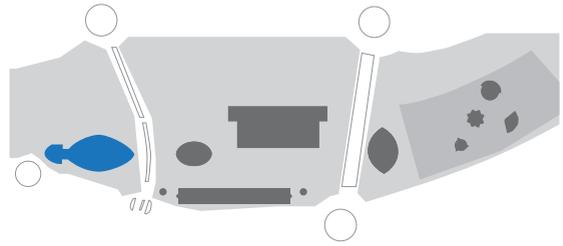


75 m

68.51 m

22.28 m

0.00 m



4.3.1 | PALAU DE LES ARTS REINA SOFIA

ARQUITECTO	AÑO DE CONSTRUCCIÓN
SANTIAGO CALATRAVA VALLS	1996/2006
USO	
3 AUDITORIOS: ÓPERA, TEATRO Y MÚSICA	
DIMENSIONES	
37.000 m ² - 230 m LONGITUD - 72 m ALTURA	
ELEMENTOS A ANALIZAR	
CUBIERTA, CERRAMIENTO y MIRADOR	

El edificio del “Palau de les Arts Reina Sofia” se localiza en la zona este de la ciudad de Valencia, en el antiguo cauce del río Turia, entre el denominado paseo de las Moreras y la autopista del Saler, formando parte de la “Ciutat de les Arts i de les Ciències”.

Dentro del complejo el edificio es el más próximo al centro urbano, situándose en la zona oeste de la CACV.

El edificio se diseña con la doble intención de construir un auditorio múltiple que albergue un completo programa cultural musical que desarrolle en diferentes niveles parciales, hasta un total de 11, y de configurar un hito urbano que se implante como elemento dinámico y consolidador de una nueva zona de expansión de Valencia. Hoy en día se ha convertido en un símbolo paisajístico de la ciudad.

La forma en planta es lenticular, de elipse apuntada con su eje longitudinal en la dirección que marca el viejo cauce. Fundamentalmente caben destacar tres elementos arquitectónicos por encima de los demás: La gran cubierta en forma de pluma, el elemento de cerramiento elipsoidal y los dos miradores de vidrio que se sitúan en los extremos este y oeste del edificio.

Con unas dimensiones monumentales, 230 metros de longitud y 72 metros de altura, su composición recuerda formas náuticas como queriendo recordar el pasado de su ubicación.

Construido sobre una cimentación existente y que correspondía a uno



4.13 - 4.14 | Imágenes exteriores del Palau de les Arts

4.15 | Detalle de la cubierta del edificio

4.16 | Detalle de los arbotantes de a cáscara de cerramiento

4.17 | Imagen interior - Auditorio de ópera

4.18 | Imagen interior - Auditorio de música

de los edificios del proyecto original de la Ciudad de las Ciencias, la Torre de Telecomunicaciones, el edificio del Palau aprovecha esa cimentación para crecer en altura y anchura manteniendo las dimensiones en la base de la torre.

Su programa funcional consta de 3 auditorios:

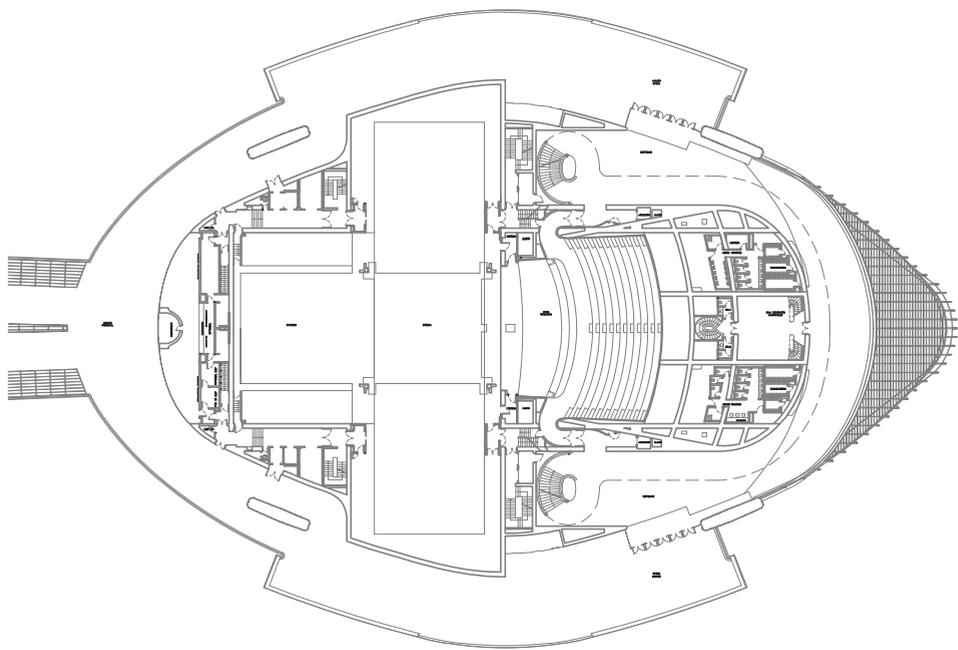
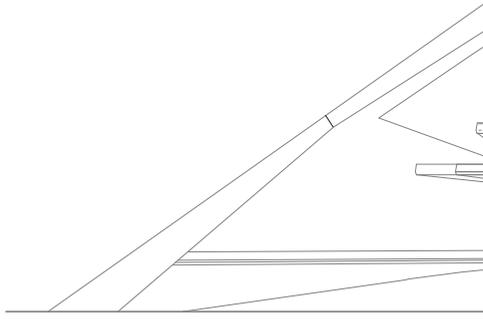
- Uno para música de cámara también válido como teatro y para música lírica o de orquesta.

- Un segundo destinado a albergar grandes óperas, pero adaptable también a ballet y otras artes escénicas.

- Y por último, un tercer auditorio en la parte superior, a modo de plaza semiabierto, especializado en certámenes de bandas de música.

Todos los espacios auxiliares, de oficina, vestuarios, almacenaje... también se prevén en el edificio.

A continuación se muestran unos planos generales del edificio a escala necesaria para su inclusión en el formato del trabajo. Se han seleccionado tan solo unos pocos para ayudar a la comprensión del edificio. En el apartado de anexos se pueden encontrar la totalidad de los planos a una escala mayor y en formato digital.

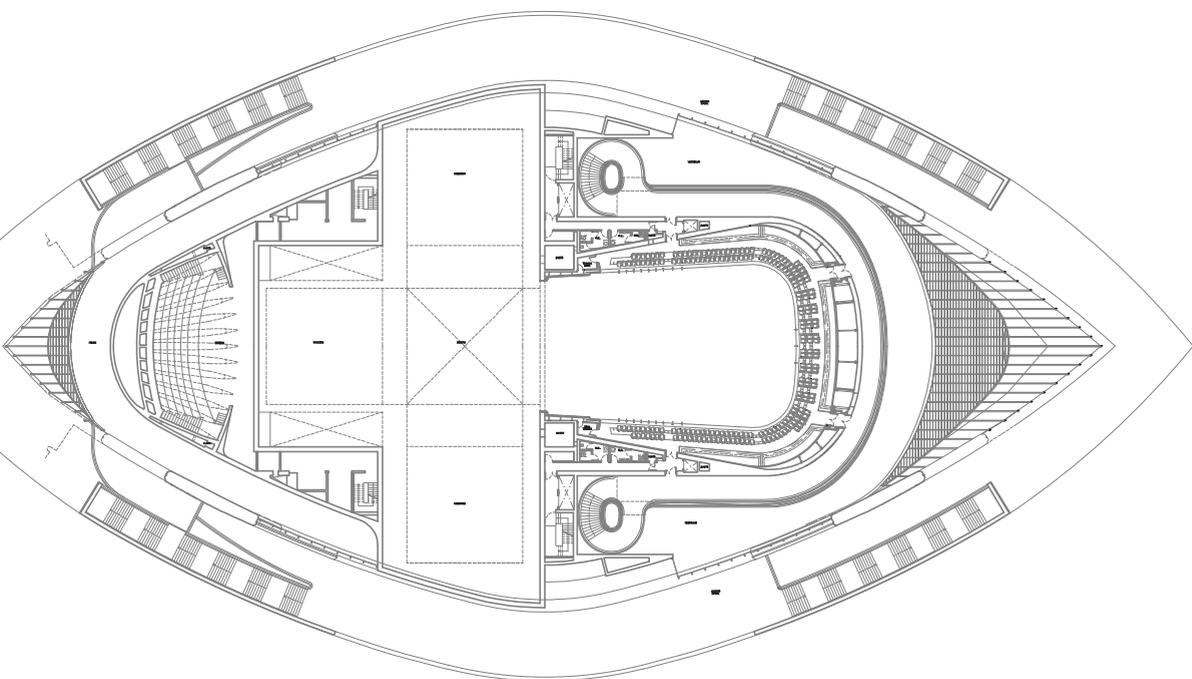
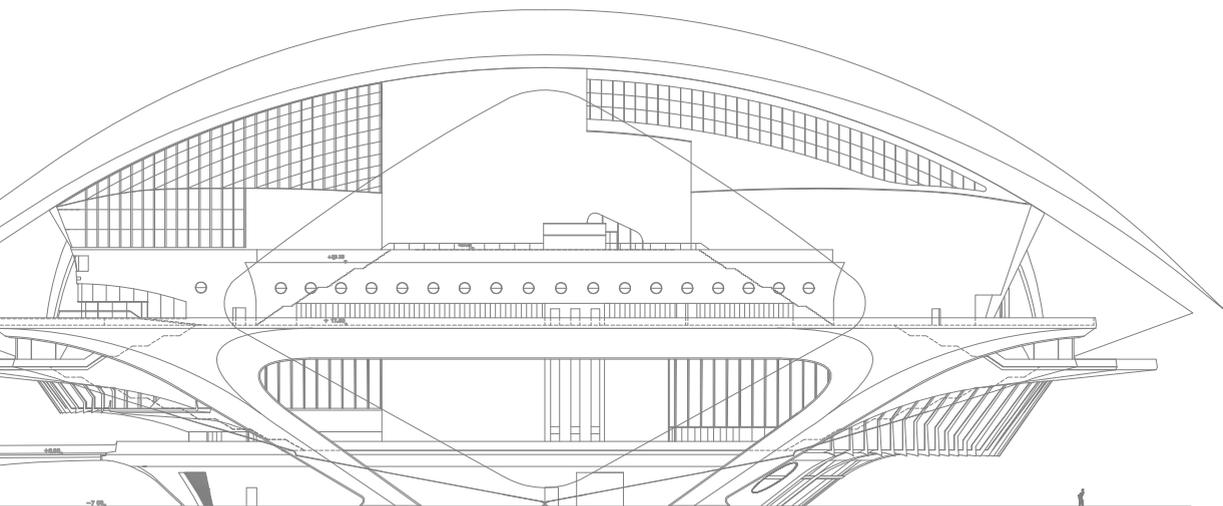


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro



0 10 20 40 80 m E 1/1000

edificio
Palau de les Arts Reina Sofia

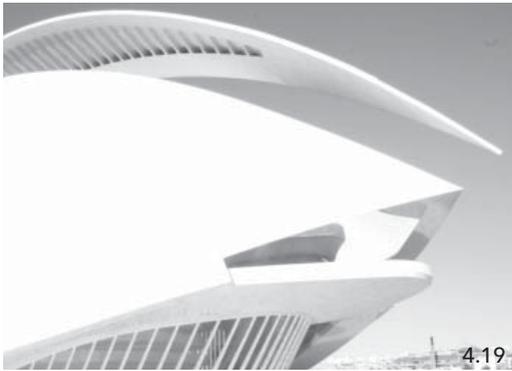
arquitecto
Santiago Calatrava Valls

plano
planta 0-1, planta 11 y alzado

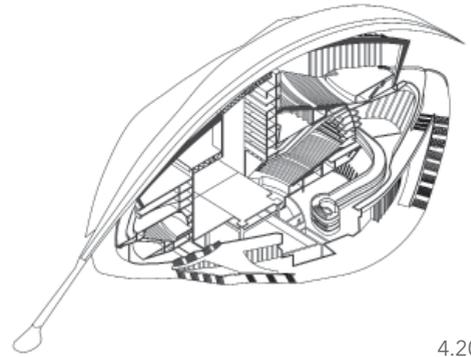
escala
1/1000



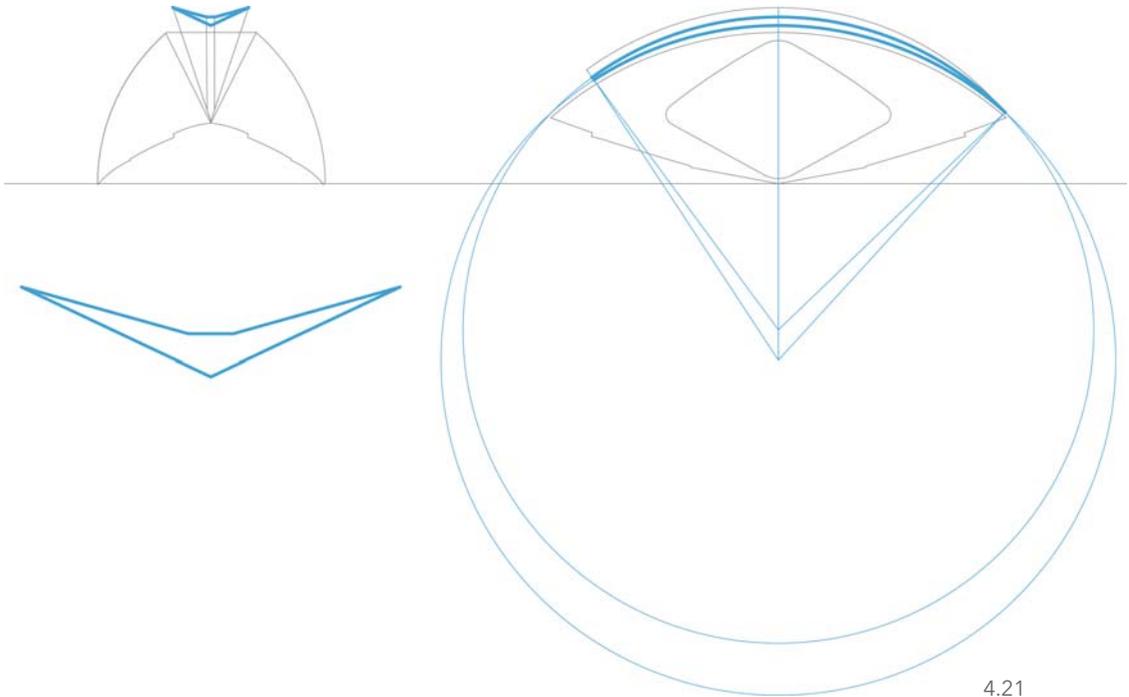
01



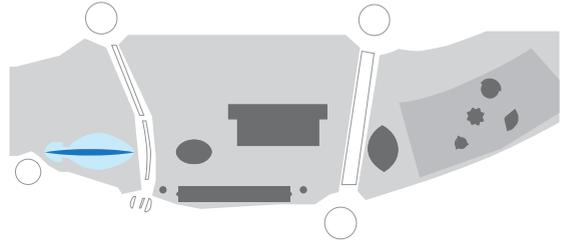
4.19



4.20



4.21



CUBIERTA

4.19 | Imagen exterior de la cubierta donde se puede observar el voladizo de la misma.

4.20 | Esquema axonométrico seccionado del edificio con la representación completa del elemento de la cubierta.

4.21 | Trazados geométricos básicos de las superficies que componen la cubierta.

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

La cubierta del “Palau de les Arts” es probablemente uno de los símbolos de la CACV. Las superficies que generan este elemento arquitectónico son una combinación de cuatro conos y un cilindro.

Una pista acerca de las superficies que componen este gran elemento nos la da las nervaturas que aparecen en la parte posterior de la cubierta, las cuales son rectas. Esto ya nos lleva a pensar que es una superficie reglada descartando otro tipo de superficies como las esféricas o toroidales.

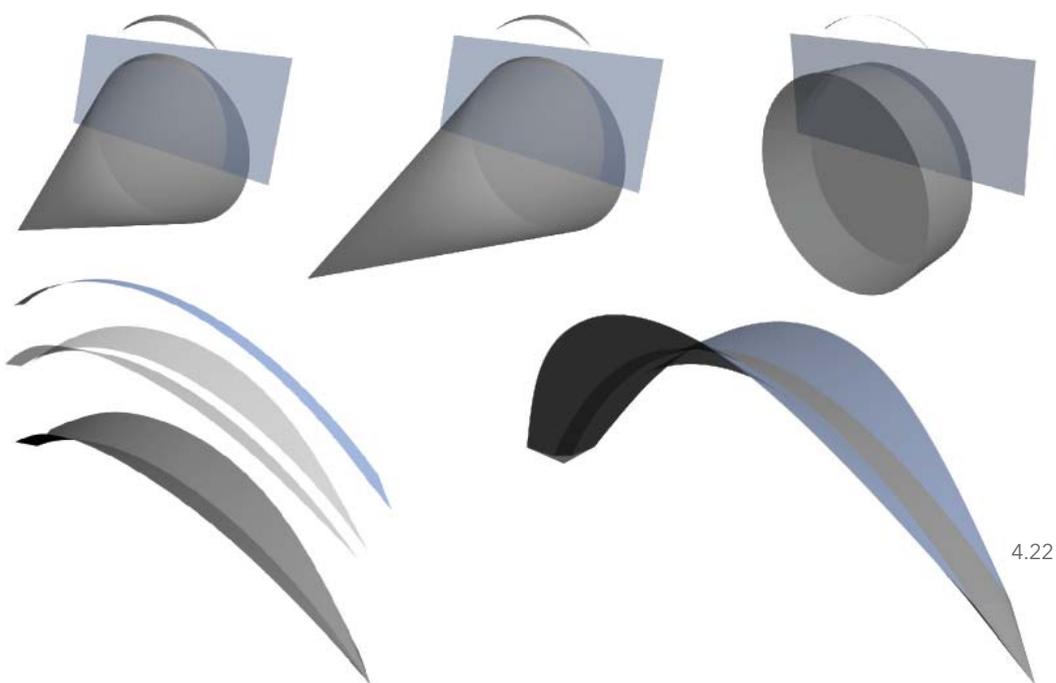
La sección transversal del edificio es simétrica, y es en ésta donde se puede apreciar la inclinación de las nervaturas que coinciden con las generatrices de los conos, así como la posición del cilindro en la parte superior.

En una sección longitudinal a eje del edificio podemos obtener los grandes radios de las bases de estas superficies, del orden de unos 150 metros.

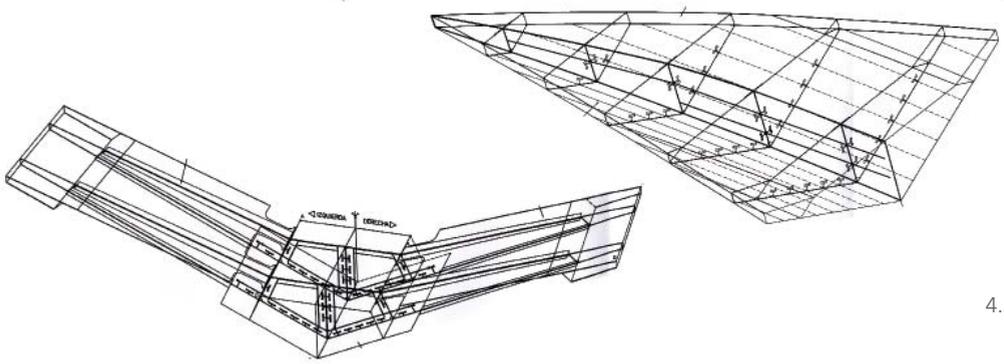
Con estos trazados se puede modelizar las superficies cónicas y el cilindro que generan la cubierta.

También a partir de tres secciones transversales podemos obtener 3 puntos del plano que secciona a los conos para obtener la curva correspondiente al borde de la cubierta. Esta se corresponde con una elipse debido a que su inclinación con respecto del eje de los conos es menor que la de las generatrices con el eje.

Una vez obtenidas las tres superficies se unen tal y como se puede apreciar en el despiece de la página siguiente para componer el conjunto de la cubierta. Este es probablemente uno de los diseños más complejos de deducir de los que no vamos a encontrar en el desarrollo del trabajo, probablemente debido a que se trata de una composición de 4 superficies y a que la porción de superficie que se utiliza en el diseño es muy pequeña respecto del tamaño de la superficie primitiva.



4.22



4.23

4.22 | Generación geométrica de la cubierta del "Palau de le Arts"

4.23 | Detalles axonométricos de la estructura de la cubierta - Proyecto de ejecución del Palau de les Arts - Santiago Calatrava

ESTRUCTURA

La estructura de la cubierta es un alarde del arquitecto. Los 230 metros de longitud de la misma tan solo se apoyan en un punto central y se atirantan de uno de los extremos, el extremo oeste del edificio. De esta manera se contrarresta el peso del vuelo del lado este que tiene una longitud de 120 metros.

Este gran voladizo se hace posible debido a la doble curvatura anticlástica que el arquitecto da al elemento al combinar las dos superficies cónicas superiores simétricas con la cilíndrica, superficies de simple curvatura todas ellas:

- La sección longitudinal a eje del edificio corresponde con una circunferencia, sección paralela a la base de la superficie cilíndrica. La curvatura en este caso es de U invertida.

- La sección transversal nos da una forma triangular en forma de flecha o de V.

La combinación de estas dos secciones es lo que da la doble curvatura anticlástica a la cubierta y lo que, en parte, permite realizar el vuelo de la misma. Es pues este un ejemplo en el que a partir de una composición de superficies de simple curvatura se puede obtener otra de doble curvatura mucho más resistente.

A la resistencia de esta estructura también ayuda la composición de conos inferior, que da inercia a la sección.

El material elegido para la cubierta es el acero, pero evidentemente, no utilizado de manera convencional, sino creando una viga cajón generada por la sección transversal de la cubierta y reforzada interiormente con multitud de perfiles metálicos.

En la imagen de la página anterior se pueden ver algunos detalles de la estructura extraídos de los planos del proyecto de ejecución.



4.24



4.25



4.26



4.27



4.28



4.29

4.24 | Primeras dovelas en izarse correspondientes al apoyo central de la cubierta

4.25 | Presentación de varias dovelas en el suelo de la obra, preparadas para ser elevadas y colocadas en su posición

4.26 | Desarrollo simétrico de la construcción de la cubierta. También se puede apreciar la ejecución simultánea del cerramiento lateral, que se explicará a continuación.

4.27 | Colocación de una de las dovelas ya en su posición final.

4.28 | Imagen de la conexión final en el apoyo atirantado, denominado también "pilono".

4.29 | Izado de la pieza correspondiente a la punta de la cubierta. Este fue el último elemento en colocarse en su posición después de atirantar el apoyo oeste.

CONSTRUCCIÓN

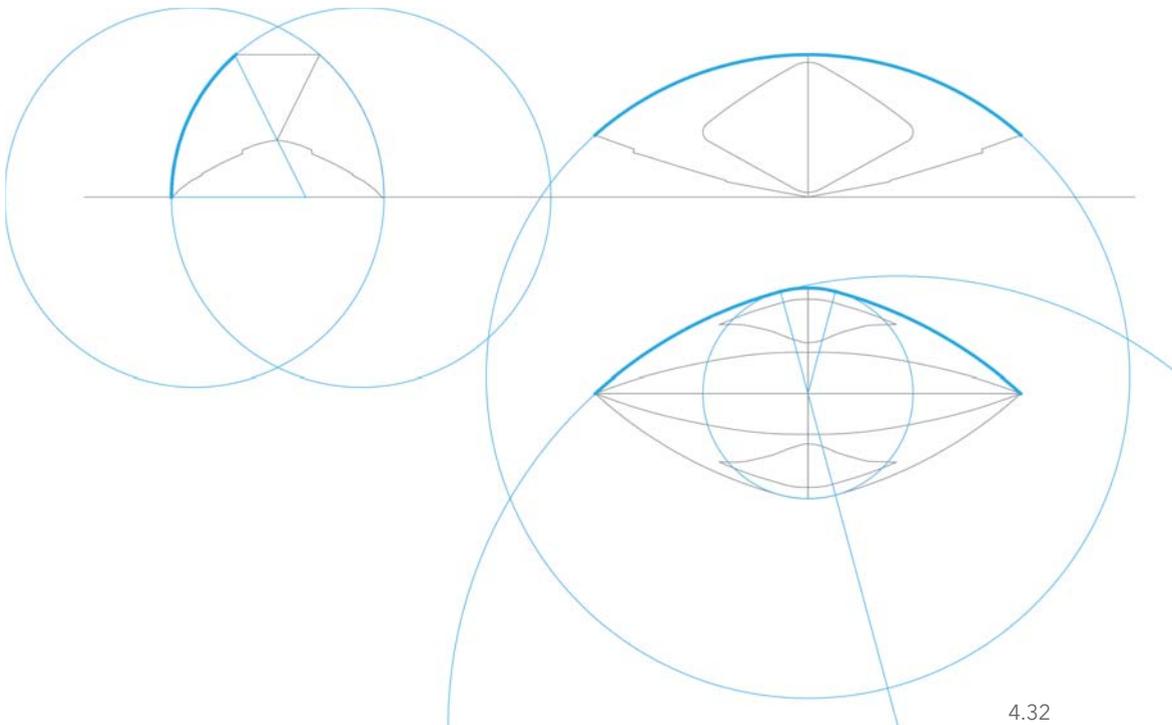
La construcción de esta gran pluma se realizó mediante 61 dovelas metálicas como la que se puede apreciar en la imagen de la página anterior. Para el despiece de la cubierta se utilizaron las generatrices de las superficies cónicas y cilíndrica.

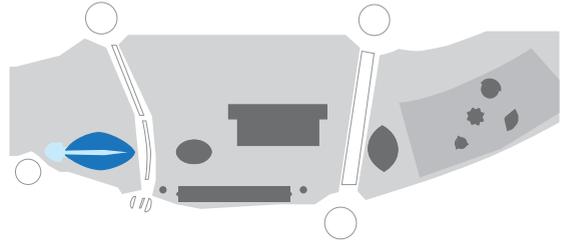
Primero se colocaron las dovelas correspondientes al apoyo central.

Posteriormente se fueron presentando a pie de obra, izando y colocando el resto, que fueron ensambladas de manera equilibrada y simétrica partiendo desde el apoyo.

La última pieza en colocarse tras la terminación del apoyo atirantado fue la punta formada por una única pieza. El esquema axonométrico de esta pieza también se puede observar en la página anterior.

En las imágenes se puede apreciar la ejecución de la cubierta y como el despiece geométrico de las dovelas se convirtió en fundamental para construir un elemento de tan grandes dimensiones.





CERRAMIENTO

4.30 | Imagen exterior del "Palau de les Arts" en la que se aprecia el gran elemento de cerramiento del edificio.

4.31 | Imagen tridimensional del cerramiento aislado del resto del edificio.

4.32 | Trazados geométricos reguladores del diseño del cerramiento.

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

El cerramiento exento en forma de cáscara es el otro elemento definitorio de la forma global del edificio del "Palau de les Arts".

Los trazados generadores que nos dan la forma de este singular elemento los podemos encontrar en la sección transversal del edificio y en la planta.

En la sección transversal vemos como el perfil del elemento describe una circunferencia, lo que nos puede indicar que la superficie que lo genera es de revolución.

En planta vemos como la elipse apuntada que comentábamos páginas atrás, está compuesta por 3 arcos de circunferencia tangentes entre sí en su parte más externa. Esta es la curva que al revolucionar según el trazado obtenido anteriormente nos da la superficie base del elemento

Podríamos decir que la superficie es una composición de 3 elipsoides de revolución, cada uno de ellos generados por las circunferencias calculadas en planta y revolucionadas de la manera descrita.

En el alzado también podemos observar un trazado circular, pero en este caso más que tratarse de un trazado regulador, lo que se trata es de la sección que el plano que podemos ver proyectante en la sección transversal, le provoca la superficie anterior.

Esta sección junto con la producida por el plano horizontal limitan la superficie de "elipsoide" que compone el cerramiento.

Para terminar de definir el elemento se utilizan los trazados de cilindro de base un rombo con los vértices redondeados y una superficie cilíndrica de directriz irregular, ambos trazados obtenidos a partir del alzado. Estos volúmenes se restan al anterior obteniendo la forma final del cerramiento. Quizás esta última operación resta limpieza a la superficie y dificulta su comprensión

4.33 | Generación geométrica del cerramiento del "Palau de les Arts"

4.34 | Esquema y detalles estructurales del cerramiento extraídos del proyecto de ejecución del Palau. Se puede observar un esquema de despiece en alzado donde apreciamos la parte denominada balancín, trípode y las diferentes planchas de la cáscara. También vemos los detalles constructivos de estas partes y de los arbotantes que hay ocultos tras esta "piel".

ESTRUCTURA

Desde el punto de vista estructural podríamos afirmar que en este caso, la geometría no juega a favor del comportamiento resistente del recurso compositivo, ya que es necesaria toda una estructura oculta para poder soportar el elemento. A pesar de la doble curvatura, sinclástica en este caso, el elemento no es estable por sí solo sino que necesita de múltiples apoyos y refuerzos.

El elemento, estructuralmente está dividido en tres partes:

- Balancín, en la parte inferior y realizado con hormigón pretensado apoyado en una rótula esférica.
- Trípode, en la parte superior. Formado por tres perfiles de acero y que sustenta la pieza clave de la cáscara.
- Arbotantes y paneles sandwich, en el desarrollo lateral del cerramiento.

Aparentemente el elemento tan solo apoya en un punto en la zona inferior, la que hemos llamado balancín, pero interiormente tiene una estructura a base de arbotantes culminada con el trípode metálico en la parte superior que es que resiste la gran estructura de 172 metros de longitud.

Para dar rigidez a la estructura se sitúan los arbotantes a modo de costillas, haciéndolos coincidir con las secciones paralelo del elipsoide generador de la forma.

En los dibujos de la página anterior pueden verse los detalles de los tres elementos estructurales, así como el esquema de distribución de los elementos en un alzado.



4.35 | Imagen de la construcción donde podemos observar como el cerramiento empezó a realizarse por su parte inferior o balancín y por la clave superior apoyada en lo que se ha denominado trípode.

4.36 | Imagen cercana del trípode superior de la estructura.

4.37 | Panel sandwich de la cáscara apeado en obra. Se pueden observar las vigas cajón de rigidización en los bordes.

4.38 | Proceso de montaje de los paneles del cerramiento. Se aprecia como el despiece de los mismos se ha realizado a partir de las secciones paralelo del elipsoide base.

4.39 | Izado y colocación de uno de los paneles.

4.40 | Imagen general del edificio en estado casi concluido del cerramiento. Es interesante apreciar todas las juntas entre paneles.

CONSTRUCCIÓN

Por lo que se refiere a los materiales, El balancín es el único elemento de hormigón, ya que el resto del cerramiento y el trípode de la parte superior están realizados con material metálico.

El balancín fue el primer elemento en ejecutarse, utilizando para ello hormigón pretensado con 7 cables tesados. La unión entre el balancín y el resto de la cáscara se realizó mediante una pieza de transición de estructura mixta acero-hormigón para asegurar una buena transmisión a rasante de las cargas.

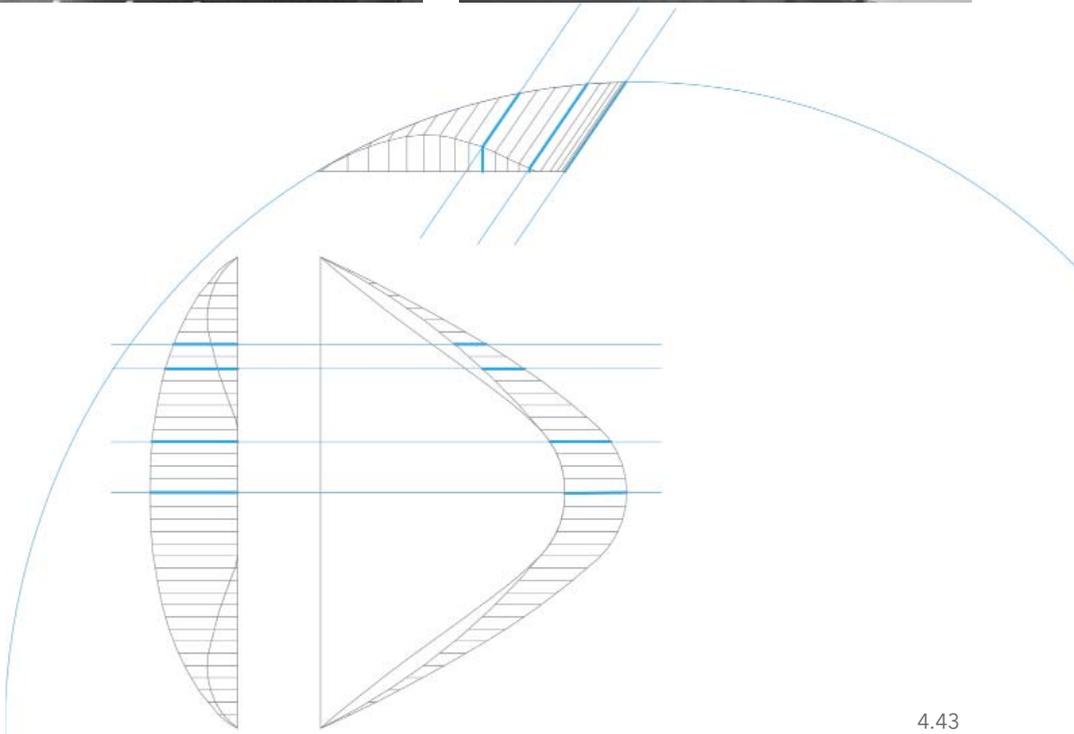
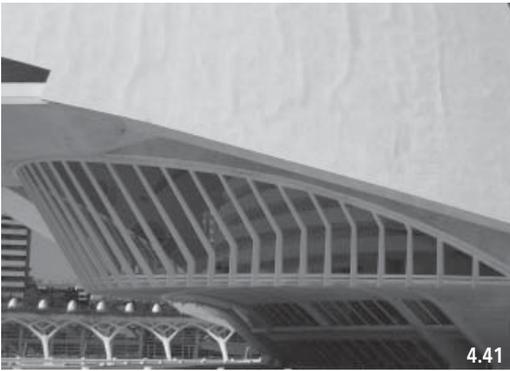
El trípode está compuesto, como se puede ver en el plano de la página anterior, por tres perfiles metálicos empotrados en el muro de hormigón del núcleo del edificio y articulado con la pieza clave de la cáscara.

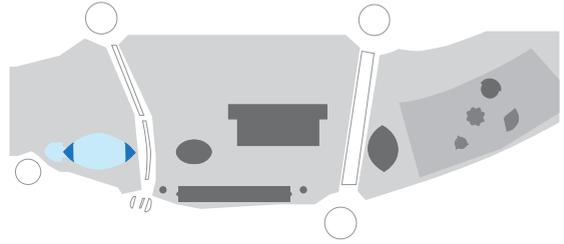
La cáscara está formada por un panel sándwich metálico, con 2 chapas de 8 mm de espesor y 400 mm de separación entre ellas. En sus bordes incorpora una vigas cajón formadas por chapas de 15 y 25 mm de espesor para dar rigidez al panel.

Interiormente el cerramiento tiene 10 arbotantes con sección metálica de ancho constante e igual a 500 mm que rigidizan las chapas de la cáscara.

Como se puede deducir de esta descripción, cuando a una estructura es necesario rigidizarla de la manera que está hecho en este caso es que la superficie por si sola no es capaz de soportar los esfuerzos y por lo tanto no tiene un diseño estructural que podríamos considerar correcto.

El acabado está materializado con trencadís, lo cual está dando problemas de falta de adherencia en la actualidad.





MIRADORES

4.30 | Imagen exterior del mirador este del "Palau de les Arts"

4.31 | Imagen interior del mirador este. Se puede observar la vista que se tiene desde el mismo.

4.32 | Trazados geométricos generadores de las superficies del mirador este.

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

En el edificio del "Palau de les Arts" se sitúan dos miradores en los extremos este y oeste. Están completamente acristalados en sus paramentos verticales y en el pavimento, con vidrio traslúcido. Desde ellos se tienen unas vistas de la CACV y del río Turia sorprendentes.

Lo interesante de estos miradores es su forma. Las formas que generan las superficies acristaladas de este elemento arquitectónico son una combinación de dos cilindros: Uno de ellos de base parabólica y de generatrices verticales; El otro de directriz irregular curva, generatrices inclinadas 55° con la horizontal y que genera una estética intersección con el anterior.

Al aislar el elemento mirador de los planos del edificio podemos observar que el trazado parabólico del cilindro vertical, se puede apreciar con toda claridad, pero el del cilindro inclinado no es visible.

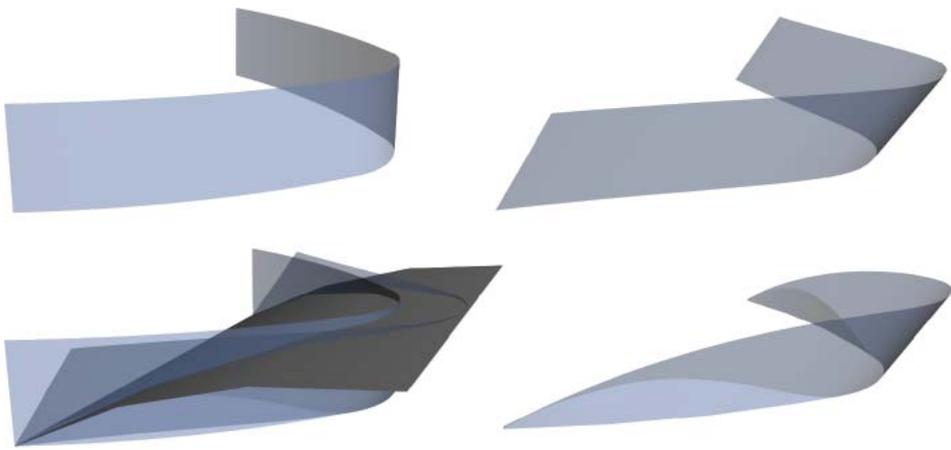
Esto es debido a que el cilindro oblicuo está limitado en su parte superior por otro cilindro de base circular y de eje horizontal, y en su parte inferior por la intersección con el cilindro vertical de base parabólica.

Para poder obtener la directriz del cilindro inclinado es necesario partir de la intersección y mediante métodos de geometría descriptiva obtener la traza del cilindro en un plano horizontal, que se correspondería con su directriz.

