

La Reinterpretación de la Cúpula en la Ciutat de Les Arts I Les Ciències de Valencia

Francisco Javier Sanchis Sampedro

*Universitat Politècnica de València | Universidad Europea de Valencia
Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónica*

The dome in the broad sense, can be defined as a curved element covering a building or part of it. In classical architecture is usual curved shape that was solved by the geometry of the sphere. At some period in history as Baroque, this was replaced this spherical geometry by the ellipsoid, much more evocative than the last. In the late nineteenth century and during the twentieth century, due to the emergence of new materials, such as reinforced concrete and structural steel, and the development of new structural systems like tensioned structures and geodesic domes, and their respective construction processes, there was a reinterpretation of the classical spherical dome. In this article these spaces that reinterpret the classic domes are analyzed in a group of buildings present the XXI century, the City of Arts and Sciences of Valencia, designed by Spanish architects of international prestige and renown. Both of geometric analysis are developed through the project drawings with 2D and 3D diagrams, constructive realization with details and photos of the works, as well as an analysis of the structural behavior from the use of a given geometry in design and what consequences does the use of this geometry used in the construction processes.

Keywords: *Geometry, reinterpretation, domes, analysis, shape*

1 Introducción

CÚPULA – Bóveda en forma de una media esfera u otra aproximada, con que suele cubrirse todo un edificio o parte de él.

BÓVEDA – Obra de fábrica curvada, que sirve para cubrir el espacio comprendido entre dos muros o varios pilares¹.

Teniendo en cuenta esta definición que nos da la Real Academia Española de la Lengua, la cúpula se puede definir como un elemento curvo que cubre un edificio o parte de él. En la arquitectura clásica esta forma curva era habitual que se solucionara mediante la geometría de la esfera, utilizando para ello la mitad de su superficie o manipulándola mediante planos y consiguiendo otras geometrías como la de la bóveda vaída, o bien con la composición de varias superficies cilíndricas. En algu-

nos periodos de la historia como el barroco, esta forma esférica se sustituyó por la geometría del elipsoide, mucho más sugerente que la de la esfera.

A finales del siglo XIX y durante el siglo XX, y debido a la aparición de nuevos materiales, como puede ser el hormigón armado y el acero laminado, y el desarrollo de nuevos sistemas estructurales como las estructuras tensadas y las cúpulas geodésicas, así como sus procesos constructivos, se produjo una reinterpretación de la cúpula clásica esférica.

El uso de las diferentes 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”²

¹ Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua.

² Crespo Cabillo, Isabel “Control gráfico de formas y superficies de transición” Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.

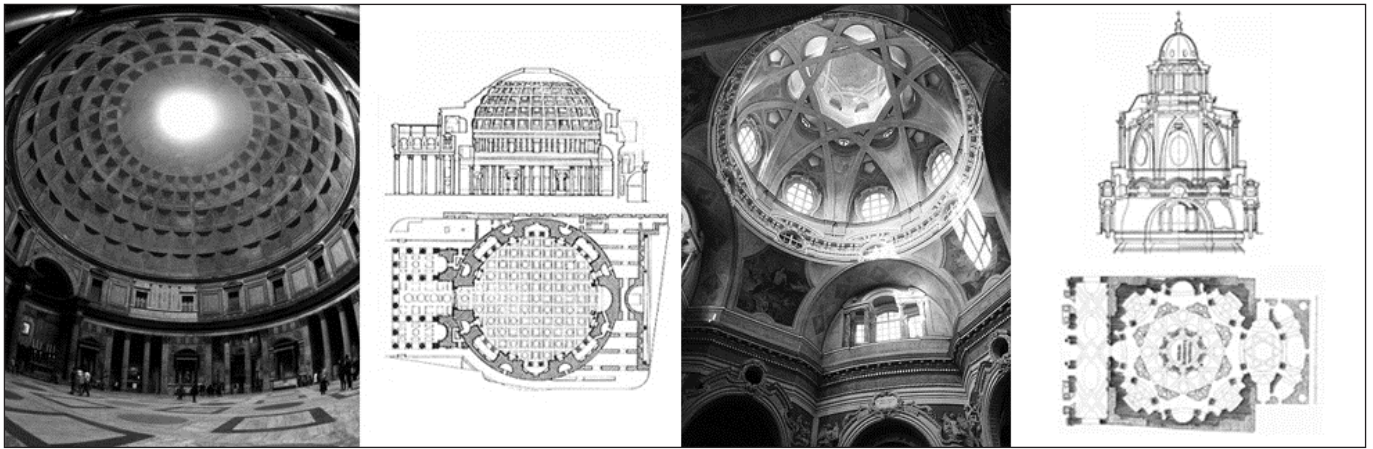


Fig. 1. Panteón de Agripa (Roma) ejemplo clásico de espacio cupulado y la Iglesia de San Lorenzo (Torino) como ejemplo de utilización del elipsoide en el Barroco como superficie para una cúpula.

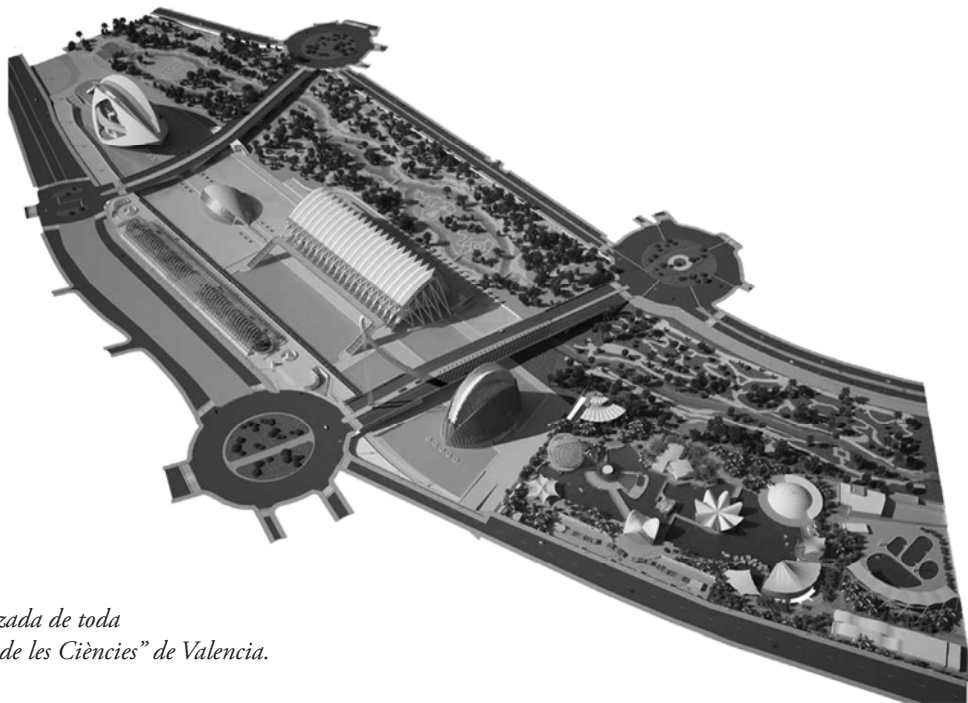


Fig. 2. Imagen renderizada de toda la “Ciutat de les Arts i de les Ciències” de Valencia.

