

LA GEOMETRÍA EN LOS EDIFICIOS DE LA CIUTAT DE LES ARTS I LES CIÈNCIES DE VALENCIA

GEOMETRY AT VALENCIAN “CIUTAT DE LES ARTS I DE LES CIÈNCIES” BUILDINGS

Francisco Javier Sanchis Sampedro, Igor Fernández Plazaola

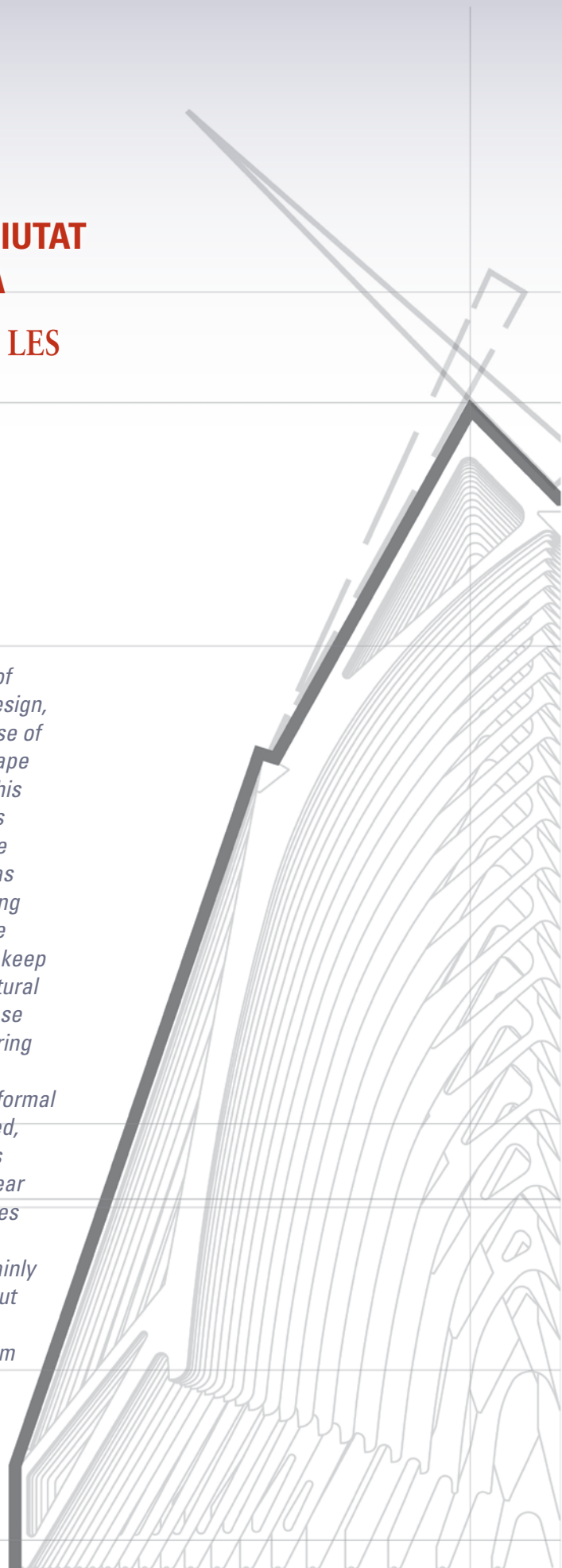
doi: 10.4995/ega.2019.12681

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 artículo. En él se pone en valor el uso de estas formas geométricas definidas como elemento de control formal 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. Se ha realizado un caso práctico de análisis formal geométrico, la “Ciutat de les Arts i les Ciències” de Valencia, que constituye uno de los ejemplos de aplicación más claros de las formas geométricas en la Arquitectura actual. Los análisis son fundamentalmente de generación de las superficies, pero también recogen la vertiente estructural y constructiva estudiada desde el punto de vista geométrico.

PALABRAS CLAVE: GEOMETRÍA. SUPERFICIES. DISEÑO. FORMA

The importance of the use of geometry in architecture design, and more specifically the use of geometric surfaces that shape the architectural space is this paper focus. The paper sets the value of the use of these geometric shapes defined as formal control element during the building designing stage helping at the same time to keep coherence within the structural behaviour, and a greater ease both in the execution as during its material construction. A case-study of geometric formal analysis has been developed, the Valencian “Ciutat de les Arts i les Ciències”, as a clear example of geometric shapes application in the current architecture. Analysis is mainly about shapes generation, but structural and constructive areas have been studied from the geometric standpoint.

KEYWORDS: GEOMETRY. SURFACES. DESIG. SHAPE





Sección del edificio Àgora. Imagen elaborada por el autor

Cover.Agora building section. Image elaborated by the author

En su tratado “De Architectura” 1 en el siglo I a.C., Marco Vitruvio ya afirmaba que toda Arquitectura descansa en tres principios fundamentales: Venustas, Firmitas y Utilitas. Por tanto podemos definir Arquitectura como equilibrio entre estos tres principios, sin sobrepasar ninguno a los otros. Consecuencia de priorizar uno de ellos nos lleva a casos tan conocidos en la historia de la arquitectura como el de la Ópera de Sidney y a otros más recientes como el de la Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia, en los que la “Belleza”, entendida desde el punto de vista Vitruviano, se impuso frente a otros aspectos como son la coherencia estructural, la posibilidad de construcción de las formas e incluso la funcionalidad de los edificios.

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 2. 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. 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 geométricamente 3. 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, el cual siempre ha reconocido su ventaja en aquel proyecto por los estudios de Geometría Descriptiva que realizó durante su formación como arquitec-

to) 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 a una geometría conocida, calculable y construible. La solución a la que se llegó fue la conocida hoy como la “Esfera de Utzon”, ya que todas las bóvedas se construyeron finalmente a partir de porciones de una misma esfera, por lo que todas tenían la misma curvatura... Y es que la forma de los edificios, su geometría, definen las construcciones de manera fundamental 4.

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. Es por tanto una herramienta fundamental de diseño y análisis de la Arquitectura y su uso en fases tempranas de proyecto es imprescindible debido a que soluciona problemas posteriores durante la construcción y el comportamiento estructural del edificio.

La condición de técnico del arquitecto obliga a tener una visión global de ésta utilización. Las consecuencias estructurales y constructivas van íntima e irremediamente 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. Tal y como indica el profesor García Valldecabres en su tesis doctoral *“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*

In his treatise “De Architectura” 1 a century B.C., Vitruvius M. stated that all architecture is based on three fundamental principles: Venustas, Firmitas and Utilitas. Therefore we can define architecture as a balance between these three principles, without exceeding one another. As a result of prioritizing one of them shows us such well-known cases in architectural history such as the Sydney Opera House and newer like the “Ciutat de les arts i de les ciències” of Valencia, where the “Beauty” understood from Vitruvian point of view prevailed over other aspects such as structural coherence, constructive possibility and even buildings functionality.