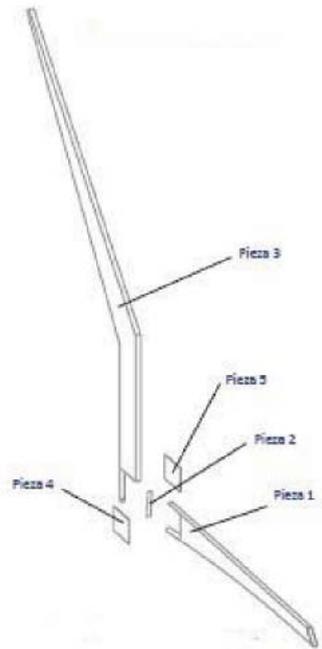
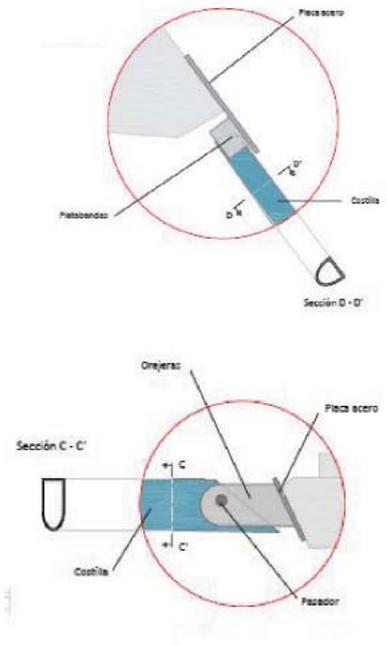
En el alzado podemos observar la inclinación de las generatrices, lo que nos ayuda junto con la directriz calculada, trazar este cilindro.

La superficie tiene una altura en su punto más alto, de 8,70 metros, y una longitud medida en desarrollo de alrededor de 75 metros.

Este es probablemente uno de los diseños más acertados, ya que como ahora veremos, la materialización constructiva y el concepto estructural están correctamente proyectados.



4.44



4.45

4.44 | Generación geométrica del mirador este del Palau.

4.45 | Esquemas constructivos del mirador: Detalle esquemático de los apoyos de las costillas metálicas y esquema axonométrico del despiece de una de las piezas estructurales.

ESTRUCTURA

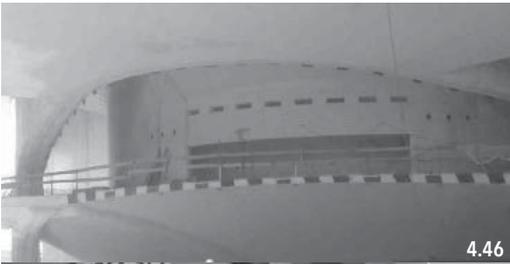
La estructura del mirador está realizada a base de costillas metálicas huecas de forma variable. Estas costillas coinciden con las generatrices de las dos superficies cilíndricas, y con rectas de la superficie plana de la base. De esta manera se han resuelto a partir de un eje poligonal.

Estas costillas metálicas están compuestas por una serie de piezas montadas a pie de obra tal y como se muestra en el esquema de la página anterior. La dimensión máxima de estas piezas puede ser, en caso central, de 10,70 metros. En este caso la costilla solo tendrá dos tramos rectos ya que coincide solo con la superficie inclinada y la horizontal.

Las costillas están empotradas en la parte superior y articuladas en la inferior, tal y como muestran los esquemas que se adjuntan.

Para dar estabilidad a la estructura se dispone de un perfil tubular hueco entre cada par de costillas situado justo en el quiebro inferior de las mismas. De esta manera se consigue un arriostramiento transversal. Este perfil tubular aproxima la directriz parabólica del cilindro vertical.

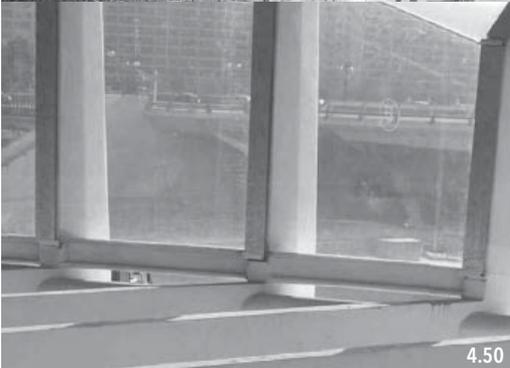
La materialización de estos miradores a partir de estas piezas poligonales coincidentes con las generatrices, permite utilizar vidrios rectangulares planos para aproximar la superficie. El único inconveniente, en el que la geometría si que es fundamental para su resolución, es el corte de los vidrios en la intersección de los cilindros. Este corte ha de ser perfectamente realizado para conseguir la junta a hueso entre vidrios diseñada.



4.46



4.48



4.50



4.47



4.49



4.51

4.46 | Estructura de hormigón del edificio del Palau terminada y con las placas de anclaje colocadas para recibir las costillas metálicas del mirador.

4.47 | Imagen desde el interior del edificio con las costillas colocadas.

4.48 | Cimbrado colocado en la parte inferior del mirador durante el montaje de las costillas metálicas.

4.49 | Montaje del suelo de vidrio traslúcido. El andamiaje inferior ya está retirado y el pavimento se monta con grúa móvil

4.50 | Detalle de colocación del vidrio con una estructura auxiliar interior soldada a los nervios metálicos.

4.51 | Fase de acabados del mirados. Sellado de las juntas. El falseado de la parte superior todavía no se ha realizado.

CONSTRUCCIÓN

Durante la ejecución de los elementos de hormigón de la estructura, se dejan embebidos una serie de placas de anclaje metálicas para posteriormente apoyar en ellas las costillas metálicas del mirador.

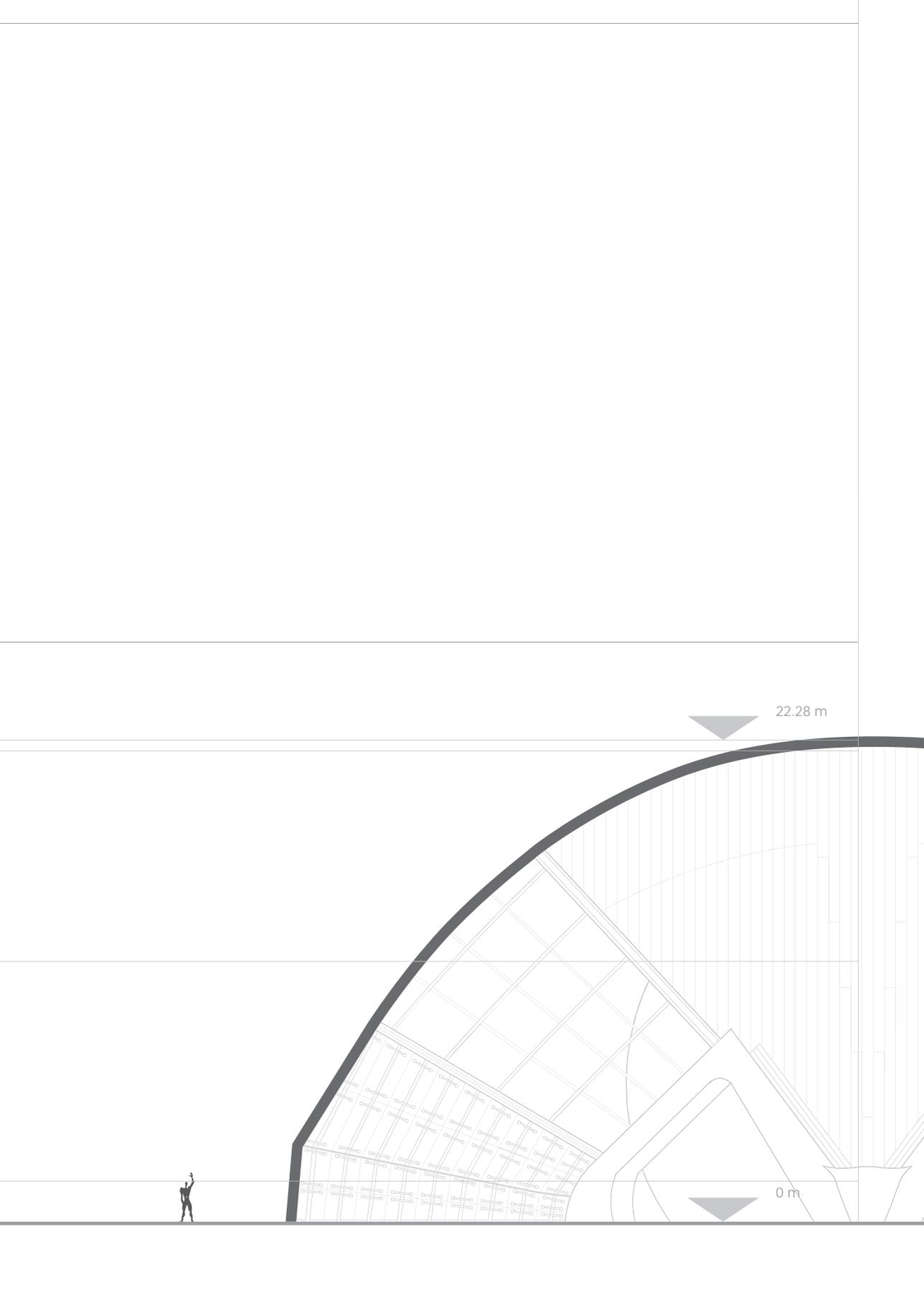
Una vez terminada la fase de hormigonado del núcleo central del edificio del Palau, se montan a pie de obra los diferentes nervios acorde al despiece mostrado en la página anterior. Se sitúan en posición y se anclan a las placas de anclaje que comentábamos antes.

Durante el montaje de las costillas la estructura se mantiene apeada en una cimbra inferior. Una vez apoyada en la estructura del edificio y arriostrada horizontalmente, toda la estructura metálica se descimbra.

El siguiente paso es la ejecución del pavimento de vidrio traslúcido. Para ello se utiliza una subestructura de pletinas metálicas y baldosas de vidrio de reducidas dimensiones.

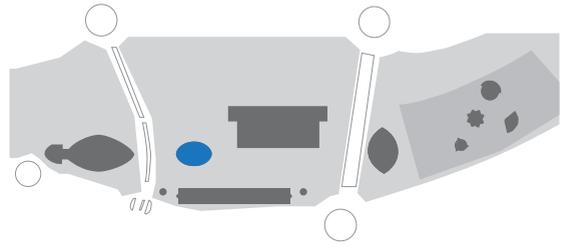
Para el montaje de los vidrios verticales del mirador también se utiliza tras los nervios metálicos una subestructura de pletinas a modo de galces para soportar los grandes paños. Estos vidrios son de una única pieza, planos y rectangulares, gracias al facetado de los cilindros conseguido por los nervios que siguen las generatrices de la superficie.

Para finalizar se sellan las juntas del vidrio y se realizan una serie de falseados para ocultar los encuentros de las costillas con la estructura de hormigón.



22.28 m

0 m



4.3.2 | L'HEMISFÈRIC

ARQUITECTO	AÑO DE CONSTRUCCIÓN
SANTIAGO CALATRAVA VALLS	1996/1998

USO
2 SALA DE PROYECCIONES, TIENDA, CAFETERIA y OFICINAS

DIMENSIONES
14.000 m ² - 110 m LONGITUD - 55,5 m ANCHURA - 26 m ALTURA

ELEMENTOS A ANALIZAR
CUBIERTA y CANCELA

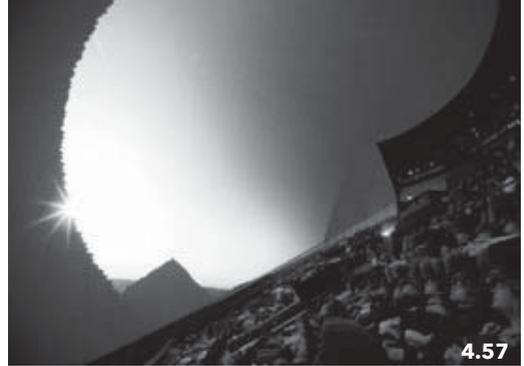
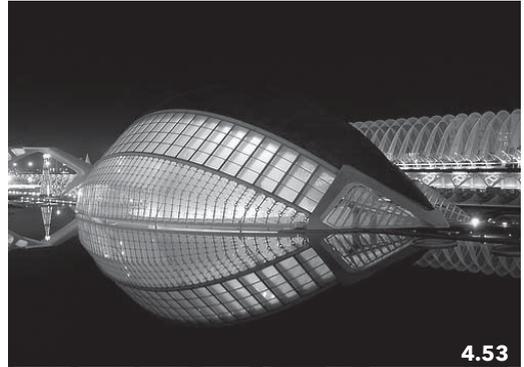
El edificio de "l'Hemisfèric" se localiza en la zona este de la ciudad de Valencia, en el antiguo cauce del río Turia, entre el denominado paseo de las Moreras y la autopista del Saler, formando parte de la "Ciutat de les Arts i de les Ciències".

Dentro del complejo el edificio se sitúa entre el "Palau de les Arts" con quien limita al oeste, el "Museu de les Ciències" situado al este y el "Umbracle", al sur con respecto su posición. A su vez está flanqueado por dos estanques rectangulares al norte y al sur.

Probablemente es el edificio más discreto de todo el complejo ya que es el de menor dimensión sobre la cota 0 y tiene la geometría más simple.

Su diseño simboliza un gran ojo humano que se completa con su reflejo en los estanques mencionados. Además dispone de unas estructuras móviles o cancelas de 90 m de longitud que permiten su apertura y cierre hidráulico, las cuales se asemejan a los párpados.

En planta el edificio tiene una forma de elipse apuntada, igual que comentábamos antes con el Palau, con su eje longitudinal en la dirección del río. Tiene una longitud de unos 100 m, una anchura de 50 m y una altura de 23 m.



4.52 - 4.53 | Imágenes exteriores de l'Hemisfèric

4.54 | Acceso al edificio

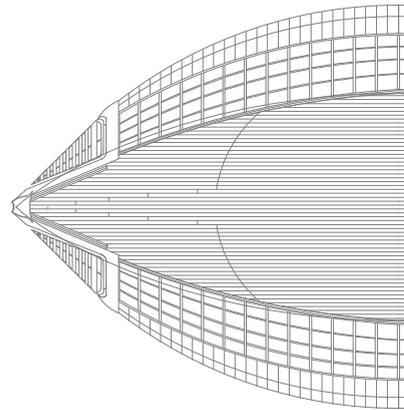
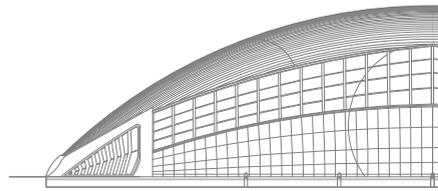
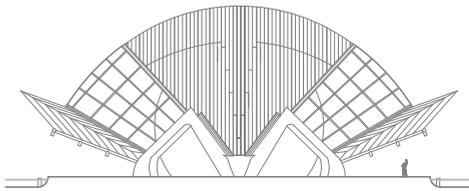
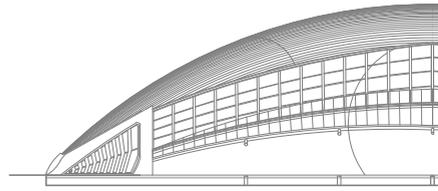
4.55 | Detalle interior de la cancela

4.56 - 4.57 | Imágenes de las salas de proyección

L'Hemisfèric es el primer edificio inaugurado del complejo CACV. Se diseñó para albergar 2 salas de proyecciones, una de ellas un planetario omnimax cuya pantalla en forma de Domo se puede apreciar desde el exterior a modo de pupila del ojo que representa el edificio.

Además también alberga toda una serie de servicios de cafetería, tienda y oficinas. Todo el desarrollo de su programa se encuentra bajo la cota 0 salvo la sala de proyecciones antes mencionada. La iluminación natural de todos estos espacios se realiza mediante una serie de lucernarios ubicados en los paseos peatonales que circundan el edificio.

A continuación se muestran unos planos generales del edificio a escala necesaria para su inclusión en el formato del trabajo. Se han seleccionado tan solo unos pocos para ayudar a la comprensión del edificio. En el apartado de anexos se pueden encontrar la totalidad de los planos a una escala mayor y en formato digital.

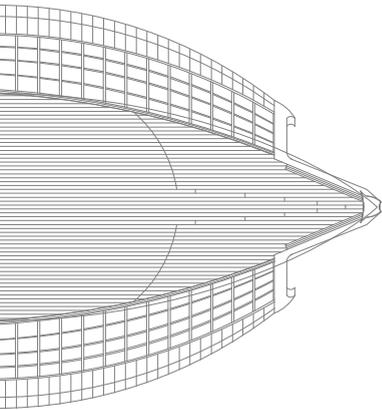
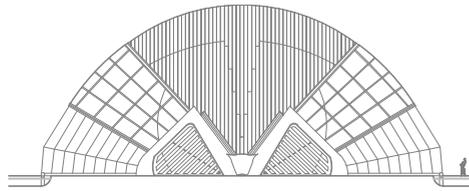
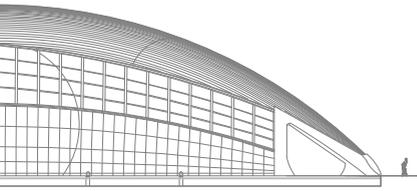
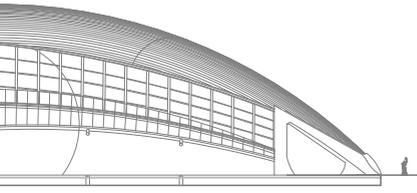


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro



edificio
L'Hemisfèric

arquitecto
Santiago Calatrava Valls

plano
planta cubierta

escala
1/1000

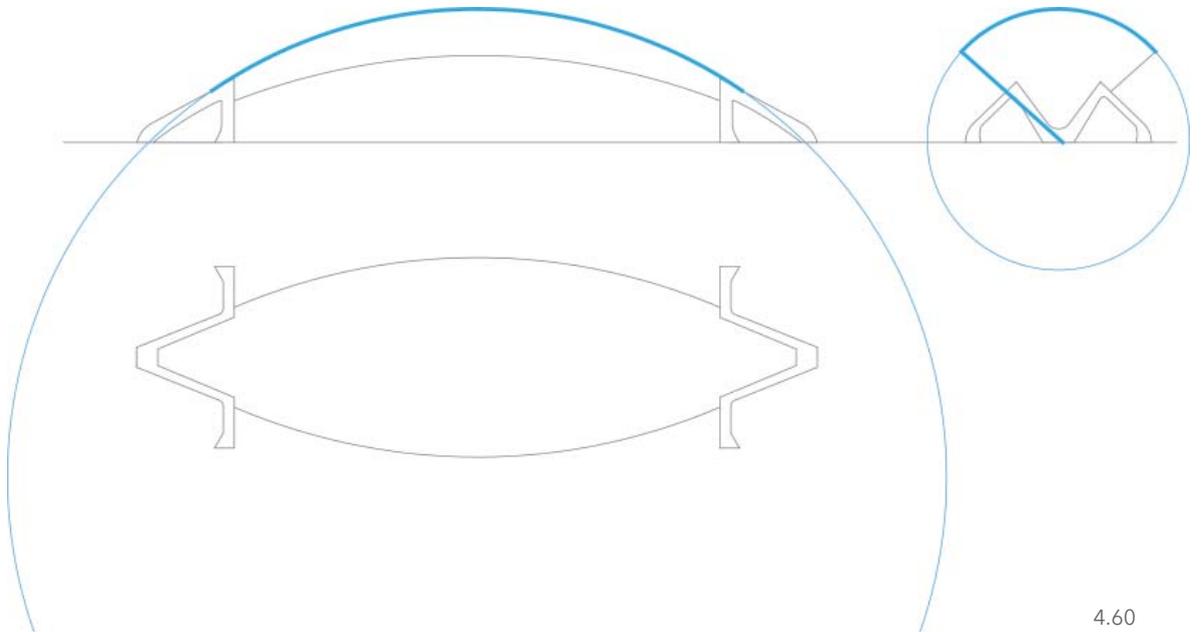




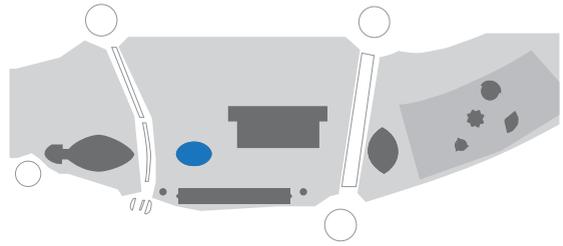
4.58



4.59



4.60



CUBIERTA

4.58 | Imagen exterior de la cubierta de "l'Hemisfèric"

4.59 | Imagen Interior donde se puede apreciar la estructura metálica de la cubierta.

4.60 | Trazados geométricos generadores de la forma del edificio.

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

La geometría de este singular edificio se centra en su cubierta.

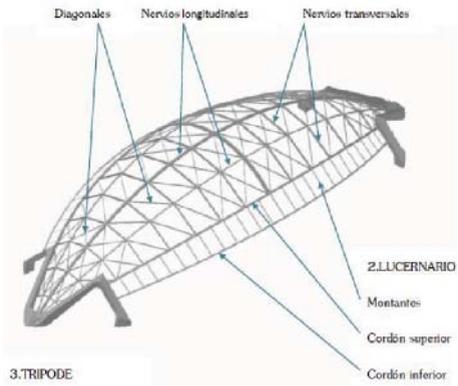
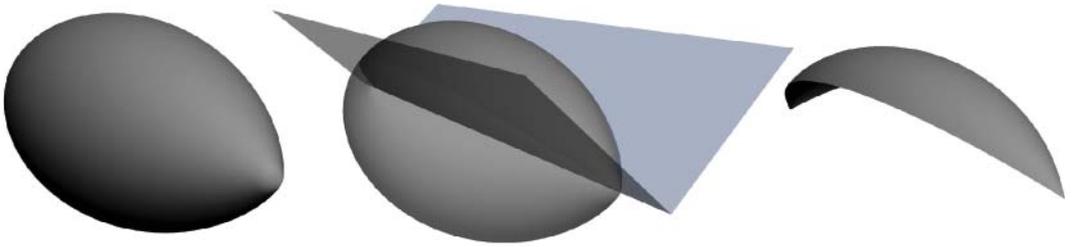
A partir de los alzados podemos ver que los trazados que regulan la generación de la forma son dos circunferencias en ambos casos. Una de ellas se correspondería con la directriz de la superficie y la otra nos da información acerca de la revolución que hay que dar a la primera para generar la superficie.

De esta manera obtenemos un elipsoide apuntado de revolución, generando una cúpula elipsoidal de gran luz con tan solo dos apoyos en forma de trípodes en sus extremos, lo que le da estabilidad. La cúpula elipsoidal es una de las geometrías más puras dentro del complejo CACV.

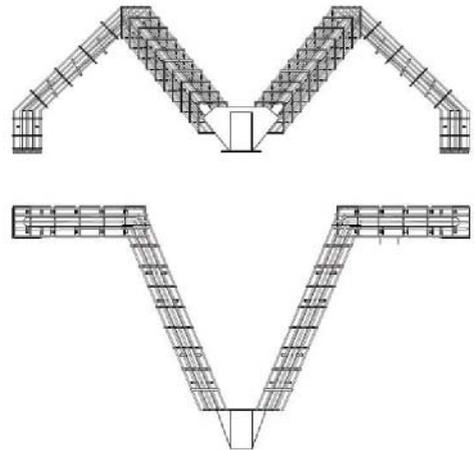
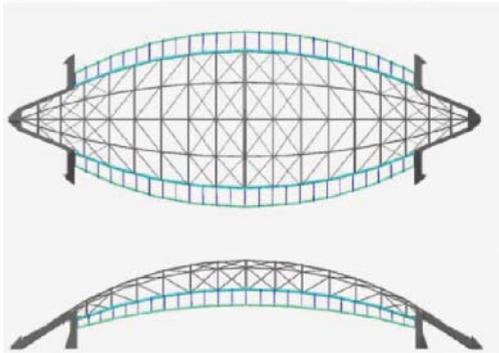
Una vez generado el elipsoide simplemente hay que limitar la superficie por dos planos cuya inclinación podemos extraer del perfil del edificio.

Igual que en la puerta de carga y descarga del museo, el arquitecto ha utilizado también el movimiento para el diseño de las puertas móviles del Hemisfèric. Cerradas aproximan la superficie del elipsoide de la cubierta y al abrirse en un hábil juego geométrico y de ingeniería, se convierten en dos superficies de plano director.

Bajo la cubierta también podemos apreciar la geometría pura de la esfera, constituida por la parte exterior de la sala de cine imax del interior. Ésta recubierta con trencadís se presenta como algo escultórico protegido por la estructura del edificio.



3.TRIPODE



4.61

4.62

4.61 | Generación geométrica de la cubierta de "l'Hemisfèric".

4.62 | Detalles estructurales de la cubierta: Esquema axonométrico, planta y alzado general de la estructura y plano de detalle de armado de uno de los trípodes de apoyo.

ESTRUCTURA

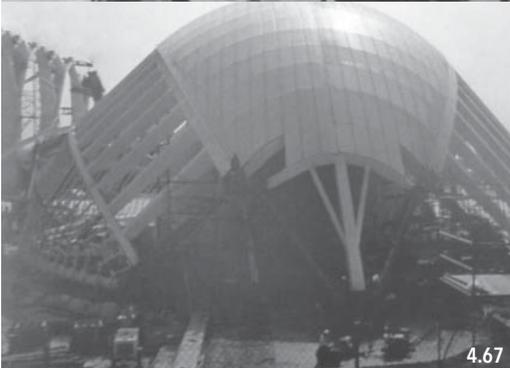
La cubierta está materializada con estructura metálica tubular y cubierta metálica, los trípodes extremos son de sección mixta de hormigón y acero.

Estructuralmente la cubierta funciona apoyada en los dos trípodes, salvando una luz de casi 100 m. Esto es posible gracias a la doble curvatura sinclástica de la superficie, por lo tanto podríamos concluir que la superficie está bien diseñada desde el punto de vista estructural.

Debido a su simetría y para dar estabilidad a la estructura, estos trípodes tienen tres puntos de apoyo.

En la página anterior se han incorporado unos esquemas estructurales en los que se aprecia la estructura metálica tubular de la cubierta y como esta se genera a partir de secciones paralela y meridiano del elipsoide base de la generación. Como estas secciones generan formas trapezoidales, se refuerza la estructura a base de diagonales que formarán hélices elipsoidales.

También se puede ver un detalle de armado de los trípodes que tienen un alma de perfil tubular redondo hueco de acero y un armado en forma de jaula denominada nervometal.



4.63 | Montaje de la estructura de la cubierta apoyada en los perfiles de acero de los trípodes.

4.64 | Colocación de la armadura metálica de los trípodes previo al hormigonado.

4.65 | Imagen del encuentro central de las dos partes exteriores del trípode con el arco central de la cubierta.

4.66 | Hormigonado mediante tolva de la parte central del trípode.

4.67 | Ejecución del material de acabado de la cubierta previo al hormigonado del trípode.

4.68 | Impermeabilización y sellado de las juntas de la cubierta, ya en una fase final de la obra.

CONSTRUCCIÓN

La estructura interior de los trípodes de hormigón es el primer elemento que se ejecuta. En un principio estaba pensado construirlo de hormigón armado, pero dada la complejidad de la obra y del encofrado necesario para realizarlo, se decidió hacerlos de sección mixta de hormigón y acero.

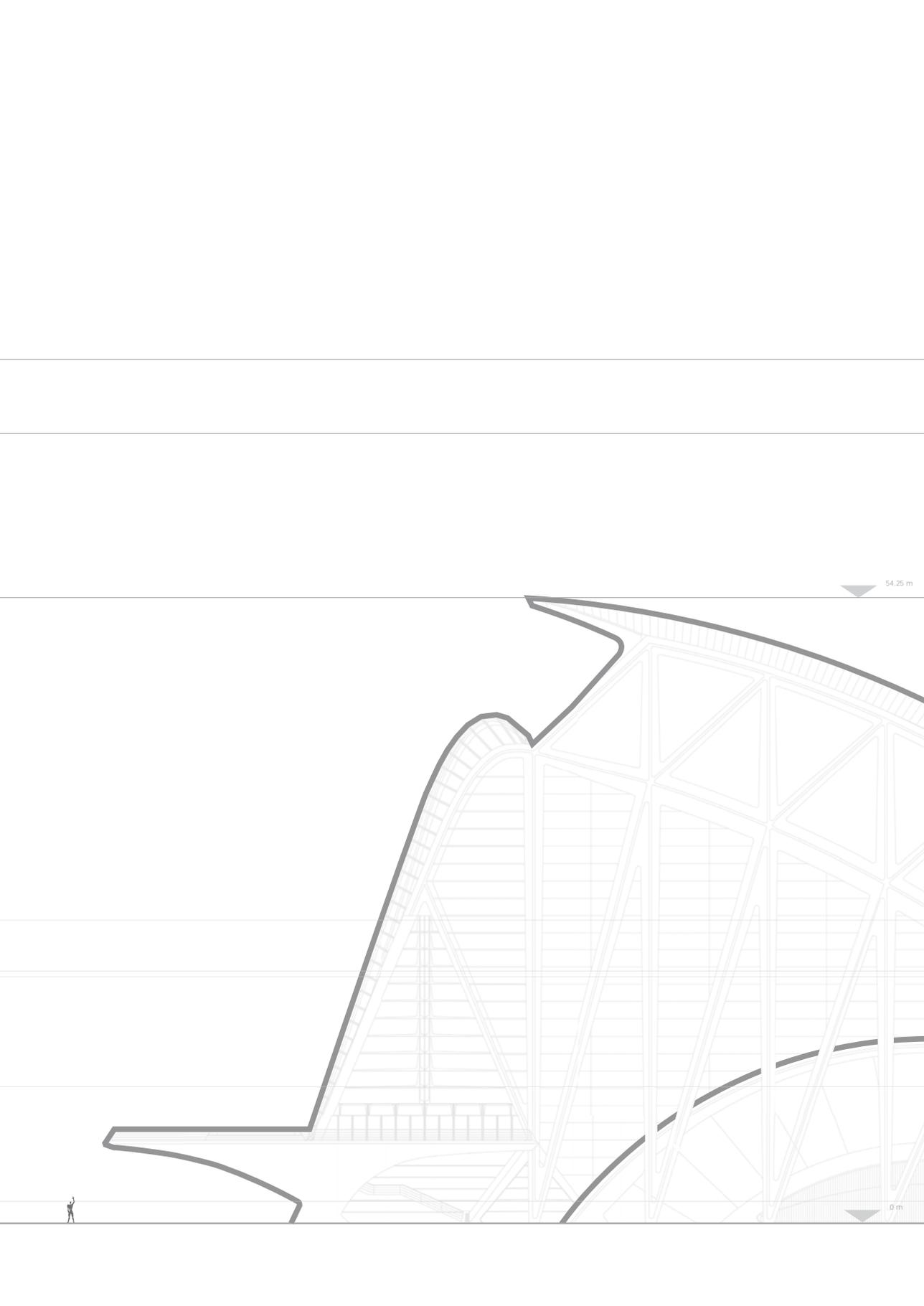
Se resolvió la unión de estos trípodes con el muro de sótano mediante una placa de anclaje fijada mediante taladros al hormigón.

La estructura de la cubierta se monta previo al hormigonado. El arco central se prolonga hasta el mismo núcleo del trípode como se puede apreciar en las imágenes. El resto de arcos longitudinales arrancan desde los apoyos laterales del trípode.

La cubierta metálica también se ejecutó antes de que se hormigonaran los trípodes. El material empleado para resolver este elemento fueron paneles tipo sandwich de 40 mm de espesor de placa galvanizada prelacada. Para desarrollar el despiece de placas se utilizaron las mismas secciones paralelo y meridiano que para el despiece de la estructura, aunque en mayor número, generando de esta manera piezas lo más rectangulares posibles.

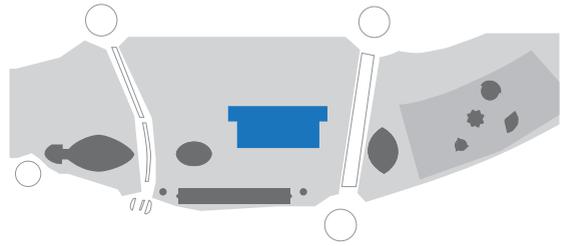
El hormigonado de los trípodes se realizó de dos maneras diferentes. El apoyo central se hormigonó mediante tolva y los laterales con hormigón gunitado.

Finalmente se sellaron las juntas de la cubierta y se revistieron con láminas metálicas de poco espesor.



54.25 m

0 m



4.3.3 | MUSEU DE LES CIÈNCIES PRÍNCIPE FELIPE

ARQUITECTO	AÑO DE CONSTRUCCIÓN
SANTIAGO CALATRAVA VALLS	1996/2000
USO	
MUSEO, AUDITORIO, OFICINAS, CAFETERIA y TIENDA	
DIMENSIONES	
42.000 m ² - 241 m LONGITUD - 104 m ANCHURA - 53,5 m ALTURA	
ELEMENTOS A ANALIZAR	
CUBIERTA, FACHADA NORTE, ACCESO y PILARES	

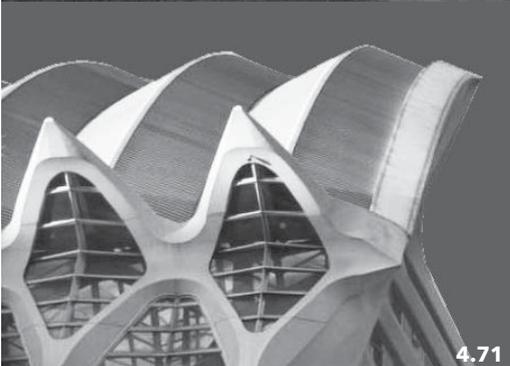
El edificio del "Museu de les Ciències Príncepe Felipe" se localiza en la zona este de la ciudad de Valencia, en el antiguo cauce del río Turia, entre el denominado paseode las Moreras y la autopista del Saler, formando parte de la "Ciutat de les Arts i de les Ciències".

Dentro del complejo ocupa una zona centrada entre otros edificios del complejo. Limita al sur con el "Umbracle", al oeste con el "Hemisfèric" y al este con el "Àgora".

Es un de los edificio de la original "Ciudad de las Ciencias" junto con la Torre de Telecomunicaciones y el "Hemisfèric". De hecho es el edificio que menos cambios ha sufrido desde su concepción hasta su construcción.

El diseño del Museu tiene como objetivo albergar exposiciones permanentes y temporales de divulgación científica y tecnológica de todo tipo, las cuales se fundamentan en el conocimiento interactivo y dinámico. Es lo que se ha venido a llamar el "gran museo del siglo XXI". No en vano tiene una gran superficie de exposiciones y de talleres.

Es un edificio de proporciones grandiosas, 241 metros de longitud, 104 metros de anchura y 53.5 metros de altura. Está generado a partir de la repetición de un módulo estructural que recuerda formas orgánicas de la naturaleza y antropomórficas. En los testeros tiene una serie de pilares inclinados a modo de contrafuertes de la arquitectura gótica. Dispone de dos grandes terrazas a modo de balcones que pueden ser utilizadas para exposiciones al aire libre.



4.69 - 4.70 | Imágenes exteriores del Museu de les Ciències

4.71 | Detalle exterior de la cubierta del edificio

4.72 | Detalle interior del encuentro de los pilares con la estructura de cubierta

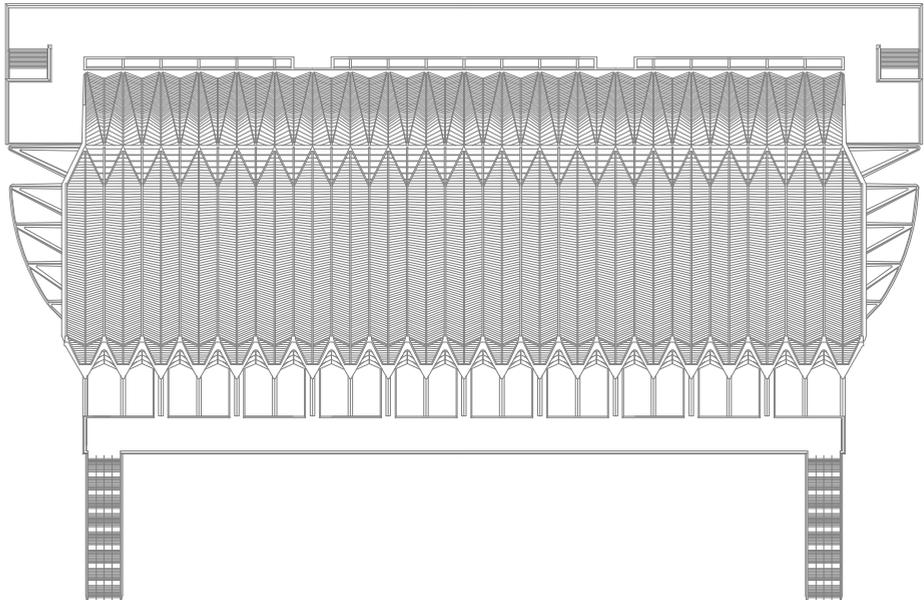
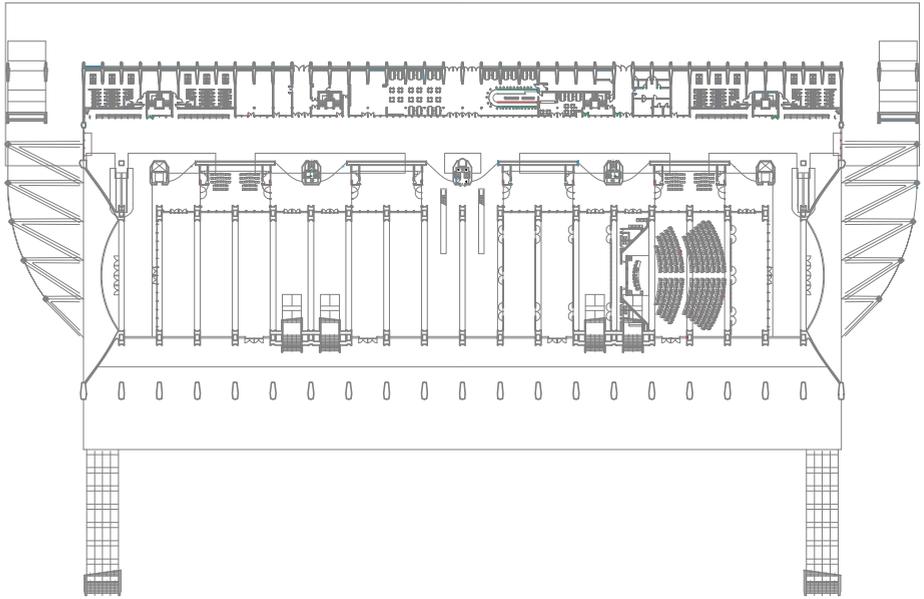
4.73 | Gran espacio interior del museo

4.74 | Cancela de acceso exposiciones

Está distribuido en 3 plantas más una serie de espacios complementarios como son las oficinas, un auditorio, las denominada calle mayor... Las comunicaciones verticales se realizan mediante escaleras y ascensores integrados en los grandes elementos estructurales.