En la ciudad de Valencia, a finales del siglo XX y principios del XXI, los arquitectos españoles Santiago Calatrava y Félix Candela trabajaron en un complejo de edificios denominado “la Ciutat de les Arts i les Ciències” que está integrado por varios edificios con diversos usos. En sus diseños los arquitectos utilizaron diversas geometrías para dar forma a los diferentes edificios. De hecho, el complejo está considerado por algunos autores como un ejemplo

del “nuevo barroco valenciano”³. Algunos de los espacios arquitectónicos de sus edificios están concebidos como grandes cúpulas de materiales diversos, y lo que es más interesante, geometrías diferentes y originales.

Si nos centramos en la obra de Félix Candela, el denominado “Parc Oceanogràfic Universal”, hay varios edificios que utilizan el concepto de cúpula para cubrir

³ Juan Vidal, Francisco “Valor barroco en la arquitectura valenciana”. General de Ediciones de Arquitectura, 2006.

un gran espacio mediante una superficie curva. En el edificio que alberga los acuarios de la “zona del ártico” podemos encontrarnos con una gran cúpula esférica rebajada. Para la materialización de una gran jaula de pájaros de la “zona húmeda”, se utilizó una gran cúpula esférica con estructura metálica triangulada. El acceso y el restaurante del complejo se diseñaron a partir de cúpulas compuestas por varios lóbulos de paraboloides hiperbólicos. Estas constituyen unos de los ejemplos más claros de reinterpretación de la cúpula como elemento de cubrición curvo con el objetivo de optimizar el funcionamiento del material, hormigón en este caso.

Por lo que se refiere a la obra del arquitecto valenciano Santiago Calatrava, podemos encontrarnos con tres espacios cupulados diferentes y con distintas características. Por un lado tenemos el edificio del “Hemisfèric”, que tiene una doble cúpula. Es el edificio más discreto de todo el complejo tanto por las dimensiones como por la simplicidad de su forma. El otro edificio cupulado singular es el llamado “Àgora”, diseñado mediante una hábil composición de superficies cilíndricas. Por último cabe destacar de este complejo, tres espacios cubiertos por una superficie curva, idénticos y de menor dimensión que los anteriores, pero que no por ello dejan de ser interesantes, que son las superficies cónicas que albergan los ascensores de acceso al complejo y que a su vez sirven de apoyo a unas escaleras helicoidales exteriores.

2 Métodos y objetivos

Se plantean dos objetivos principales en el desarrollo del presente artículo.

Por un lado dar a conocer unos ejemplos actuales de espacios cubiertos con superficies singulares que se pueden entender como una reinterpretación del concepto clásico de cúpula. Para ello se realizará una descripción de los mismos y se aportarán planos, esquemas e imágenes.

En segundo lugar se analizará su diseño geométrico y se establecerán unas relaciones entre su geometría y el comportamiento estructural de los edificios así como la aplicabilidad de ésta en la construcción de los mismos⁴.

⁴ Sanchis Sampedor, Francisco Javier “La geometría de las superficies arquitectónicas. Análisis formal geométrico de la Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia”. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València. 2013

Las metodologías empleadas para cubrir estos objetivos, serán dos.

El primer paso consiste en la búsqueda de información acerca de los edificios en diferentes publicaciones y medios digitales, la recopilación de información en las empresas constructoras y de gestión de proyectos que llevaron a cabo los edificios, y la gestión de toda esta información mediante el software específico. Este proceso nos ayudará a alcanzar el primer objetivo planteado.

Para cubrir el segundo de los objetivos marcados se empleará la metodología estructuralista, definida por el profesor Mario Docci⁵ y que 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*”.

3 La reinterpretación de la cúpula en la ciutat de les arts i les ciències de valencia

3.1 Parc oceanogràfic universal

El complejo del “Parc Oceanogràfic Universal” 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 cubiertas⁶.

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 avan-

⁵ Docci, Mario “Il disegno come strumento per l’analisi grafica dell’architettura” Conferencia en la UPV en 1995

⁶ CACSA “Dossier de comunicació: L’Oceanogràfic de la Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia”. Generalitat Valenciana, 2011.

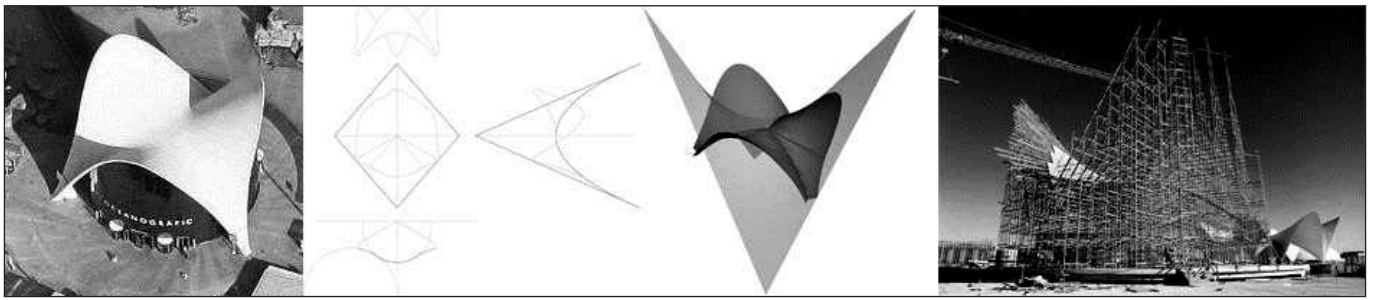


Fig. 3. Imágenes y esquemas del edificio de acceso al “Parc Oceanogràfic Universal”.

zada edad, fallece antes de poder terminar el proyecto, aunque muchas de sus ideas y bocetos previos sí 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”⁷, 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 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 pretendió hacer un homenaje al arquitecto repitiendo la forma de la que realizó años atrás en Xoximilco para el restaurante “Los Manantiales”.