While the final result of the Utzon’s Opera House Project is one of the most beautiful buildings in the history of architecture, the way to its realization and its construction was not easy 2. The intriguing and attractive forms from the preliminary design, winning the prize of the jury chaired by Eero Saarinen, turned against the architect during the course of its construction. It seemed that these forms as they were designed, could not be carried out without losing their initial attraction. His drawings original forms were not geometrically recognizable 3. It was not until the building engineer Ove Arup joined the constructive team (along with other architects and engineers who collaborated with Utzon, as in the case of the Spanish Rafael Moneo, which has always recognized his advantage in the project due to the Descriptive Geometry studies he performed during his degree as an architect) when, after a skillful exercise with the domes geometrization, the building could be finally built. The shapes Utzon had designed “sensitively” were forced to be adapted to a known geometry, calculable and buildable. The solution that was reached is known today as the “Utzon’s Sphere” since all the domes were eventually built from portions of the same sphere, so they all had the same curvature. So that buildings shape, its geometry, define constructions on its basis 4.

Geometry has always been the instrument that has allowed architects, in many different ways, to join the creativity of the design process with the structural and



construction requirements. It is therefore a fundamental tool to design and analyze the architecture and its use in the early project stages is essential because it solves later problems during construction and the structural behavior of the building.

The technical condition of the architect requires a global view of this use. The structural and constructive consequences are intimately and irrevocably linked to the design of a building, so we must never lose sight of them, moreover it is always necessary to relate them to the design and implementation of the various and unique geometries. As indicated by teacher García Valldecabres in his doctoral thesis *"Geometry is the key to understand the other parameters of construction. Establishes a simple geometric criterion allowing by repetition or deviation, to get a rational order in a whole, underlying eventhough as if it is apparently presented disordered"* 6.

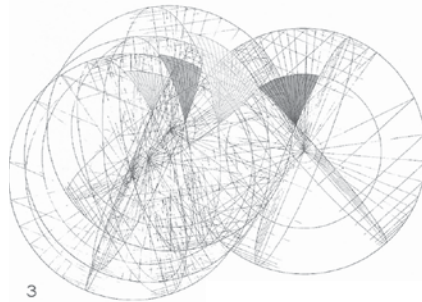
Aside from structural and construction criteria, and focusing only on formal aspects, geometry has become the available tool for the architect to fight the imposed minimalism in the early decades of the twentieth century. *"Free architecture from the ornament resource, geometry becomes this way the responsible for the architectural expression"* 7.

With the emergence from the automotive industry of Bezier curves and surfaces in the late 60s 8, subsequently applied to computer-aided drawing softwares, designing a new architecture not only based on regulated forms but all organic and irregular shapes became possible. The consequences of these software use and "computerized surfaces" have led to a great architectural heterodoxy, full of whimsical shapes as huge sculptures with a wide freedom design but with total disregard for the laws of physics. *"Strange teen mannerism with the unpardonable sin of unconstructibility"* 9.

In the last decade of the twentieth century and early twenty-first, in the city of Valencia, the architect Santiago Calatrava Valls and the company "Civis Project Management", and in its initials in collaboration with the architect Felix Candela, have raised a large cultural complex with great wealth



1



3

1



2



4

orden racional en un todo y que subyace aunque pudiera presentarse aparentemente desordenado" 6.

Dejando de lado criterios estructurales y constructivos, y centrándonos en aspectos únicamente formales, la geometría 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 esta manera en la responsable de la expresión arquitectónica"* 7.

Con la aparición de las curvas y superficies de Bezier a finales de los años 60 provenientes de la industria automovilística 8, 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. Las consecuencias del uso

de estos programas y "superficies informatizadas" han 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. *"Extraño manierismo adolescente con el imperdonable pecado de la aconstructividad"* 9.

En la última década del siglo xx y principios del XXI, en la ciudad de Valencia, el arquitecto Santiago Calatrava Valls y la empresa de "Civis Project Management", con la colaboración del también arquitecto Félix Candela en sus inicios, han levantado un complejo cultural de grandes dimensiones y con una gran riqueza y complejidad formal. La "Ciutat de les Arts i les Ciències" de Valencia supone un gran laboratorio de formas geométricas singulares, que algunos autores han venido a definir como el *nuevo barroco va-*



2

1. Diferentes aspectos de la Ópera de Sidney: Boceto de concurso, imagen exterior, esquema geométrico de las esferas y la “Esfera de Utzon”. Imágenes extraídas de la publicación “Utzon’s sphere: Sydney Opera House, how it was design and built” de Yuzo Mikami 5

2. Ejemplos actuales de heterodoxia arquitectónica.

1) Pabellón de España, Exposición Universal de Shanghai de 2010. Estudio EMBT

2) Estación de autobuses en Casar de Cáceres, 2003. Justo García Rubio

3) Museo Guggenheim de Bilbao, 1997. Frank O. Gehry

4) Estadio nacional de Japón, propuesta ganadora del concurso. Zaha Hadid

1. Different aspects of the Sydney Opera House: Sketch context, external image, geometric spheres layout and “Utzon’s Sphere”. Images extracted from the “Utzon’s Sphere: Sydney Opera House, how it was design and built” Yuzo Mikami 5

2. Current examples of architectural heterodoxy
1) Spanish pavilion, Shanghai Expo 2010. EMBT Studio

2) Casar de Cáceres bus station, 2003. Justo García Rubio

3) Guggenheim Museum Bilbao, 1997. Frank O. Gehry

4) Japan National Stadium, winning competition proposal. Zaha Hadid

lenciano, cuyo análisis permite estudiar el uso de la geometría sobre edificios actuales, de los cuales se dispone de gran cantidad de información acerca de su concepción y la posterior construcción, pudiendo de esta manera valorar la idoneidad del empleo de la geometría.

Para su análisis se ha utilizado la denominada “metodología estructuralista” que en palabras del profesor Mario Docci “*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*” 10.

En todas estas acciones de descomposición y recomposición aplicadas a la arquitectura, la geometría es la herramienta fundamental del análisis. Tras un análisis de los trazados geométricos planos deducidos a partir de las plantas, alzados y secciones de los edificios, se ha

and formal complexity. The “Ciutat de les arts i les Ciències” in Valencia is a great laboratory of unique geometric shapes, some authors have come to define it as the *new Valencian Baroque*, which analysis allows to study the use of geometry on existing buildings, of which lots of information about its design and subsequent construction is at disposal, what makes possible to assess the suitability use of its geometry.