De este edificio resulta interesante analizar la geometría de la cubierta, la fachada norte de vidrio, las puertas de acceso para carga y descarga en los testeros este y oeste y los grandes pilares de hormigón diseñados en forma de árbol geometrizando sus superficies.

A continuación se muestran unos planos generales del edificio a escala necesaria para su inclusión en el formato del trabajo. Se han seleccionado tan solo unos pocos para ayudar a la comprensión del edificio. En el apartado de anexos se pueden encontrar la totalidad de los planos a una escala mayor y en formato digital.

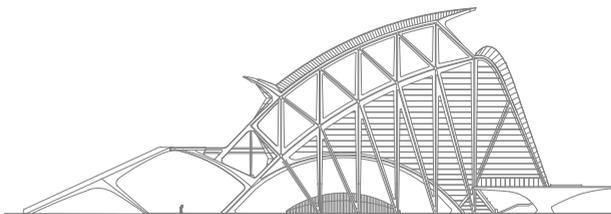
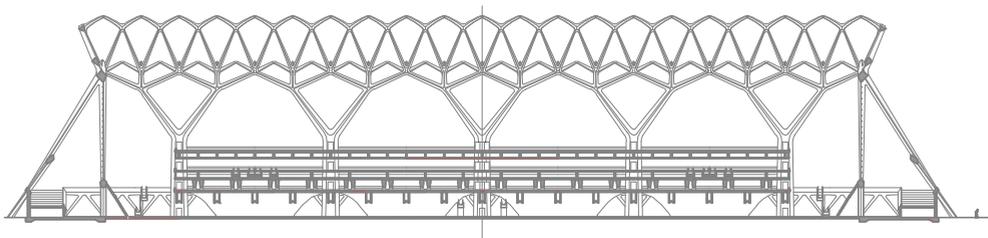
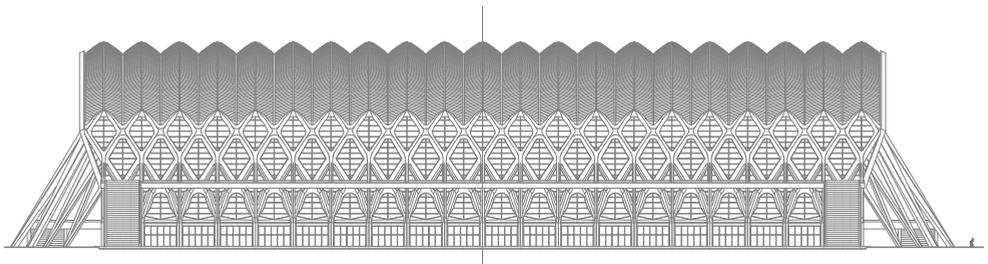
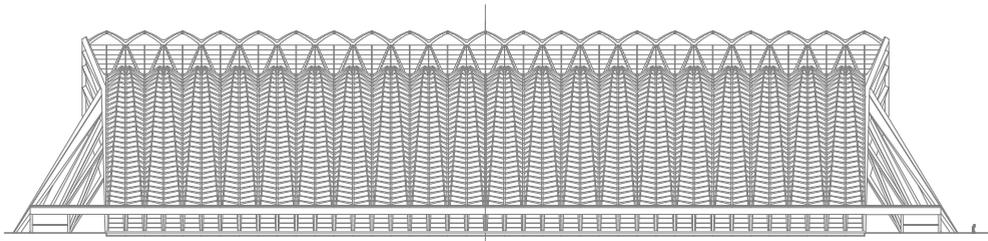


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro



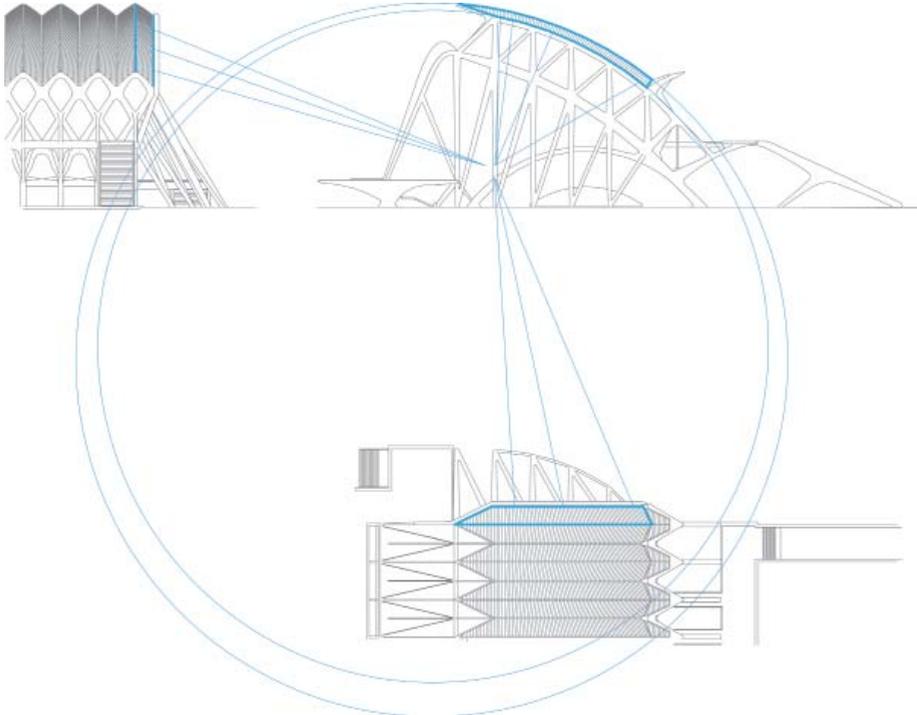
edificio
Museu de les Ciències Príncep Felip

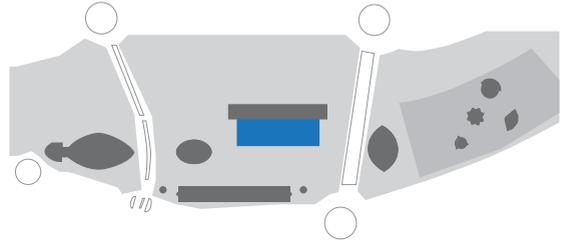
arquitecto
Santiago Calatrava Valls

plano
planta cubierta, cota -7m, alzados y sección longitudinal

escala
1/2000







CUBIERTA

4.58 | Imagen exterior de la cubierta de "l'Hemisfèric"

4.59 | Imagen Interior donde se puede apreciar la estructura metálica de la cubierta.

4.60 | Trazados geométricos generadores de la forma del edificio.

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

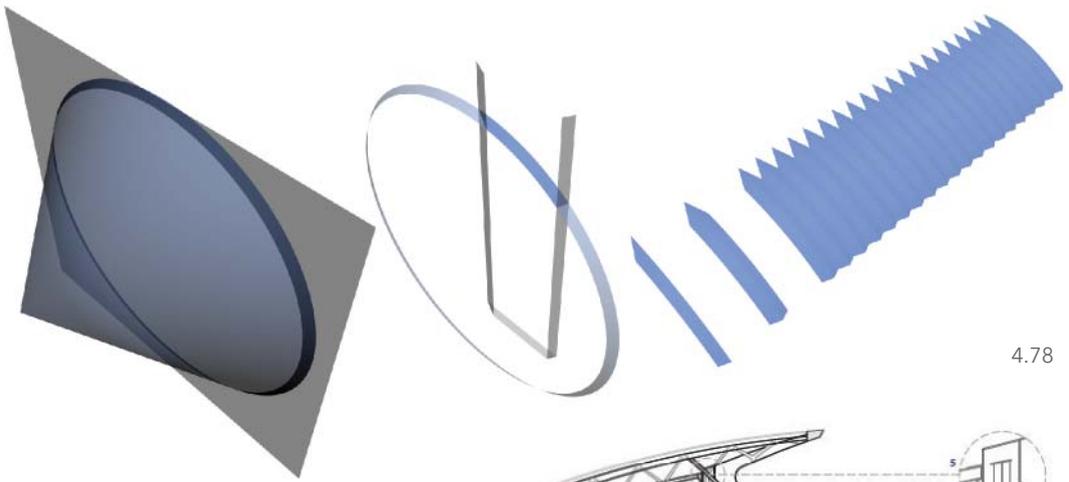
La cubierta del "Museu de les Ciències" se genera por repetición de un elemento a modo de costillas. Se podría decir que es como una cubierta a un agua, generada a partir de varias cubiertas a 2 aguas de superficies curvadas.

Al plantearse la generación de estas superficies, en los alzados este y oeste, lo que hemos denominado como testeros, se advierte que la curvatura de la cubierta son arcos de circunferencia. Circunferencias que como se puede apreciar en planta o alzado longitudinal, son paralelas.

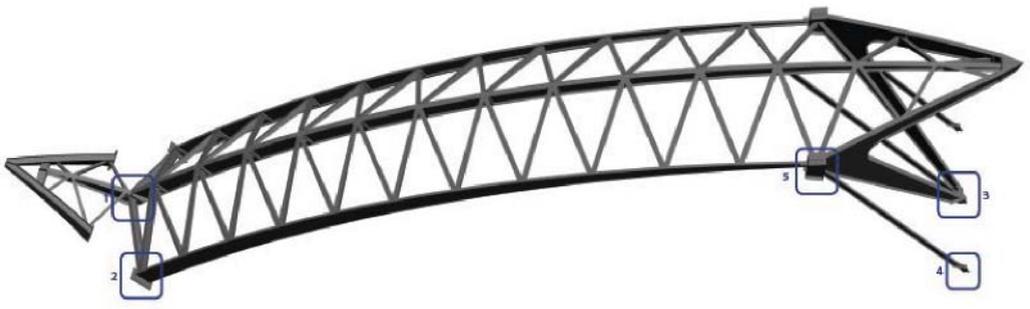
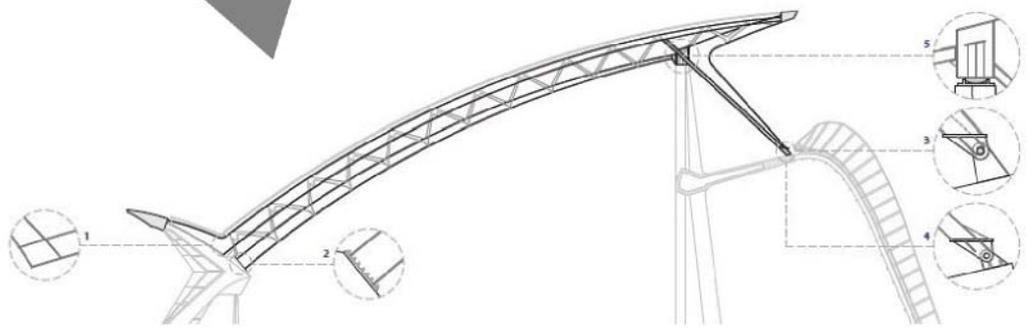
De la misma manera, si alargamos las juntas de las piezas de cubierta, apreciamos que todas ellas se cortan en un punto en las 3 proyecciones. Esto, junto a los trazados anteriores, nos indica que las superficies que componen la cubierta son conos. El punto de concurrencia de las piezas es el vértice del cono. Este punto no coincide con el centro de las circunferencia de la base, por lo que se tratan de conos de base circular, pero oblicuos.

Al generar los conos, hay que seccionarlos por los planos paralelos que contienen a las circunferencias, y posteriormente con los planos que podemos deducir a partir de los trazados de la planta. Estos serán los que den la punta en la zona más alta y el acabado menos apuntado en la parte baja.

Con las operaciones descritas obtendríamos medio módulo. Realizando una operación de simetría obtenemos el módulo completo y por repetición de este módulo 21 veces, se obtiene la cubierta completa del edificio.



4.78



4.79

4.78 | Desarrollo de la generación geométrica del módulo de la cubierta.

4.79 | Detalles en sección y esquema axonométrico del módulo de la estructura de la cubierta. Se puede apreciar un detalle de los nudos. También se aprecia la relación cercana con el resto de elementos estructurales del edificio.

ESTRUCTURA

La estructura de la cubierta se obtiene también por repetición del módulo, el cual se representa en la página anterior en sección y en esquema tridimensional.

Este módulo funciona empotrado a la estructura de la fachada sur en su parte más baja y articulado en la parte más alta prolongándose en voladizo en la zona correspondiente a la punta. Esta zona también es denominada "pico de pato", ya que tiene una forma romboidal alabeada, extendiendo dos piezas en la parte inferior de la punta que a su vez también se articulan en su apoyo con los pilares estructurales.

Las directrices de la superficie se materializan en sendas vigas metálicas de sección compuesta montadas in situ. Sin embargo las generatrices no tienen su reflejo en la estructura, probablemente por la necesidad de triangulación de la misma. En este caso se sustituyen por unas barras diagonales que recorren en zigzag la zona correspondiente a la superficie cónica. Posteriormente el material de recubrimiento si que seguirá la dirección de las generatrices.

Al estar la cubierta generada por repetición de un módulo, las piezas interiores se arriostran en dirección longitudinal unas con otras, pero las piezas extremas requieren de un apoyo adicional. Para lograr este apoyo se sitúan los contrafuertes que comentábamos antes en la zona de los testeros.

En sentido transversal no requiere arriostramiento ya que la estructura de la cubierta se apoya en la del edificio que en conjunto funciona aproximando el trazado de una catenaria, con el apoyo intermedio de los grandes pilares interiores.

El conjunto de las superficies cónicas forman una superficie compuesta que podríamos caracterizar como de doble curvatura sinclástica. Este hecho es el que permite que pueda cubrir una luz de 42 metros ya que le da inercia a la sección de la cubierta y redistribuye los esfuerzos de manera natural.



4.80 | Celosía apeada a pie de obra correspondiente a medio módulo de la estructura.

4.81 | Montaje de uno de los "picos de pato".

4.82 | Detalle del apoyo de la estructura de la cubierta en las "ramas" más altas de los grandes pilares estructurales.

4.83 | Celosías de la estructura de cubierta montadas y a la espera de recibir el recubrimiento metálico.

4.84 | Ejecución de las piezas de remate en la zona más baja de la cubierta, recayente a la fachada sur.

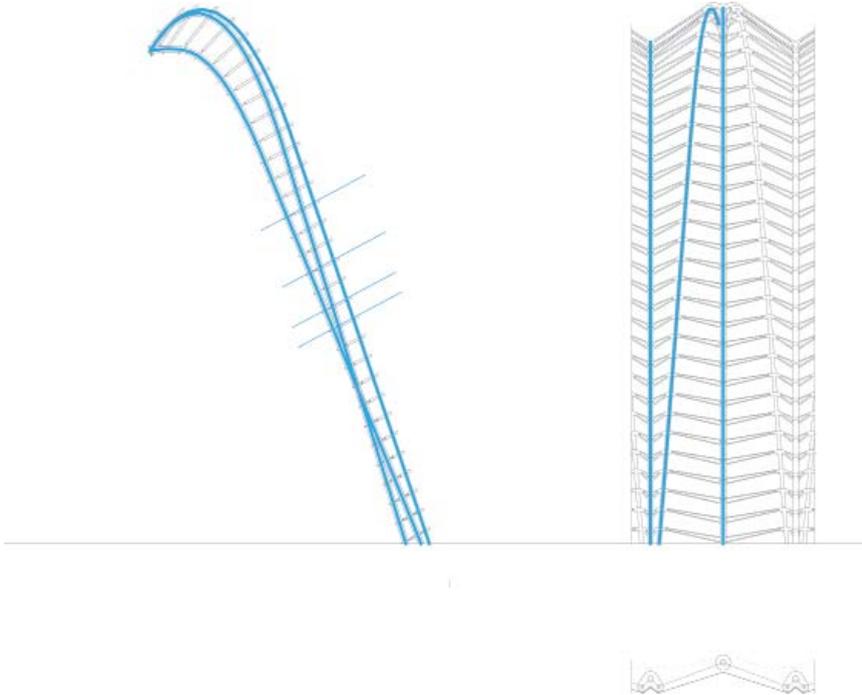
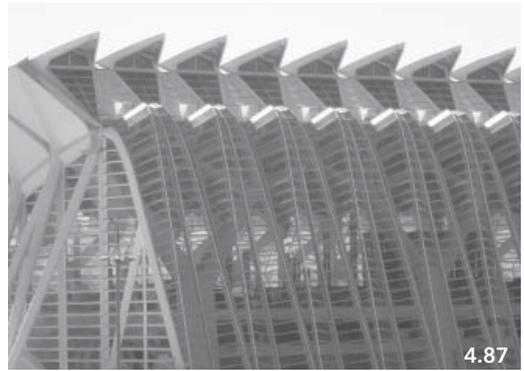
4.85 | Detalle comercial del sistema "kalzip" con el que se realizó el acabado de la cubierta.

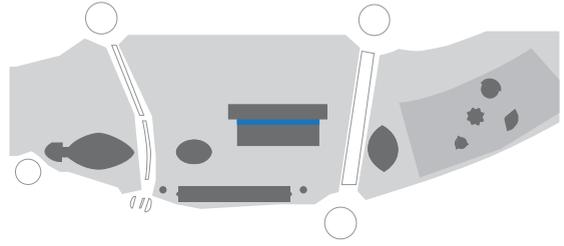
CONSTRUCCIÓN

La construcción de la cubierta se llevó a cabo subdividiendo la estructura de cada módulo en partes, en principio con un criterio de montaje y transporte por carretera de las diferentes piezas, más que por un criterio geométrico o de comportamiento estructural.

Por una lado se montaron los "picos de pato" y el arranque del módulo en zona baja. Posteriormente se montaron las cerchas que se transportaron a obra divididas por el perfil alto de sección compuesta y se izaron para colocarlas en posición. Finalmente se acabó poniendo el remate de la zona baja.

Una vez montada la estructura de la cubierta se paso a montar el material de acabado a base de chapas metálicas grecadas unidas con un sistema que recibe el nombre de "kalzip", el cual se puede apreciar en la imagen de la página anterior. Estas uniones y chapas si que siguen las direcciones de las generatrices de las superficies cónicas, por lo que se puede afirmar que en su diseño si que intervino la generación geométrica.





FACHADA NORTE

4.86 | Imagen aérea del "Museu", en la que podemos ver la fachada norte del edificio.

4.87 | Imagen exterior parcial de la fachada norte del "Museu".

4.88 | Trazados geométricos generadores de la forma del módulo base de la fachada.

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

La fachada norte del "Museu de les Ciències" destaca sobre el resto de fachadas ya que está diseñada como un gran muro cortina de vidrio con una geometría muy singular.

Este alarde de geometría está compuesto por un módulo repetido 20 veces a lo largo de los 241 metros de longitud del edificio. La geometría está formada por 3 perfiles tubulares de forma parabólica que albergan entre ellos unas superficies de plano director cuyas generatrices son perfiles metálicos que se cubren con paños planos de vidrio.

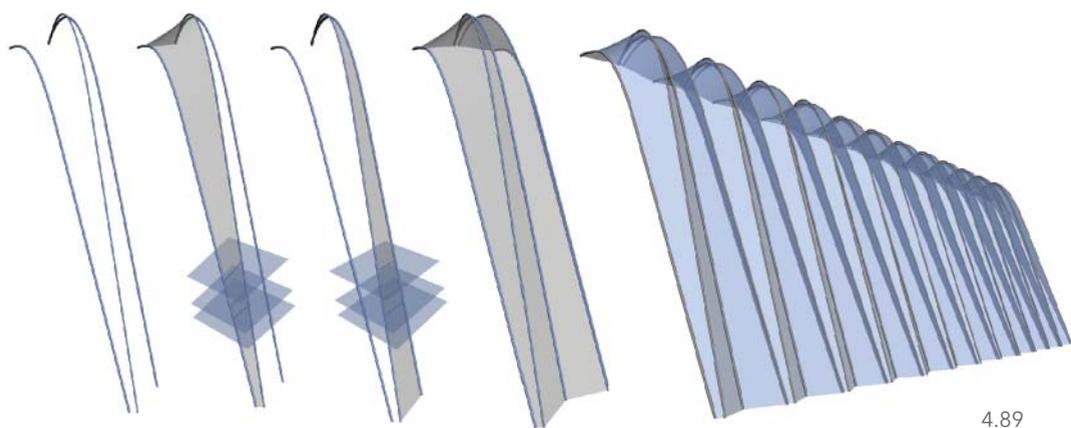
Aislado la planta, alzado y perfil de uno de los módulos, podemos observar los trazados generadores de las superficies descritas. Por un lado, en el perfil y alzado vemos las directrices parabólicas. Dos de estas directrices las podemos ver en verdadera magnitud en el perfil ya que son paralelas a él. La interior necesitamos de una operación geométrica para obtenerla en verdadera forma.

En el perfil puede apreciarse la dirección de las piezas metálicas que cubren el espacio entre las directrices como siguen la dirección de las generatrices de la superficie.

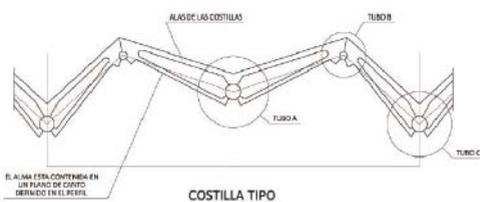
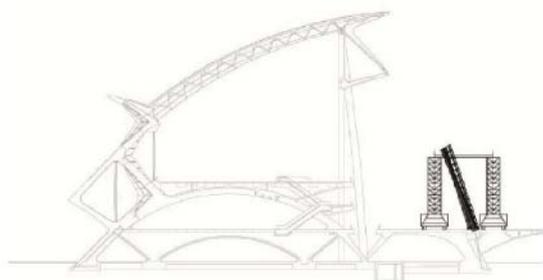
Existen dos motivos que hacen las superficies de la fachada singularmente curiosas. Una es la inclinación mencionada de la directriz interior, y la otra es la diferente altura entre las directrices. Con estos dos recursos se consiguen unas superficies con cierto movimiento.

Las superficies descritas son la mitad simétrica del módulo de la fachada.

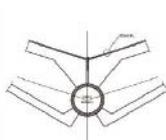
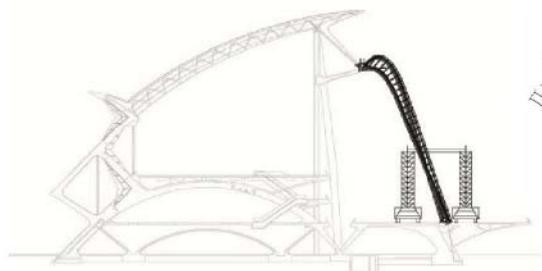
Las diferentes superficies de plano director que componen los vidrios generan un movimiento y una transparencia en fachada que deja ver el protagonismo de los árboles estructurales.



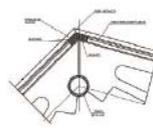
4.89



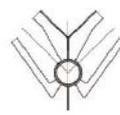
COSTILLA TIPO



DETALLE TUBO A



DETALLE TUBO B



DETALLE TUBO C

4.90

4.89 | Generación geométrica de las superficies de la fachada norte del "Museu de les Ciències".

4.90 | Detalles estructurales y del proceso de ejecución de la fachada. A la izquierda esquema de las fases de ejecución. A la derecha secciones horizontales donde se puede apreciar la dimensión de los perfiles tubulares parabólicos y la disposición de las costillas.

ESTRUCTURA

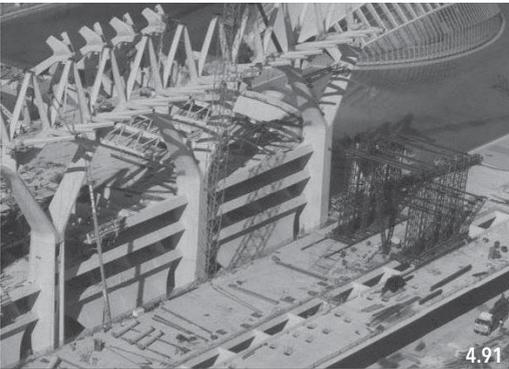
La materialización de la estructura se realiza mediante perfiles tubulares metálicos siguiendo la dirección de los arcos parabólicos descritos anteriormente. Los tubos correspondientes a las directrices exteriores del módulo descrito, son de mayor diámetro, siendo el perfil interior de menor dimensión.

Entre estos arcos se colocan una serie de costillas metálicas dobles siguiendo la dirección de las generatrices de las superficies, tal y como se puede apreciar en el detalle adjunto en la página anterior. Posteriormente se cubren los espacios entre estas con superficies planas de vidrio.

Estructuralmente debido a la forma parabólica de los perfiles tubulares, semejante a la forma de un arco catenario, resulta un cerramiento muy estable.

Estos perfiles se relacionan con el resto de la estructura del edificio empotrándose en su parte inferior en la estructura de hormigón que a su vez soporta el gran vuelo de esta fachada. Este empotramiento se ejecuta mediante unas grandes placas de anclaje atornilladas al elemento de hormigón, tal y como se puede apreciar en las imágenes de la página siguiente.

En la parte superior los perfiles tubulares se articulan con respecto los brazos finales de los grandes "árboles" estructurales del edificio. Esta articulación no estaba prevista en el proyecto original y se incorporó durante la obra para permitir el movimiento de el elemento fachada con respecto el resto del edificio.



4.91 | Disposición de las camillas auxiliares para la ejecución de la primera fase de la fachada.

4.92 | Arranque de los perfiles tubulares parabólicos ya desapareados.

4.93 | Imagen de una fase intermedia de la ejecución donde se pueden apreciar algunos perfiles tubulares ya completamente apoyados en la estructura y otros que se están empezando a montar ayudándose de la camilla auxiliar.

4.94 | Imagen de detalle de la articulación de los perfiles parabólicos en la parte superior de la fachada.

4.95 | Detalle del izado de una de las piezas que forma la estructura de la fachada.

CONSTRUCCIÓN

El proceso de ejecución de la estructura portante de la fachada norte se realizó en las siguientes fases:

Primero se dispusieron unas camillas metálicas auxiliares de ayuda para el montaje de los arranques de los perfiles tubulares.

Una vez montadas las estructuras auxiliares, se colocaron los arranques de estos perfiles atornillándolos a la estructura de hormigón previamente ejecutada.

Para dar estabilidad a estos arranques se unieron con las primeras costillas metálicas. De esta manera se podían retirar las camillas auxiliares para montar los siguientes arranques.

En el siguiente paso y en dos fases se montaron el resto de los perfiles tubulares parabólicos apoyándolos mediante una articulación a los grandes pilares ya ejecutados.

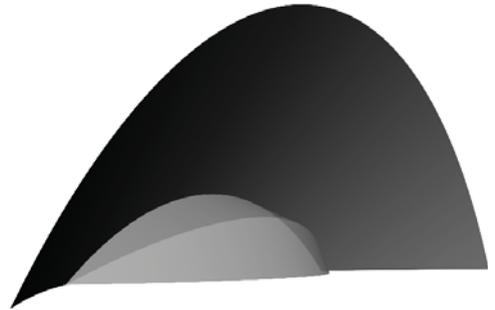
Una vez montados los arcos parabólicos, se arriostran los perfiles mediante las costillas para ir dando estabilidad al conjunto.

Finalmente y con el edificio prácticamente finalizado, se montan los vidrios de la fachada.

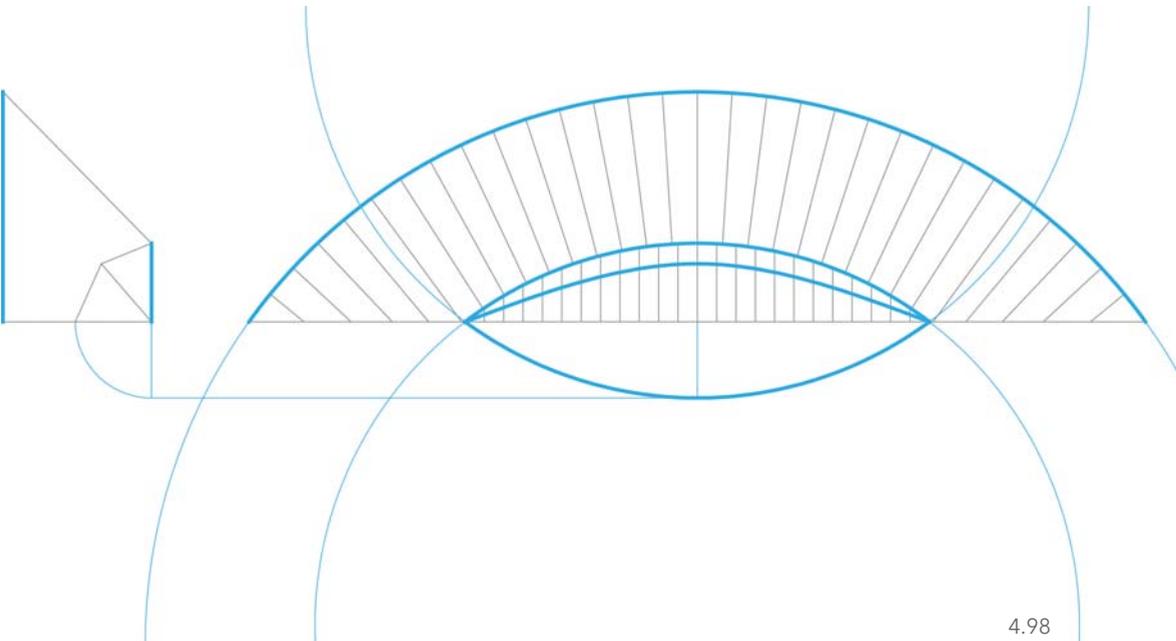
Como curiosidad constructiva comentar que se utilizó acero cortén para todos los perfiles metálicos y que posteriormente se pintaron de blanco.



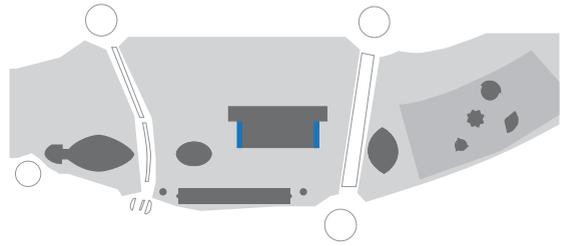
4.96



4.97



4.98



PUERTA DE ACCESO

4.96 | Imagen exterior de la puerta de acceso para carga y descarga de exposiciones del "Museu de les Ciències".

4.97 | Imagen tridimensional de los elementos a estudiar de la puerta.

4.98 | Trazados geométricos generadores de la forma de la puerta.

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

El movimiento en la obra de Calatrava es una de sus características más notables y diferenciadoras del resto de arquitectos. No en vano su tesis doctoral versa acerca de esta característica. Es uno de los aspectos donde se nota su doble formación como arquitecto e ingeniero.

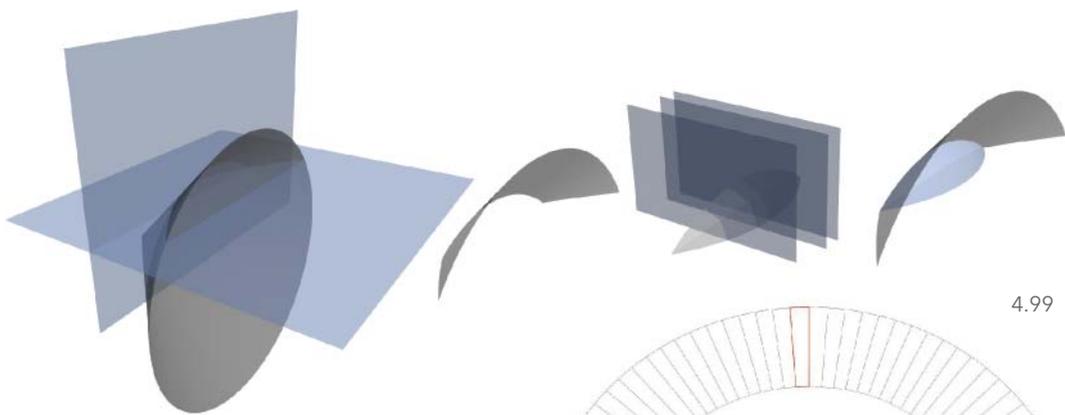
Este tipo de diseño con movimiento podemos verlo en más elementos de la CACV como son la cancela del "Hemisféric" o el brise soleil, no ejecutado a día de hoy, del "Ágora". También en un elemento menos conocido por su situación poco visible como es una puerta existente en la zona inferior del "Umbracle".

Para el acceso de carga y descarga del "Museu" diseñó un elemento compuesto por dos formas geométricas.

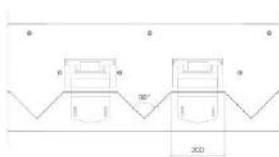
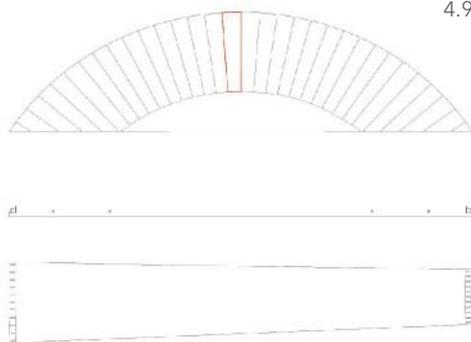
Por un lado tenemos un gran tímpano con la geometría de un cono de base elíptica. Los trazados que nos aportan información acerca de esta superficie se obtienen del alzado, donde podemos observar las dos directrices que limitan la superficie correspondientes a dos circunferencias. Las juntas de unión entre las piezas prefabricadas que forman el tímpano se corresponderían con las generatrices de las superficies que al prolongarlas nos da la posición del vértice excéntrico respecto de las circunferencias, lo que nos hace ver que es un cono de base elíptica.

En segundo lugar tenemos una puerta móvil de grandes dimensiones con dos superficies de plano director. Estas puertas son las que al abrirse y cerrarse producen ese movimiento que el arquitecto busca en todas sus obras.

Como curiosidad, la forma elíptica del tímpano genera lo que se denomina una "galería de susurros".

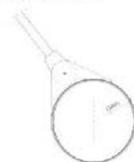
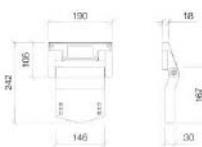


4.99



Biogras de unión entre perfiles.

Perfil circular de la elipse 1.



4.100

4.99 | Generación geométrica del tímpano y la cancela que componen la puerta del "Museu de les Ciències".

4.100 | Detalles constructivos de la puerta:

En la parte superior se puede ver el despiece de elementos prefabricados que componen el tímpano, y en la parte inferior algunos detalles de la estructura metálica de la cancela.

ESTRUCTURA

Desde el punto de vista estructural, el elemento realmente interesante del conjunto de la puerta es el tímpano.

El tímpano está compuesto por unas placas prefabricadas pretensadas con un rebaje en los extremos que dejan libres las armaduras que posteriormente se anclarán a la estructura del edificio. Estas placas se diseñaron haciéndolas coincidir con las generatrices de la superficie cónica de manera que se pudieron aproximar por superficies planas, formando finalmente una superficie curva.

Estas piezas se apoyan en dos arcos de hormigón de directriz circular, que a su vez forman parte de la estructura del edificio del Museu. En estos arcos se dejaron embebidas unas placas de anclaje durante el hormigonado donde se soldaron posteriormente las esperas de las placas. Finalmente se hormigonó la unión protegiendo la junta entre placas y arcos.

Los arcos circulares funcionan de manera similar a unos arcos catenarios distribuyendo los esfuerzos de manera natural hacia los apoyos. La curvatura de los arcos es menor que la de una funicular por lo que la sección de este arco está muy armada para poder soportar los esfuerzos, al igual que muchos otros casos en el edificio (de hecho se están produciendo fisuraciones por exceso de cuantía de armado y falta de recubrimiento en muchos elementos).

Las piezas prefabricadas pretensadas están empotradas en los dos arcos por lo que funcionan como biempotradas. Tan solo soportan su peso propio por lo que no existen deformaciones destacables.

La cancela está materializada por una serie de perfiles metálicos articulados, y desde el punto de vista estructural simplemente resaltar los perfiles tubulares que siguen las directrices elípticas inferior y superior que son que son los que soportan las cargas de peso propio y funcionamiento del elemento.



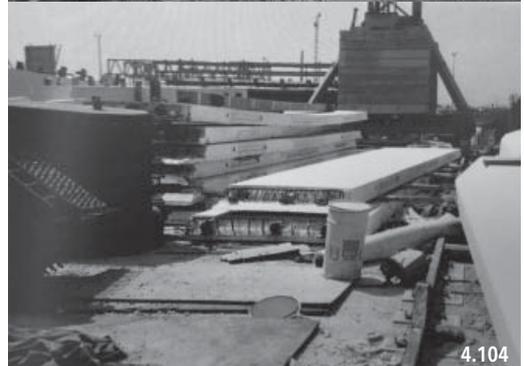
4.101



4.102



4.103



4.104



4.105



4.106

4.101 | Imagen interior del encofrado del arco en la que se pueden apreciar todas las armaduras del mismo.

4.102 | Imagen del arco circular tomada durante la ejecución todavía con la cimbra inferior.

4.103 | Imagen de los arcos estructurales que soportan las piezas del tímpano, desencofrados y sin la cimbra.

4.104 | Losas prefabricadas pretensadas apeadas en obra previo a su colocación. Se puede observar el rebaje efectuado en las piezas para realizar el empotramiento con los arcos.

4.105 | Proceso de montaje de las piezas prefabricadas. Se puede apreciar las placas de anclaje dejadas en el arco a la espera de recibir estas piezas.

4.106 | Imagen interior de la cancela donde se observa el sistema de pistones hidráulicos, los perfiles tubulares superior e inferior y las piezas metálicas que conforman la cancela.

CONSTRUCCIÓN

Como ya hemos comentado, la puerta está compuesta en primer lugar por unos arcos de hormigón armado, un tímpano de piezas prefabricadas pretensadas de hormigón y una cancela a base de perfiles metálicos.

En primer lugar se ejecutaron los arcos que fueron hormigonados en tres etapas para evitar la disgregación de los componentes del hormigón. Tal y como se ha indicado anteriormente, durante este proceso se dejaron unas placas de anclaje de espera para empotrar después las piezas prefabricadas.