3.1.1 Cubierta del edificio de acceso

La cubierta del acceso al “Parc Oceanogràfic” es probablemente uno de los elementos más reconocibles del conjunto.

Está compuesta de 3 lóbulos de paraboloides hiperbólicos, distribuidos de manera radial y limitados en su borde a partir de un trazado de circunferencias tangentes en planta.

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.

Con este diseño se consigue obtener un espacio cupulado 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, que sirve de acceso al plano inferior del complejo en el que se encuentran los acuarios.

También destacar, 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.

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 Faber⁸, 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

7 Fernández Casado, Carlos, Candela, Félix “Parque Oceanogràfic Universal, Valencia”. Informes de la construcción, vol 52 n°469-470, Madrid, 2000.

8 Faber, Colin “Las estructuras de Félix Candela”. Compañía editorial continental SA. México DF. 1981.

doble curvatura anticlástica. Ésta es la que hace que sea capaz de soportar grandes esfuerzos absorbiéndolos únicamente por su forma. Este hecho es posible gracias a 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 esto, las estructuras generadas con esta superficie pueden tener muy poco espesor y un armado mínimo.

En el caso de 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 en la cubierta del restaurante. Además, como se puede ver en el detalle, 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.

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 las cimbras, éstas se levantan hasta llegar exactamente a la altura de apoyo de las primeras vigas de encofrado.

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 tablonés de madera que conformarán la superficie, en este caso siguiendo la otra dirección de generatrices.

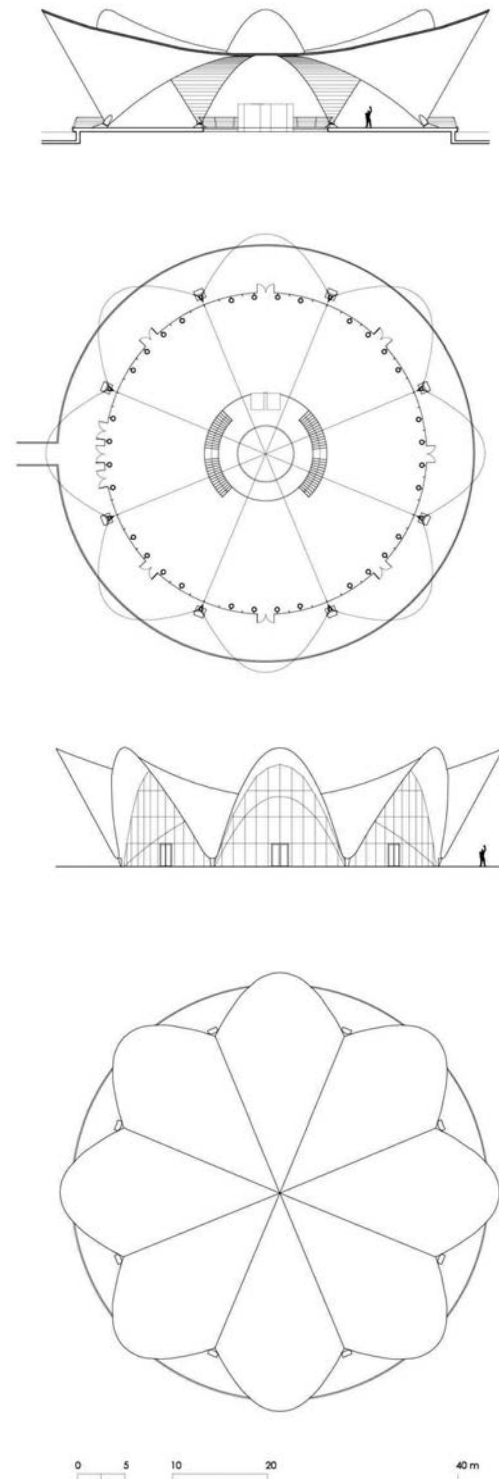


Fig. 4. Planos de la cubierta del edificio de acceso al “Parc Oceanogràfic”.

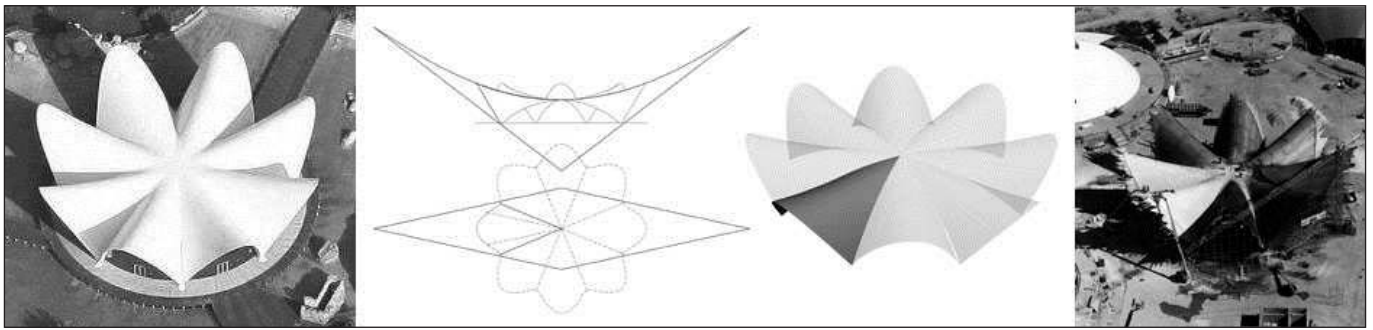


Fig. 5. Imágenes y esquemas del edificio del restaurante del “Parc Oceanogràfic Universal”.

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.

3.1.2 Cubierta del restaurante

Probablemente, el diseño de esta cubierta supone uno de las formas más elegantes de aplicación del paraboloides hiperbólico.

Este espacio cupulado 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 li-

mita 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 horizontal⁹.

Tal y como se puede apreciar en el esquema de generación de la imagen, 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.