For its analysis the “structuralist methodology” has been used, than in words of Professor Mario Docci “*consist to examine a particular event, break it down into its constituent parts to classify and re-compose it to be able to understand the relationships that bin parts together and each one with the whole*” 10.

In all these actions of decomposition and recomposition applied to architecture, geometry is the fundamental tool of analysis. After an analysis of the plane geometric sketches deduced from the plans, elevations and sections of buildings, a geometric generation has been done based on basic geometric shapes, showing the modeling operations and its modification with planes, transparencies, section lines, colors... in different independent steps that at the end are recomposed in order to have a better understanding of the whole and its parts. As indicated by Professor Carlos Montes “*We just get to remember the building if we reduce or simplify it by schemes acting as substitutes of itself*” 11. In addition, performing this type of analysis and once the pattern composition of the different parts of the buildings has been found, we can get to geometric relationships consequence from it and that the autor did not consider in its design 12.

Due to the formal complexity of the different buildings, during the analysis to work with significant partial parts of each of the buildings was chosen. In the following table the analyzed parties of the complex buildings, aswell as the geometric surface that serves as the basis for its design and its dimensions are indicated. One of the most important features is the monumentality of the buildings that can be appreciated by consulting its dimensions (Table 1).

In a first approach to the analysis results we



EDIFICIO	ELEMENTO / USO	SUPERFICIE	DIMENSIONES
1_PALAU DE LES ARTS	1.1_CUBIERTA / PLUMA	Conos rectos de base circular Cilindro recto de base circular	Longitud - 230 m / Voladizo - 120 m Anchura - 32 m Altura - 72 m
	1.2_CERRAMIENTO / CÁSCARA	Elipsoide	Longitud - 172 m Anchura - 50 m Altura - 58 m
	1.3_MIRADOR	Cilindro recto de base parabólica Cilindro oblicuo irregular	Longitud - 26 m / Anchura - 36 m Longitud en desarrollo- 75 m Altura - 8,70 m
2_L'HEMISFÈRIC	2.1_CUBIERTA	Elipsoide apuntado	Longitud - 110 m Anchura - 55,5 m Altura - 26 m
3_MUSEU DE LES CIÈNCIES	3.1_CUBIERTA	Conos oblicuos de base circular	Longitud cubierta - 210 m Módulo: Longitud - 53 m Anchura - 10 m / Altura - 22 m
	3.2_FACHADA NORTE	Superficies de plano director con directrices parabólicas	Longitud fachada - 200 m Módulo: Longitud - 19,3 m Anchura - 10 m / Altura - 37 m
	3.3_PUERTA DE ACCESO	Cono oblicuo de base circular superficie de plano director con directrices circulares y elípticas	Longitud - 65 m Anchura - 11 m Altura - 16 m
	3.4_PILARES	Planos enlazados con conos y cilindros tangentes	Unidad: Longitud - 40 m Anchura - 6,3 m Altura - 49 m
4_L'UMBRACLE	4.1_CUBIERTA	Superficies de plano directos con directrices parabólicas	Longitud cubierta - 280 m Módulo: Longitud - 5 m Anchura - 32,3 m / Altura - 19,2 m
	4.2_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
	4.3_ELEMENTO VENTILACIÓN	Cono recto de revolución Cilindros rectos de revolución	Diámetro base cono - 6,72 m Altura - 6,72 m
5_L'ÀGORA	5.1_CERRAMIENTO	Cilindros rectos de revolución	Longitud - 98 m Anchura - 65 m Altura - 70 m
6_PARC OCEANOGRÀFIC	6.1_ACCESO	Paraboloides hiperbólicos	Anchura - 34 m Distancia entre apoyos - 30 m Altura central- 11 m / Lóbulos - 21 m
	6.2_RESTAURANTE	Paraboloides hiperbólicos	Anchura - 46,2 m Dist. entre apoyos - 13,5 / 35,5 m Altura central- 8 m / Lóbulos - 12 m
	6.3_ÁRTICO	Esfera Cono recto de revolución Cilindro recto de revolución	Diámetro de la base - 44 m Altura - 11,5 m
	6.4_AUDITORIO	Superficies toroidales	Longitud total- 60,3 m Módulo: Longitud - 35,4 m Anchura - 8 m / Altura - 7,5 m

Tabla / Table 1

can observe how all sort of surfaces have been used in the design of the buildings. Since sinclastic double curvature surfaces: ellipsoid spheres and toroids, to single curved and regulated all kind surfaces: Different generation cones and cylinders, hyperbolic paraboloid, director plane surfaces... These surfaces are not always obvious, though its defining elements are not always visible such as the generators or guidelines. Also, on many occasions, the

realizado una generación geométrica partiendo de formas geométricas básicas 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. Tal y como indica el profesor Carlos Montes *“tan solo llegamos a recordar el edificio si logramos reducirlo o simplificarlo mediante esquemas que funcionan como sustitutivos del mismo”* 11.

Además, realizando este tipo de análisis y una vez encontrada la pauta de composición de las diferentes partes de los edificios, pode-

Tabla 1. Resumen de parámetros de los edificios analizados de la Ciutat de les Arts i de les Ciències de València