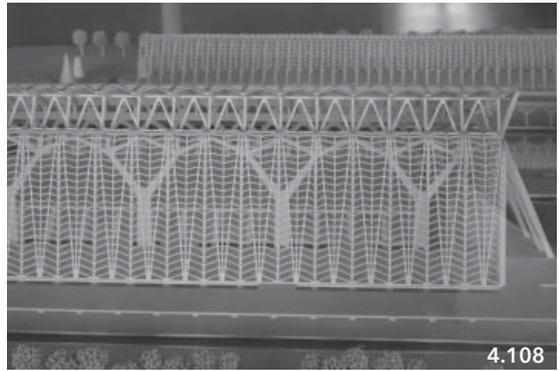
Una vez desencofrados los dos arcos circulares, se procedió a ir izando las diferentes placas prefabricadas e ir soldándolas a las placas de anclaje dejadas en los soportes. El montaje se realizó desde las placas inferiores hasta llegar a la "clave" montándolas de manera simétrica para ir compensando las cargas.

Tal y como se puede apreciar en las imágenes, estas piezas prefabricadas se diseñaron con un rebaje en sus extremos que permitía realizar la unión con los arcos y posteriormente hormigonar la unión para protegerla.

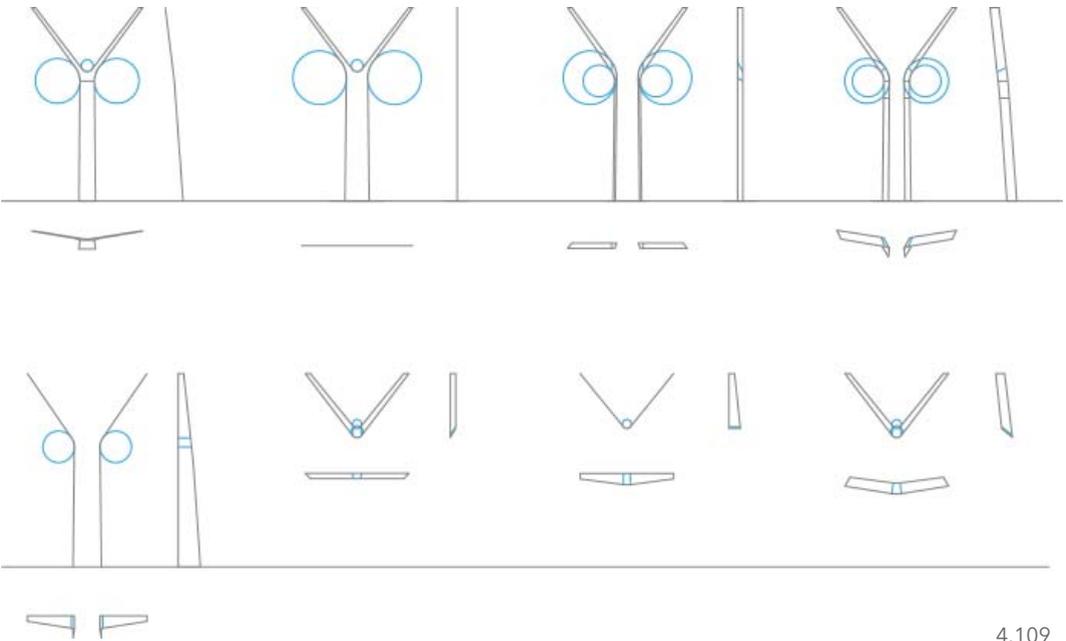
Finalmente se montó la cancela compuesta por los perfiles metálicos que se pueden apreciar en la imagen, así como el sistema de pistones hidráulicos que permiten su apertura dejando todo el hueco libre para la entrada de camiones.



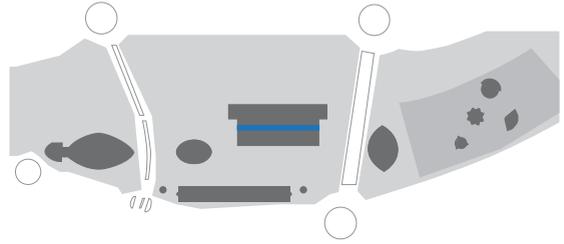
4.107



4.108



4.109



PILARES

4.107 | Imagen interior del edificio del "Museu de les Ciències" donde se pueden observar los grandes soportes en forma de árbol.

4.108 | Imagen de la maqueta expuesta en el Museu donde se aprecia la importancia de los pilares dentro del diseño del edificio.

4.109 | Trazados geométricos generadores de la forma de los pilares..

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

Los pilares, también denominados "árboles", del "Museu de les Ciències" son uno de los elementos estructurales de la obra de Santiago Calatrava donde se pueden encontrar referencias a la naturaleza y a otros arquitectos como Antoni Gaudí.

En un hábil juego de geometrización, el arquitecto lo que realiza es una simplificación de un elemento orgánico como es un árbol, en formas tan simples como planos, enlazados entre si con conos y cilindros. Algo parecido, pero con una geometría mucho más compleja, es el diseño que realiza Gaudí en las columnas de la "Sagrada Familia" en Barcelona.

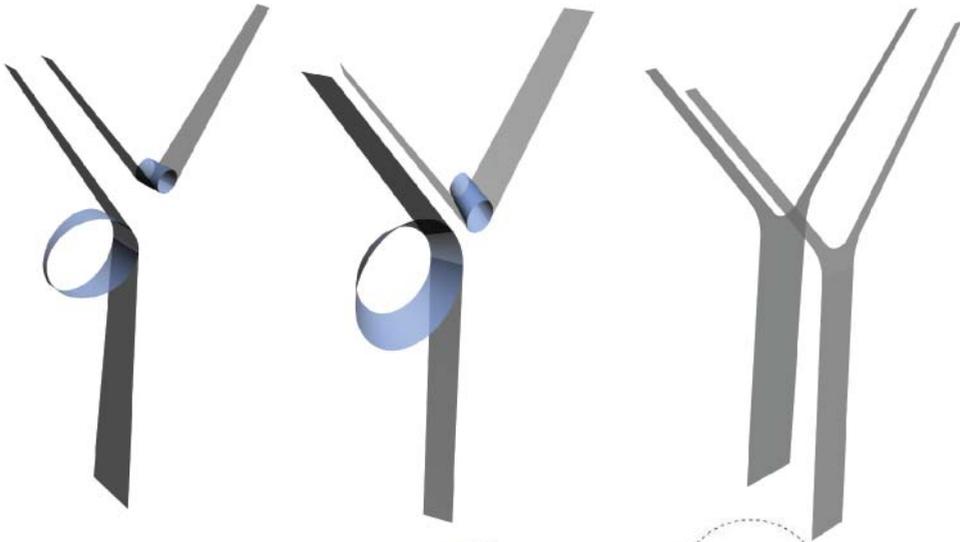
En algunos videos y publicaciones también se hace referencia a que están inspirados en la figura antropomórfica de un hombre en pie con los brazos levantados. Quizá la parte superior de los pilares puede ser que responda a esta forma, pero no así la parte inferior.

Este elemento además de la función estructural también cumple la función de comunicación vertical, ya que en su interior alberga los núcleos de escalera y ascensor que sirven a las diferentes plantas del edificio.

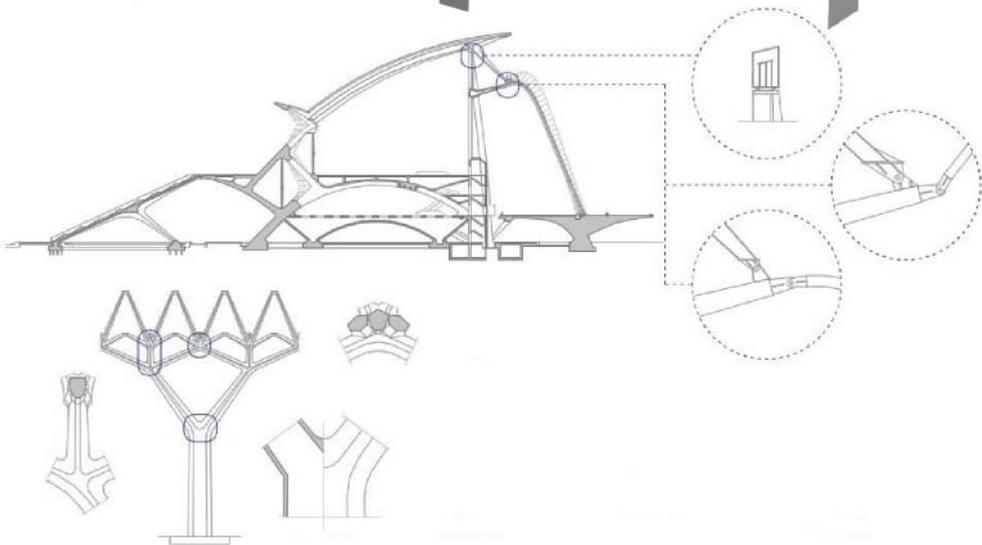
Se va a analizar la parte inferior de los pilares por resultar la más clara y sencilla de entender, aunque los criterios utilizados se podrían extender al resto del elemento, ya que se realizaron de la misma manera.

A partir de los planos de alzado y sección del "Museu", aislando las vistas de uno de los elementos, podemos ir deduciendo y separando cada una de las superficies planas y viendo como se realiza el enlace con las otras a partir de las superficies cónicas y cilíndricas a modo de ejercicio de tangencias en 3 dimensiones.

Se puede observar en la página anterior el esquema de cada uno de esos enlaces realizados con los trazados que regulan su geometría.



4.110



4.111

4.110 | Generación geométrica de algunos de los enlaces entre planos que conforman el pilar.

4.111 | Detalles estructurales de los pilares: En la parte superior se observan los apoyos de la estructura de cubierta y de fachada en el pilar, y en la parte inferior un detalle de los nudos de las diferentes ramas del "árbol". Se aprecia como en la parte inferior los nudos son huecos y permiten la ubicación de los elementos de comunicación vertical, y en la parte superior los nudos se resuelven con sección maciza.

ESTRUCTURA

Los pilares del Museo constituyen el elemento estructural más importante del edificio. Sorprende como un edificio de las dimensiones del que estamos analizando, puede tener una estructura de tan solo 5 apoyos. Esto es posible gracias a la imitación de la estructura resistente de un árbol que realiza Santiago Calatrava.

Estructuralmente, las "ramas" superiores de los pilares van recogiendo las cargas de la cubierta y de la fachada norte reconduciéndolas hasta los fustes principales del "árbol". Conforme se asciende estas ramas son cada vez de sección más delgada, ya que tienen que resistir menor carga. Por el contrario, al descender van aumentando de sección hasta llegar al pilar.

Además, el diseño de las diferentes barras, podemos apreciar en los planos como va generando arcos de descarga, de manera que los pilares no trabajan individualmente, sino que funcionan como una serie de arcos que recuerdan las estructuras romanas de puentes o acueductos. Estos arcos además describen una forma próxima a la catenaria, como hace Gaudí en la "Sagrada Familia", por lo que las cargas se van transmitiendo de forma natural hasta los apoyos.

Los dos pilares extremos se apoyan a su vez en los "contrafuertes" inclinados de los testeros que ya hemos comentado al analizar la cubierta. Estos elementos tienen la función de soportar los empujes laterales debidos a la inexistencia de otro pilar.

Todas las barras de la estructura de los pilares están empotradas por lo que funcionan como nudos rígidos y no como articulaciones, que es lo habitual en las celosías. Esto es otra de las muestras de influencia natural, ya que en las ramas de los árboles los nudos funcionan de manera similar.



4.112 | Fase inicial de la construcción de los pilares. Se puede ver el arranque de los mismos.

4.113 | Los pilares fueron ejecutándose de manera progresiva ya que se aprovecharon los mismos encofrados para hormigonar los cinco elementos.

4.114 - 4.115 | Para realizar las diferentes "ramas" se diseñaron unos encofrados que se apoyaban en el propio pilar.

4.116 | La ejecución de las ramas se fue realizando de manera alternada según un estudio de distribución de esfuerzos.

4.117 | En esta imagen se ve la parte final de la ejecución de la parte superior de la estructura de los pilares y los encofrados utilizados en esta última fase.

CONSTRUCCIÓN

La ejecución de los pilares del "Museu" se realizó de manera progresiva y aprovechando al máximo la repetición de formas para reutilizar los mismos encofrados.

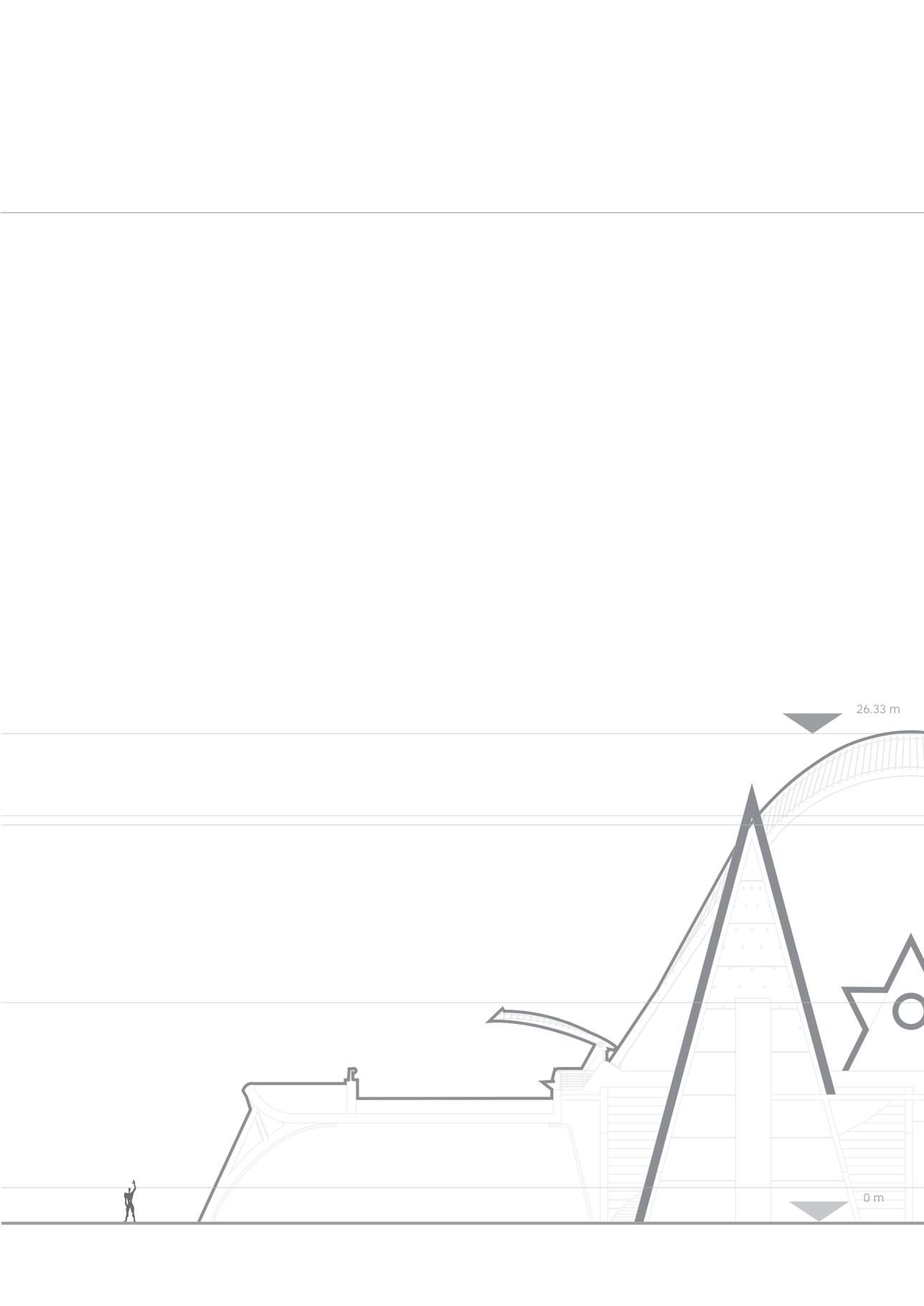
Los fustes de los "árboles" se hormigonaron en 4 fases según los anillos que se pueden intuir por las juntas dejadas en la superficie del pilar. Estas juntas se dejaron con fin estético y de ocultar la posible fisuración producida por dilataciones y contracciones diferenciales entre hormigones.

Posteriormente se ejecutó el primer nudo, y las primeras ramas de los pilares. A partir de este momento se va alternando la ejecución de las diferentes ramas acorde a un cálculo de entrada en carga de la estructura, alternando los vanos que se iban ejecutando.

Como puede intuirse, tanto los detalles constructivos de las diferentes piezas, como el proceso de ejecución de la estructura poco tienen de convencional. Las secciones de cada una de las piezas son totalmente diferentes, tanto en forma como en composición. Se alternan los armados de barras corrugadas, los compuestos por perfiles metálicos, las piezas prefabricadas...

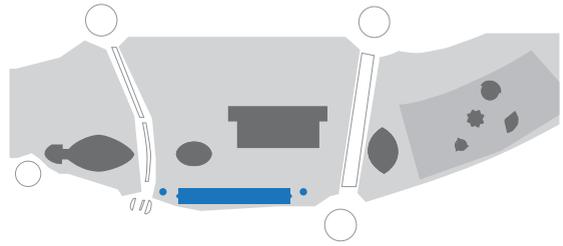
Los andamios y encofrados se diseñaron de manera especial para esta obra, ya que las condiciones de forma y de ejecución son totalmente singulares.

Si desde el punto de vista del diseño geométrico, los "árboles" son un hábil juego de geometrización de la naturaleza y desde el punto de vista resistente es una estructura que consigue cubrir un gran espacio con pocos apoyos, los cuales se pueden utilizar para ubicar las escaleras y ascensores, desde la perspectiva constructiva, estos pilares son unos elementos muy complejos y costosos de ejecutar.



26.33 m

0 m



4.3.4 | L'UMBRACLE

ARQUITECTO

SANTIAGO CALATRAVA VALLS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

1997/2000

USO

APARCAMIENTO, JARDÍN Y EXPOSICIONES AL AIRE LIBRE

DIMENSIONES

17.500 m² - 320 m LONGITUD - 60 m ANCHURA - 18 m ALTURA ARCOS

ELEMENTOS A ANALIZAR

CUBIERTA, RESPIRADERO y ESCALERA-ASCENSOR

El edificio del "Umbracle" se localiza en la zona este de la ciudad de Valencia, en el antiguo cauce del río Turia, entre el denominado paseo de las Moreras y la autopista del Saler, formando parte de la "Ciutat de les Arts i de les Ciències".

Dentro del complejo el edificio es el situado más al sur, permitiendo el acceso a la CACV desde la autopista del Saler.

El edificio está diseñado con dos objetivos fundamentales. Por un lado tiene un uso de aparcamiento que da servicio a todo el complejo. Tiene una capacidad de 700 vehículos y 20 autobuses. Este uso ocupa las dos plantas más bajas del edificio.

En la planta de cubierta encontramos el otro uso del edificio, el que le da nombre. Santiago Calatrava quiso convertir la cubierta del edificio en un gran jardín de 320 metros de longitud, con una cubierta a modo de umbráculo de la arquitectura tradicional mediterránea. La vegetación escogida para esta zona ajardinada es típica de este clima.

También se diseñó una zona a modo de gran balcón desde el que se tiene una vista general de toda la CACV. El arquitecto denominó esta zona como un "balcón al futuro". En la actualidad se utiliza para realizar exposiciones de escultura contemporánea y fotografía al aire libre.

Existen en este edificio varios elementos singulares desde el punto de vista del diseño geométrico:



4.118 - 4.119 | Imágenes exteriores de l'Umbracle

4.120 | Interior del jardín

4.121 | Respiradero escultórico del aparcamiento del edificio

4.122 | Detalle de la celosía de cubierta del jardín

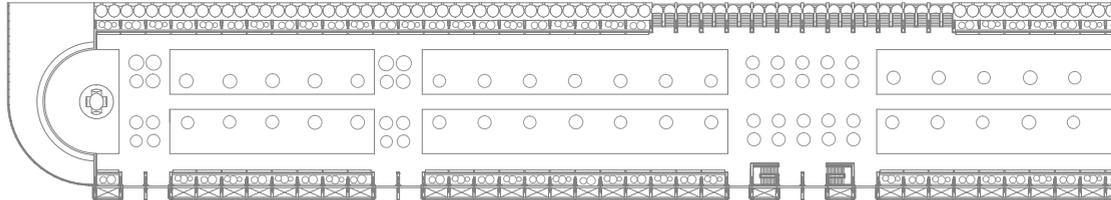
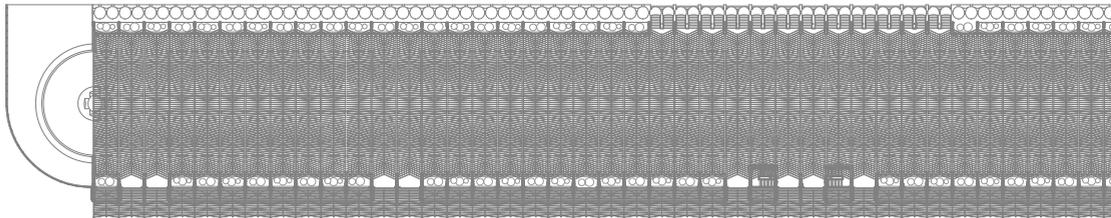
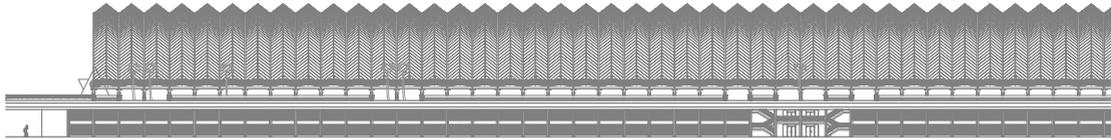
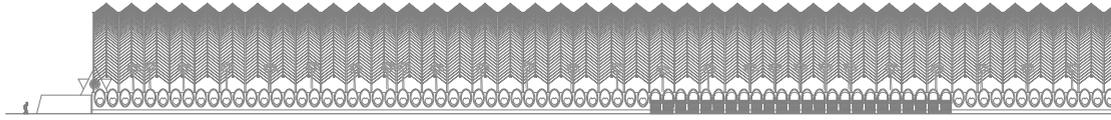
4.123 | Escalera de acceso a la CACV

Por un lado tenemos la singular cubierta del jardín. Esta cubierta de sección parabólica es uno de los iconos de la CACV. Posteriormente, y debido a su éxito, Calatrava la ha repetido en otros de sus proyectos.

En el lado recayente a la autopista del Saler, el arquitecto diseñó unos elementos escultóricos de forma elipsoidal que junto con la cubierta constituyen la fachada del edificio.

En los extremos y sirviendo de acceso al complejo, existen dos núcleos de escalera-ascensor con un diseño geométrico curioso. El ascensor exento con forma cilíndrica se encuentra en el interior de un espacio de forma cónica. Bordeando este cono, el arquitecto sitúa una escalera helicoidal que exteriormente se apoya en un cilindro de hormigón.

También hay que destacar un elemento de escaso interés como puede ser una chimenea de ventilación del aparcamiento. Calatrava lo trabaja desde el punto de vista escultórico creando un elemento de diseño geométrico puro a base de un cono y dos cilindros.

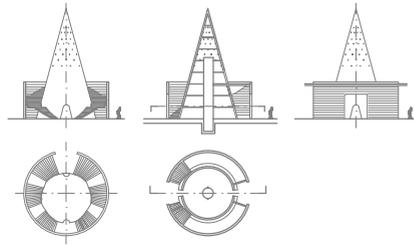
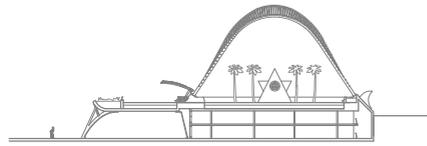
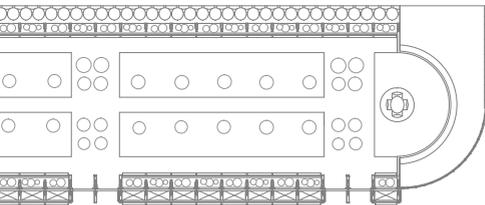
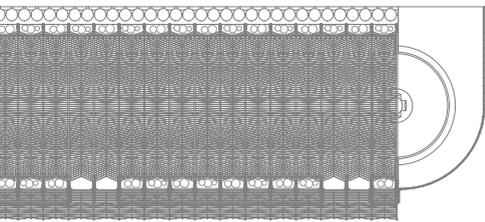
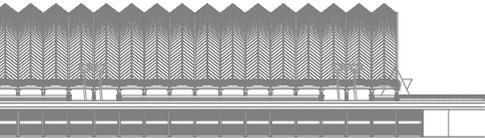
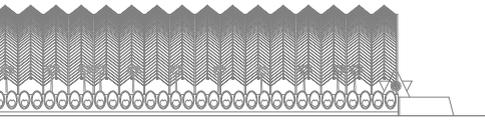


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro



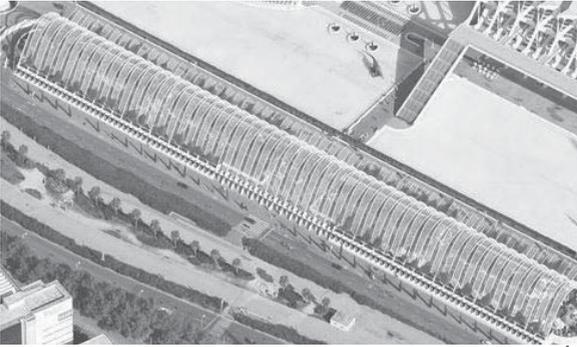
edificio
L'Umbracle

arquitecto
Santiago Calatrava Valls

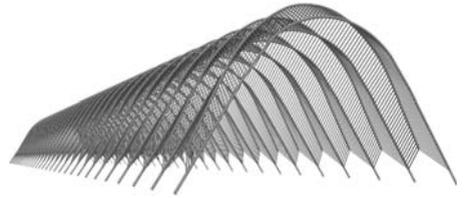
plano
sección transversal

escala
1/1500

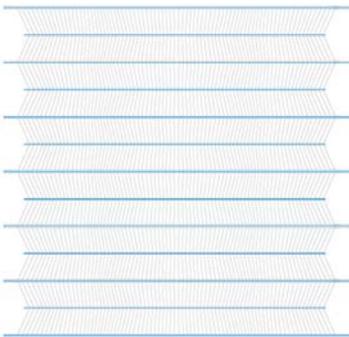
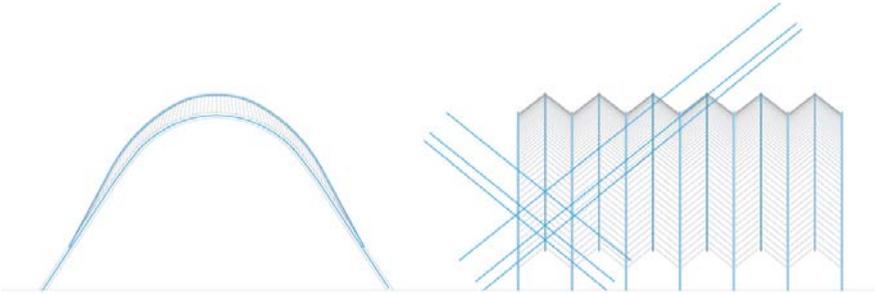




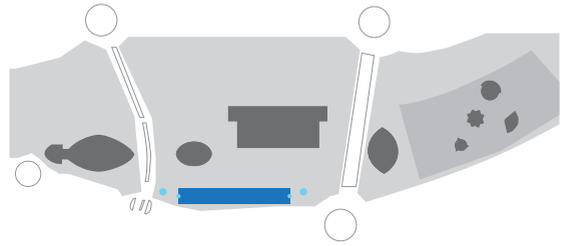
4.124



4.125



4.126



CUBIERTA

4.124 | Imagen aérea del edificio del "Umbracle". En esta fotografía puede apreciarse la gran dimensión de longitud del edificio.

4.125 | Imagen tridimensional de la cubierta.

4.126 | Trazados generadores de la geometría de la cubierta.

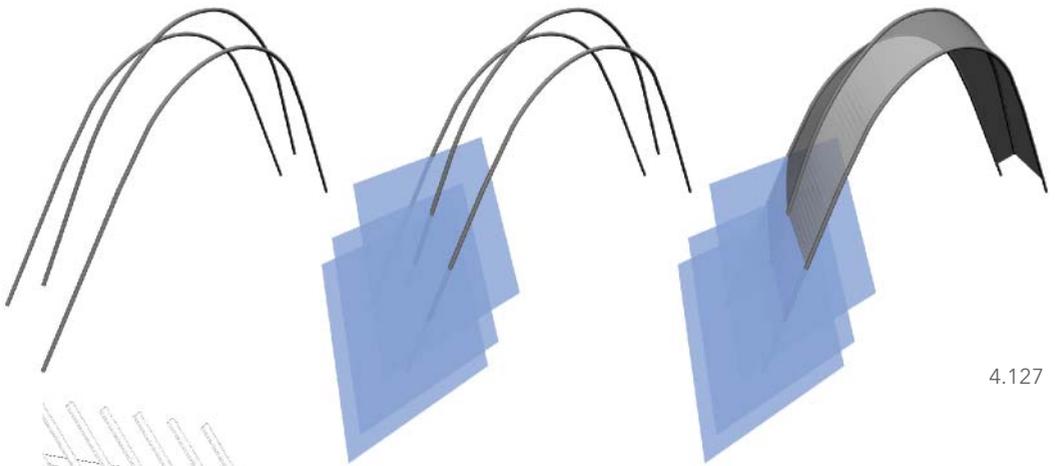
GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

En una primera aproximación al edificio, la cubierta puede parecer que está generada por un cilindro de directriz parabólica. Pero es al aproximarse al "Umbracle" cuando se puede apreciar que la superficie resulta más compleja ya que está compuesta por la combinación de varias superficies.

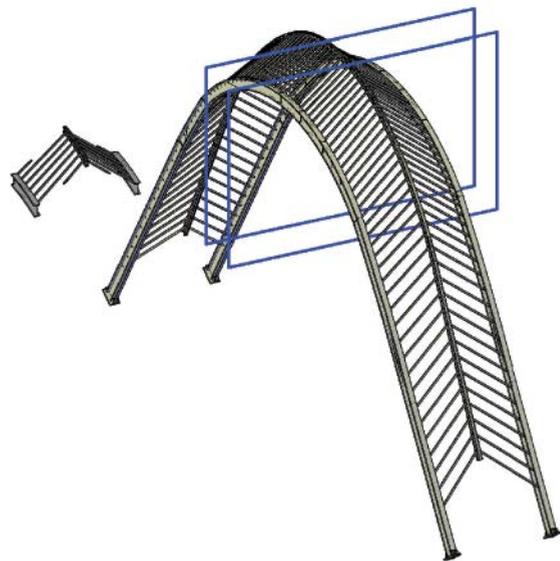
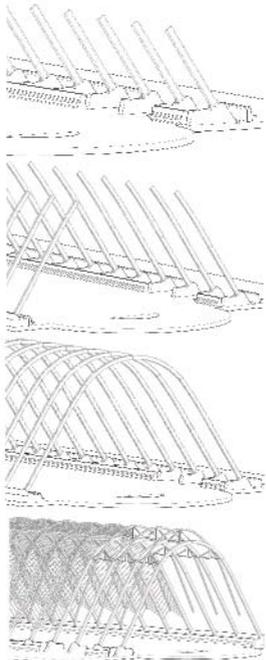
Igual que en otros casos que ya hemos analizado en la CACV, como puede ser la cubierta del "Museu", la manera que tiene el arquitecto de componer este elemento es por repetición de un módulo a lo largo de todo el edificio.

De los planos de planta, alzado y sección, podemos extraer los trazados geométricos del módulo. En la sección vemos que la cubierta sigue unas directrices parabólicas. En alzado se puede apreciar que las barras que forman las superficies son paralelas a una dirección.

Por tanto podemos concluir que la cubierta está diseñada utilizando una serie de arcos parabólicos que une con una superficie de plano director materializada con barras metálicas siguiendo la dirección de las generatrices de la superficie. Cada módulo consta de dos arcos parabólicos, dos apoyados en el suelo y uno flotante y desplazado en vertical hacia arriba, y uniendo estos arcos, de dos superficies de plano director.



4.127



4.128

4.127 | Generación geométrica de uno de los módulos de la cubierta.

4.128 | Detalles estructurales y constructivos de la cubierta: En la parte de la izquierda se puede ver un esquema del proceso constructivo de la cubierta, y en la derecha una modelización de uno de los módulos con el detalle de una porción de la estructura.

ESTRUCTURA

En la estructura de esta cubierta la geometría juega un papel esencial.

En primer lugar, los arcos parabólicos que aproximan al arco catenario hacen que los esfuerzos se distribuyan de manera natural hasta los apoyos. Estos arcos están materializados por perfiles metálicos compuestos con sección en I. Los apoyos de los arcos son empotramientos realizados con una placa de anclaje atornillada a la estructura de hormigón del edificio. Cabe resaltar que la dirección parabólica de los arcos tiene su continuidad en la estructura de hormigón, transmitiendo de esta manera mejor los esfuerzos a la cimentación.

Los arcos intermedios que no llegan a apoyar en el suelo, reparten su peso a los contiguos mediante las barras metálicas que componen la superficie de plano director. Estas barras son las que anteriormente hemos comentado que siguen las direcciones de las generatrices de la superficie de plano director. Se sueldan a tope a los arcos y están construidas con barras macizas de sección circular.

La longitud de la cubierta también le otorga estabilidad, ya que el esquema se repite con 55 arcos fijos y 54 flotantes a lo largo de los 320 metros de longitud del edificio. A diferencia de la estructura del "Museu", no necesita de elementos a modo de contrafuertes ya que los empujes laterales son menores.



4.129



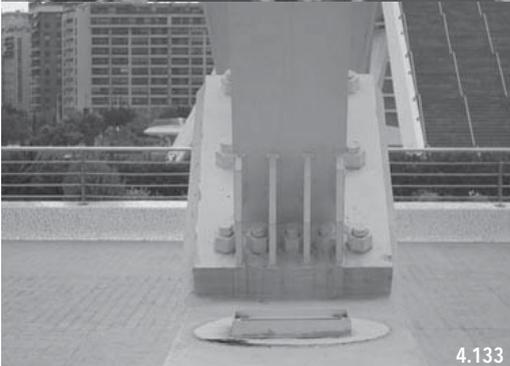
4.130



4.131



4.132



4.133



4.134

4.129 | Imagen que muestra la primera fase de la ejecución de la cubierta. En la parte izquierda puede verse el arranque de los arcos parabólicos.

4.130 | Se puede apreciar en la imagen las diferentes juntas de los arcos fijos, ya ejecutados en su totalidad y arriostrados provisionalmente mediante unas barras auxiliares en sentido longitudinal.

4.131 | Fase de la ejecución donde se puede ver la estructura auxiliar que a base de barras en forma triangular para situar en posición el arco flotante para posteriormente soldarle las barras de la superficie.

4.132 a 4.134 | Imágenes de detalle de uno de los empotramientos de los arcos fijos. Se puede apreciar la placa de anclaje y la tornillería.

CONSTRUCCIÓN

La ejecución de la cubierta se realizó en las siguientes fases:

Primero se ejecutaron los arcos parabólicos fijos en tres tiempos. En primer lugar se fijó la parte más baja atornillada a la estructura de hormigón del edificio.

Posteriormente se soldó la siguiente parte del arco, que no llegaba a cerrarlo. Para dar estabilidad a los perfiles colocados se arriostró en sentido longitudinal las piezas colocadas con unas barras auxiliares.

Para finalizar la ejecución de los arcos se terminó colocando soldada la pieza superior a modo de clave, arriostrándola de la misma manera que las anteriores.

A continuación se dispuso una estructura auxiliar con barras formando triángulos que permitía situar el arco flotante en posición, tal y como se puede apreciar en la imagen de la página anterior.

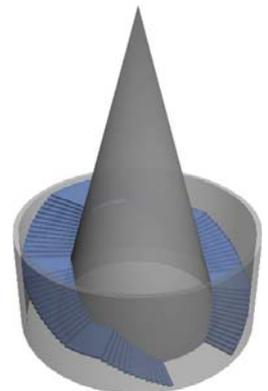
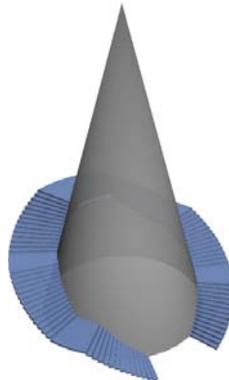
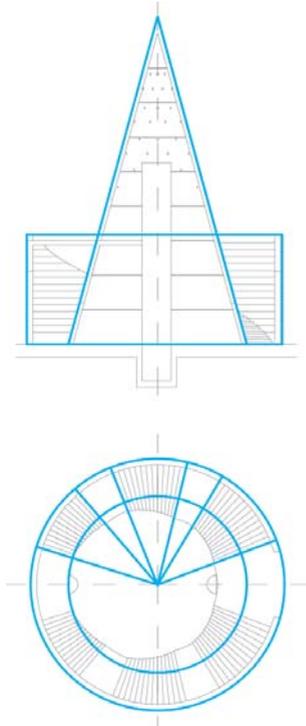
Finalmente se soldaron las barras de sección circular que definen las superficies de plano director y se quitaron las estructuras auxiliares. La ejecución de los dos últimos pasos se hizo de manera progresiva con el objetivo de ir aprovechando las estructuras auxiliares para todos los arcos flotantes.



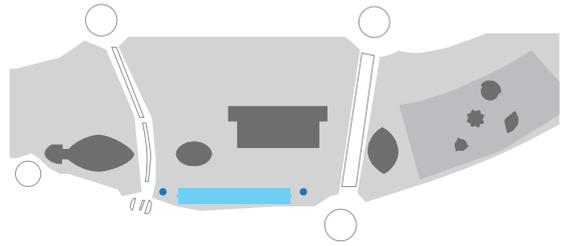
4.135



4.136



4.137



CONJUNTO ESCALERA-ASCENSOR

4.135 | Imágenes del conjunto escalera-ascensor del "Umbracle".

4.136 | Imagen tridimensional del conjunto.

4.137 | Trazados regulados y generación geométrica del conjunto escalera-ascensor

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

Un elemento interesante por su diseño geométrico es el conjunto escalera-ascensor que Calatrava diseña para acceder desde el nivel de la autopista del Saler al complejo. Dispone dos conjuntos en los extremos del edificio.

El elemento está compuesto por tres superficies fundamentalmente:

Una superficie cónica que alberga en su interior un ascensor exento incluido dentro de un cilindro de vidrio. El cono está perforado en su parte superior permitiendo la entrada de la luz solar.

Rodeando el cono se sitúan las escaleras helicoidales con sus escalones siguiendo la direcciones de las generatrices. Resulta interesante la intersección de esta escalera con la superficie del cono, ya que genera una hélice cónica, difícil de encontrar en el diseño de edificios.

Exteriormente a la escalera, esta se apoya en un cilindro, describiendo en su intersección con él una hélice cilíndrica.