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”¹⁰. 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 estudiada 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

9 Andrés Martín, Francisco Ramón, Fadón Salazar, Fernando “Análisis gráfico de obras emblemáticas de Félix Candela”. XVI Congreso internacional de Ingeniería Gráfica. Zaragoza-Huesca. 2004.

10 Entrevista realizada con Carlos Lázaro en la Universitat Politècnica de València el 2010.

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”¹¹.

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 la condición de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de sus autores y por lo tanto del 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.

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 facilidad¹². 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 como la cubierta es estable sin necesidad de ninguna estructura auxiliar.

11 Sanz Balduz, Luis Javier “El borde libre y Félix Candela”. Revista de Obras Públicas nº3383. Enero 1999.

12 Domingo, Alberto; Lázaro, Carlos “La cubierta de l’Oceanogràfic de la Ciutat de les Arts i de les Ciències”. Jornada IECA. Expresión del Hormigón Armado. Alicante, 2006.

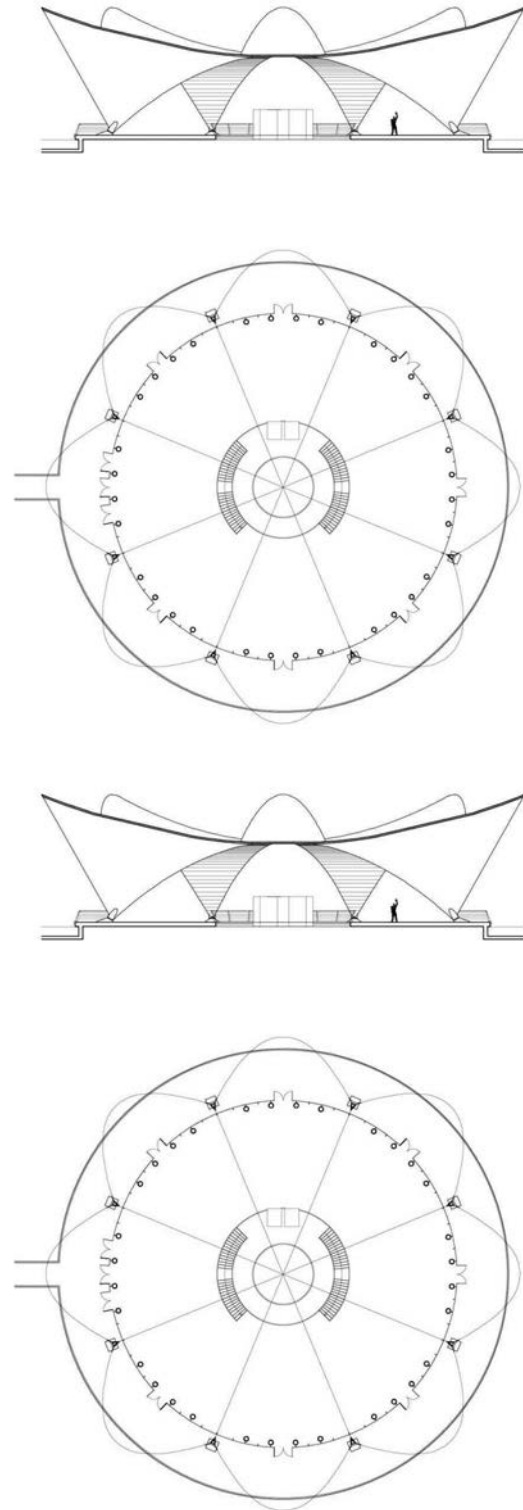


Fig. 6. Planos de la cubierta del edificio del restaurante del “Parc Oceanogràfic”.

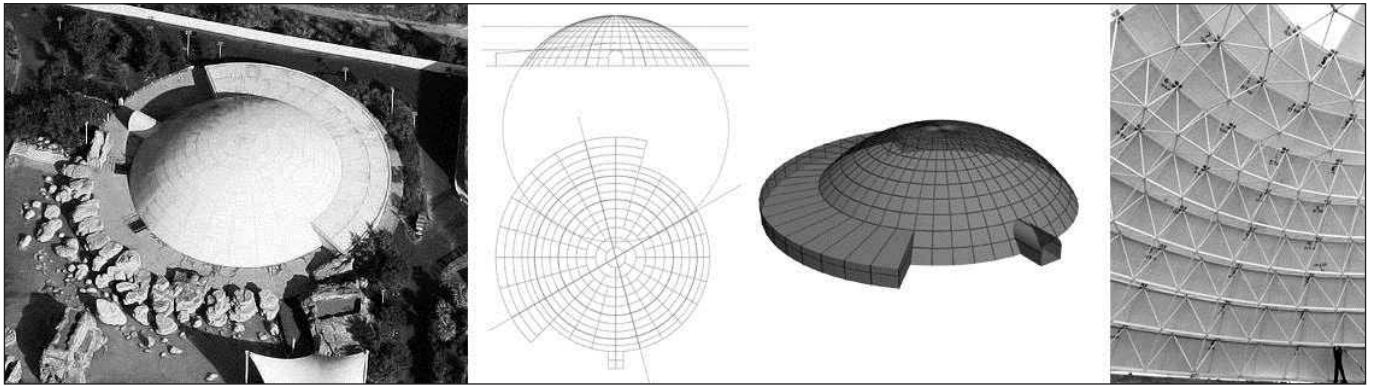


Fig. 7. Imágenes y esquemas del edificio de la zona del ártico del "Parc Oceanogràfic Universal".

Por último el muro cortina del cerramiento también se diseñó con una superficie cilíndrica y se ejecutó de manera similar.

3.1.3 Cubierta de la zona del ártico

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 tradicionales construcciones.

A partir de los planos de planta y alzado podemos deducir los trazados que regulan ésta 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 más 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.

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.

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 producidas 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 compresión¹³.

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 en las celosías planas, pero en este caso irregulares, ya que todas las barras no tendrán la misma longitud.

¹³ Engel, Heino "Sistemas de estructuras". Gustavo Gili. Barcelona, 1997.