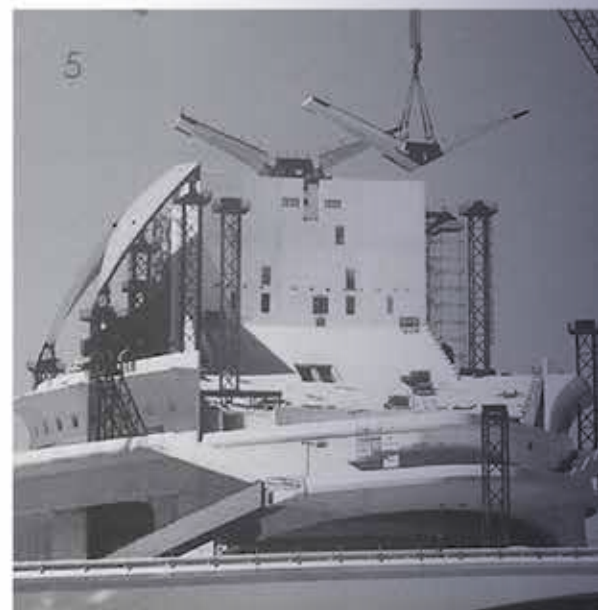
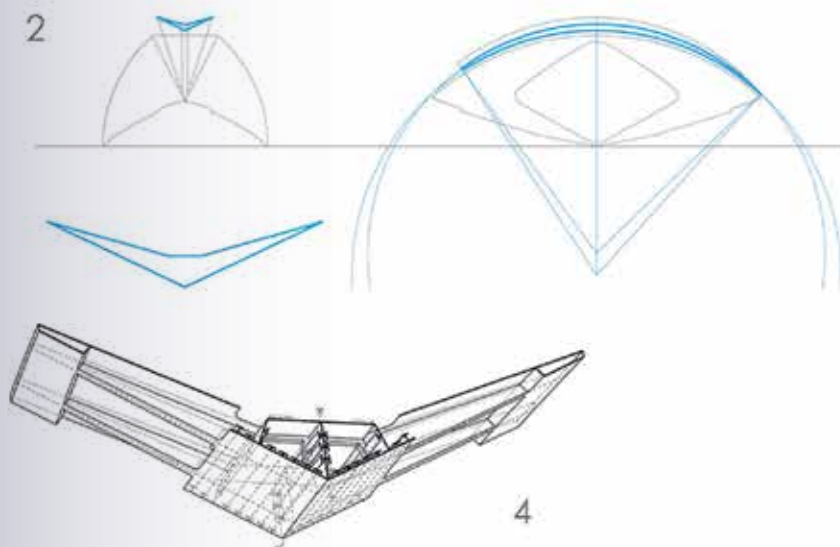
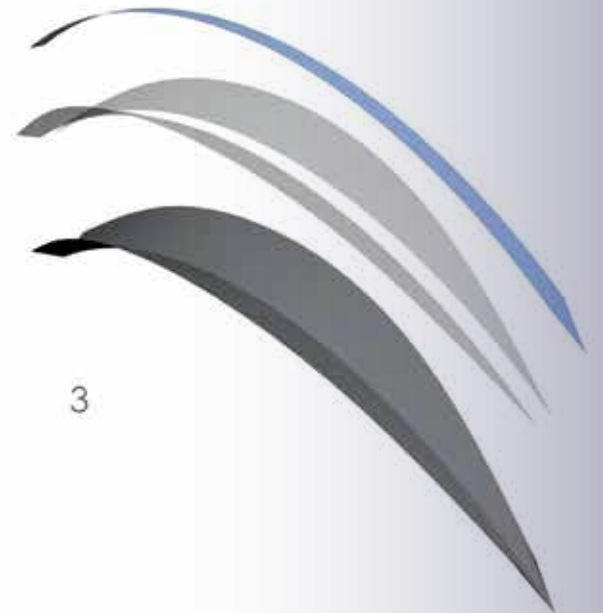
3. Análisis de la cubierta del Palau:

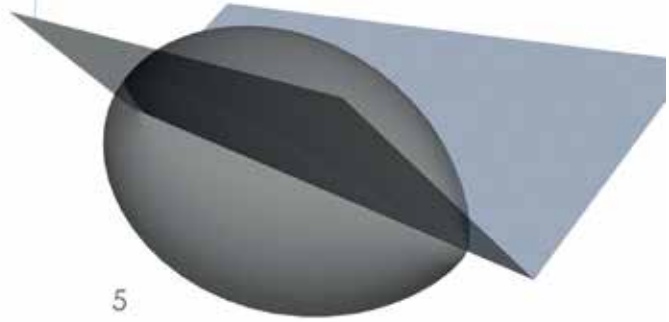
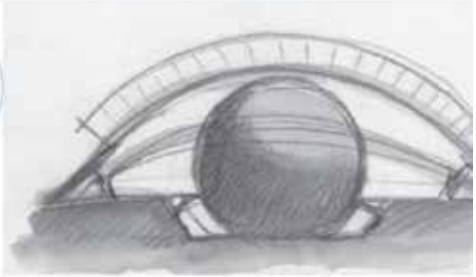
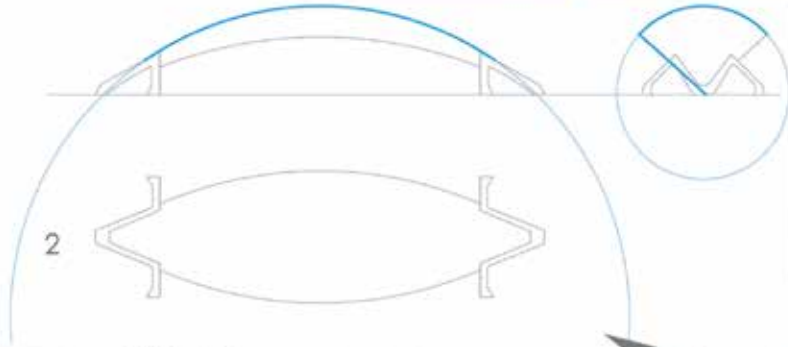
- 1) Imagen exterior de la cubierta. El autor
- 2) Análisis de los trazados geométricos de la cubierta. El autor
- 3) Esquema tridimensional de generación geométrica. El autor
- 4) Detalle de una dovela de la cubierta. Plano facilitado por el estudio del arquitecto
- 5) Proceso constructivo de la cubierta. Imagen facilitada por la empresa constructora

Table 1. Summary parameters of the analyzed buildings analyzed at the "Ciutat de les Arts i de les Ciències" of Valencia

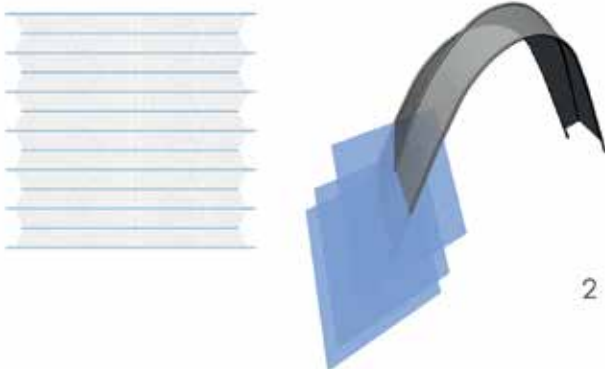
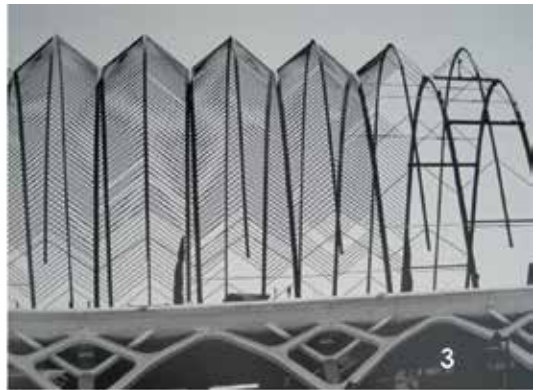
3. Analysis of Palau cover:

- 1) Outer image of the cover. The author
- 2) Analysis of the geometric traces of the cover. The author
- 3) Three-dimensional geometric generation scheme. The author
- 4) Detail of a cover keystone. Plan facilitated by the architect study
- 5) Cover constructive process. Image provided by the construction company