Todos los elemento descritos están materializados con hormigón armado y ejecutados a la manera tradicional, por lo que su construcción no tiene interés en este análisis.

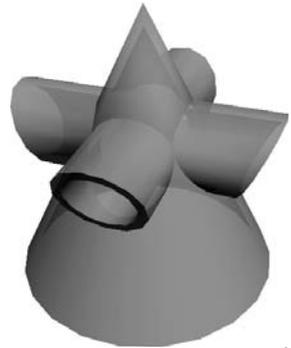
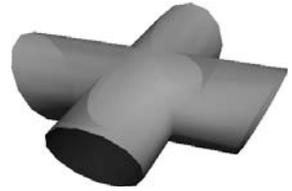
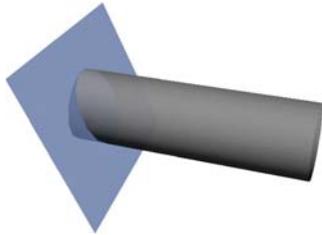
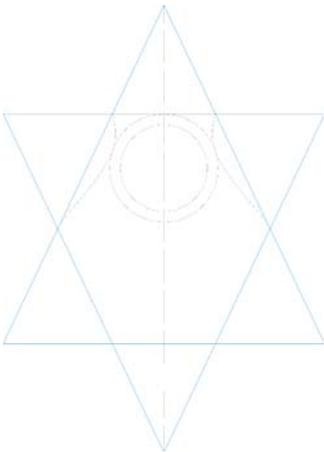
Estructuralmente sucede lo mismo, por lo que no se procederá a comentar su comportamiento resistente.



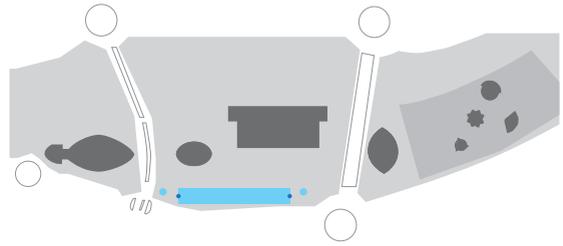
4.138



4.139



4.140



ELEMENTO DE VENTILACIÓN DEL APARCAMIENTO

4.138 | Imagen del respiradero escultórico del "Umbracle".

4.139 | Imagen tridimensional del elemento.

4.140 | Trazados generados y generación geométrica de uno del respiradero.

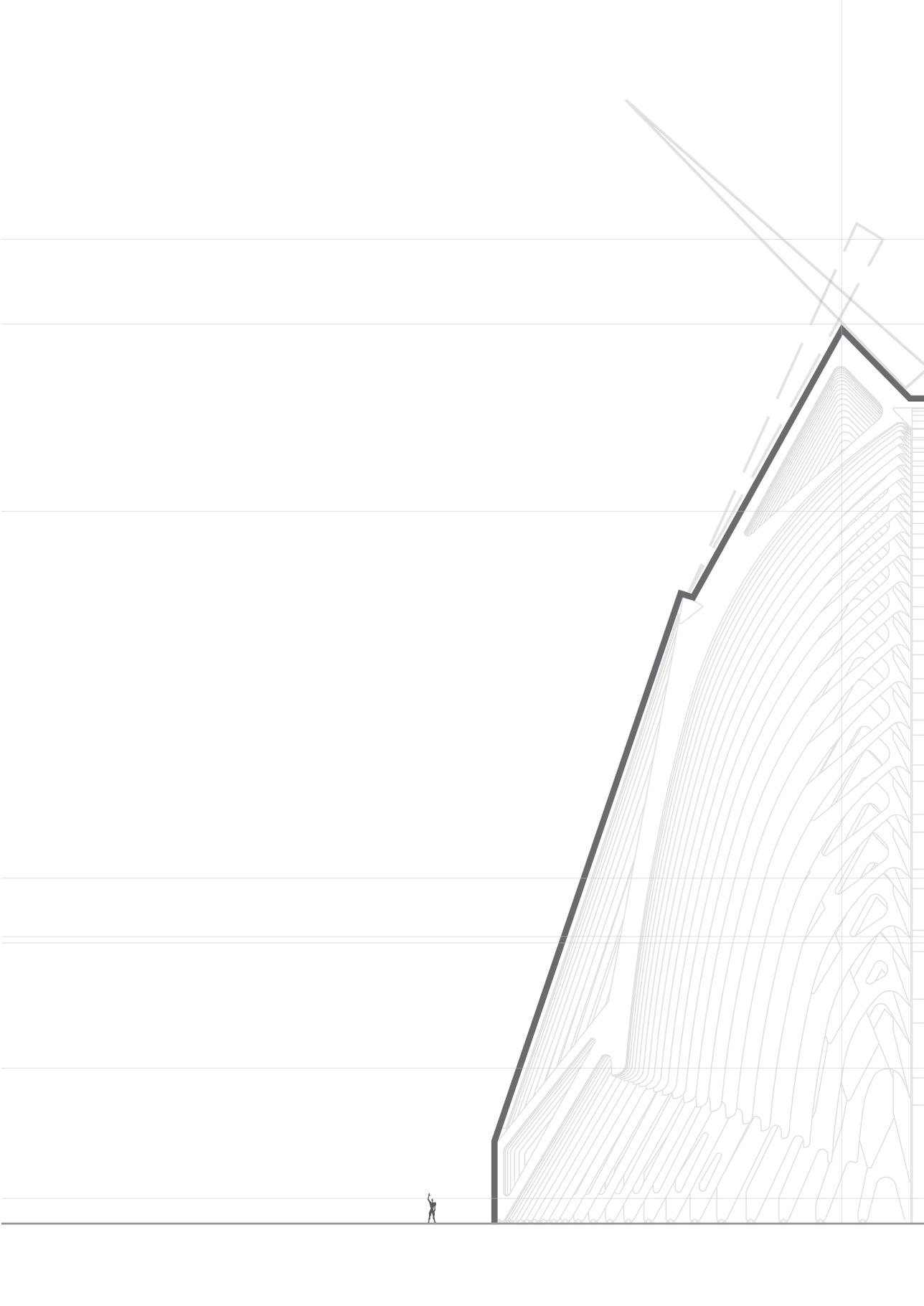
GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

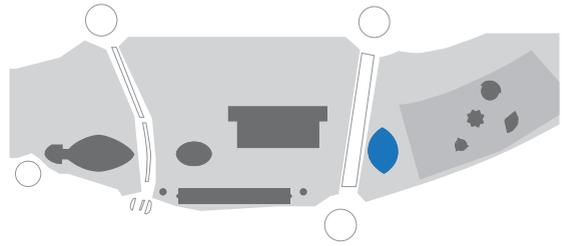
Una de las características de la obra de Santiago Calatrava es convertir elementos en principios funcionales y poco atractivos, en partes singulares y características de sus edificios ya que les otorga importancia a partir de un cuidado diseño geométrico. Igual que en la parada de la Alameda en Valencia, ya estudiada en el capítulo anterior.

En este caso, las superficies cónicas y cilíndricas también se combinan para dar lugar a un elemento tan común y poco atractivo como suele ser una chimenea de ventilación de un aparcamiento. Este hito en el paseo cobra especial relevancia debido al diseño a partir de formas geométricas. Además su acabado en trencadís los vincula con el resto del edificio.

Resulta curioso que un elemento como este haya llegado incluso a convertirse en imagen de la CACV en multitud de revistas y publicaciones.

El respiradero desde el punto de vista constructivo y estructural no tiene mayor singularidad.





4.3.5 | L'ÀGORA

ARQUITECTO
SANTIAGO CALATRAVA VALLS

AÑO DE CONSTRUCCIÓN
2006 / actualidad

USO
ESPACIO MULTIFUNCIONAL

DIMENSIONES
5.000 m² - 98 m LONGITUD - 65 m ANCHURA - 70 m ALTURA CENTRAL

ELEMENTOS A ANALIZAR
CUBIERTA

El edificio del "Àgora" se localiza en la zona este de la ciudad de Valencia, en el antiguo cauce del río Turia, entre el denominado paseo de las Moreras y la autopista del Saler, formando parte de la "Ciutat de les Arts i de les Ciències".

Dentro del complejo el edificio se sitúa entre el "Museu de les Ciències" con quien limita al oeste, el "Parc Oceanogràfic Universal" situado al este. A su vez está flanqueado por un estanque que lo rodea por su lado este.

El "Àgora" es el último edificio en comenzar a construirse, y en la actualidad, a pesar de ya haberse utilizado para multitud de eventos, se encuentra sin finalizar a nivel de cubierta ya que falta por ejecutar el brise soleil móvil que ayudaría a matizar la entrada de luz cenital.

En un principio el edificio no estaba incluido en el programa de la CACV, y en algún momento durante la ejecución del resto de edificios se incorporó. Llamen la atención dos aspectos:

En primer lugar su posición en el conjunto de edificios, con su eje longitudinal perpendicular al del río, justo al contrario que el resto de edificios.

El otro aspecto es su color. Todos los edificios son blancos y sin embargo el arquitecto eligió para el "Àgora" el color azul.

El edificio está concebido como un gran espacio multifuncional cubierto y de gran versatilidad capaz de albergar exposiciones, eventos deporti-

página anterior | Imagen de la sección del edificio "Àgora" que forma parte del complejo de la Ciutat de les Arts i de les Ciències de Valencia, España, inacabado - Santiago Calatrava Valls



4.141 | Infografía de proyecto del edificio donde se puede observar el brise soleil móvil en la parte superior de edificio, parte que falta por ejecutar en la actualidad.

4.142 | Imagen exterior del edificio en la actualidad.

4.143 | Detalle del cerramiento exterior donde se puede ver uno de los extremos del edificio y el acabado de trencadís azu.

4.144 | Imagen interior del edificio vacío. Se puede apreciar el diseño por repetición de los pórticos metálicos de la estructura.

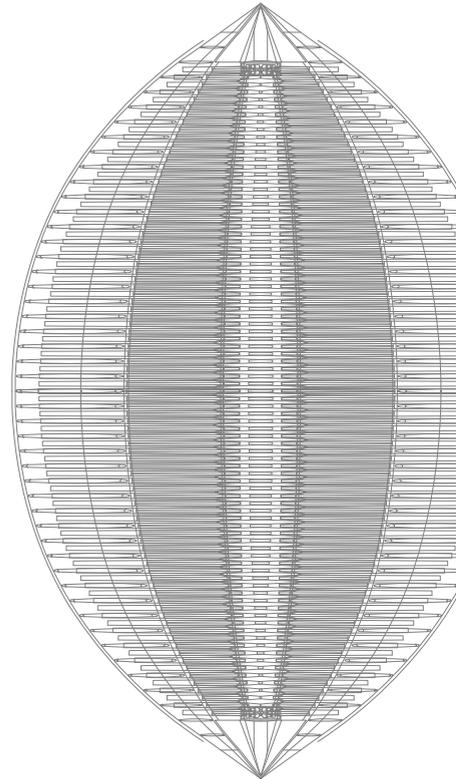
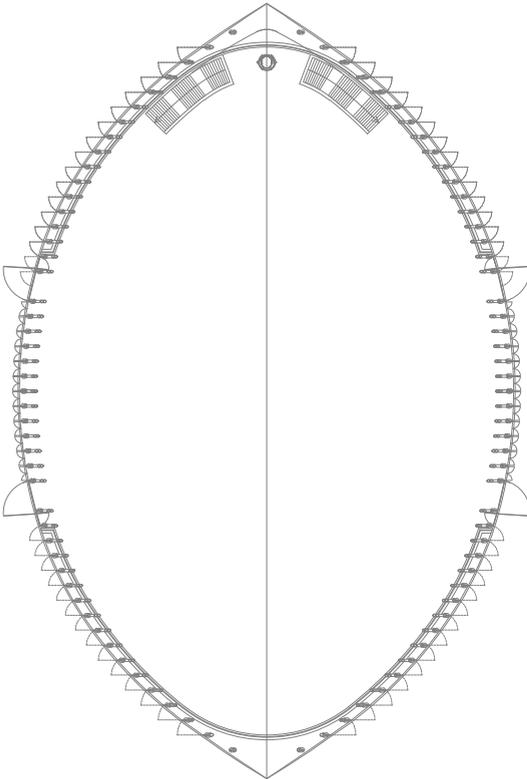
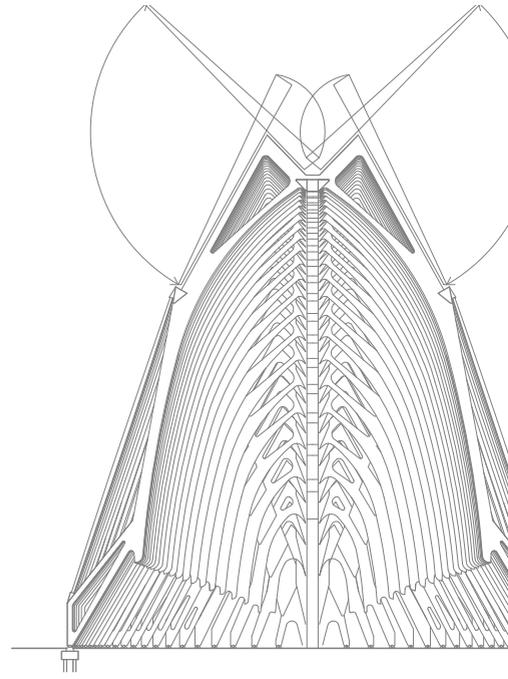
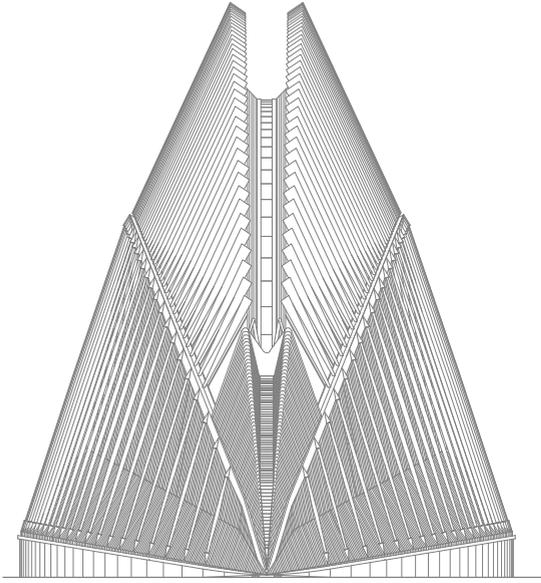
4.145 - 4.146 | Imágenes interiores del edificio tomadas durante diferentes eventos realizados en él y que dan una muestra de la versatilidad del espacio interior.

vos, congresos, pases de moda...

Su diseño orgánico interior recuerda en primer lugar el esqueleto de un animal debido a la repetición de arcos estructurales blancos a modo de costillas. Con un análisis más profundo observando fundamentalmente la sección del edificio, el diseño nos acerca más al de las catedrales góticas, con sus tornapuntas a modo de contrafuertes contemporáneos. Incluso los arcos remiten al templo de la "Sagrada Familia" de Gaudí, ya que forman una estructura que sigue una directriz catenaria.

Exteriormente la volumetría del edificio es muy rotunda, doblemente simétrica y en comparación con el resto de edificios, especialmente cerrada.

El edificio tiene una serie de espacios auxiliares de servicio al uso principal que desarrolla en una cota inferior.

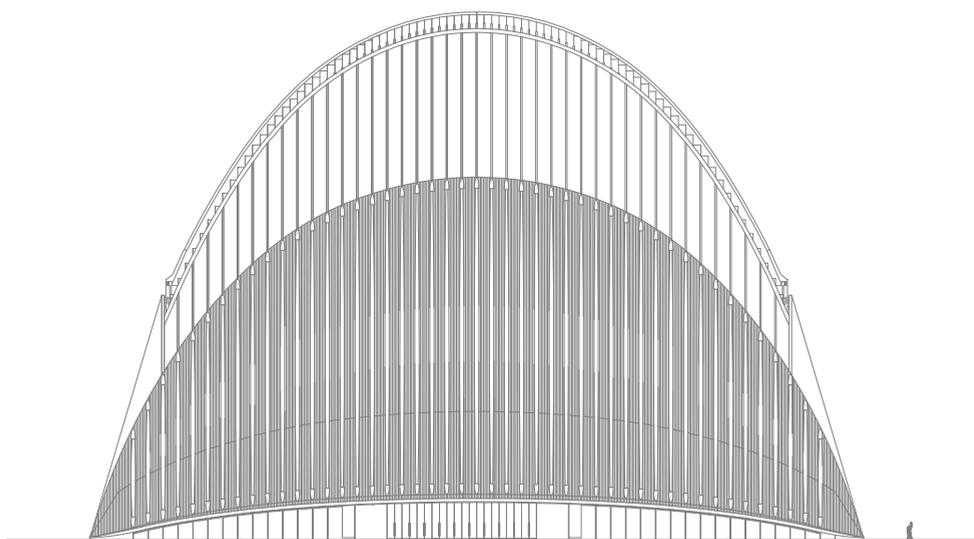
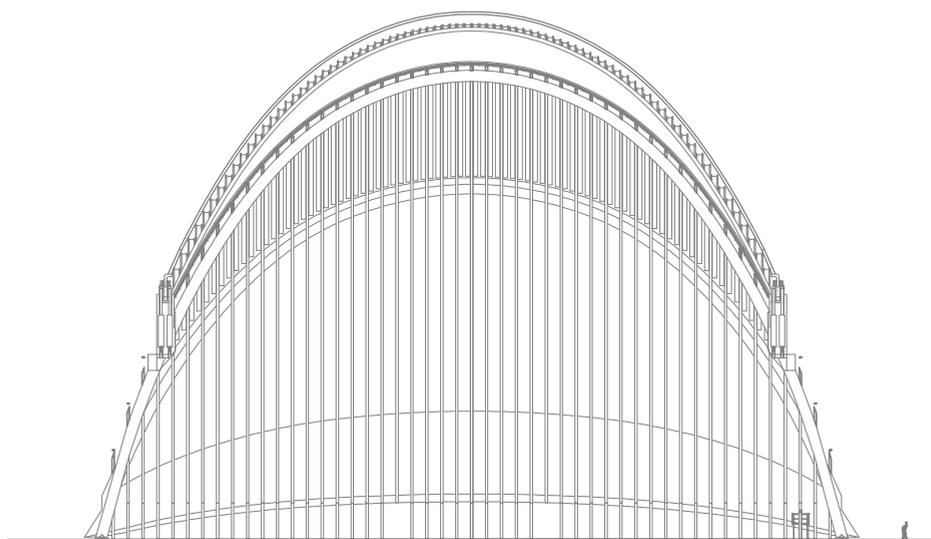


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro



edificio
L'Àgora

arquitecto
Santiago Calatrava Valls

plano
planta cubierta

escala
1/1000



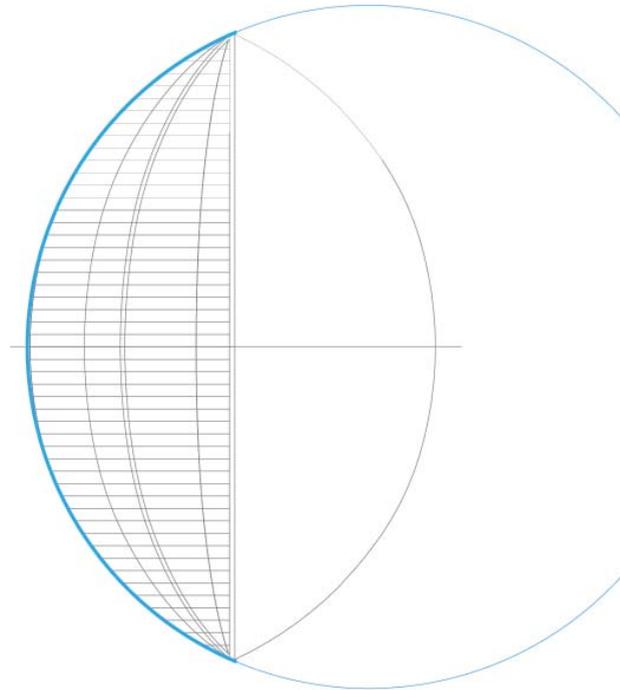
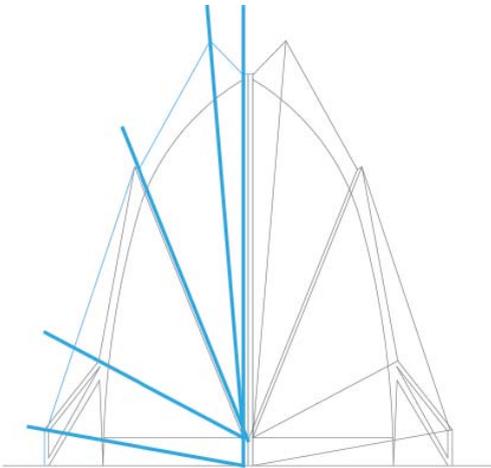
05



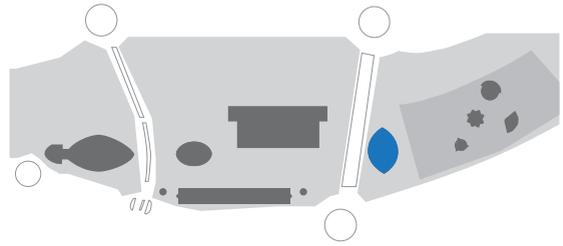
4.147



4.148



4.149



CUBIERTA-CERRAMIENTO

4.147 | Imagen exterior de la cubierta- cerramiento de "l'Àgora".

4.148 | Imagen tridimensional de la estructura.

4.149 | Trazados geométricos generadores de la forma del edificio.

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

La envolvente del edificio está diseñada con un hábil juego de superficies cilíndricas en una de las operaciones geométricas más complejas y efectivas desde el punto de vista visual y estructural de toda la CACV.

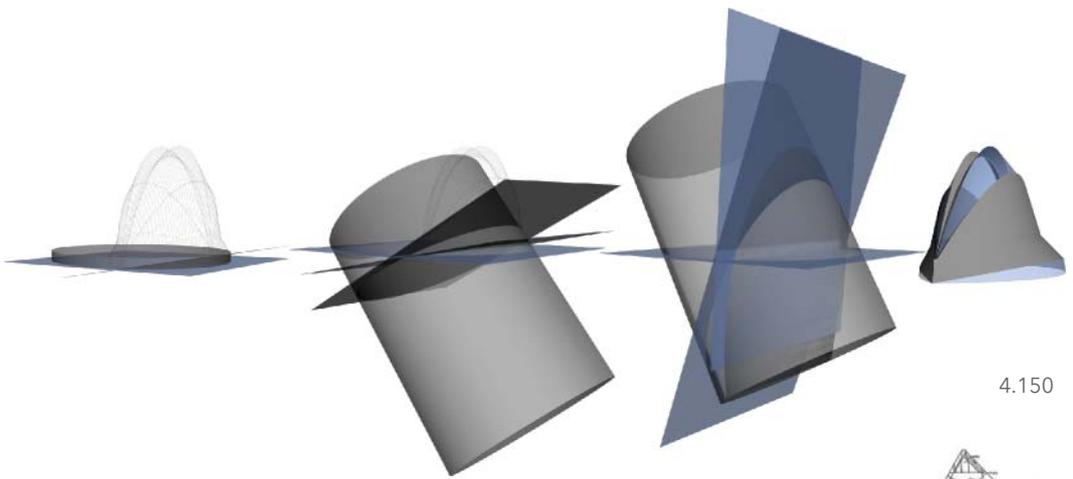
Seis superficies cilíndricas combinadas entre sí conforman la volumetría exterior del edificio. Estas superficies en su parte inferior y superior están construidas con vidrio, lo que aporta una iluminación cenital al interior. Esta entrada de luz se verá matizada y controlada con la colocación del brise soleil en la parte superior y que como hemos comentado, en la actualidad no se ha ejecutado.

De los planos podemos extraer los trazados reguladores de la geometría del edificio.

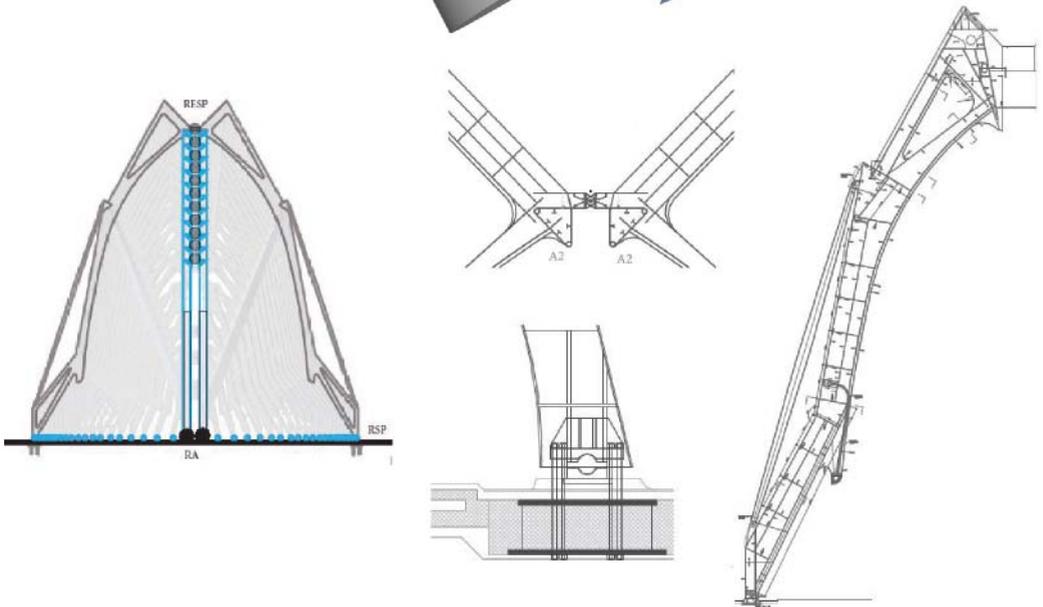
En la planta vemos que tiene una forma de elipse apuntada compuesta por dos circunferencias. Además también podemos observar una serie de curvas elípticas que serán la proyección de las diferentes intersecciones entre los cilindros.

En la sección es donde podemos extraer información acerca de la dirección de las generatrices de las superficies cilíndricas y por qué planos están limitadas.

Una buena pista de que la envolvente se diseñó a partir de una composición de cilindros, es que la estructura interior se dispone coincidiendo con las generatrices de las superficies, repitiéndose de manera paralela.



4.150



4.151

4.150 | Generación geométrica de algunas de las superficies que componen la cubierta - cerramiento de "l'Àgora".

4.151 | Detalles estructurales del edificio: A la izquierda, esquema en sección con indicación de las articulaciones en los apoyos de la estructura. En el centro detalle de la rótula superior y de la articulación de los apoyos. A la derecha, detalle de uno de los arcos estructurales.

ESTRUCTURA

Interiormente estas superficies cilíndricas están materializadas por 49 pórticos metálicos de sección hueca y disposición triangulada que recuerdan la reinterpretación que hizo Gaudí en la "Sagrada Familia" de la construcción de una catedral gótica.

Los apoyos a nivel el suelo de los pórticos están articulados mediante unas grandes rótulas que se han dejado vistas.

Los pórticos realmente son la repetición simétrica de la pieza que se puede apreciar en la página anterior. En su parte superior estas dos piezas están articuladas para mejorar su trabajo conjunto y eliminar la transmisión de momentos flectores. En conjunto forman unos arco catenarios de gran altura (70 metros en el arco central) que consiguen realizar una distribución de esfuerzos muy natural, llegando a los apoyos prácticamente en vertical y sin transmitir momentos.

Estos pórticos están arriostrados longitudinalmente a su vez por unos arcos elípticos que resultan de la intersección de los cilindros usados en la volumetría. Estos arcos unen los pórticos a tres niveles y otorgan estabilidad a toda la estructura.

En este caso, a diferencia del "Museu", pero de manera parecida al "Palau", la estructura del edificio que define su volumetría, queda vista en el interior pero oculta al exterior. Tan solo los tornapuntas más exteriores se han dejado vistos.



4.152



4.153



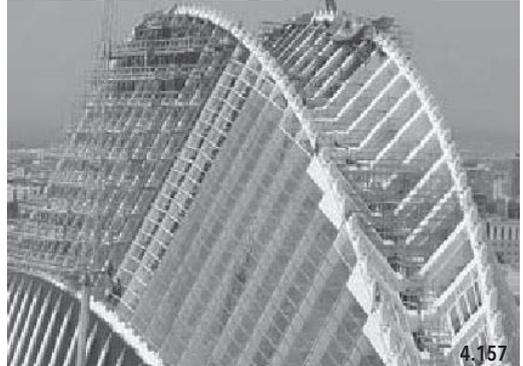
4.154



4.155



4.156



4.157

4.152 | Imagen de la cimentación acabada del edificio con las placas de anclaje esperando para comenzar el montaje de la estructura.

4.153 | Primer tramo de la estructura en fase de ejecución.

4.154 | Apoyo extremo de la estructura. Se puede ver el apoyo en rótula esférica.

4.155 | Comienzo de la ejecución de los arcos de arriostramiento de la estructura.

4.156 | Detalle del izado de una de las piezas estructurales de la parte superior del edificio.

4.157 | Montaje de los grandes vanos de vidrio de la parte superior. Se puede apreciar las piezas de anclaje del brise soleil que actualmente se siguen observando en la parte superior del edificio.

CONSTRUCCIÓN

El proceso de construcción del edificio del "Àgora" se ha prolongado mucho en el tiempo y ha sido de gran complejidad técnica, necesitando multitud de medios auxiliares para su ejecución.

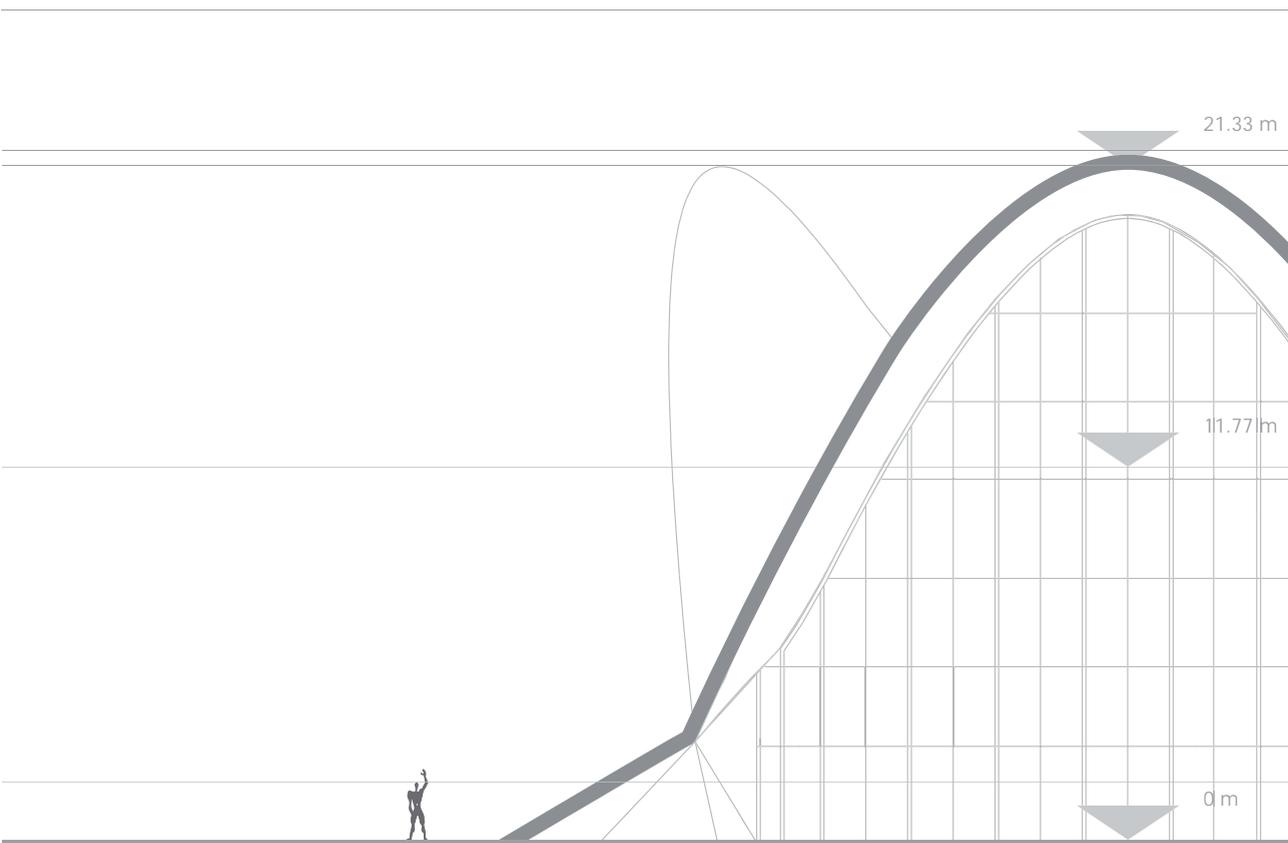
Tras la realización de la cimentación mediante pilotaje y encepado de los pilotes se dispusieron una placas de anclaje a las que se atornillaría las rótulas de apoyo de los arcos.

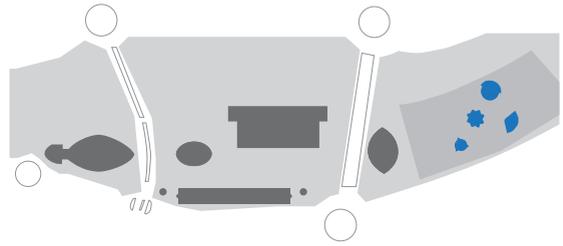
En primer lugar se montaron, apeados, los primeros tramos de los arcos.

A continuación se fueron ejecutando por tramos los primeros arcos elípticos longitudinales que iban arriostrando la estructura y permitiendo desaparecer las primeras piezas de la estructura.

Del mismo modo se fueron ejecutando el segundo tramo de los pórticos, arriostrándolo con el segundo arco longitudinal y posteriormente el tercer tramo. Hay que destacar las grandes cimbras que fueron necesarias para ir apoyando los tramos de pórtico hasta que se podían apoyar en el arco elíptico o se acabaron cerrando en la parte superior.

Para el trabajo en la parte superior se montó todo un sistema de andamiaje muy complejo. Este sistema es el que estaba previsto para el montaje del brise soleil y al retirarse para empezar a dar uso al edificio, en la actualidad resulta inviable su nueva colocación.





4.3.6 | PARC OCEANOGRÀFIC UNIVERSAL

ARQUITECTO	AÑO DE CONSTRUCCIÓN
CIVIS PROJECT MANAGEMENT SL	1997/2006
USO	
ACUARIOS CON LOS DIFERENTES AMBIENTES MARINOS	
DIMENSIONES	
110.000 m ² - 42.000 litros de agua (equiv. 15 piscinas olímpicas)	
ELEMENTOS A ANALIZAR	
CUBIERTAS: ACCESO, RESTAURANTE, AUDITORIO Y ZONA ÁRTICO	

El complejo del "Parc Oceanogràfic" se localiza en la zona este de la ciudad de Valencia, en el antiguo cauce del río Turia, entre el denominado paseo de las Moreras y la autopista del Saler, formando parte de la "Ciutat de les Arts i de les Ciències".

Dentro de ésta, el complejo es lo más próximo a la desembocadura, y por lo tanto al mar, situándose en la zona este de todo el conjunto de edificios.

Este gran acuario es en la actualidad el más grande de Europa y recrea los principales ecosistemas marinos del mundo. Está formado por una serie de piscinas las cuales en su gran mayoría se recorren a una cota enterrada para poder observar a los animales. Sin embargo a nivel superficial existen varios espacios en los que las superficies singulares juegan un papel muy importante en el diseño de sus cubiertas.

El proyecto del "Oceanogràfic" es encargado a Félix Candela, arquitecto con una gran trayectoria de ejecución de edificios donde las superficies de doble curvatura son parte fundamental del diseño. Debido a su avanzada edad, fallece antes de poder terminar el proyecto, aunque muchas de sus ideas y bocetos previos si que se han podido desarrollar en parte.

El proyecto pasa a manos de una empresa de gestión de proyectos creada al efecto, Civis Project Management SL, que es la encargada de desarrollar todo el Parc Oceanogràfic. Como figura de referencia detrás de esta empresa nos encontramos al arquitecto José María Tomás Llavador. Los diferentes "edificios" que conforman el complejo son encargados

página anterior | Imagen de la cubierta del acceso del "Parc Oceanogràfic Universal" que forma parte del complejo de la Ciutat de les Arts i de les Ciències de Valencia, España, 2006 - Civis Project Management



Imágenes exteriores de algunas de las cubiertas del "Parc Oceanogràfic":

4.158 | Edificio de acceso

4.159 | Edificio del restaurante submarino

4.160 | Edificio de la zona del ártico

4.161 | Gran jaula esférica de las zonas húmedas que alberga multitud de especies de aves.