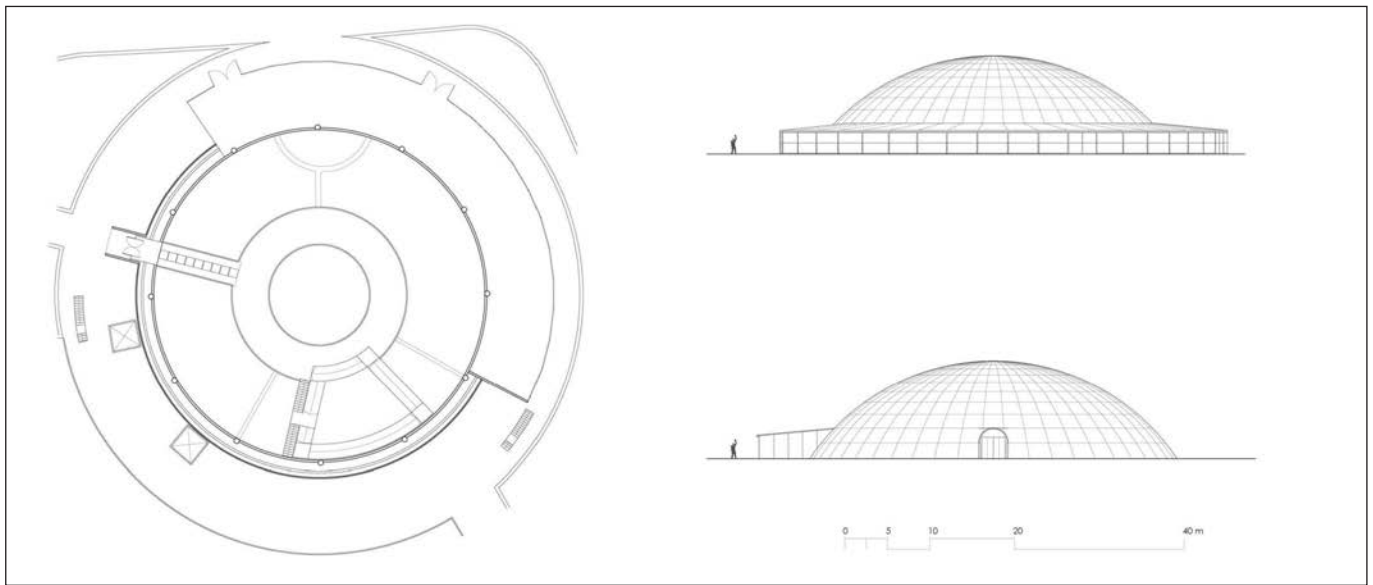


Fig. 8. Planos de la zona del ártico del "Parc Oceanogràfic".

Para su construcción, y 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.

3.1.4 Jaula de la zona húmeda

Uno de los ecosistemas incluido en el Parc Oceanogràfic es el existente en las denominadas "Zonas Húmedas" del planeta. En estas latitudes es muy importante la presencia de aves para el correcto funcionamiento de su fauna y flora. Por ello se hizo necesario generar un gran espacio cerrado sobre la cota 0 y que fuera permeable al viento, a la luz, a modo de espacio exterior.

Para este fin se materializó una gran jaula para estos pájaros. En su diseño se utilizó una gran cúpula esférica con estructura metálica triangulada de 33,5m de diámetro, la cual se puede apreciar casi en su totalidad.

3.2 Hemisféric

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.

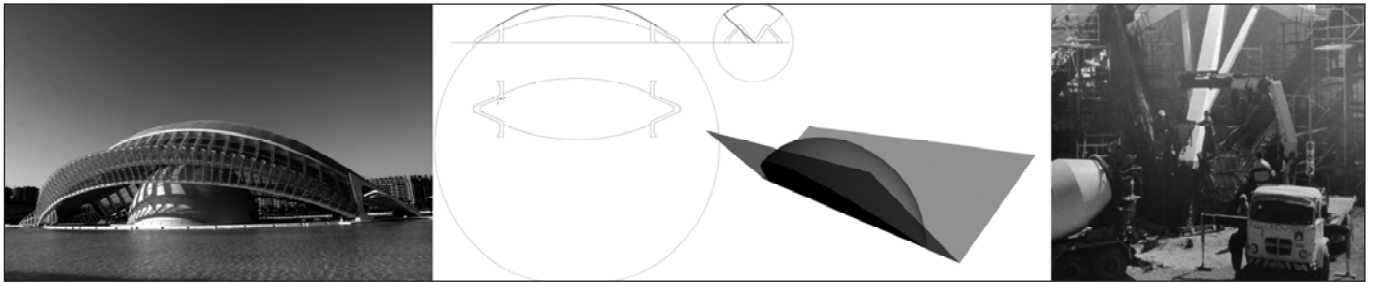


Fig. 9. Imágenes y esquemas de "L'Hemisfèric".

Su diseño simboliza un gran ojo humano que se completa con su reflejo en los estanques situados alrededor del edificio. 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, con su eje longitudinal en la dirección del río. Tiene una longitud de unos 100 m, una anchura de 50 m y una altura en su parte central de 23 m¹⁴.

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.

3.2.1 La cubierta

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. También se podría hablar de un toroide, pero parece más acertado hablar de un elipsoide en este caso. 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.

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 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 los esquemas estructurales se aprecia la estructura metálica tubular de la cubierta y como esta se genera a partir de secciones paralelo y meridiano del elipsoide de base de la generación. Como estas secciones generan

¹⁴ Calatrava Valls, Santiago "L'Hemisfèric: Una ventana al mundo". Informes de la construcción, vol 52 n°469-470. Madrid, 2000.