4



5



4. Análisis de la cubierta de l'Hemisfèric:
- 1) Imagen exterior de la cubierta. El autor
 - 2) Análisis de los trazados geométricos de la cubierta. El autor
 - 3) Boceto del edificio realizado por el arquitecto 13
 - 4) Proceso constructivo de la cubierta. Imagen facilitada por la empresa constructora
 - 5) Esquema tridimensional de generación geométrica. El autor
5. Análisis de la cubierta del Umbracle:
- 1) Análisis de los trazados geométricos de la cubierta. El autor
 - 2) Esquema tridimensional de generación geométrica. El autor
 - 3) Proceso constructivo de la cubierta. Imagen facilitada por la empresa constructora
 - 4) Imagen exterior de la cubierta. El autor
 - 5) Modelización del conjunto, destacando el módulo generador. El autor

4. Hemisfèric Cover Analysis:
- 1) Outer image of the cover. The author
 - 2) Analysis of the geometric traces of the cover. The author
 - 3) Building sketch by the architect 13
 - 4) Cover constructive process. Image provided by the construction company
 - 5) Threedimensional geometric generation scheme. The author
5. Umbracle cover analysis:
- 1) Analysis of the geometric traces of the cover. The author
 - 2) Three-dimensional geometric generation scheme. The author
 - 3) Cover constructive process. Image provided by the construction company
 - 4) Outer image of the cover. The author
 - 5) Whole modelling, highlighting the generator module. The author

mos encontrar relaciones geométricas que son consecuencia de ella y que el autor no había considerado en su diseño 12.

Debido a la complejidad formal de los diferentes edificios, en el análisis se ha optado por trabajar con partes parciales significativas de cada uno de ellos. En la tabla siguiente se indican las partes analizadas de los edificios del complejo así como la superficie geométrica que sirve de base para su diseño y las dimensiones generales de estos. Una de las características más importantes es la monumentalidad de los edificios que se puede apreciar al consultar sus dimensiones (Tabla 1).

En una primera aproximación a los resultados del análisis podemos observar cómo se han utilizado todo tipo de superficies en el diseño de los edificios. Desde superficies de doble curvatura sinclástica:

elipsoide, esferas y toroides, hasta superficies de curvatura simple y regladas de todo tipo: Conos y cilindros de diversa generación, paraboloides hiperbólicos, superficies de plano director... Estas superficies no son siempre evidentes, ya que no siempre son visibles sus elementos definitorios como pueden ser las generatrices o directrices. Además, en multitud de ocasiones, la parte de la superficie que se ha utilizado en el diseño es pequeña respecto del global de la misma, por lo que hay que hacer un esfuerzo de visión tridimensional del elemento geométrico completo y de esta manera poder analizarlo.

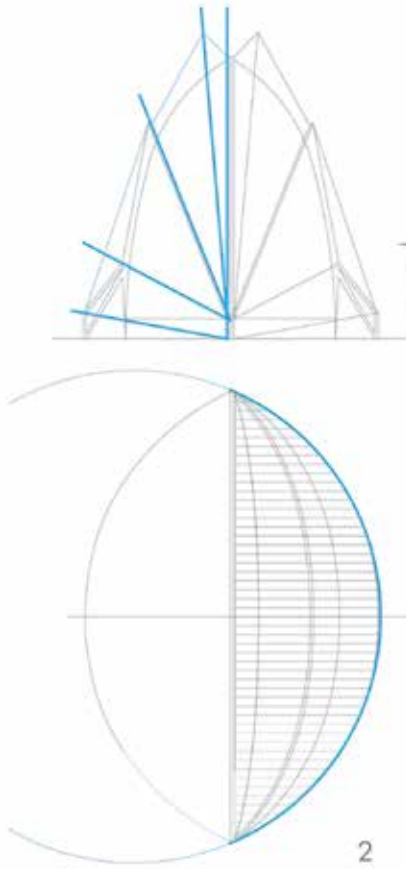
Resulta significativo que las superficies más utilizadas en el complejo son las superficies regladas, y más en concreto las superficies radiadas (de curvatura simple), conos y cilindros. Es lógico pensar que esto es debido a que su materialización mediante elementos rectos es más sencilla que en aquellas partes diseñadas a partir de superficies de doble curvatura. Un ejemplo ilustrativo de este hecho lo podemos observar en la cubierta del edificio del "Palau de les Arts" donde una forma en principio aparentemente compleja se ha diseñado a partir de una composición de cuatro conos y un cilindro de base circular. Esto contrasta con otras obras del mismo arquitecto donde elementos similares están diseñados a partir de formas toroidales de hormigón, como es el caso del auditorio de Tenerife. La materialización de estas superficies radiadas se ha realizado con diversos materiales. Podemos encontrarnos estructuras únicamente metálicas, como es el caso de la cubierta del Palau, otras donde se alternan elementos metálicos y vidrio, como en el mirador del mismo edi-

part of the surface that has been used in the design is small compared to the whole of it, so a three dimensional vision effort of the complete geometric element has to be done to be able to analyze it.

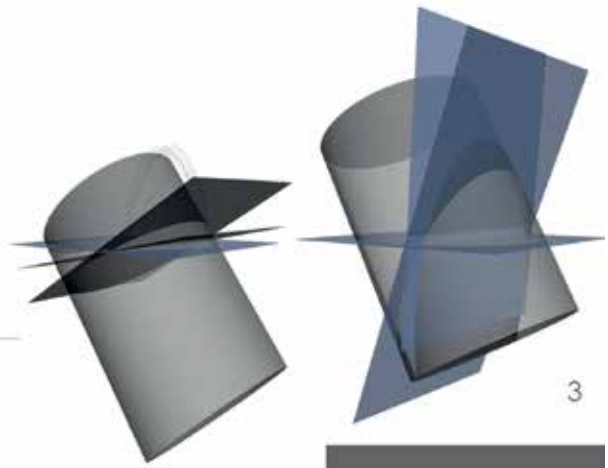
Significantly, the most used surfaces in the complex are ruled surfaces, and more particularly the radiated surfaces (with single curvature), cones and cylinders. It is logical to think that this is because the realization of straight elements is simpler than in those parts designed with double-curved surfaces. An illustrative example of this can be observed in the "Palau de les Arts" cover where a seemingly complex shape at the beginning has been designed from a composition of four cones and a cylinder with a circular base. This contrasts with other works by the same architect where similar elements are designed from concrete toroidal shapes, such as Tenerife auditorium case. Realization of these radiated surfaces has been made with various materials. We can find only metal structures, such as Palau cover case, others where metal and glass elements alternate, as the same building bay window, other elements built with prefabricated elements, such the access to the building of the "Museu de les Ciències", and finally elements built with reinforced concrete, such as parabolic covers of the "Parc Oceanographic". In all of them we can observe how through the reinforcing ribs, window mullions or the formwork elements, surface generators can be perceived, which are those that have facilitated its realization. As regards to the sinclastic double curvature surfaces (spheres, ellipsoids and toroids) they have not been expressly developed in the whole complex opposite to what a first approximation may seem. The fact that two of the most significant buildings, such as Palau and Hemisfèric, have their main shape defined by these surfaces, gives us the feeling that these forms are significantly present in the complex, but is not like this. Also contributes to this fact the vision of the edge of other surfaces as conical ones. Circles and ellipses make us think that the surfaces are double curvature, when in fact they are not. In the table is shown how only 4 out of the 16 analyzed elements are