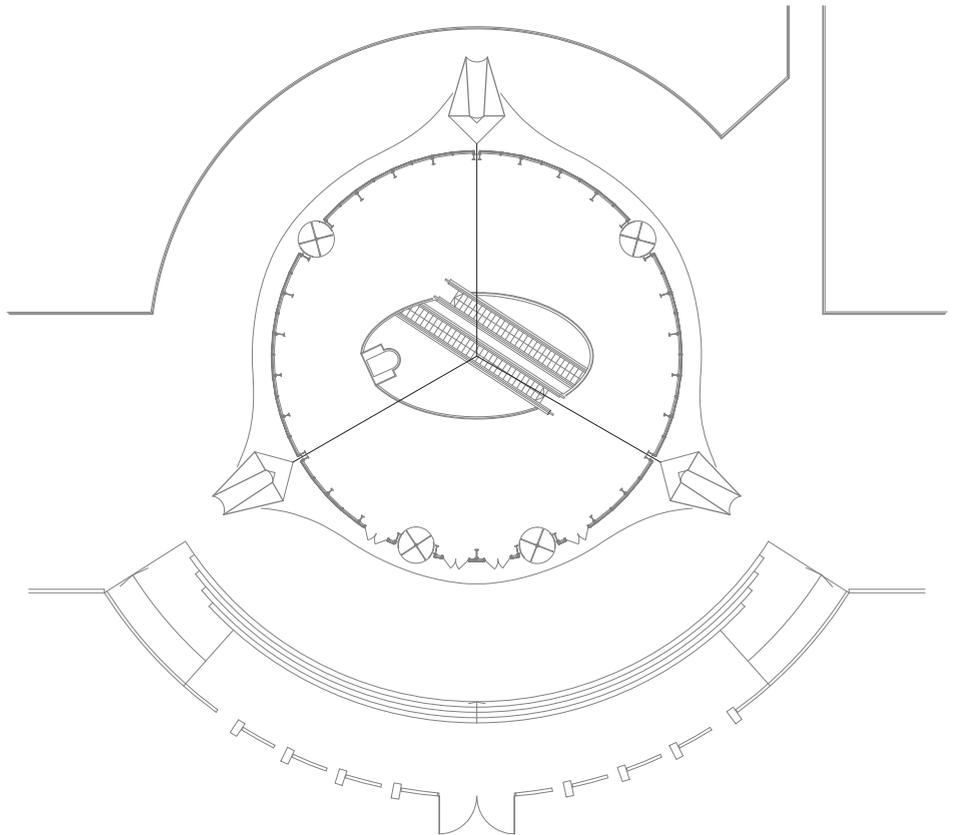
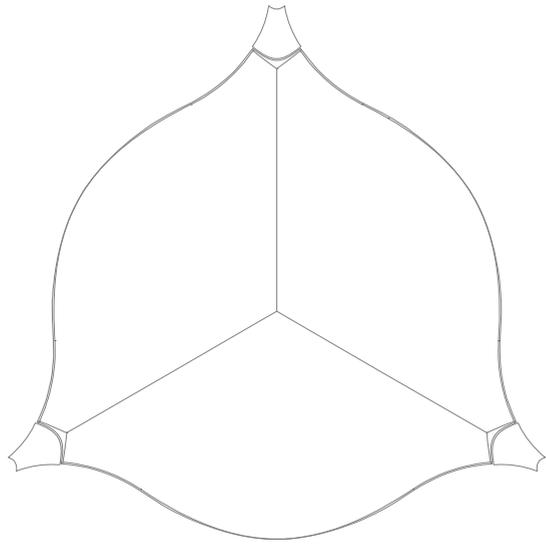
4.162 | Edificio del auditorio del Mar Rojo

4.163 | Imagen de una de las cubiertas textiles tensadas que se pueden encontrar en varios puntos del Oceanogràfic

de manera parcial a diferentes despachos de arquitectura e ingeniería. Como ejemplo, señalar que el proyecto de la cubierta del restaurante la llevaron a cabo en el estudio "CMD ingenieros" los ingenieros y profesores de la UPV, Carlos Lázaro y Alberto Domingo.

Finalmente se mantuvieron algunos de los diseños de Candela con modificaciones, y otras de sus ideas se sustituyeron. Es significativo el cambio sustancial que sufrió la cubierta del restaurante, con la que se le quiso hacer un homenaje al arquitecto repitiendo la forma de la que realizó años atrás en Xoximilco para el restaurante "Los Manantiales".

A continuación se muestran unos planos generales de los edificios a escala necesaria para su inclusión en el formato del trabajo. Se han seleccionado tan solo unos pocos para ayudar a la comprensión del complejo. En el apartado de anexos se pueden encontrar la totalidad de los planos a una escala mayor y en formato digital.

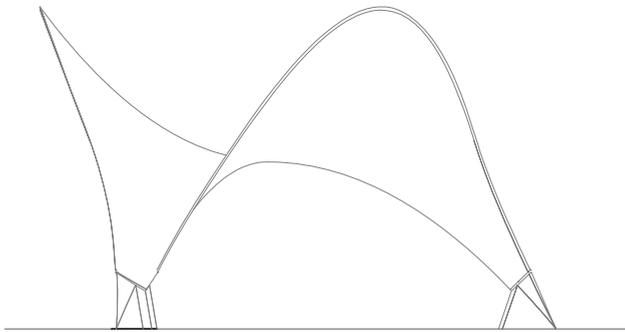
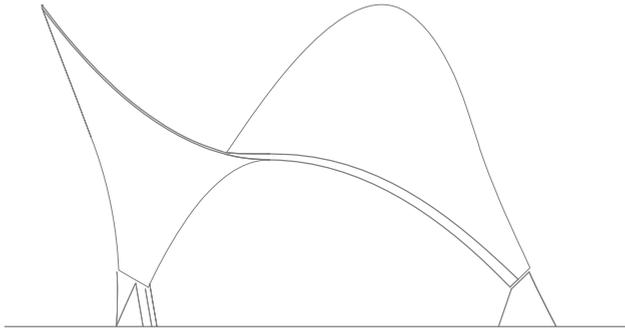
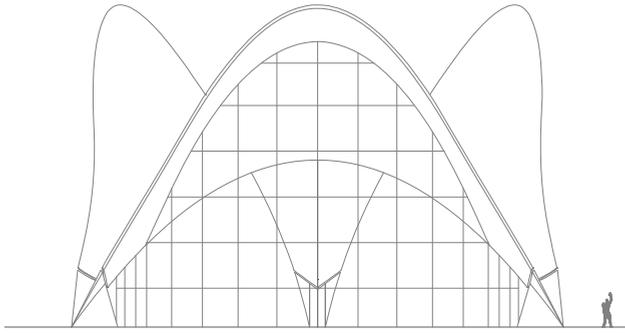


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro



edificio
Oceanogràfic Acceso

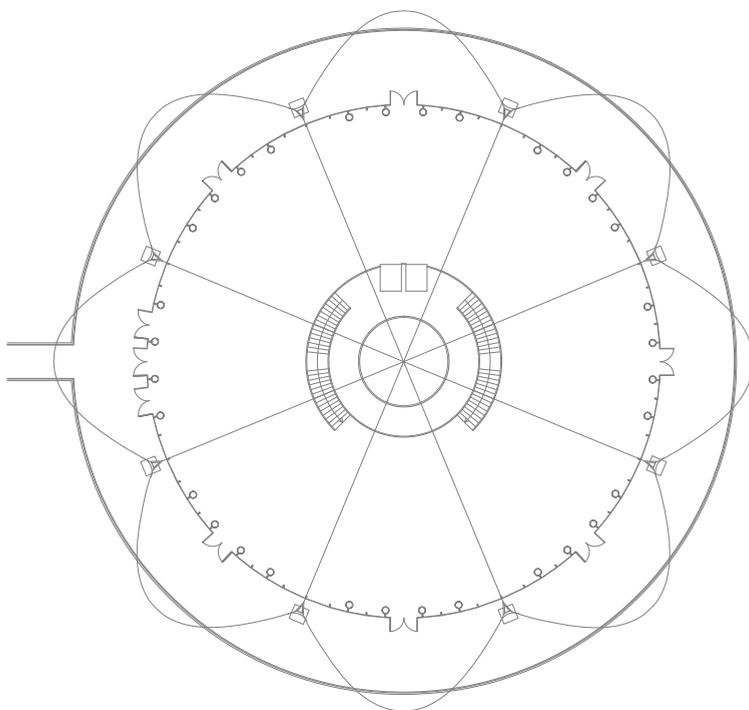
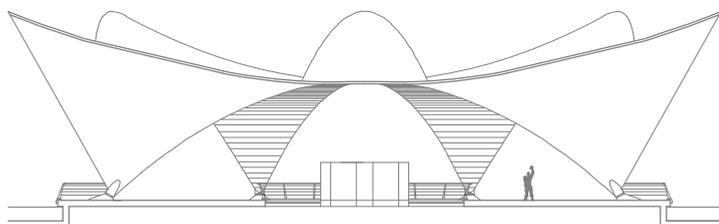
arquitecto
Civis Project Management

plano
planta cota 0, planta cubierta, alzados y sección

escala
1/500



06.1

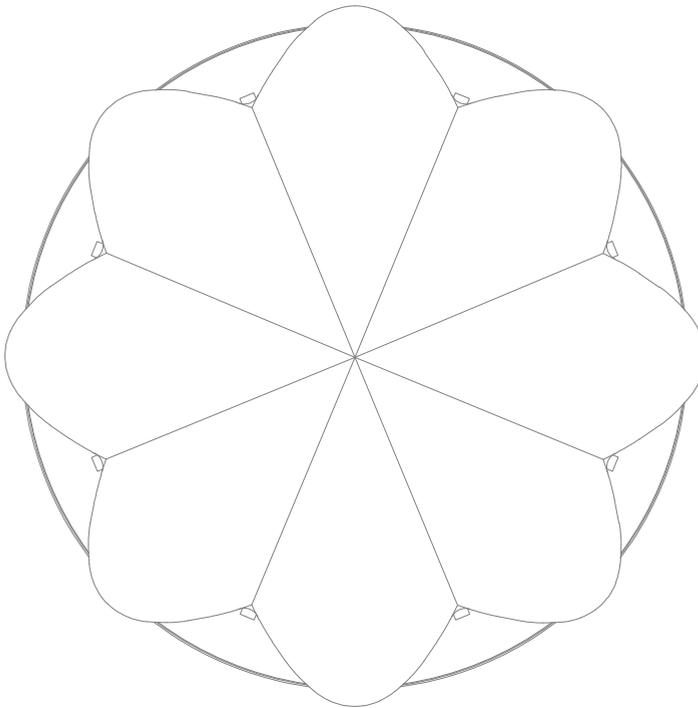
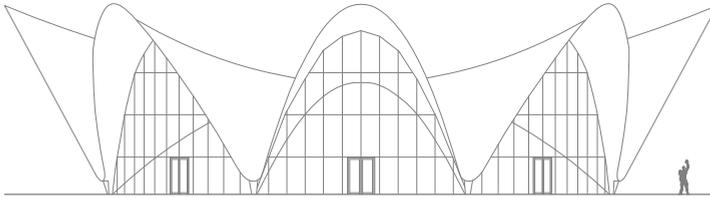


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro



edificio
Oceanográfico Restaurante

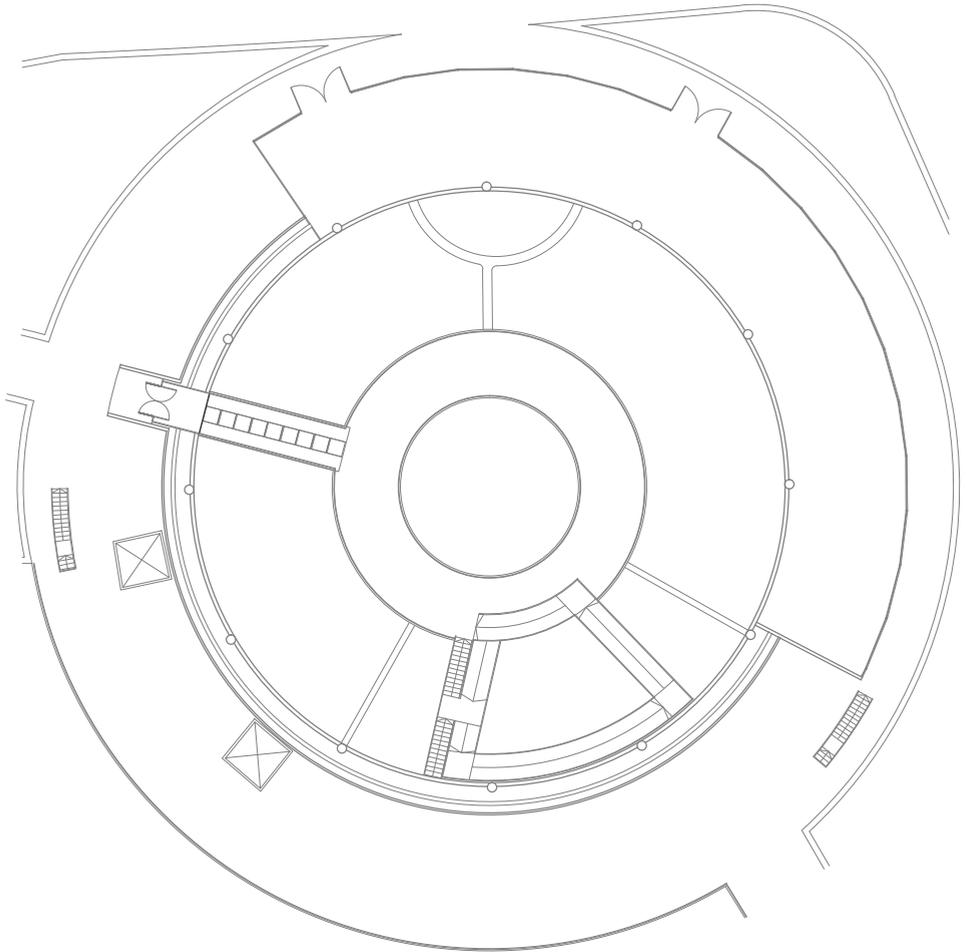
arquitecto
Civis Project Management

plano
planta cota 0, planta de cubierta alzado y sección

escala
1/500



06.2

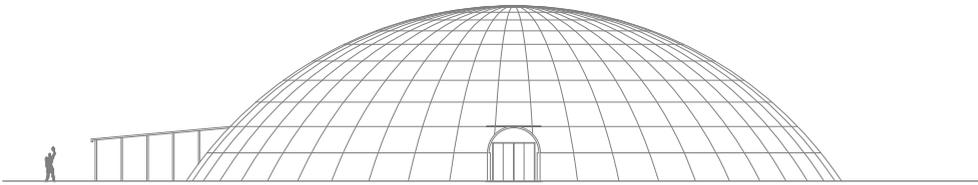
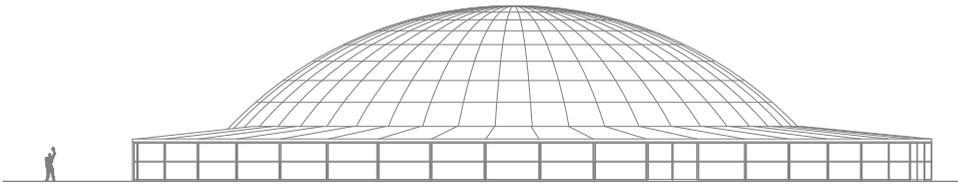


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro



edificio
Oceanogràfic Àrtic

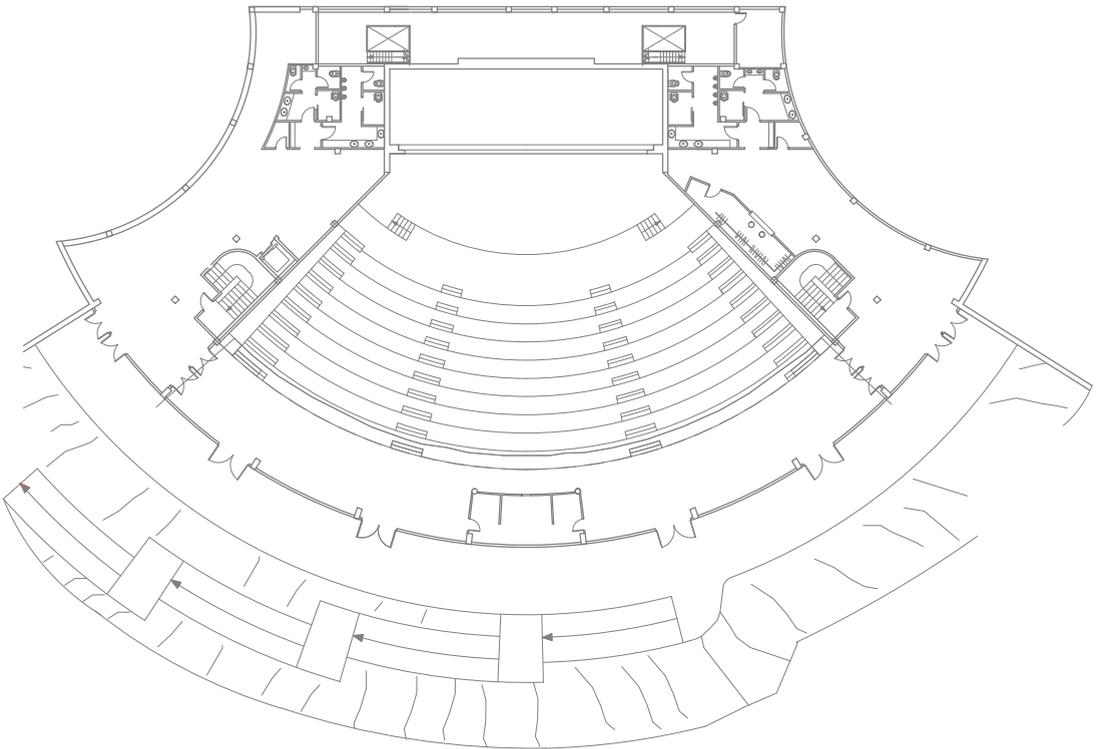
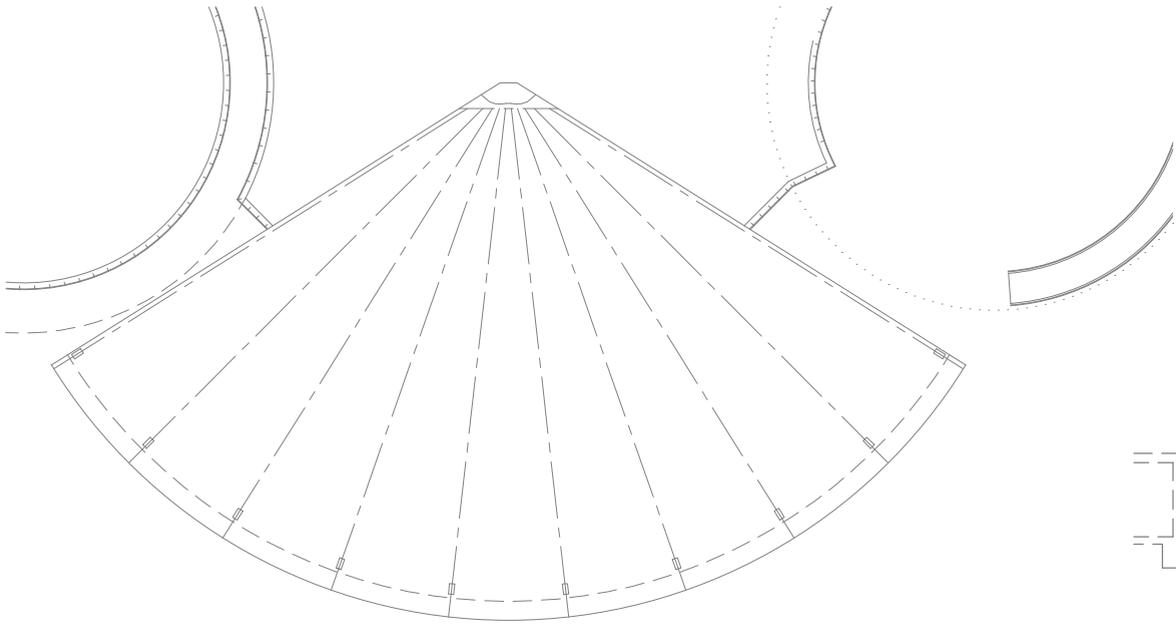
arquitecto
Civis Project Management

plano
planta

escala
1/500



06.3

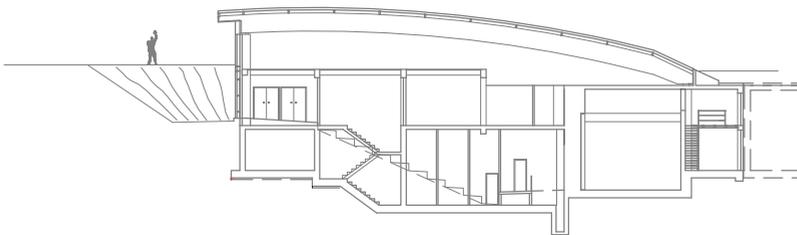
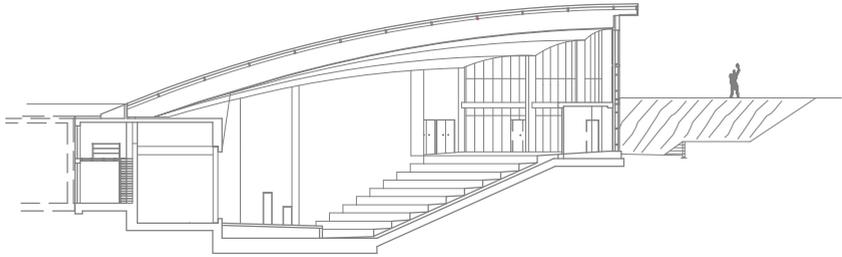
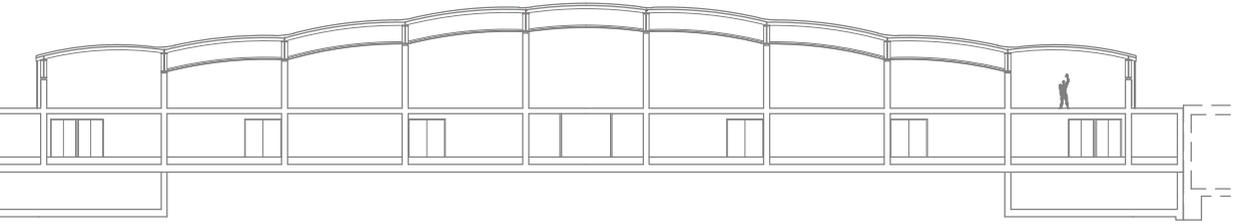
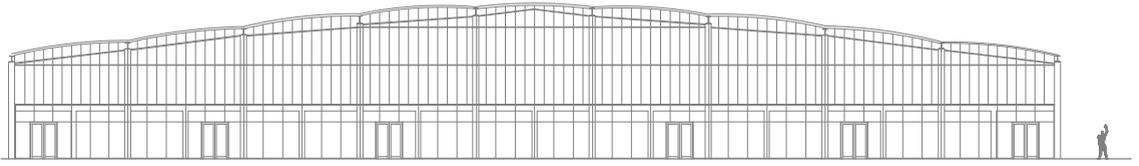


tesis

Análisis formal geométrico de las superficies arquitectónicas

autor

Francisco Javier Sanchis Sampedro



edificio
Oceanogràfic Auditorio Mar Rojo

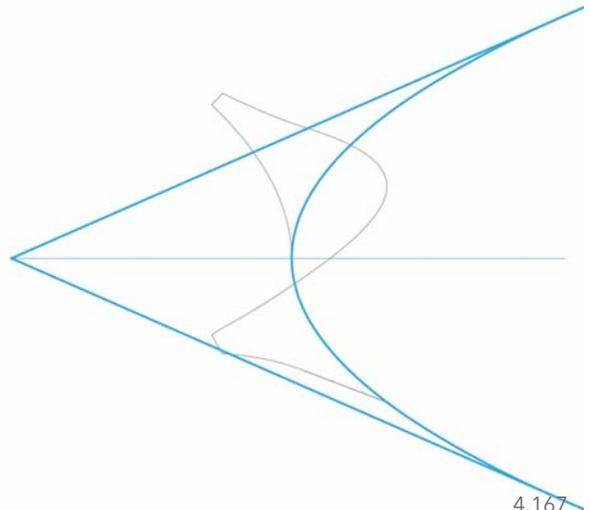
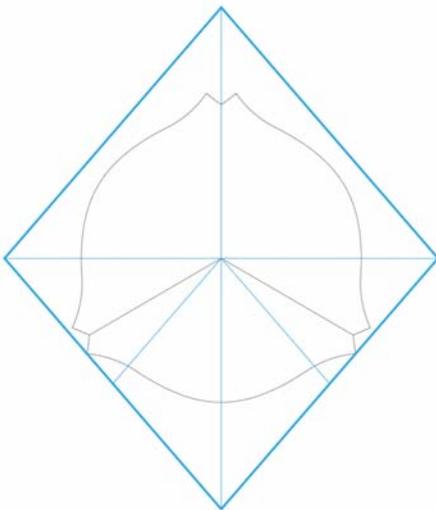
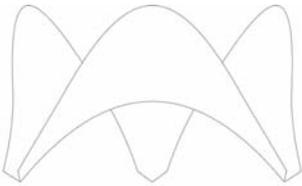
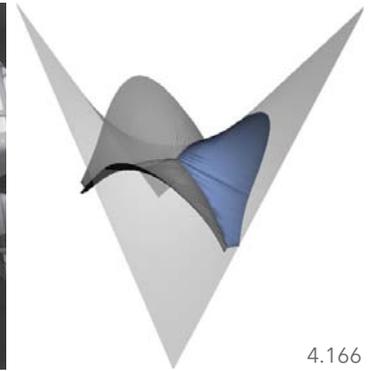
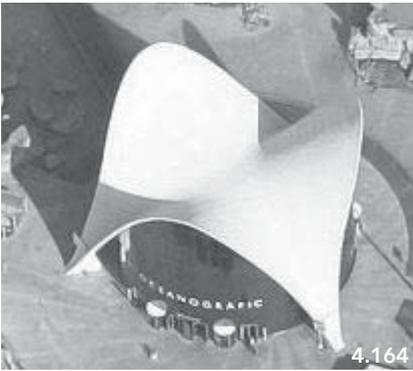
arquitecto
Civis Project Management

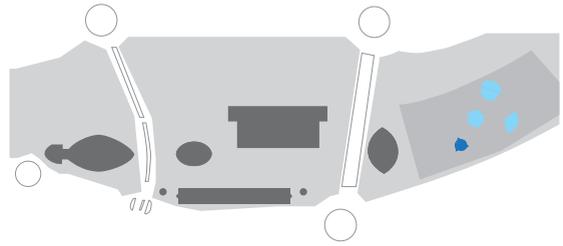
plano
planta auditorio, planta cubierta, alzado desarrollado y secciones

1/500



06.4





CUBIERTA DEL ACCESO

4.164 | Imagen exterior de la cubierta del edificio de acceso al "Parc Oceanogràfic"

4.165 | Imagen Interior donde se puede apreciar una parte del intradós de la cubierta

4.166 | Esquema geométrico de la forma de los lóbulos con la geometría del paraboloides hiperbólico

4.167 | Trazados geométricos generadores de la forma del edificio

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

La cubierta del acceso al "Parc Oceanogràfic" es probablemente uno de los elementos más reconocibles del conjunto.

También es cierto que, junto con la cubierta del restaurante, está generada por una de las superficies más complicadas de analizar.

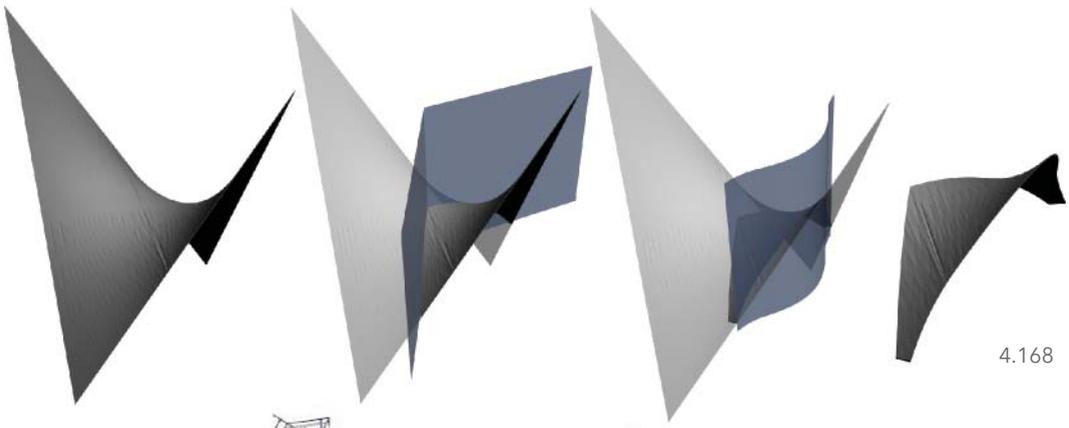
Para poder extraer los trazados reguladores de la geometría del elemento hay que partir de las generatrices de la superficie y de la sección parabólica de uno de sus lóbulos. Con estos dos parámetros podemos deducir el cuadrilátero alabeado en el que se apoya un paraboloides hiperbólico, base de la superficie de los tres lóbulos.

En este caso, y a diferencia de la cubierta del restaurante como veremos en el siguiente análisis, el borde de la superficie no se consigue mediante la intersección del paraboloides con un plano, sino que se obtiene a partir de la intersección de la superficie con otra generada por unos trazados tangentes en planta.

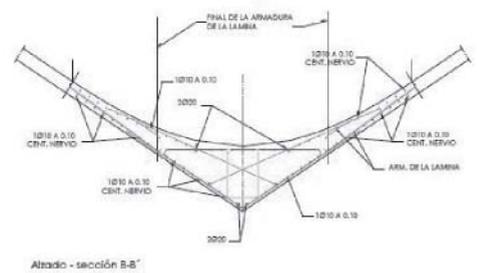
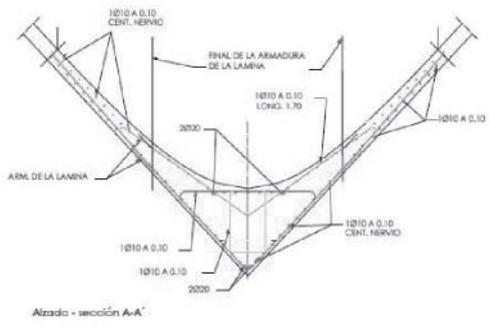
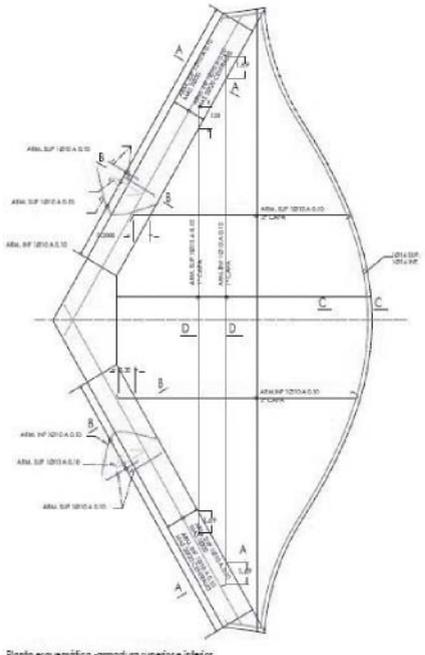
Por tanto, la cubierta está compuesta de 3 lóbulos de paraboloides hiperbólico, distribuidos de manera radial y limitados en su borde a partir de un trazado de circunferencias tangentes en planta.

Con este diseño se consigue obtener una cubierta con una altura central de 11 metros, una altura en el extremo de los lóbulos de 21 metros y una luz entre apoyos de 30 metros.

También destacar, aunque no forme parte del análisis, los cerramientos de muro cortina que siguen la forma de un cilindro de base circular limitado en su parte superior por las superficies de la cubierta. La estructura de este cerramiento está materializada según las generatrices del cilindro y las secciones paralelas a la base, por lo tanto circunferencias.



4.168



4.169

4.168 | Generación geométrica e la cubierta del edificio de acceso

4.169 | Detalles estructurales de la cubierta: A la izquierda planta de armado de uno de los lóbulos, y a la derecha secciones del lóbulo con indicación de los armados

ESTRUCTURA

La superficie de paraboloides hiperbólicos fue la más trabajada en su trayectoria profesional por el arquitecto Félix Candela. En el libro "Las estructuras de Félix Candela" escrito por Colin Faber, se explica de manera exhaustiva el comportamiento estructural de estas superficies.

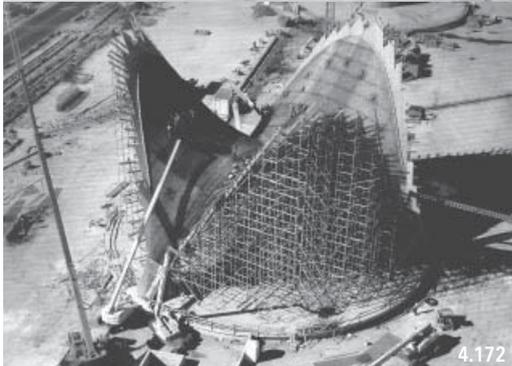
Lo que hace del paraboloides hiperbólicos una superficie "eficiente" desde el punto de vista estructural es su doble curvatura anticlástica. Ésta es la que hace que sea capaz de soportar grandes esfuerzos absorbiéndolos únicamente por su forma. Lo que produce este hecho es la forma parabólica contrapuesta de sus secciones en cualquier punto de la superficie, que transmiten de manera natural las tensiones generando arcos catenarios hasta los apoyos. Gracias a este hecho, las estructuras generadas con esta superficie pueden tener muy poco espesor y un armado mínimo.

En este caso, la cubierta del acceso tiene un espesor en gran parte de su superficie de unos 12 centímetros. A pesar de la delgadez del elemento, en la obra de Félix Candela nos podemos encontrar espesores incluso de la mitad, como veremos también el la cubierta del restaurante. Además, como se puede ver en el detalle de la página anterior, el armado previsto para la lámina parabólica es mucho más cuantioso que el que veremos para la del restaurante.

Estos dos hechos, espesor y cuantía de armadura, son debidos a un exceso en la curvatura de la superficie, lo que genera unos lóbulos de gran longitud que acaban trabajando en voladizo y no a compresión, que sería el comportamiento más conveniente de la superficie.

El hecho de que el borde libre no genere un arco de descarga continuo sino que tenga una forma irregular también colabora en lo anteriormente comentado.

Otro detalle a destacar de esta cubierta es la innovación, con respecto de la obra de Félix Candela, de colocar rótulas plásticas en los apoyos para absorber la transmisión de momentos a la cimentación.



4.170 | Montaje de la cimbra necesaria para la posición del encofrado de la cubierta. Se pueden observar la colocación de las primeras vigas del encofrado que siguen la dirección de las generatrices de la superficie

4.171 | Principio de montaje del encofrado. Se aprecia la dirección recta de las vigas de encofrado y la dirección de los tablonos, según la doble generación recta del paraboloides hiperbólico.

4.172 | Fase de armado de la cubierta

4.173 | Imagen de la cubierta hormigonada pero todavía sin descimbrar

4.174 | Imagen de la cubierta con toda la cimbra y encofrado retirado. En esta fotografía se aprecia como la estructura de la cubierta es estable apoyándose solo en tres puntos

4.175 | Montaje de los muros cortina de fachada. Como se ha visto en la imagen anterior, los montantes del muro cortina no sirven de apoyo estructural a la cubierta

CONSTRUCCIÓN

Para la construcción de este tipo de superficies es necesario un complejo sistema de encofrado perfectamente replanteado en obra mediante un equipo de topógrafos. Para este replanteo se hace imprescindible el profundo conocimiento de la geometría ya que todos los elementos que los componen han de estar colocados con una gran precisión.

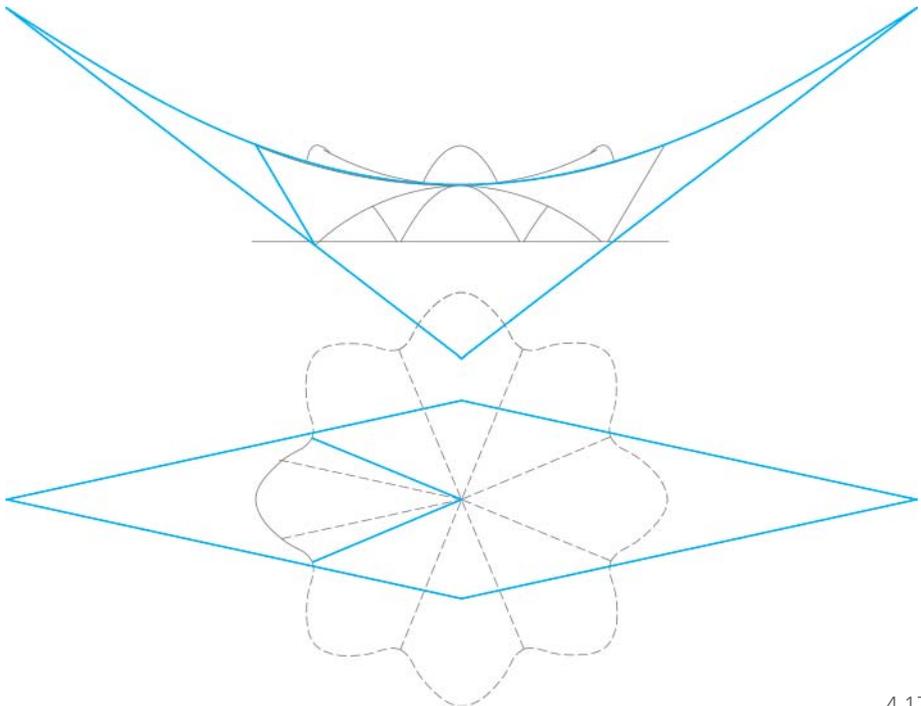
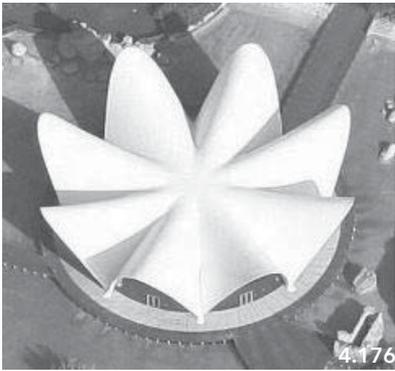
Tras replantear en el plano horizontal la cimbras, éstas se levantan hasta llegar exactamente a la altura de apoyo de las primeras vigas de encofrado.

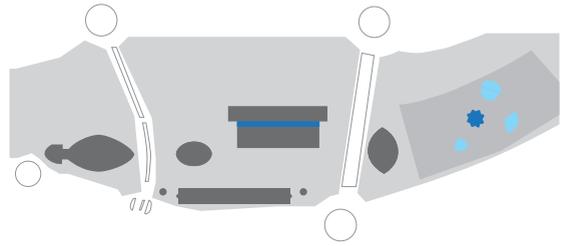
Como se ha visto en el apartado de detalle de las superficies, los paraboloides hiperbólicos tienen una doble generación recta, es decir, son superficies "doblemente" regladas, con generatrices en 2 direcciones. Es por esto que para la ejecución del encofrado se utilizan en primer lugar una serie de vigas que siguen una de estas dos direcciones. En una segunda capa se colocan los tablonos de madera que conformarán la superficie, en este caso siguiendo la otra dirección de generatrices.

El armado no aprovecha las condiciones geométricas de la superficie ya que simplemente se utiliza un mallazo ligero como armado base del hormigón, que puede adaptarse a la curvatura de la cubierta.

El desencofrado ha de ser progresivo y simétrico, empezando por los puntos más altos de los lóbulos hasta terminar por los nervios que se corresponden con la intersección de los tres paraboloides.

Finalmente, una vez desencofrada la superficie, se ejecutó el cerramiento compuesto por un muro cortina en el que los montantes de la estructura secundaria siguen las generatrices de la superficie cilíndrica que describe y los travesaños aproximan las secciones circunferencia paralelas a la base del cilindro.





CUBIERTA DEL RESTAURANTE SUBMARINO

4.176 | Imagen exterior de la cubierta de la cubierta del restaurante submarino del "Parc Oceanogràfic"

4.177 | Imagen Interior donde se puede ver una vista del intradós de la cubierta

4.178 | Trazados geométricos generadores de la forma de la cubierta

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

Probablemente, el diseño de esta cubierta supone uno de las formas más elegantes de aplicación del paraboloides hiperbólico.