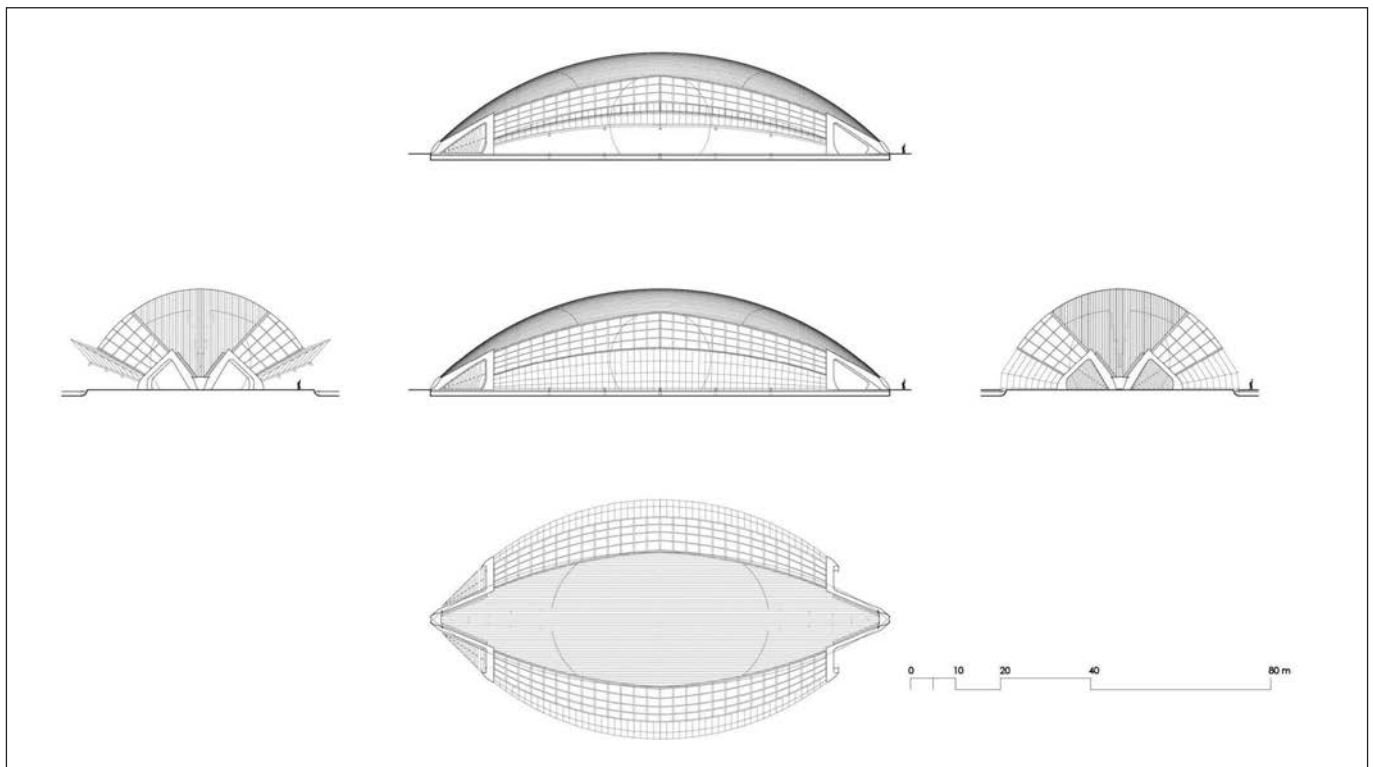


Fig.10. Planos de la cubierta de "l'Hemisfèric".

formas trapezoidales, se refuerza la estructura a base de diagonales que formarán hélices elipsoidales.

También se puede ver un detalle de armado de los trípodés que tienen un alma de perfil tubular redondo hueco de acero y un armado en forma de jaula denominada nervometal.

La estructura interior de los trípodés 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 trípodés con el muro de sótano mediante una placa de anclaje fijada mediante taladros al hormigón.

La estructura de la cubierta se monta previamente al hormigonado. El arco central se prolonga hasta el mismo núcleo del trípodé. El resto de arcos longitudinales arrancan desde los apoyos laterales del trípodé.

La cubierta metálica también se ejecutó antes de que se hormigonaran los trípodés. 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 trípodés 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 revisitaron con láminas metálicas de poco espesor.

3.3. Umbracle

El edificio del Umbracle 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

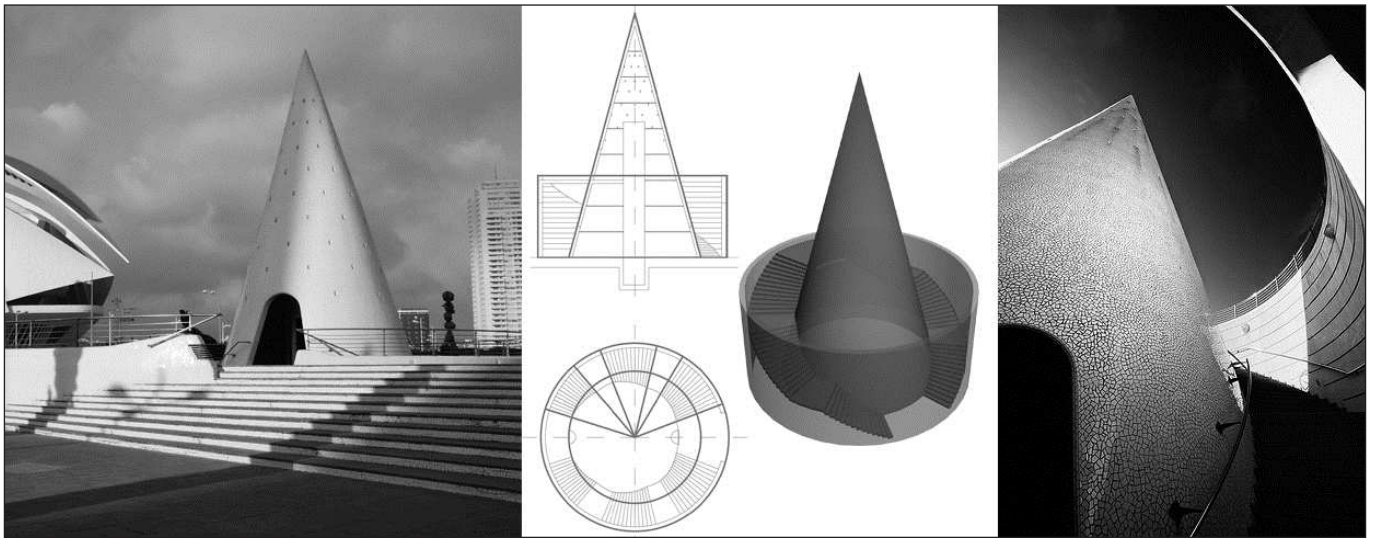


Fig. 11. Imágenes y esquemas del acceso al edificio de "l'Umbracle".

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. Cabe destacar de este edificio la singular cubierta del jardín. Ésta 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.

3.3.1 Conjunto escalera – ascensor

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 las 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 elementos descritos están materializados con hormigón armado y ejecutados a la manera tradicional, por lo que su construcción no tiene interés su análisis estructural o constructivo.