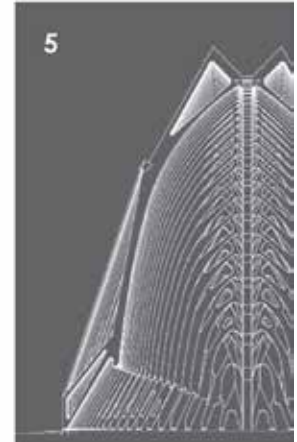
6



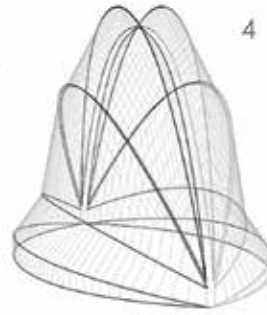
2



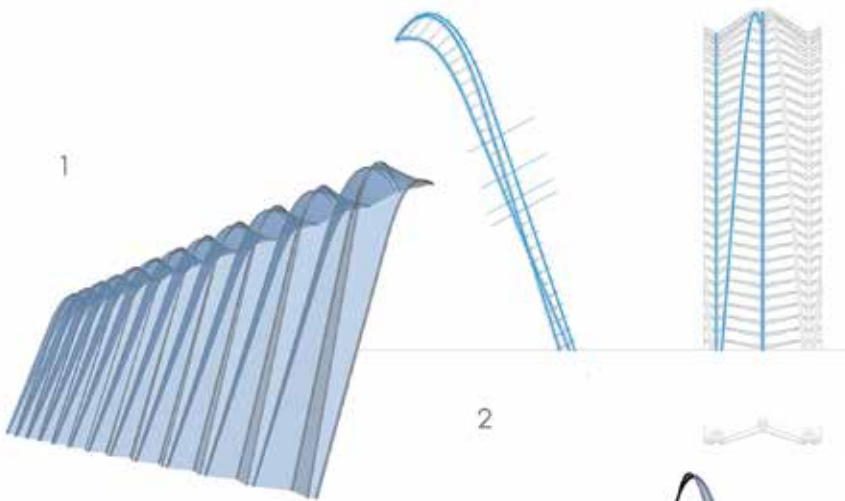
3



5



4



1

2



4



5



3

7



6. Análisis de la cubierta del Àgora:

- 1) Imagen exterior de la cubierta. El autor
 - 2) Análisis de los trazados geométricos de la cubierta. El autor
 - 3) Esquema tridimensional de generación geométrica. El autor
 - 4) Esquema tridimensional del edificio en estructura alámbrica. El autor
 - 5) Sección del edificio con la representación de los pórticos de la estructura. El autor
- #### 7. Análisis de la fachada Norte del Museu de les Ciències:
- 1) Modelización del conjunto. El autor
 - 2) Análisis de los trazados geométricos de la fachada. El autor
 - 3) Imagen interior de la fachada. El autor
 - 4) Proceso constructivo de la fachada. Imagen facilitada por la empresa constructora
 - 5) Esquema tridimensional de generación geométrica. El autor

6. Agora cover analysis:

- 1) Outer image of the cover. The author
 - 2) Analysis of the geometric traces of the cover. The author
 - 3) Three-dimensional geometric generation scheme. The author
 - 4) Three-dimensional building wireframe structure scheme. The author
 - 5) Building section with the structure frames representation. The author
- #### 7. North façade analysis of the Museu de les Ciències:
- 1) Whole modelling. The author
 - 2) Analysis of the geometric traces of the façade. The author
 - 3) Interior image of the façade. The author
 - 4) Façade constructive process. Image provided by the construction company
 - 5) Three-dimensional geometric generation scheme. The author

ficio, otros elementos construidos con elementos prefabricados, como el acceso al edificio del “Museu de les Ciències”, y por último, elementos construidos con hormigón armado, como son las cubiertas parabólicas del “Parc Oceanogràfic”. En todas ellas podemos observar como mediante los nervios de refuerzo, los montantes de carpintería o los elementos de encofrado se pueden percibir las generatrices de las superficies, que son las que han facilitado su ejecución.