Esta cubierta es diferente a los diseños preliminares que había realizado Félix Candela. Los ingenieros Carlos Lázaro y Alberto Domingo quisieron realizar un homenaje póstumo al arquitecto repitiendo el diseño que hizo para el restaurante "Los Manantiales" en Xoximilco.

Igual que en la anterior cubierta, para deducir los trazados reguladores que nos ayudan a entender la geometría, hay que partir de un par de generatrices y obtener el cuadrilátero alabeado en el que se apoyará el paraboloides hiperbólico.

En este caso, este paraboloides está limitado por tres planos: Dos de ellos son verticales y radiales respecto del centro de la cubierta, mientras que el otro es el que limita al paraboloides en su borde libre. Los dos primeros forman un ángulo de 45° entre sí, mientras que el último forma unos 61° con el plano horizontal.

Tal y como se puede apreciar en el esquema de generación de la página siguiente, con estas operaciones de corte del paraboloides y los planos conseguimos un lóbulo de la cubierta. Repetido de manera radial 8 veces obtenemos el conjunto de la cubierta.

En este caso las dimensiones finales de la cubierta son de 8 metros de altura en la parte central, 12 metros en el punto más alto de los lóbulos y con una luz entre apoyos próximos de 13,5 metros y entre apoyos opuestos de 35,5 metros.

4.179 | Generación geométrica de la cubierta del edificio del restaurante submarino

4.180 | Detalles estructurales de la cubierta: A la izquierda en la parte superior Una sección con indicación de los armados, y en la parte inferior, un detalle de un lóbulo con la indicación de los espesores de hormigón. Cabe destacar como el espesor de los lóbulos se mantiene constante hasta la zona próxima a nervio. A la derecha detalles en sección de armado de los lóbulos y un alzado de uno de los apoyos de la cubierta.

ESTRUCTURA

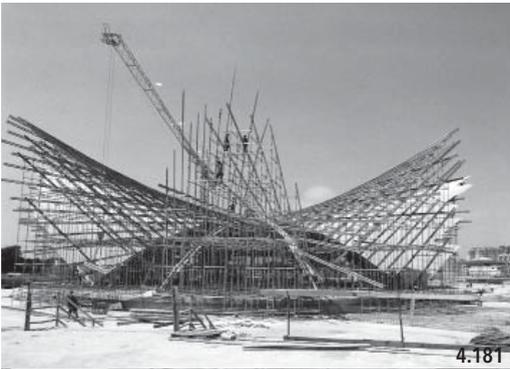
El comportamiento estructural de esta cubierta es uno de los mejores ejemplos de buen diseño geométrico que podemos encontrar. En este caso la geometría de la cubierta ayuda a soportar las cargas de una manera tan natural que en palabras de los propios proyectistas, no hubiera sido necesaria ni tan siquiera la armadura base.

El motivo de este óptimo comportamiento es debido a que las superficies tienen una curvatura bien estudiada de manera que transmiten las cargas a los apoyos mediante arcos de descarga parabólicos, que tienen una curvatura que consigue minimizar los esfuerzos flectores, llegando a transmitir únicamente esfuerzos de compresión.

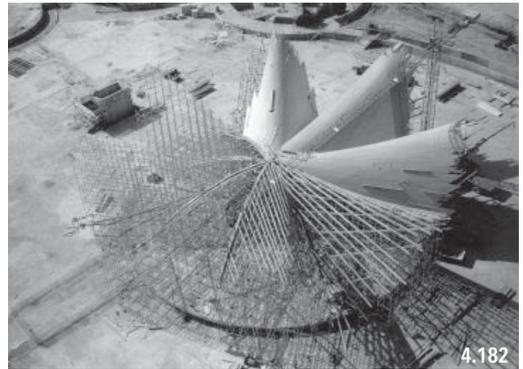
El borde generado por la sección plana anteriormente descrita también ayuda a este hecho, ya que las tensiones acumuladas en el borde de la lámina se reconducen sin ningún impedimento hasta las cimentaciones recorriendo este borde. Es lo que Félix Candela denominaba “el borde libre”.

Al igual que en la anterior cubierta, los apoyos empotrados típicos de las obras del arquitecto, se han sustituido por rótulas plásticas, de manera que ya se evita transmitir ningún tipo de momento a los apoyos. Probablemente esta innovación venga motivada por el diseño de puentes.

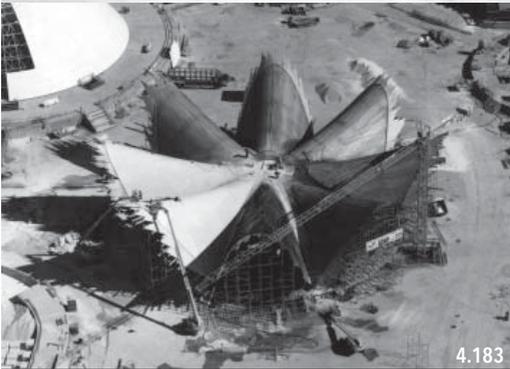
Para la ejecución de los apoyos también se utilizó una combinación de superficies interesantes. En la parte inferior se situó un tronco de cono oblicuo y en la parte superior, en su encuentro con la intersección de los lóbulos, se diseñó una superficie cilíndrica.



4.181



4.182



4.183



4.184



4.185



4.186

4.181 | Montaje de la cimbra necesaria para la posición del encofrado de la cubierta. Se pueden observar la colocación de las vigas del encofrado que siguen la dirección de las generatrices de la superficie

4.182 | Principio de montaje del encofrado. Se aprecia la dirección recta de las vigas de encofrado y la dirección de los tablonés, según la doble generación recta del parabolóide hiperbólico.

4.183 | Fase de armado de la cubierta

4.184 | Imagen de la cubierta con toda la cimbra y encofrado retirado. En esta fotografía se aprecia como la estructura de la cubierta es estable apoyándose en los 8 puntos de apoyo

4.185 | Montaje de los muros cortina de fachada. Como se ha visto en la imagen anterior, los montantes del muro cortina no sirven de apoyo estructural a la cubierta

4.186 | Imagen del final de obra de la cubierta

CONSTRUCCIÓN

La ejecución de esta cubierta en principio es similar a la anterior.

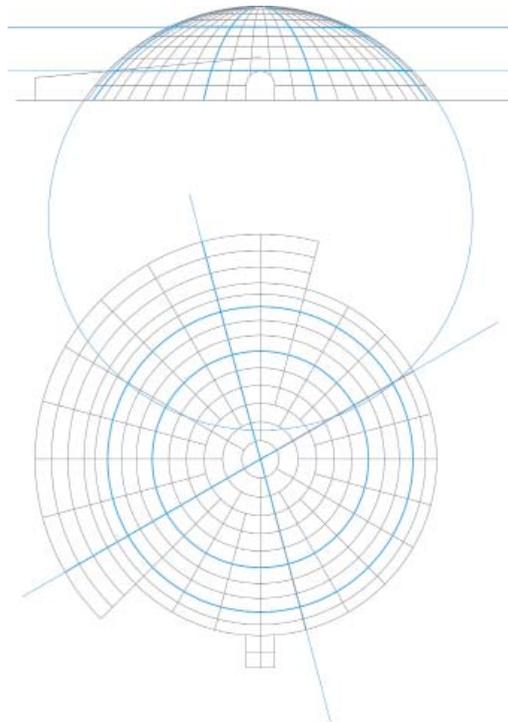
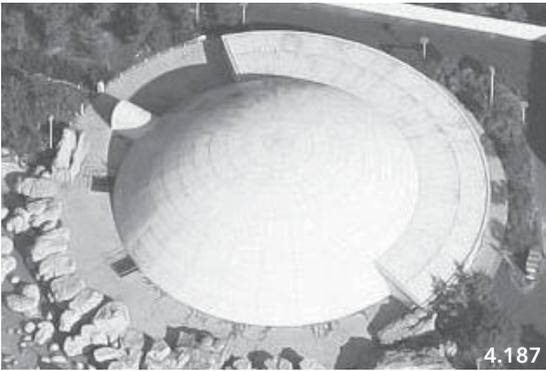
En un primer paso se ha de colocar la cimbra y el encofrado necesario para el hormigonado posterior. Para ellos es necesario un replanteo topográfico complicado en el que el conocimiento de la superficie es fundamental.

El armado como en el caso anterior, no sigue las generatrices ya que al tratarse solo de un armado base, los diámetros de las barras permiten su ajuste a la curvatura de la superficie.

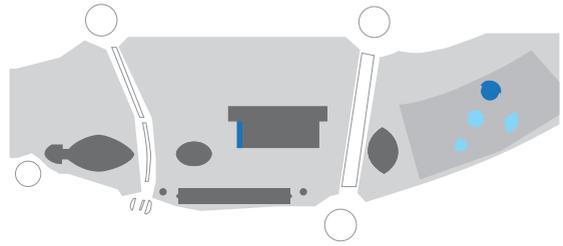
Como dato a tener en cuenta, en conversación con los ingenieros que desarrollaron el proyecto, en los cálculos la armadura base resultaba innecesaria para asegurar la resistencia estructural del elemento. Esto era debido a que los ensayos se realizaron con hormigón proyectado en seco con fibras de acero, que tiene una resistencia mayor que el hormigón vertido convencional. Además permitía una mejor ejecución en las zonas más verticales de la cubierta, ya que no se desprendía con facilidad.

El descimbrado al igual que en la cubierta del acceso también se realizó de manera simétrica, en este caso por lóbulos opuestos, para garantizar un reparto de las cargas durante el proceso equilibrado. Los nervios fueron el último elemento en desencofrarse. Se puede apreciar en la imagen de la página anterior como la cubierta es estable sin necesidad de ninguna estructura auxiliar.

Por último el muro cortina del cerramiento también se diseñó con una superficie cilíndrica y se ejecutó de manera similar.



4.189



CUBIERTA DE LA ZONA DEL ÁRTICO

4.187 | Imagen exterior de la cubierta de la zona del ártico del "Parc Oceanogràfic"

4.188 | Imagen de detalle del acceso al edificio donde se puede ver la intersección entre la esfera de la cubierta y el cilindro del acceso

4.189 | Trazados geométricos generadores de la forma de la cubierta

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

La zona encargada de albergar los acuarios de las zona más frías del planeta, la zona del ártico, está diseñada a modo de un gigantesco iglú cerrado y sin más aberturas al exterior que una pequeña puerta que simula también la de estas construcciones.

A partir de los planos de planta y alzado podemos deducir los trazados que regulan esta cubierta. En principio, parecen evidentes las circunferencias que nos ayudan a ver que se trata de una gran esfera seccionada por un plano horizontal que no pasa por su centro.

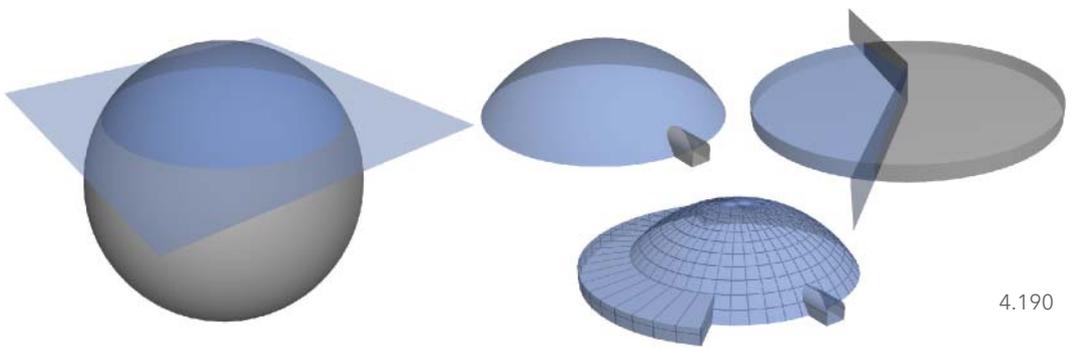
En una visión mas de detalle, podemos ver el despiece de paneles del cerramiento, tanto exterior como interior, que están generados a partir de secciones paralelo y meridiano de esta esfera.

El acceso está compuesto por una superficie cilíndrica tangente a dos planos verticales. Resulta interesante la intersección de la superficie cilíndrica, de pequeñas dimensiones, con la propia cúpula.

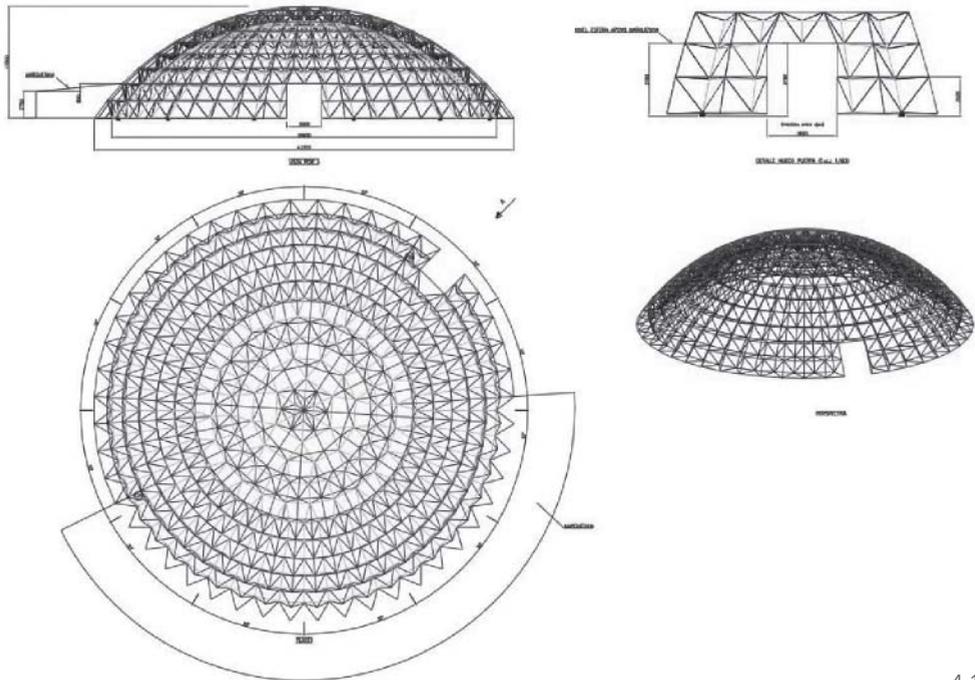
Adosado al edificio existe un anexo que lo rodea en parte. La cubierta de este espacio tiene cierta inclinación. Por tanto podemos deducir que se trata de una superficie cónica recta limitada en su parte interior por la esfera y en sus extremos por dos planos verticales radiales, que además coinciden con los que le generan secciones meridiano a la esfera.

Tal y como se aprecia en la pagina siguiente, la generación de este diseño se realiza a partir de geometrías muy puras. Esto ayudara en su materialización.

La cúpula cubre una luz de 44 metros con una altura de 11,5 metros medidos desde la cota 0.



4.190



4.191

4.190 | Generación geométrica de la cubierta de la zona del ártico

4.191 | Detalles estructurales de la cubierta: A la izquierda planta y alzado del entramado de barras que soporta la cubierta. A la derecha en la parte superior el detalle del acceso y en la parte inferior una axonometría de la estructura.

ESTRUCTURA

Para resolver la estructura de la cubierta de la zona del ártico, se planteó una estructura de barras esférica bicapa. La elección de esta tipología seguramente está motivada por la ligereza del sistema, la gran luz que puede llegar a alcanzar y el reparto que realiza de las cargas en múltiples apoyos, ya que en su parte inferior alberga acuarios de grandes dimensiones.

Esta malla estructural tiene dos capas con similares características. Sus barras principales están generadas por las secciones meridiano y paralelo de la esfera. Las secciones meridiano generadas por planos que van girando un ángulo igual alrededor del centro de la esfera, y las secciones paralelo por planos horizontales que pasan por puntos equidistantes de los meridianos. De esta manera se generan espacios trapezoidales entre las barras principales.

Las secciones meridiano son las que actúan como arcos de descarga de los esfuerzos hasta llegar a los apoyos distribuidos en su parte inferior. Fundamentalmente estas barras estarán por tanto sometidas a compresión.

Por el contrario, las secciones paralelo estarán en su mayor parte sometidas a tracción ya que sirven de arriostramiento de las secciones meridiano.

Para unir las dos capas se disponen unas barras diagonales interiores que forman una serie de medios octaedros igual que el las celosías planas, pero en este caso irregulares, ya que todas las barras no tendrán la misma longitud.



4.192 | Hormigonado de los acuarios que posteriormente se situarán por debajo de la cota 0. Observando la esbeltez de los muros se entiende la necesidad del reparto en múltiples apoyos de la carga de la cubierta.

4.193 | Montaje del primer anillo de la cubierta que se encuentra apeado al lado del edificio.

4.194 - 4.195 | Montaje de la parte superior de la cubierta. Tanto el primer anillo como la zona superior se montaron al lado del edificio y después se izaron con gruas hasta su posición final.

4.196 | Detalle del comienzo de colocación del material de recubrimiento exterior.

4.197 | Imagen interior con la capa exterior montada.

CONSTRUCCIÓN

Tras la ejecución de los acuarios con planta cilíndrica, se comenzó el montaje de la cubierta del edificio.

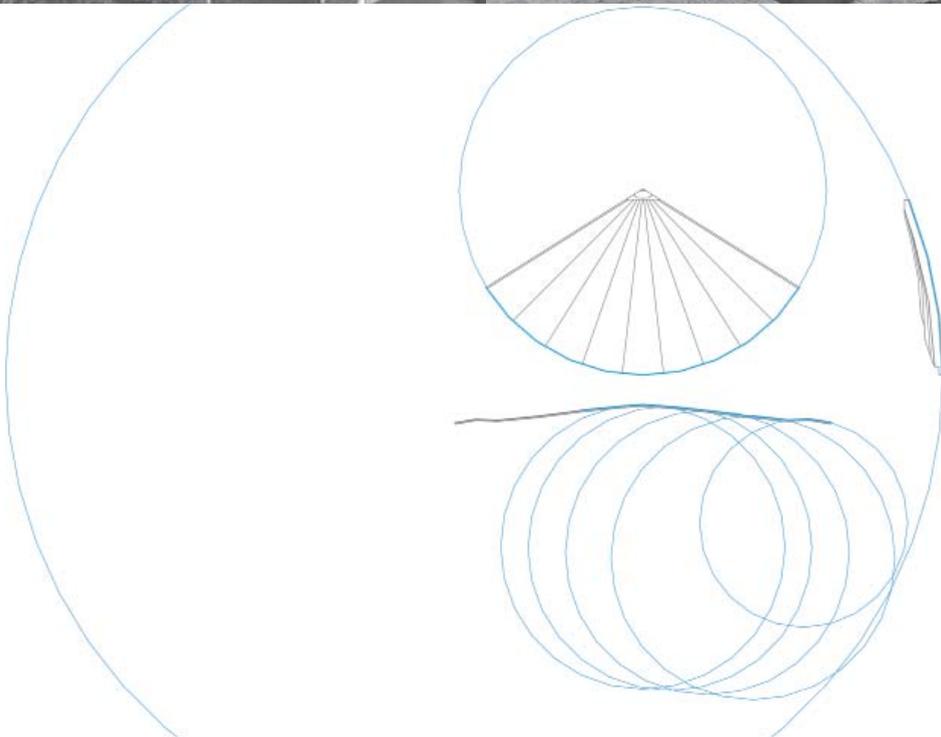
En primer lugar se armó el primer anillo, correspondiente aproximadamente a la mitad de la altura de la cubierta, hasta conseguir un elemento estable que pudiera ser izado y colocado en su posición. Una vez en el lugar final, se realizaron los anclajes correspondientes a los múltiples apoyos articulados.

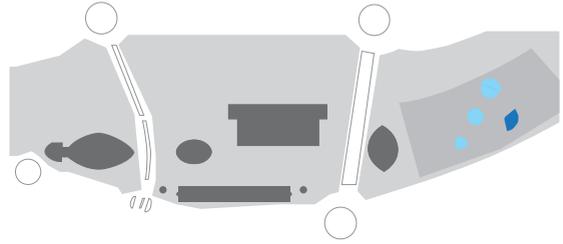
Mientras se fue montando la parte superior de la malla estructural. El casquete esférico restante se izó hasta situarlo encima del anterior anillo y se procedió a su montaje.

Una vez ejecutada la estructura de la cubierta se agregaron a esta estructura el volumen lateral, generado con pórticos metálicos concéntricos apoyados en la estructura de la cúpula, y el acceso realizado con una estructura similar a la malla de cubierta.

El material de acabado exterior se dispuso de manera radial y ascendente. El material elegido fue el GRC (Glass Reinforced Concrete) en forma de placas que se ajustan a la geometría de la esfera, es decir, se trata de placas con doble curvatura. El despiece de estas piezas se consiguió a partir de las secciones meridiano y paralelo estudiadas al principio del análisis, pero con la variación de ir juntando sectores circulares en la zona alta de la cúpula.

Para la superficie interior se optó por un techo acústico a base de paneles metálicos microperforados trasdosados con lana de roca. Esto es debido a la singular geometría de la cúpula que de haber colocado otro acabado podría haber reflejado los sonidos llegando incluso a hacerlos molestos. El despiece de estas placas sigue también los criterios anteriores, adaptándose a la estructura metálica de la cubierta.





CUBIERTA DEL AUDITORIO DEL MAR ROJO

4.198 - 4.199 | Imágenes exteriores de la cubierta del "Auditorio del Mar Rojo"

4.200 | Trazados geométricos generadores de la forma de la cubierta

GEOMETRÍA: TRAZADOS Y GENERACIÓN

Así como hemos visto otras cubiertas y edificios que destacan convirtiéndose en icono de la CACV, en el caso de la cubierta del auditorio pasa justo lo contrario. Es uno de los edificios que pasa desapercibido a la vista del visitante. Es desde una vista aérea del "Parc Oceanogràfic" cuando podemos apreciar su singularidad.

Diseñado a modo de concha marina (recuerda la forma de la concha de vieira o del peregrino) alberga un gran auditorio en cuyo escenario se sitúa como fondo un acuario de grandes dimensiones.

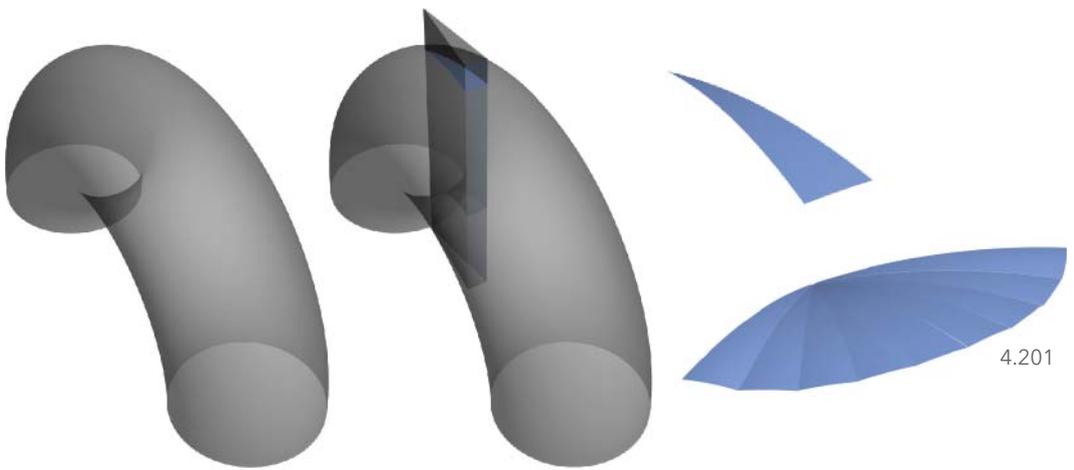
La forma de la cubierta, a primera vista orgánica y de imitación de un elemento natural, esconde unos trazados simples pero a la vez complejos de utilizar para generarla.

Como se puede apreciar en la página anterior, en planta la cubierta describe un sector circular en el que aparecen unos nervios de manera radial, los cuales parten desde el mismo centro hasta el contorno de la circunferencia.

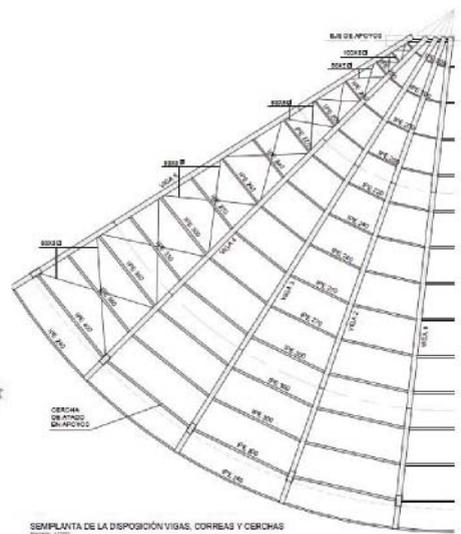
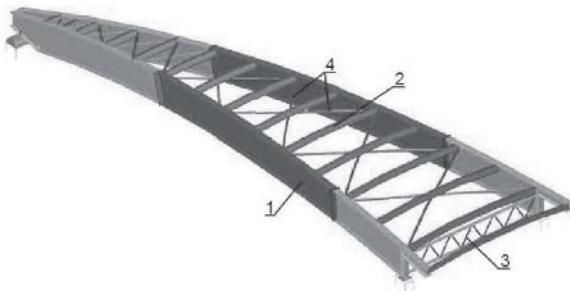
En sección longitudinal vemos que estos nervios describen una circunferencia de gran radio, por lo que tienen una curvatura que les ayudará en su comportamiento estructural.

La dificultad reside en los trazados del alzado desarrollado. Aquí aparecen una serie de circunferencias en cada uno de los lóbulos, lo que nos hace ver que se trata de una combinación de superficies de doble curvatura, en este caso toroides. Pero estas circunferencias no tienen sus centros a la misma altura, sino que van descendiendo en altura hacia los extremos e incluso la circunferencia más extrema cambia de diámetro reduciéndose.

La consecuencia de esto es que cada lóbulo tiene, aún partiendo de la misma generación, una diferente superficie.



4.201



SEMPLANTA DE LA DISPOSICIÓN VIGAS, CORREAS Y CERCHAS
Escala: 1:1000

4.202

4.201 | Generación geométrica de la cubierta de la zona del auditorio

4.191 | Detalles estructurales de la cubierta: A la derecha una planta parcial de la estructura de la cubierta con la indicación de los perfiles que la componen, y a la izquierda una imagen tridimensional de uno de los lóbulos de la estructura de cubierta

ESTRUCTURA

Para materializar estructuralmente la cubierta se utilizó una estructura metálica con un acabado con forjado de chapa colaborante.

La estructura metálica esta adaptada a la geometría de la superficie de cubierta. Dispone de unas grandes vigas radiales coincidentes con las diferentes intersecciones entre superficies tóricas. Estas vigas están formadas por una sección a base de perfiles metálicos unidos en forma de I y montados en 3 piezas.

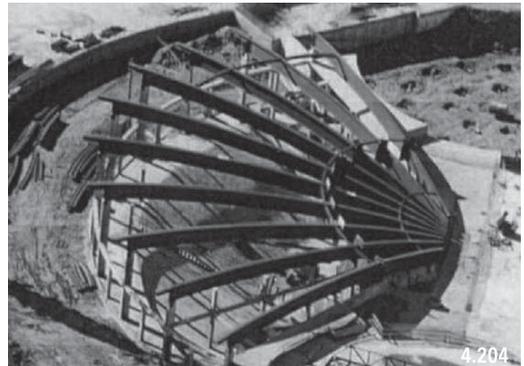
Estas vigas se vinculan con el resto de la estructura mediante un apoyo articulado en la zona más baja correspondiente al centro de la circunferencia de planta, y con un apoyo deslizante en el apoyo superior con los pilares del edificio. De esta manera se evita transmitir momentos a la estructura de hormigón.

Arriostrando estas vigas de sección circular se dispusieron una serie de perfiles metálicos transversalmente a ellas. A estos perfiles se les dio forma curva para aproximar la superficie tórica.

La doble curvatura conseguida con las vigas y los perfiles de arriostramiento colaboran en la resistencia de la estructura.

En la parte exterior de la cubierta se dispuso en cada lóbulo una viga en celosía de arriostamiento a la altura de la cabeza de los pilares. Esta viga no sigue la curvatura de la superficie, por lo que resulta como un elemento "ajeno" a la estructura.

La estructura se termina en la parte superior con un forjado de chapa colaborante que unido a las vigas metálicas da estabilidad a todo el conjunto con un peso reducido.



4.203 | Imagen que muestra la fase previa de la construcción a la ejecución de la cubierta

4.204 | Montaje de los perfiles metálicos que conforman los nervios de la cubierta

4.205 | Detalle del arriostramiento de los lóbulos extremos de la cubierta

4.206 | Detalle de las vigas en celosía de borde

4.207 | Imagen del proceso de montaje de la cubierta a base de chapas metálicas grecadas que servirán de chapa colaborante al hormigón de acabado

4.208 | Imagen de la cubierta con la chapa grecada superior a falta de la zona del escenario

4.209 | Detalle inferior de la cubierta con el proyectado ignífugo de lana de roca

4.210 | Imagen interior del edificio finalizado donde se puede apreciar la colocación de un falso techo que no permite ver la estructura de la cubierta

CONSTRUCCIÓN

Durante la ejecución de la cubierta, el proyecto sufrió varias modificaciones, de las que comentaré alguna que resulta de interés para el análisis.

En primer lugar, y con la estructura de hormigón del edificio finalizada, se montaron las grandes vigas radiales de la cubierta. Éstas se montaron a partir de tres tramos a pie de obra y se izaron hasta su posición.

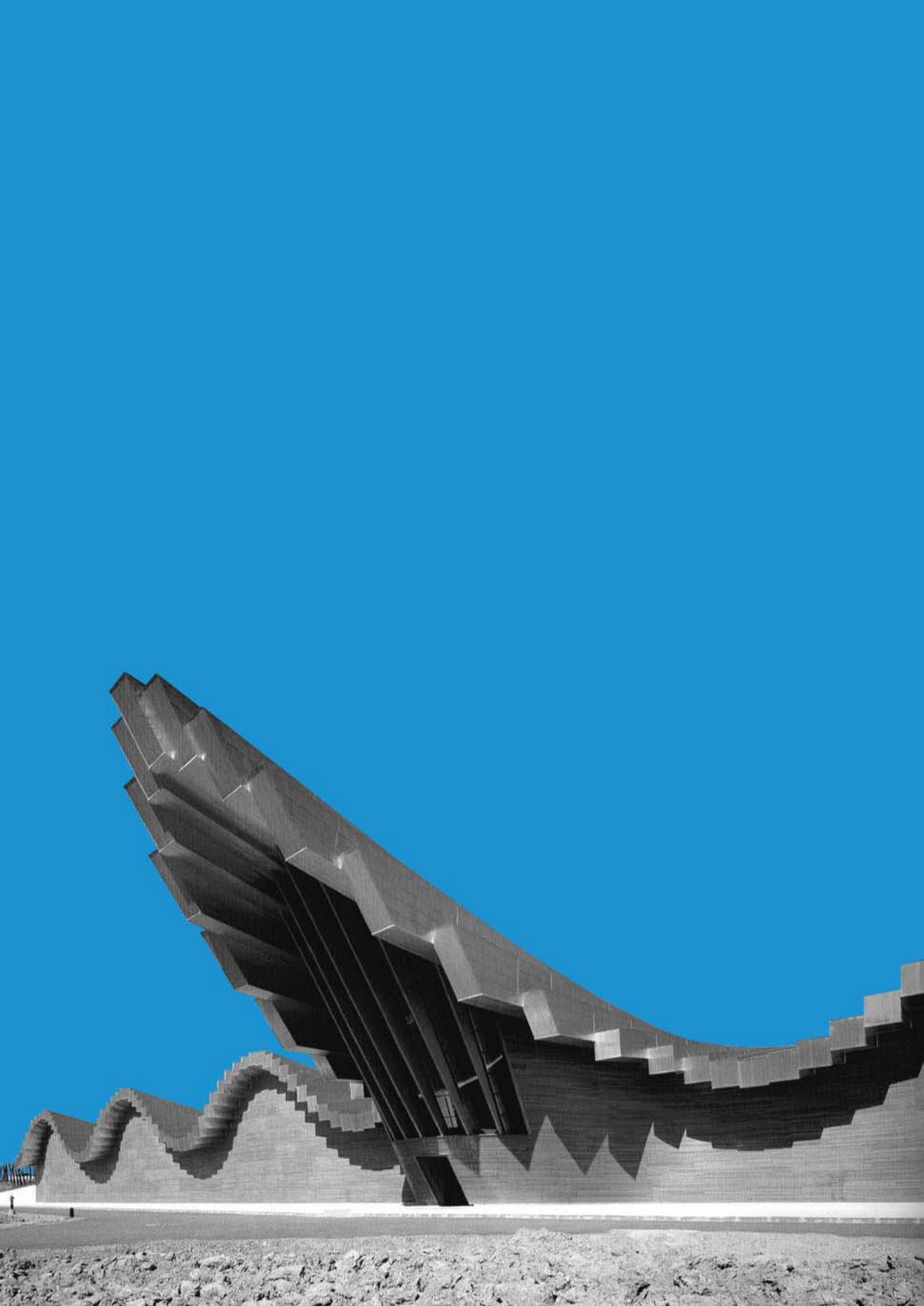
Una vez en su posición se realizaron los arriostramientos transversales con las vigas curvas. Como se puede apreciar en las imágenes de la página anterior, en los lóbulos extremos se dispusieron una serie de diagonales para dar mayor estabilidad a estas partes.

Una vez concluida la disposición de todos los perfiles metálicos se procedió a colocar las chapas grecadas unidas a ellos. Debido a que la curvatura de la superficie no es excesiva y que estas chapas admiten cierto alabeo, se fueron adaptando a la superficie con sus acanaladuras aproximando la dirección radial de la planta de la cubierta.

Por la parte inferior de la cubierta, una vez colocada la chapa grecada se procedió a dar un recubrimiento ignífugo a base de lana de roca.

La ejecución de la cubierta finaliza con la disposición del armado de la capa superior del forjado colaborante y su posterior hormigonado.

Cabe destacar una modificación significativa con respecto al proyecto original y es el acabado interior. En la documentación que tenemos de proyecto, el acabado seguía la forma de la cubierta apoyándose en los perfiles de las vigas radiales y mostrando la doble curvatura en el intradós. Por motivos acústicos, durante la obra se decidió sustituir este acabado por uno liso que no refleja la geometría de la cubierta al interior, falseando la forma de esta.



5 | RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 | CLASIFICACIÓN DE SUPERFICIES

Tras el estudio de las diferentes clasificaciones de superficies en los diferentes ámbitos ligados a la arquitectura, se ha concluido en el apartado 3.2 que no es posible realizar una única clasificación de las superficies que abarque todos los campos. Ni tan siquiera es posible en determinados campos establecer una manera de clasificar las superficies que no pueda dar lugar a dobles interpretaciones, como es el caso de la clasificación geométrica.

Al final cada uno de estos tipos de clasificación se ha propuesto una serie de características que pueden definir las superficies sin que estas sean excluyentes de las otras. Por tanto mas que una clasificación al uso, con los criterios de clasificación en columnas y jerarquizados, se propone una clasificación con las características de las superficies en horizontal y no excluyentes.

Así pues, los parámetros que se han propuesto en los diferentes campos son:

GEOMETRÍA:

- Elemento generador:
 - SUPERFICIES REGLADAS - Generadas por RECTAS
 - SUPERFICIES CURVAS - Generadas exclusivamente por CURVAS
- Movimiento de generación:
 - DE REVOLUCIÓN - Por giro del elemento generador
 - DE TRASLACIÓN - Por el movimiento del elemento generador
 - HELICOIDAL - Por el movimiento combinado de revolución y traslación del elemento generador
- Directrices / Plano o cono director:
 - NÚMERO Y TIPO DE DIRECTRICES
 - PLANO DIRECTOR
 - CONO DIRECTOR

ESTRUCTURAS:

- Curvatura:
 - CURVATURA NULA - Cuando al seccionar por un plano obtenemos una recta en todas las direcciones
 - CURVATURA SIMPLE - Al seccionar por un plano obtenemos una recta en una dirección y una curva en la perpendicular
 - CURVATURA DOBLE - Si seccionamos por planos la superficie obtenemos curvas en todos los casos
 - SINCLÁSTICA - Las curvas obtenidas son del mismo signo
 - ANTICLÁSTICA - Las curvas cambian de signo
- Elemento generador:
 - REGLADAS / CURVAS
- Movimiento de generación:
 - REVOLUCIÓN / TRASLACIÓN

Como los criterios de generación también se incluyen en la clasificación geométrica, en las fichas que se adjuntan a continuación no se incluirán en la parte estructural, limitando esta a la curvatura únicamente.

MATEMÁTICAS:

En el campo de las matemáticas aceptamos como válida la clasificación de las publicaciones analizadas.

- Larson / Edwards / Falvo
Algebra lineal
Edit. Pirámide
- Salas / Hille / Etgen
Calculus. Volumen II: Una y varias variables
Edit. Reverté

En ellas clasifica las superficies según los siguientes criterios:

- Cuádricas:
 - ELÍPTICAS - Si por todos los puntos de la superficie, al seccionarla solo se pueden obtener elipses
 - PARABÓLICAS - Si al hacer la misma operación se obtienen parábolas
 - HIPERBÓLICAS - Si se pueden obtener hipérbolas

- Ecuación de la superficie

- Secciones por los planos coordenados

Este último criterio se incluirá en la clasificación estructural, ya que nos ayudará a caracterizar el tipo de curvatura de la superficie en cada caso.

DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR:

Se ha llegado a la conclusión en lo referente a una posible clasificación basada en las herramientas informáticas que no tiene sentido establecer una clasificación basándonos en las órdenes de los programas. Cualquier modelo estará fundamentado en los criterios que hemos visto anteriormente en el resto de campos.