3.4 Agora

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 cenital¹⁵. 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 blan-

¹⁵ Rodríguez Fajardo, Raúl; Rondo Campos, Mario; Goberna Pérez, Enrique "Edificio Àgora. Ciudad de las artes y las ciencias. Valencia. Congreso internacional de estructuras – ACHE Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural.

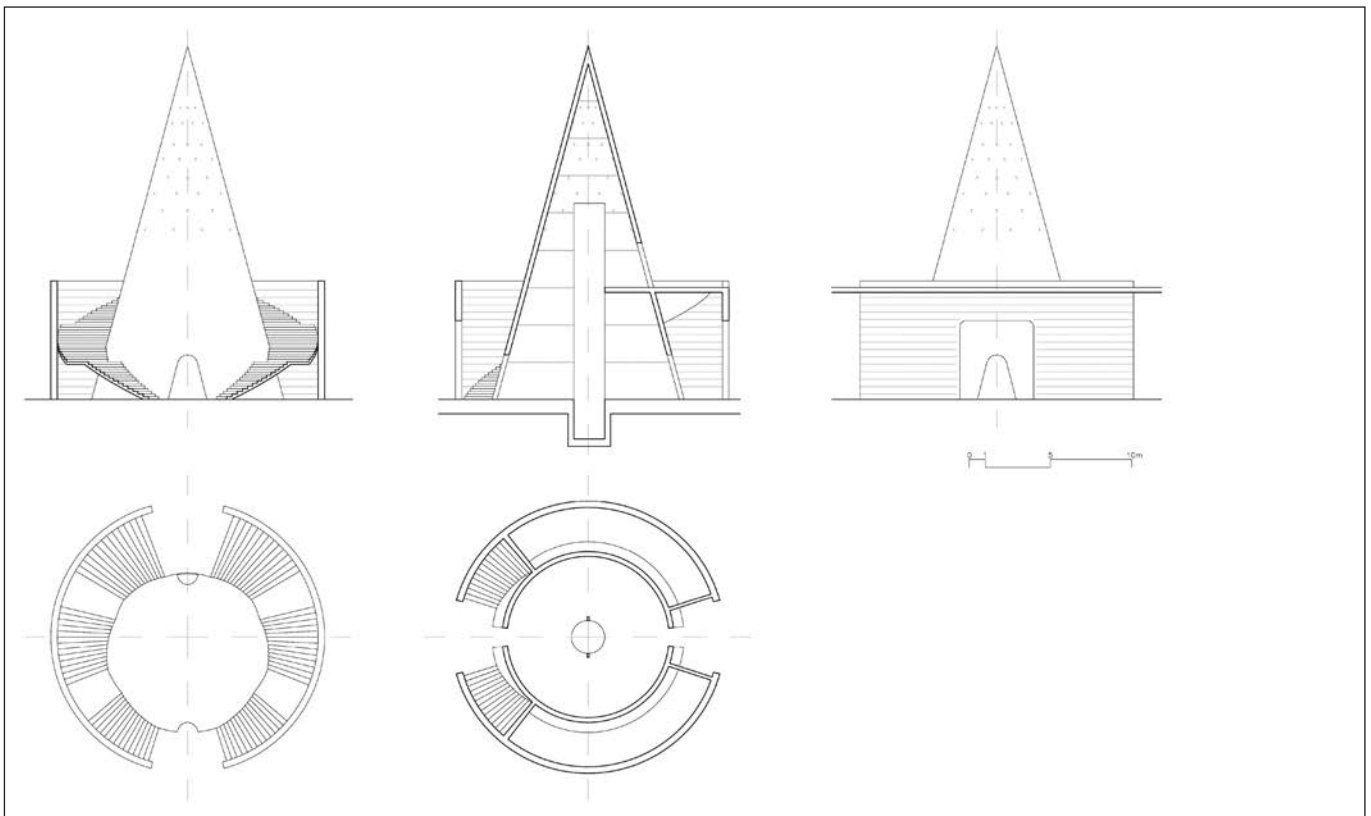


Fig. 12. Planos de la conjunto escalera-ascensor de acceso a "l'Umbracle".

cos 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 deportivos, congresos, pases de moda... a modo de gran cúpula contemporánea.

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.

3.4.1 Cubierta - cerramiento

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.

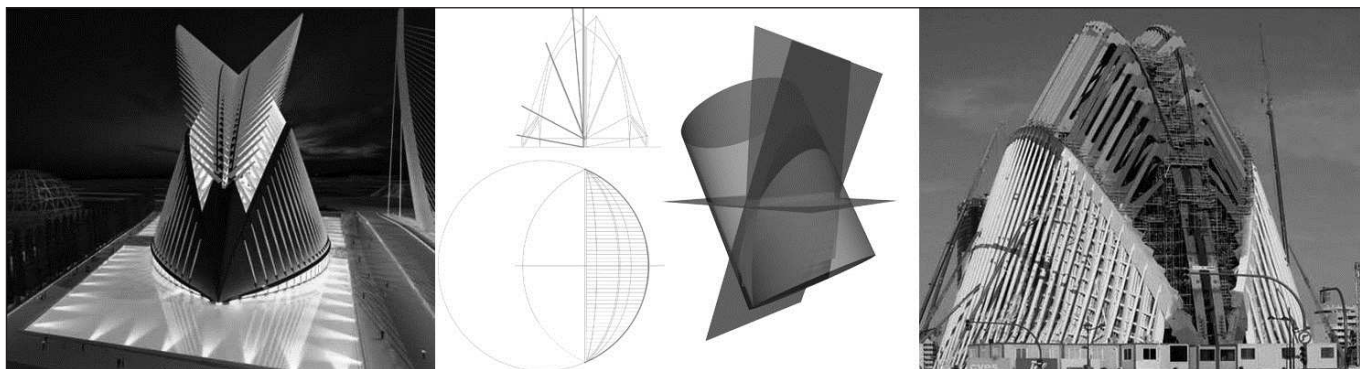


Fig. 13. Imágenes y esquemas del edificio de "l'Àgora".

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.

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 pórticos realmente son la repetición simétrica de la pieza que se puede apreciar en la sección. En su parte superior estas dos piezas están articuladas para mejorar su trabajo conjunto y eliminar la transmisión de momentos flectores. Los apoyos de los pórticos están articulados mediante unas grandes rótulas que se han dejado vistas. 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 de les Ciencies", pero de manera parecida al "Palau de les Arts", 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.