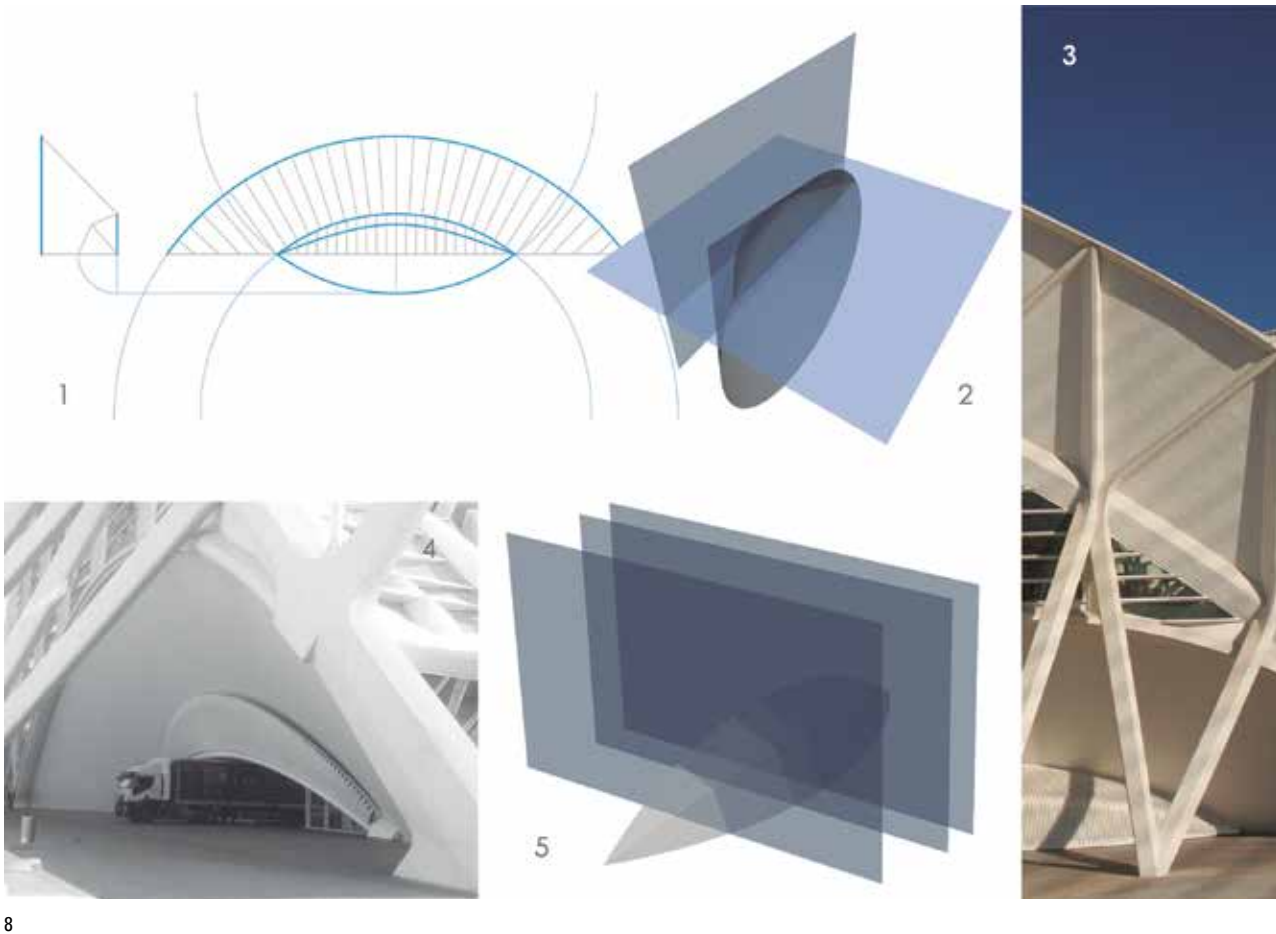
Por lo que se refiere a las superficies de doble curvatura sinclástica (esferas, elipsoides y toroides), no se han desarrollado demasiado en el complejo en contra de lo que en una primera aproximación pueda parecer. El hecho de que dos de los edificios más significativos, como

son el Palau y l’Hemisfèric, tengan su forma general definida por estas superficies, nos da la sensación de que estas formas están presentes de manera importante en el complejo, pero no es así. También contribuye a este hecho la visión de los bordes de otras superficies como las cónicas. Circunferencias y elipses nos hacen pensar que las superficies son de doble curvatura, cuando en realidad no lo son. En la tabla se puede apreciar cómo tan solo 4 de los 16 elementos analizados están diseñados con este tipo de superficies. Además, salvo en el cerramiento o “cáscara” del Palau, en el que si se ha realizado una superficie con acabado curvo, en el resto de los casos la curvatura se ha aproximado mediante elementos rectos. La cubierta del Hemisfèric tiene una estructura tubular en su interior, siendo el acabado superior el que se adapta a esta estructura. En la cubierta de la zona del Àrtico del Oceanogràfic pasa algo similar, está diseñada a partir de una estructura triangulada metálica de doble capa. Para la materialización de estas estructuras se han utilizado elementos rectos en las direcciones de las secciones paralelo y meridiano de las diferentes superficies curvas base de su diseño.

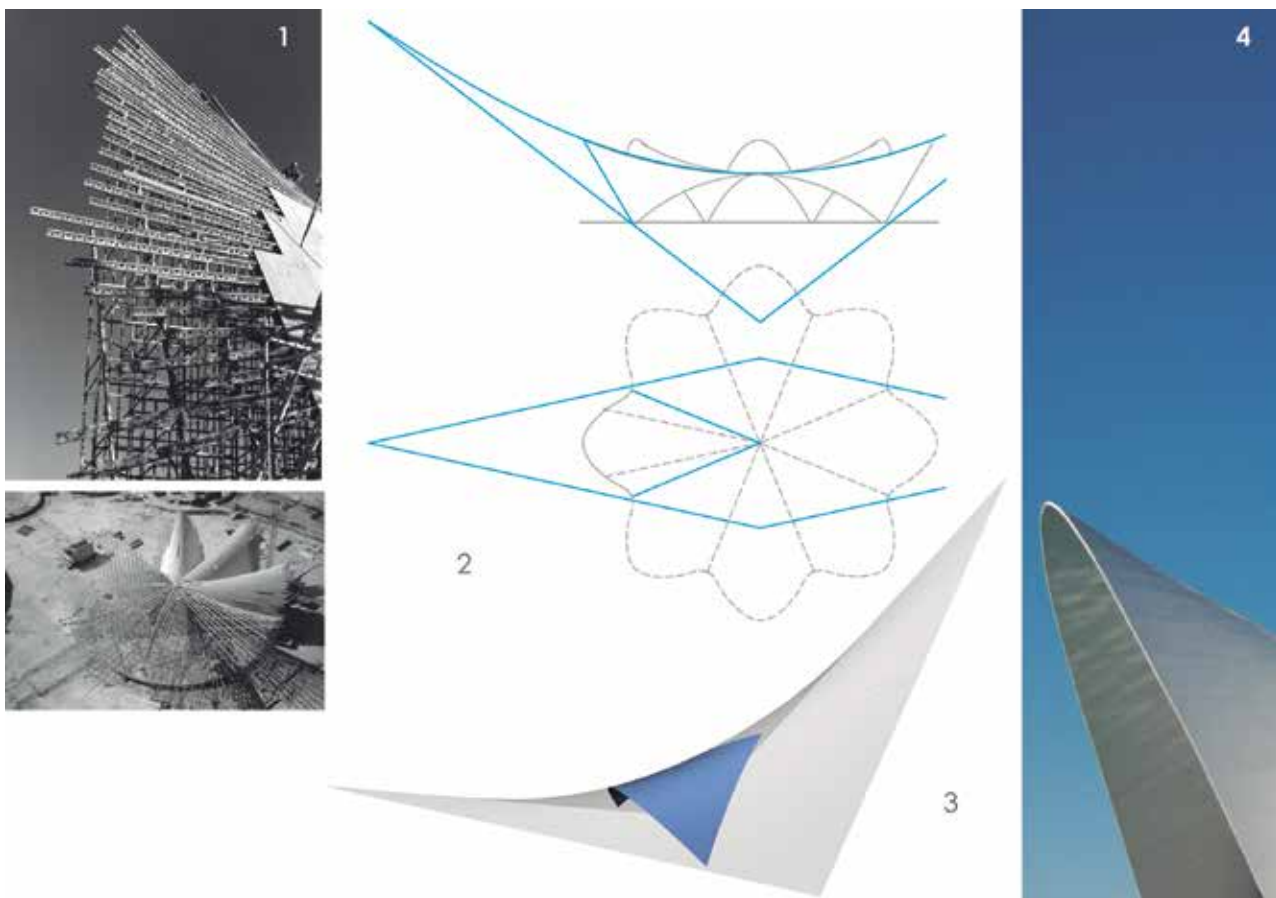
Entre todas las superficies del complejo cabe destacar la cubierta del restaurante del Parc Oceanogràfic. Esta parte del complejo fue ideada por el arquitecto Félix Candela, quien falleció antes de terminar el proyecto, el cual fue retomado, como se ha indicado anteriormente, por la empresa “Civis Project Management” quien encargó de manera parcial cada uno de sus edificios a diferentes estudios de arquitectura e ingeniería. En concreto este edificio fue diseñado por los in-