A continuación y en modo de tabla, se presenta la clasificación final propuesta de las superficies que mayor aplicación tienen en la arquitectura y que han sido desarrolladas en el apartado 3.3

NOMBRE	GEOMETRÍA					
	ELEMENTO GENERADOR		MOVIMIENTO DE GENERACION			DIRECTRICES
	REGLADA	CURVA	REVOLUCIÓN	TRASLACIÓN	HELICOIDAL	
POLIEDROS	Caras planas			1 arista en una dirección por cara		2 rectas paralelas o que se cortan por cara
ESFERA		Circonf.	Alrededor de un diámetro			Circunferencia
ELIPSOIDE		Elipse	Alrededor de un eje de la elipse			Elipse
CILINDRO	Recta paralela al eje	Curva perpend. al eje	Recta alrededor del eje	Curva en la dirección del eje		Circunferencia Elipse Parábola
CONO	Recta que corta al eje		Alrededor del eje			Circunferencia Elipse Parábola
CONOIDE						Circunferencia y recta
PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	Doble generación recta					2 rectas que se cruzan y plano director
HIPERBOLOIDE HIPERBÓLICO	Doble generación recta					3 rectas que se cruzan
TOROIDE		Circonf.	Alrededor de una recta exterior a la circunferencia			Circunferencia
HELICOIDE	Helicoides reglados				A lo largo del eje de la hélice	Hélice y eje

		ESTRUCTURA		MATEMÁTICAS		
		CURVATURA		CUÁDRICA / ECUACIÓN		
NULA	SIMPLE	DOBLE		ELÍPTICA	PARABÓLICA	HIPERBÓLICA
		SINCLÁSTICA	ANTICLÁSTICA			
1 cara	2 caras	3 caras				
		Circunferencias		$x^2+y^2+z^2=a^2$		
		Elipses y/o circunferencia		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$		
	Circunf.				$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$	
	Cónica				$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$	
	Elipse o circunf.					
			Parábolas y/o hipérbola			$z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}$
			Hipérbolas y/o parábola			$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
		Parte exterior	Parte interior			
	Curva					

5.2 | ANÁLISIS FORMAL GEOMÉTRICO DE LA CACV

En los apartados anteriores de la investigación se ha llegado a la conclusión de que el uso de la geometría en la arquitectura ha sido y seguirá siendo fundamental. Pero no la geometría en sí misma, aplicada tan solo en el diseño y con un fin estético, sino como algo vinculado a otros aspectos de la arquitectura como son la estructura y la construcción.

En los análisis realizados de la “Ciutat de les Arts i de les Ciències” se han comentados aspectos de diseño en cuanto a la geometría de los elementos, así como sus consecuencias estructurales y constructivas. Se ha incidido en estos dos aspectos para poner en valor el uso de la geometría como parte integrante y que articula el resto de facetas de la arquitectura.

Podríamos afirmar que la geometría es el nexo de unión entre la belleza, la utilidad y la firmeza, los tres principios vitruvianos.

Tras este análisis es conveniente recoger en una tabla todos aquellos parámetros del estudio que nos sirvan para comparar unas superficies con otras y de esta manera poder compararlos fácilmente y poder valorarlos.

Para ello se ha elaborado una tabla en la que se reflejan los siguientes aspectos:

- EDIFICIO - Se indica el edificio al que pertenece la superficie analizada
- ELEMENTO / USO - Hace referencia al elemento analizado y su uso
- SUPERFICIE - Clasificación de la superficie o superficies que han servido de base para el diseño geométrico del elemento
- DIMENSIONES - Indicación de las superficies de longitud, anchura y altura del elemento analizado y en su caso, si resulta como repetición de un módulo, las dimensiones de este. También se adjuntan dimensiones singulares, como puede ser la longitud de un voladizo o una altura en el extremo de un lóbulo, que pueden resultar de interés.
- MATERIAL - Material empleado tanto en la estructura como en el acabado del elemento. Resulta de interés para el estudio, tal y como se ha podido

apreciar en el desarrollo de los análisis, la materialización de las superficies.

- **COEFICIENTE DE IDONEIDAD GEOMÉTRICA**- Este coeficiente es una valoración personal acorde al análisis realizado que recoge tres aspectos:

- **FORMA GEOMÉTRICA** - La superficie geométrica puede haber sido utilizada en el diseño de manera limpia y exacta o haberse adaptado a la forma deseada. Se valorará con un 2 la geometría utilizada de manera más correcta y con un 0 la que ha sufrido excesivas modificaciones para adaptarse al diseño desde su forma original

- **COHERENCIA ESTRUCTURA - GEOMETRÍA** - En ocasiones el uso de una determinada geometría ayuda a un mejor comportamiento estructural. Otras veces el empleo de una forma necesita de elementos estructurales auxiliares para poder soportar las cargas. Se ha valorado con un 2 el primer caso en el que estructura y geometría son coherentes, y con un 0 el caso en que la geometría no solo no ha sido coherente con el sistema estructural sino que ha necesitado de una estructura auxiliar para ejecutarse.

- **APLICABILIDAD DE LA GEOMETRÍA DURANTE EL PROCESO CONSTRUCTIVO** - Durante la ejecución de una superficie singular, la geometría puede colaborar a realizar los despieces del material, diseñar los encofrados, organizar el proceso constructivo. Si en el elemento analizado sucede este hecho se ha valorado con un 2. Si por el contrario no se ha utilizado la geometría durante la construcción de una determinada superficie, y además, de haberse utilizado se hubiera optimizado algunos de los procesos, materiales... se valorará con un 0 en este apartado.

Se ha dejado una horquilla de dos puntos en la valoración de los diferentes parámetros para poder estimar de manera intermedia si no es un claro ejemplo de buena o mala praxis geométrica.

Por tanto, el "coeficiente de idoneidad geométrica" resultará de la suma de los tres parámetros anteriores, pudiendo ser 0 en el caso de un elemento donde la geometría no se ha utilizado correctamente en ninguna de los tres

aspectos comentados, o puede ser 6 si es un buen ejemplo de utilización de la geometría en el diseño de arquitectura.

En la columna aparecerá la suma con los 3 parámetros y el resultado final. De esta manera se puede apreciar la valoración dada en cada caso.

En la tabla se ha seguido el mismo orden que en los análisis para que resulte cómoda la consulta de la información.

EDIFICIO	ELEMENTO / USO	SUPERFICIE
1_PALAU DE LES ARTS	1.1_CUBIERTA / PLUMA	Conos rectos de base circular Cilindro recto de base circular
	1.2_CERRAMIENTO / CÁSCARA	Elipsoide de base óvalo
	1.3_MIRADOR	Cilindro recto de base parabólica Cilindro oblicuo irregular
2_L'HEMISFÈRIC	2.1_CUBIERTA	Elipsoide apuntado
3_MUSEU DE LES CIÈNCIES	3.1_CUBIERTA	Conos oblicuos de base circular
	3.2_FACHADA NORTE	Superficies de plano director con directrices parabólicas
	3.3_PUERTA DE ACCESO	Cono oblicuo de base circular superficie de plano director con directrices circulares y elípticas
	3.4_PILARES	Planos enlazados con conos y cilindros tangentes
4_L'UMBRACLE	4.1_CUBIERTA	Superficies de plano directos con directrices parabólicas
	4.2_ESCALERA-ASCENSOR	Cono recto de revolución Cilindro recto de revolución Superficie helicoidal axial recta
	4.3_ELEMENTO VENTILACIÓN	Cono recto de revolución Cilindros rectos de revolución
5_L'ÀGORA	5.1_CERRAMIENTO	Cilindros rectos de revolución
6_PARC OCEANOGRÀFIC	6.1_ACCESO	Paraboloides hiperbólicos
	6.2_RESTAURANTE	Paraboloides hiperbólicos
	6.3_ÁRTICO	Esfera Cono recto de revolución Cilindro recto de revolución
	6.4_AUDITORIO	Superficies toroidales

DIMENSIONES	MATERIAL	COEFICIENTE IDONEIDAD
Longitud - 230 m / Voladizo - 120 m Anchura - 32 m Altura - 72 m	Estructura metálica compleja Acabado metálico	2+1+1 4
Longitud - 172 m Anchura - 50 m Altura - 58 m	Estructura metálica de panel sandwich Acabado exterior en trencadís cerámico	1+0+0 1
Longitud - 26 m / Anchura - 36 m Longitud en desarrollo- 75 m Altura - 8,70 m	Estructura metálica tubular Vidrio transparente y traslúcido en pavimento	1+1+1 3
Longitud - 110 m Anchura - 55,5 m Altura - 26 m	Estructura metálica y de hormigón Acabado con chapa metálica	2+2+1 5
Longitud cubierta - 210 m Módulo: Longitud - 53 m Anchura - 10 m / Altura - 22 m	Estructura metálica Acabado metálico con paneles kalzip	2+1+1 4
Longitud fachada - 200 m Módulo: Longitud - 19,3 m Anchura - 10 m / Altura - 37 m	Estructura tubular metálica Vidrio transparente	2+2+2 6
Longitud - 65 m Anchura - 11 m Altura - 16 m	Arcos de hormigón armado Piezas prefabricadas pretensadas de hormigón Cancela metálica con pistones hidráulicos	2+1+2 5
Unidad: Longitud - 40 m Anchura - 6,3 m Altura - 49 m	Hormigón armado Perfiles metálicos en armadura Piezas prefabricadas de hormigón	2+1+1 4
Longitud cubierta - 280 m Módulo: Longitud - 5 m Anchura - 32,3 m / Altura - 19,2 m	Perfiles metálicos compuestos en arcos Perfiles metálicos tubulares entre arcos	2+2+2 6
Diámetro cilindro - 16,8 m Diámetro base cono - 11,8 m Altura - 21,8 m	Hormigón armado realizado in situ Acabado exterior en trencadís cerámico	2+1+2 5
Diámetro base cono - 6,72 m Altura - 6,72 m	Elementos prefabricados de hormigón Acabado exterior en trencadís cerámico	2+1+1 4
Longitud - 98 m Anchura - 65 m Altura - 70 m	Estructura metálica tubular Paneles metálicos en cerramiento Acabado exterior en trencadís cerámico	2+1+1 4
Anchura - 34 m Distancia entre apoyos - 30 m Altura central- 11 m / Lóbulos - 21 m	Hormigón armado realizado in situ Estructura metálica en cerramiento Vidrio transparente	1+2+2 5
Anchura - 46,2 m Dist. entre apoyos -13,5 / 35,5 m Altura central- 8 m / Lóbulos - 12 m	Hormigón armado reforzado con fibras de acero Estructura metálica en cerramiento Vidrio transparente	2+2+2 6
Diámetro de la base - 44 m Altura - 11,5 m	Estructura triangulada metálica de doble capa Acabado exterior en paneles de GRC Acabado interior en paneles metálicos microperforados trasdosados con lana de roca	2+2+2 6
Longitud total- 60,3 m Módulo: Longitud - 35,4 m Anchura - 8 m / Altura - 7,5 m	Estructura metálica con perfiles compuestos Forjado de hormigón con chapa colaborante	2+1+1 4

1 | "El hormigón armado y el desarrollo de la tipología laminar: la transformación del canon en la arquitectura moderna" - Comunicación presentada en el IV Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 2005 - Carmen Jordá Such

2 | "Sobre cáscaras y blobs. Superficies estructurales de la era digital" - Harvard Design Magazine n°19, Martin Bechthold, Profesor de la Harvard University Graduate School of Design

5.3 | POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Durante el desarrollo de la investigación han ido surgiendo diferentes líneas de trabajo que tras iniciar su estudio se han descartado por no centrarse en los objetivos que se plantearon al inicio. Estas líneas quedan abiertas para desarrollarse tras la finalización de esta tesis doctoral.

Fundamentalmente se podrían resumir en 2 las posibles líneas de investigación:

1_ESTUDIO DE PREFABRICACIÓN DE SUPERFICIES SINGULARES

Como se ha comentado en el apartado 2.2, las superficies en forma de cascara de hormigón tuvieron su momento de esplendor durante la primera mitad del siglo XX. En los años 60 tuvo lugar una subida de los costes de la construcción y empezaron a ser inviables a pesar de su ahorro de material y su coherencia estructural.¹

Una de las posibles líneas de investigación que surgieron a raíz de este hecho es la de trabajar en la dirección de abaratar los costes de ejecución y mano de obra necesarios para ejecutar los "cascarones".²

Por un lado se podría trabajar en la dirección de la prefabricación de elementos que tuvieran una fácil puesta en obra. De esta manera, al no realizar las superficies in situ se podrían rebajar los costes de mano de obra y de equipos necesarios para su ejecución, además de conseguir una mejora notable de su calidad material y su durabilidad.

Quizá debido a la tecnología que hoy en día está a nuestro alcance, como son las impresoras 3d de grandes formatos, se podría abordar el problema desde el punto de vista de su ejecución in situ, generando los encofrados con estas herramientas y de este modo facilitando su puesta en obra y ejecución.

Durante la investigación se ha contactado con algunas empresas interesadas en este tema y dispuestas a colaborar y desarrollar estos aspectos mediante un proyecto de investigación conjunto.

Evidentemente, no hace falta decirlo, la geometría se convierte en una pie-

za fundamental para el desarrollo de cualquiera de las dos propuestas expuestas.

2_TALLER DE PROYECTOS DE SUPERFICIES SINGULARES

En el periodo de desarrollo de la investigación tuve la oportunidad de participar e impartir clase en un taller de bioconstrucción, coordinado por la profesora de la ETS de Ingeniería de Edificación de la Universitat Politècnica de València Milagro Iborra, en el que se construyó una cúpula geodésica a partir de material reciclado.

Tras esta experiencia entré en contacto con profesores del área de estructuras y construcción que están trabajando en el estudio estructural y constructivo de edificios donde se utilizan superficies no convencionales o que podríamos denominar singulares. Se planteó una colaboración para la ejecución de unas estructuras diseñadas con este tipo de superficies y que está a la espera de recibir la concesión de medios para su realización.

En la misma dirección, el próximo curso 2013-14 está prevista la creación de un taller y un laboratorio de superficies singulares en la ETSIE, proyecto del que soy responsable, con el fin de investigar nuevas soluciones y usos de las superficies en arquitectura.

De este taller podrían salir proyectos de investigación y patentes de nuevos sistemas estructurales y constructivos basado en superficies singulares arquitectónicas.

A continuación, y como punto y final a este trabajo, se van a mostrar una imágenes que ilustren estas líneas de investigación descritas. Son sólo una muestra de las múltiples experiencias que se están realizando en la UPV y en otras universidades y que sirven de motivación a futuras investigaciones.

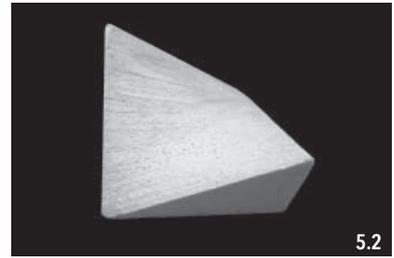
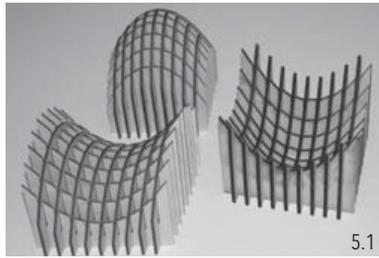
5.1 | Maquetas de superficies que bien podrían utilizarse a mayor escala para generar encofrados de superficies con diferentes curvaturas.

5.2 | Molde de poliestireno extraído de una pieza prismática para generar un paraboloi-de hiperbólico. Realizada por los profesores Eduardo Espín y Javier Blanes

5.3 | Imagen de la reconstrucción de las "Naves en las cavas Codorniu" en Sant Sadurní d'Anoia (2012), del arquitecto Lluís Bonet i Garí, discípulo de Antoni Gaudí. Se empleó para la ejecución de las bóvedas en forma de paraboloi-de hiperbólico de ladrillo unos encofrados modulares de poliestireno expandido.

5.4 | Ejecución de la "Screen house solar, Ciname pavilion" en la Bauhaus University of Weimar, Alemania 2009. Fue realizada por los profesores Jürgen Ruth y Rainer Gump, junto con los estudiantes de la universidad. Constituye un ejemplo de taller de aplicación de las superficies arquitectónicas singulares.

5.5 | Cúpula geodésica ejecutada con motivo de la realización del taller de Bioconstrucción en la ETS de Ingeniería de Edificación de la Universitat Politècnica de València. La responsable del taller fue la profesora Milagro Iborra y el doctorando partidipó de la docencia del mismo.



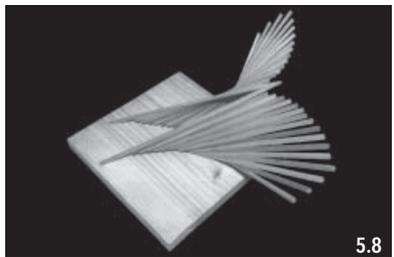
5.6 | Maqueta escultórica de aplicación de las superficies regladas.



5.7 | Reproducción catenaria de la cripta de la colonia Güell de Antoni Gaudí realizada con cadenas de clips.



5.8 | Maqueta escultórica de aplicación de las superficies regladas, realizada por el profesor Felipe Soler Sanz





6 | BIBLIOGRAFÍA

1_GEOMETRÍA

Albert Ballester, Julio - Querol Romero, Vicente - Sintas Martínez, Antonio. Geometría para la arquitectura. Ejercicios de sistemas de representación. Valencia : Editorial UPV, 2010.

Andrés Martín, Francisco Ramón - Fadón Salazar, Fernando. Análisis gráfico de obras emblemáticas de Félix Candela. Zaragoza : XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, 2004

Bermejo Herrero, Miguel. Geometría Descriptiva aplicada. Madrid : Editorial Tébar Flores, 1996

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

Ferrer Muñoz, José Luis. Superficies poliédricas. Madrid : Paraninfo, 2000

Fernández I. Y Reyes M^a. E. Geometría con el hexágono y el octógono. Granada : Proyecto Sur de Ediciones, S.L. Armilla, 2003

Fuller, Richard Buckminster. The artifacts of R. Buckminster Fuller. Vol4. New York : Garland Publishing, 1985

García-Gutiérrez Mosteiro, J. Elementos de Dibujo para geometría descriptiva. I - Trazados fundamentales. Madrid : Cuadernos del instituto Juan de Herrera, 2001.

García Lara, Luis Fernando. IN SITU 18. Geometría de formas estructurales y formas de transición I. Las escuelas provisionales de la Sagrada Familia. Barcelona : colección IN SITU, 2008

García Lara, Luis Fernando. IN SITU 18. Geometría de formas estructurales y formas de transición II. Iglesia San Juan de Ávila. Barcelona : colección IN SITU, 2008

García Valldecabres, Jorge. La métrica y las trazas en la iglesia de San Juan

del Hospital de Valencia. Valencia : Tesis doctoral - Universitat Politècnica de València, 2010

González Casares, José Antonio - Martínez Carrillo, Manuel J. - Ruiz Sanchez, Antonio. Estudio y aplicación de superficies curvas en el patrimonio arquitectónico. Repositorio Universidad de Granada, 2011

Ibáñez Torres, Raúl. El vientre de un arquitecto. Curso Universitario Interdisciplinar "Sociedad, Ciencia, Tecnología y Matemáticas", 2004.

Ibáñez Torres, Raul. Os arquitectos de verdade teñen curvas.

Izquierdo Asensi, Fernando. Geometría descriptiva. Madrid : Paraninfo, 2000

Kurent, T. La coordinación modular de las dimensiones arquitectónicas. Boletín del Museo Arqueológico Nacional (Madrid), III. 1985. Universidad Edvard Kardelj. Yugoslavia.

Leighton Wellman, B. Geometría descriptiva. Compendio de geometría descriptiva para técnicos. Barcelona : Editorial Reverté, 1987

Monge, Gaspar. Geometría Descriptiva. Lecciones dadas en las escuelas normales en el año tercero de la república. Imprenta real. Madrid, 1803. Prólogo de Gentil Baldrich, Jose M^a y Rabasa Diez, Enrique. Sobre la geometría descriptiva y su difusión en España. Edición facsimilar del Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Madrid, 1996.

Navarro Fajardo, Juan Carlos. Bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV al XVI. Traza y monte. Valencia : Tesis doctoral - Universitat de València, 2004

Otxotorena Elizegui, Juan M. Sobre dibujo y diseño. A propósito de la proyectividad de la representación de la arquitectura. Pamplona . T6 Ediciones, 1996

Pozo, Jose Manuel. Geometría para la arquitectura. Concepto y práctica. Pamplona : T6 ediciones, 2002

Sanchis Sampedro, Francisco Javier. Las superficies geométricas arquitectónicas. Valencia : Diazotec, 2012

Soler Sanz, Felipe. Apuntes sobre cuádricas regladas. Apuntes manuscritos cedidos por el autor

Taibo Fernández, Ángel. Geometría Descriptiva y sus aplicaciones. Tomo II. Albacete : Tebar Flores, 1983.

Valldecabres Gómez, Rafael. Estructura geométrica de las superficies arquitectónicas. Valencia : Servicio de publicaciones UPV, 1988.

Vallejo Lobete, Esther - Fadón Salazar, Fernando - Cerón Hoyos, José Enrique. La geometría, soporte de la idea en el proceso del diseño. Congreso Graphica 2007, Brasil

2_ESTRUCTURAS

Andrés, Oscar - Ortega, Néstor. Extensión de la técnica funicular de Gaudí a la concepción y génesis de superficies estructurales. Madrid : Informes de la Construcción vol.44, 1993

Antuña Bernardo, Joaquín. Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret. Madrid : Tesis doctoral - Universidad Politécnica de Madrid, 2002

Bernabeu Larena, Alejandro - Azagra, D. La estructura de las formas libres. Madrid : Informes de la construcción vol.64, 2012

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

Biedma García, Manuel. Cáscara del Palacio de las Artes de Valencia. Artículo publicado en "Realizaciones españolas. Diez años de ingeniería estructural". 2009 : A-CHE - Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. 2009

Cáceres Garralón, Francisco. El paraboloides hiperbólico como generador inagotable de formas en las estructuras laminares. Madrid : I Jornada Nacional de Investigación en Edificación, 2007

Charleson, Andrew. La estructura como arquitectura. Barcelona : Editorial Reverté S.A., 2007

Domingo, Alberto - Lázaro, Carlos. La cubierta de l'Oceanogràfic de la Ciudad de las Artes y de las Ciencias. Valencia : Preentación CMD Ingenieros - UPV, 2006

Engel, Heino. Sistemas de estructuras. Barcelona : Gustavo Gili, 1997

Escrig, F. The great structures in architecture from antiquity to baroque. Boston : WIT press, 2006

Faber, Colin. Las estructuras de Félix Candela. Mexico DF : Compañía edito-

rial continental S.A., 1981.

Lozano Galant, Jose Antonio. Cylindrical Thin Concrete Shells. Structural Analysis of the Frontón Recoletos roof. Stockholm : Master of Science Thesis, 2009

Millais, Malcom. Estructuras de edificación. Madrid : Celeste ediciones, 1997

Requena Ruiz, Ignacio. Análisis de tipologías estructurales: Bóveda, Lámina, Cúpula y Paraboloide. Apuntes

Salvadori, Mario y Heller, Robert. Estructuras para arquitectos. New Jersey : Nobuko, 1986

Sanchis Sampedro, Francisco Javier. Las formas del hormigón. Catálogo práctico de diseño. Valencia : Trabajo Final de Máster - Universidad Politécnica de Valencia, 2011

Torroja Miret, Eduardo. Razón y ser de los tipos estructurales. Madrid : CSIC, 1957

Valcarcel, J.P. - Escrig, F. Estructuras espaciales: entre la imaginación y la crisis. Apuntes

3_MATEMÁTICAS

Alsina Catalá, Claudi, Jacas Moral, Joan y Tomás Belenguer, M. Santos. Geometría a l'arquitectura. Barcelona : Edicions UPC, 2007

Alsina Catalá, Claudi. Los secretos geométricos en diseño y arquitectura. Curso Interuniversitario "Sociedad, ciencia, tecnología y matemáticas" 2005

Alsina Catalá, Claudi. Arquitectura del siglo XX y clases de matemáticas. La laguna : Revista Números vol.43-44, 2000

Borrás Veses, E., Moreno Gómez, P., Nomdedeu Moreno, X. Ritmos matemáticos e imágenes. Nivola libros y ediciones, 2002

Chávez de Diego, María José - Revuelta Marchena, Pastora. Un paseo matemático por las bóvedas a través de la historia. Sevilla : III Congreso Nacional de Historia de la Construcción, 2000

Ghyka, M. C. Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes. Ed. Poseidón. Barcelona, 1983

Ghyka, M. C. El número de Oro. Tomo II. Ed. Poseidon. Barcelona, 1983

Ghyka, M.C. Filosofía y mística del número. Editorial Apóstrofe, 1998

Livio, M. La proporción áurea, la historia de phi, el número más sorprendente del mundo. Ediciones Ariel, 2002

Monterde, Juan. Arquitectura y matemáticas. La geometría al servicio del arte: de Gaudí a Ghery. Valencia : revista Método nº37, 2003

Naredi-Rainer, P. Architektur und Harmonie. Ed. DuMont, Dokumente, 1982

4_DIBUJO ASISTIDO POR ORDENADOR

Álvarez, Enrich, Llena, Riera (Mediaactive). El gran libro de Autocad 2012. Barcelona : Ediciones Marcombo, 2012

Autodesk. Manual de usuario. Autocad 2012

Autodesk. Users manual. 3ds Max 2010

Mediaactive. Manual de 3ds Max. Barcelona : Ediciones Marcobo, 2010

Robert McNeel & Associates. Manual de Rhinoceros. Modelador NURBS para Windows

5_ HISTORIA, TEORÍA Y CRÍTICA DE LA ARQUITECTURA

Adell, Josep M^a - García Santos, Alfonso. Gaudí y las bóvedas de las escuelas de la sagrada familia. Madrid : Informes de la Construcción vol.56, 2005

Alonso García A. San Carlino, la máquina geométrica de Borromini. Secretariado de publicaciones e intercambio editorial Universidad de Valladolid, 2003.

Araujo, Ignacio. La forma arquitectónica. Pamplona : Ediciones Universidad de Navarra S.A., 1976.

Araujo Armero, Ramón. Geometría, técnica y arquitectura. Madrid . Revista Tectónica n°17

Arnau Amo, Joaquín - Songel González, Juan María. La estética en la ingeniería ¿materia pertinente o impertinente? Madrid : Revista de Obras Públicas n°3510, 2010

Baker, Geoffrey H. Le Corbusier. Análisis de la forma. Barcelona : Gustavo Gili, 1984

Bassegoda Nonell, Juan. La arquitectura escultórica de Antonio Gaudí.

Bechthold, Martin. Sobre cascaras y blobs. Superficies estructurales de la era digital. Santiago : Revista ARQ n°63, 2006

Bonell, Carmen. La divina proporción. Las formas geométricas. Barcelona : Ediciones UPC, 1999

Cabezas, L. Ichnographia, la fundación de la arquitectura. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica, n° 2, Valladolid, 1994.

Calatrava Valls, Santiago. L'Hemisfèric: Una ventana al mundo. Madrid : Informes de la Construcción vol.52, 2000

Calatrava Valls, Santiago. Museo de las Ciencias. Centro y foro internacional

de las ciencias. Madrid : Informes de la Construcción vol.52, 2000

Calatrava Valls, Santiago. El Palacio de las Artes. Campus de las artes escénicas. Madrid : Informes de la Construcción vol.52, 2000

Candela Outeriño, Félix. El escándalo de la Ópera de Sidney. Madrid : Arquitectura, 1968.

Cassinello, P. - Schlaich, M. - Torroja, J.A. Félix Candela. In memoriam (1910-1997) From thin concrete shells to the 21st century's lightweight structures. Madrid : Informes de la Construcción vol.62, 2010

Chiarella, Mauro. Superficies paramétricas y arquitectura Conceptos, ideación y desarrollo. Nueva Delhi : 10th International Conference CAADRIA (Computer-Aided Architectural Design Research in Asia), 2005

Chias Navarro, Pilar - Abad Balboa, Tomás. Eduardo Torroja: Obras y proyectos. Madrid : Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2005

D'Anselmo, Marcello. Las geometrías de las estructuras abovedadas. Sevilla : III Congreso Nacional de Historia de la Construcción, 2000

De La Hoz Arderius, R. Varia Espacial. Discurso leído por el académico electo, el 20 de enero de 1991 en Madrid ante los miembros de la Academia de san Fernando.

Del Cueto Ruiz-Funes, Juan Ignacio. Cien años de Félix Candela. Vuelos Impensados. México DF : Revista de la Universidad de México nº69, 2009

Del Cueto Ruiz-Funes, Juan Ignacio. Félix Candela, el mago de los cascarones de concreto. México DF : Arquine, revista internacional de arquitectura nº2, 1997

Delgado Orusco, Eduardo. Las iglesias de Miguel Fisac. Ourense : I Congreso Internacinal de Arquitectura Religiosa, 2007

Doblado González, Marina. La proporción cordobesa en la arquitectura. Madrid : II Congreso Internacional de Matemáticas en la Ingeniería y la Arquitectura.

Duque, Conde. Félix Candela. La conquista de la esbeltez. Madrid : Catálogo exposición UPM - Ayto. de Madrid, 2010

Escrig, Félix - Sánchez, José. La bóveda de hormigón del club Táchira en Caracas. Madrid : Informes de la Construcción vol 57, 2005

Fernandez Casado, Carlos - Candela, Félix. Parque Oceanográfico Universal, Valencia. Madrid : Informes de la Construcción vol.52, 2000

Folguera, Francisco. Frei Otto: Cubiertas colgantes. Barcelona : Editorial Labor, 1958

Frampton, Kenneth. Historia crítica de la arquitectura moderna. Barcelona : Gustavo Gili, 1998

García Codoñer, A. Patrimonio Arquitectónico: Estudios Previos. Ed. UPV. Valencia, 2002.

García Reig, Carmen. La geometría inteligente. Madrid : Capitulo de la publicación Félix Candela centenario 2010, 2010

García Sanz, Joaquín-Luis, Proceso Creativo de la Arquitectura. Algunos Conceptos Básicos. Ed. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 1978.

García, F. El simbolismo de las iglesias de Miguel Fisac. Madrid : Informes de la Construcción vol.58, 2006

Gentil Baldrich, Jose María. Sobre la proporción y los trazados geométricos de la arquitectura. Sevilla : 2008

Giedion, S. El presente eterno: los comienzos de la arquitectura. Alianza Editorial, 1981.

- Gil Medrano, Olga. Un món a la butxaca : La geometria plegable de Santiago Calatrava. Valencia : Revista Mètode nº37, 2003
- Giralt-Miracle, Daniel. Gaudí. La búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción. Barcelona : Ayto. de Barcelona, 2002
- Goitia Cruz, Aitor. Soft show. Valencia : Congreso Internacional EGA, 2010
- González Capitel, Antón. Jorn Utzon. Origen y fortuna del organicismo tardío. Madrid : Revista Arquitectura nº352, 2008
- Gutiérrez Labory, Elsa M^a. El empleo de la geometría en la obra de Le Corbusier como modelo de aprendizaje. Valencia: Congreso Internacional EGA, 2010
- Jodidio, Philip. Calatrava. 1 Complete works 1979-2009. Köln : Tachen, 2009
- Jordá Such, Carmen. El hormigón armado y el desarrollo de la tipología laminar: la transformación del canon en la arquitectura moderna. Cádiz : IV Congreso Nacional de Historia de la Construcción, 2005
- Kostof, S. El arquitecto, historia de una profesión. Ed. Alianza. Madrid, 1984.
- Mas Guindal, Antonio J. - Adell, Jose M^a. Eladio Dieste y la cerámica estructural en Uruguay. Madrid : Informes de la Construcción vol 56, 2005
- López González, Concepción. El buen oficio frente al concurso. Los maestros canteros valencianos del siglo XV. Oporto : 14º Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica. 2012
- Molinari, Luca. Santiago Calatrava. Milán : Skira, 1999
- Monedero, Javier. La forma como molde. La forma como proceso. Valencia : Revista EGA nº16, 2010
- Moya Blanco, L. Arquitectura Cortes y otros escritos. Ed. Servicio de Publicaciones COAM. Madrid, 1993
- Quaroni, Ludovico. Proyectar un edificio: Ocho lecciones de arquitectura.

Xarait. Madrid, 1980

Ruiz De La Rosa, J.A. Traza y Simetría de la Arquitectura en la Antigüedad y el Medievo. Universidad de Sevilla, Sevilla, 1987

Scholfield, P.H. Teoría de la proporción en la arquitectura. Ed. Labor. Barcelona, 1971

Segre, Roberto - Barki, José. Niemeyer: La poética de una experimentación creadora. La Habana : Revista Arquitectura y Urbanismo vol XXXII n°3, 2011

Simon García XVII Arquitecto de Salamanca y Rodrigo Gil XVI arquitecto de Segovia, Tratado titulado: Compendio de Architectura y simetría de los templos conforme a la medida del cuerpo humano con algunas demostraciones de geometría. Año 1681. Ed. facsímil. Ed. C.O.A. Valladolid. Valladolid, 1990.

Songel, Juan María. Frei Otto y el debate sobre la génesis de la forma arquitectónica. Valencia : Revista EGA n°16, 2010

Soriano Piqueras, Victor Manuel. Transformaciones urbanas en la ciudad de Valencia en tiempos recientes. Madrid : Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2012

Soler Sanz, Felipe. Trazados reguladores octogonales en la arquitectura clásica. Valencia : General de ediciones de arquitectura, 2008

Varios Autores. Investigando los Bienes Arquitectónicos. Ediciones generales de la construcción. Valencia. 2005

Vitruvio Polión, Marco. Los diez libros de arquitectura. Madrid : Alianza, 1995

Von Simson, O., La catedral gótica. Alianza editorial. Madrid 1980

William Lidwell, Kritina Halden, Jill Batler. Los principios universales del diseño. Ed. Blum, Barcelona 2005. 1ª EEUU, 2003, reimpresión en 2006-2008

6 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ARQUITECTURA

Bechmann, R. Los dibujos técnicos del Cuaderno de Villard de Honnecourt. Cuaderno. Akal, Madrid 1991.

Docci, Mario. Dibujo y proyecto de arquitectura. Valencia : Congreso Internacional EGA, 2010

Franco Taboada, Manuel. Acerca del dibujo de Oscar Niemeyer ¿Dibujo sencillo, versus, arquitectura sencilla?. Valencia : Revista EGA nº16, 2010

Jiménez Martín, A. Y Pinto Puerto, F. Levantamiento y análisis de edificios. Tradición y futuro. Ed. Universidad de Sevilla. Sevilla, 2003

Mikami, Yuzo. Utzon's sphere: Sidney Opera House--how it was designed and built. California : Shokokusha, 2001

Montes Serrano, Carlos. Representación y análisis formal: lecciones de análisis de formas. Valladolid : Universidad de Valladolid, 1992

Recht, R. Le Dessin d'architecture. Ed. Adam Biro, París, 1995

7_CONSTRUCCIÓN

Aguirre De Yraola, F. Coordinación dimensional de unidades de obra y elementos de construcción. Ed. Instituto Eduardo Torroja CSIC. Madrid, 1969

García García, Rafael. Láminas plegadas de hormigón armado. Realizaciones en España. Burgos : V Congreso Nacional de Historia de la Construcción, 2007

Neufert, E. Industrialización de las Construcciones. Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 1965

Rabasa Díaz, E. Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX. Akal, Madrid, 2000



7 | ANEXOS

7.1 | PLANOS DE LOS EDIFICIOS DE LA CIUTAT DE LES ARTS I DE LES CIÈNCIES DE VALENCIA

1 | “El Modulor” - Le Corbusier - Estudio de dimensiones y proporciones de la figura humana que se ha incluido en los planos con el objeto de tener una referencia y de esta manera poder comparar el tamaño de los edificios con un elemento reconocible en tamaño.

Para la realización de la presente tesis doctoral se han utilizado una serie de planos de la “Ciutat de les Arts i de les Ciències” de Valencia obtenidos de diferentes fuentes. Estos planos se han ordenado, limpiado, comprobado, redibujado... según se ha explicado en la metodología anteriormente expuesta.

Por motivos de tamaño de los edificios y consecuentemente de los planos que contienen su representación, no se ha considerado conveniente incluirlos en formato papel en el documento, por lo que se ha realizado una representación conjunta de las diferentes vistas de los mismos a una escala pequeña que permita la comprensión del análisis posterior, pero no siendo ésta una escala que permita su correcta definición. En el CD adjunto se aporta toda la documentación gráfica de los edificios acorde al listado que se muestra a continuación.

Los planos se han representado a escala 1/250, escala con suficiente nivel de definición para el tipo de análisis realizado.

Para dar una idea de las dimensiones reales de los edificios, se ha incorporado en todos los planos 2 elementos: una escala gráfica y un “modulor”¹.

página anterior | Imagen del Hipódromo e la Zarzuela en Madrid, España, 1935 - Eduardo Torroja, Carlos Arniches y Martín Domínguez.

COD	EDIFICIO	SUBCOD	CONTENIDO	ESCALA
00	Ciutat de les Arts i les Ciències	00.01	Materplan de la CACV	1/2000
		01.01	Planta de cubierta	1/250
		01.02	Planta nivel 00 y 01	1/250
		01.03	Planta nivel 03 y 04	1/250
01	Palau de les Arts Reina Sofía	01.04	Planta nivel 05	1/250
		01.05	Planta nivel 11	1/250
		01.06	Planta nivel 16	1/250
		01.07	Alzado sur	1/250
02	L'Hemisfèric	02.01	Planta de cubierta	1/250
		02.02	Planta de cubierta 2	1/250
		02.03	Alzado sur	1/250
		02.04	Alzado oeste y este	1/250
03	L'Umbracle	03.01	Planta de cubierta, nivel 00 y alzado norte	1/250
		03.02	Alzado sur y sección transversal	1/250
		03.03	Conjunto escalera/ascensor	1/250
04	Museu de les Ciències Príncipe Felipe	04.01	Planta de cubierta	1/250
		04.02	Planta cota -7.00m	1/250
		04.03	Planta cota -4.30m	1/250
		04.04	Planta cota ±0.00m	1/250
		04.05	Planta cota +5.20m	1/250
		04.06	Planta cota +10.40m	1/250
		04.07	Alzados norte y sur	1/250
		04.08	Alzado oeste y este	1/250
		04.09	Sección longitudinal y transversal	1/250

COD	EDIFICIO	SUBCOD	CONTENIDO	ESCALA
05	L'Àgora	05.01	Planta de cubierta	1/250
		05.02	Planta cota ±0.00m	1/250
		05.03	Alzados norte y sur	1/250
		05.04	Alzados este y oeste	1/250
		05.05	Sección transversal	1/250
		05.06	Sección longitudinal	1/250
06	Parc Oceanogràfic Universal Edificio de acceso	06.01	Planta de cubierta	1/250
		06.02	Planta cota ±0.00m	1/250
		06.03	Alzados	1/250
		06.04	Secciones	1/250
07	Parc Oceanogràfic Universal Edificio del restaurante	07.01	Plantas	1/250
		07.03	Alzado y sección	1/250
08	Parc Oceanogràfic Universal Auditorio del mar rojo	08.01	Planta de cubierta	1/250
		08.02	Planta cota ±0.00m	1/250
		08.03	Planta cota -4.65m	1/250
		08.04	Alzado	1/250
		08.05	Sección A y B	1/250
		08.06	Sección C, D y E	1/250
09	Parc Oceanogràfic Universal Zona del ártico	09.01	Plantas	1/250
		09.02	Alzados	1/250