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.

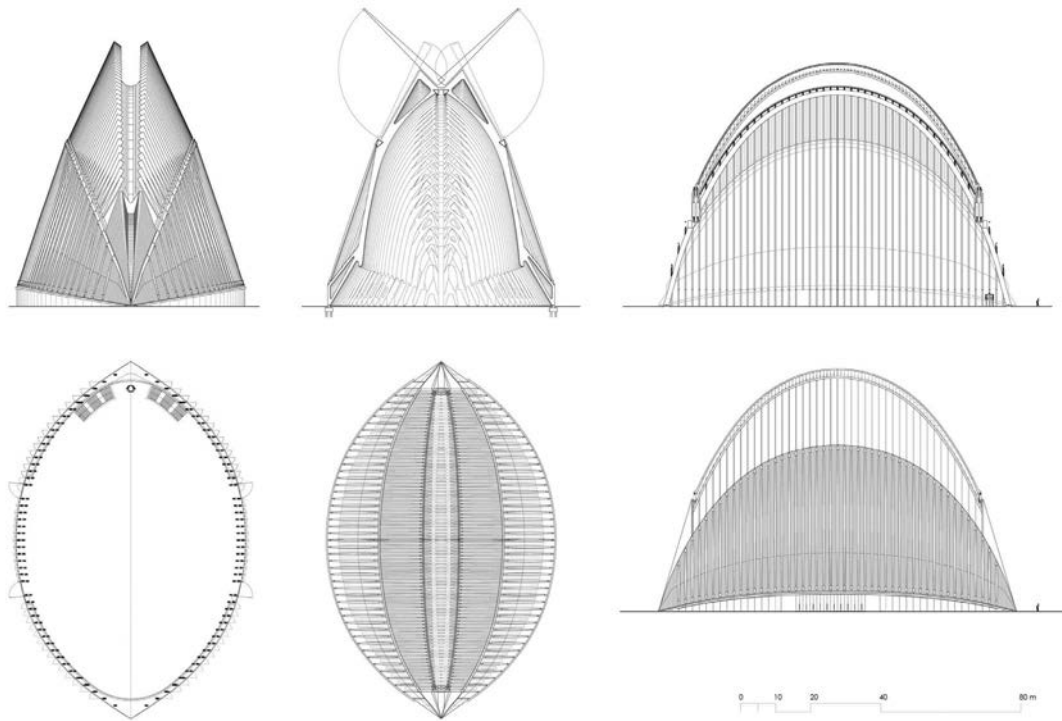


Fig. 14. Planos de la cubierta del edificio "Àgora".

4 Resultados y conclusiones

En la tabla adjunta se recogen los resultados obtenidos de los análisis realizados.

Tal y como se ha comentado en la introducción, la cúpula en su esencia, el espacio que define y su singularidad, en la actualidad se sigue empleando para usos muy

diversos y con geometrías muy diversas. La "Ciutat de les Arts i de les Ciències" constituye uno de los ejemplos más ricos en cuanto al uso de geometrías singulares al servicio del diseño arquitectónico, y como hemos visto recoge en varios de los edificios el concepto de cúpula reinterpretando tanto su forma como su función tradicional.

TABLA 1. Comparativa de los resultados obtenidos de los análisis

EDIFICIO	ELEMENTO / USO	SUPERFICIE	DIMENSIONES	MATERIAL
L'HEMISFÈRIC	CUBIERTA	Elipsoide apuntado	Longitud - 110 m Anchura - 55,5 m Altura - 26 m	Estructura metálica y de hormigón Acabado con chapa metálica
L'UMBRACLE	ESCALERA-ASCENSOR	Cono recto de revolución Cilindro recto de revolución Superficie helicoidal axial recta	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
L'ÀGORA	CUBIERTA-CERRAMIENTO	Cilindros rectos de revolución	Longitud - 98 m Anchura - 65 m Altura - 70 m	Estructura metálica tubular Paneles metálicos en cerramiento Acabado exterior en trencadís cerámico
PARC OCEANOGRÀFIC	ACCESO	Paraboloides hiperbólicos	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
	RESTAURANTE	Paraboloides hiperbólicos	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
	ZONA ÀRTIC	Esfera Cono recto de revolución Cilindro recto de revolución	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

Bibliografía

- Andrés Martín, Francisco Ramón, Fadón Salazar, Fernando. *Análisis gráfico de obras emblemáticas de Félix Candela*. XVI Congreso internacional de Ingeniería Gráfica. Zaragoza – Huesca, 2004.
- CACSA, *Dossier de comunicació: L'Oceanogràfic de la Ciutat de les Arts y las Ciències*. Valencia. Generalitat Valenciana, 2011.
- Calatrava Valls, Santiago *L'Hemisfèric: Una ventana al mundo*. Informes de la construcción, vol 52 nº469-470. Madrid. 2000.
- Crespo Cabillo, Isabel. *Control gráfico de formas y superficies de transición*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- Docci, Mario. *Il disegno come strumento per l'analisi grafica dell'architettura*, Conferencia en la UPV en 1995.
- Domingo, Alberto; Lázaro, Carlos. *La cubierta de l'Oceanogràfic de la Ciutat de les Arts y de les Ciències*. Jornada IECA. Expresión del Hormigón Armado. Alicante, 2006.
- Engel, Heino. *Sistemas de estructuras*. Gustavo Gili. Barcelona. 1997.
- Faber, Colin. *Las estructuras de Félix Candela*. Compañía editorial continental SA. México DF. 1981.
- Fernández Casado, Carlos, Candela, Félix *Parque Oceanográfico Universal, Valencia*. Informes de la construcción, vol 52 nº469-470, Madrid. 2000.
- Juan Vidal, Francisco. *Valor barroco en la arquitectura valenciana*. General de Ediciones de Arquitectura, 2006.
- Rodríguez Fajardo, Raúl; Rondo Campos, Mario; Goberna Pérez, Enrique. *Edificio Ágora. Ciudad de las artes y las ciencias*. Valencia. Congreso internacional de estructuras – ACHE Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural.
- Sanchis Sampedro, Francisco Javier. *La geometría de las superficies arquitectónicas. Análisis formal geométrico de la Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València, 2013.
- Sanz Balduz, Luis Javier. *El borde libre y Félix Candela*. Revista de Obras Públicas nº 3383, Enero 1999.