designed with these surfaces. Moreover, except in the “shell” or closing of Palau, in which a curved surface has been done, in the other cases the curvature is approximated by straight elements. Hemisfèric cover has a tubular structure in its interior, being the upper finishing layer the one that adapts to the structure. Something similar happens in the Oceanogràfic Àrtic zone cover, it is designed from a metal triangular double layer structure. For the realization of these structures straight elements have been used in the parallel and meridian sections directions of the different curved surfaces base of its design.

Among all the complex surfaces outstands the Oceanogràfic park restaurant cover. This part of the complex was designed by architect Felix Candela, who died before finishing the project, which was retaken, as noted above, by the company “Civis Project Management” who commissioned partially each one of the buildings to different architecture and engineering studies. Specifically, this building was designed by civil engineers Alberto Domingo and Carlos Lázaro, teachers at the Universitat Politècnica de València and not by Félix Candela as is oftenly thought. What was pretended with the building design is to tribute the Spanish architect by doing a similar design to one of his most recognized works, as is the restaurant “Los Manantiales” at Xoximilco, Mexico. The cover is composed out of eight hyperbolic paraboloid lobes radially repeated, limited by the section with a 61° inclined plane. The differential fact of this building respect the others in the complex is the correct application of the geometric design criteria in its design respect to the structural behavior and constructive realization of the element. Thanks to the double anticlastic curvature of the hyperbolic paraboloid surface a structure is achieved that besides saving a span between supports of 35.5 meters with an 8 meters central height and a 12 meters height at the lobes end, the concrete blade used is only 6 centimeters thick at 90% of its surface. Furthermore the double straight generation of the surface allows to execute it from a formwork system which, although complex, can be realized



8



9



8. Análisis del acceso del Museu de les Ciències:

- 1) Análisis de los trazados geométricos del acceso. El autor
 - 2) Esquema tridimensional de generación geométrica. El autor
 - 3) Imagen exterior del acceso. El autor
 - 4) Imagen de la entrada de un camión para la descarga de una exposición. El autor
- #### 9. Análisis de la cubierta del restaurante del Parc Oceanogràfic:
- 1) Proceso constructivo de la cubierta. Imagen facilitada por la empresa constructora
 - 2) Análisis de los trazados geométricos de la cubierta. El autor
 - 3) Esquema tridimensional de generación geométrica. El autor
 - 4) Imagen exterior de la fachada. El autor

8. Museu de les Ciències acces analyze:

- 1) Analysis of the geometric traces of the acces. The author
 - 2) Three-dimensional geometric generation scheme. The author
 - 3) Outer image of the cover. The author
 4. Image of a truck entrance to unload an exhibition. The author
- #### 9. Oceanographic Parc restaurant cover analysis:
- 1) Cover constructive process. Image provided by the construction company
 - 2) Analysis of the geometric traces of the cover. The author
 - 3) Three-dimensional geometric generation scheme. The author
 - 4) Outer image of the façade. The author

genieros de caminos Carlos Lázaro y Alberto Domingo, profesores de la Universitat Politècnica de València, y no por Félix Candela como se suele pensar. Lo que se pretendió con el edificio fue dar un homenaje al arquitecto español realizando un diseño similar a una de sus obras más reconocidas, como es el restaurante los Manantiales en Xoximilco, México. La cubierta está compuesta por ocho lóbulos de paraboloides hiperbólicos repetidos de manera radial y limitados por la sección con un plano que tiene una inclinación de 61° . El hecho diferencial de este edificio con el resto de los del complejo es la correcta aplicación de los criterios geométricos en su diseño respecto del comportamiento estructural y la materialización constructiva del elemento. Gracias a la doble curvatura anticlástica de la superficie paraboloides hiperbólicos se consigue una estructura que, además

de salvar una luz entre apoyos de 35,5 metros con una altura central de 8 metros y en los extremos de los lóbulos de 12 metros, la lámina de hormigón utilizada sea de tan sólo 6 centímetros de espesor en el 90% de su superficie. Además, la doble generación recta de la superficie permite ejecutarla a partir de un sistema de encofrado, que aunque complejo, se puede materializar con elementos de madera rectos. Otros aspectos a destacar son las aportaciones de los ingenieros, como son la incorporación de fibras de acero al hormigón para mejorar su resistencia o el diseño de rótulas plásticas en los apoyos para evitar la transmisión de momentos flectores a la cimentación. Estas aportaciones surgen de la investigación y experimentación en el campo de la geometría ligada a la arquitectura y las técnicas constructivas.

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 si-

with straight timber elements. Other aspects to highlight are the engineer's contributions, such as the addition of steel fibers in the concrete to improve its strength, or the design of plastic hinges at supports to prevent bending moments transmission to the foundation. These contributions arise from research and experimentation in the field of geometry linked to architecture and construction techniques.

A return to the architecture principles is needed. In these times of constant acceleration becomes necessary a quiet and peaceable reflection on the basis of the architecture, the Vitruvian triad. The formal integrity, unity between the elements, the coherence between design, structure and construction... is fundamental.

To do this, to get to what we might call an "adequate or proper architecture" research, experimentation ... and technical training is needed, which is being lost in our faculties for over artistic matters.

"We are in a historic moment in which geometry is being questioned as a basic pillar of knowledge in a technical world. However, it is seen that in a firm way or in a quieter anonymity, as main character inside a computer aided design software, geometry remains unquestioned in the execution of large structures " 3.

Geometry becomes the necessary support to master the software, make efficient structures and viable construction for the new buildings.

Furthermore, the recovery of architectural study methodologies in which geometric unique surfaces are used for its design is essential. One of these methodologies could be the use of working mockups as is well known Antoni Gaudí made with his catenary mockups for the Colonia Güell crypt or the Sagrada Família itself at Barcelona **14**, Eduardo Torroja to test his unique structures as the one designed to cover Frontón de Recoletos **15** and Félix Candela with his mockups or large scale prototypes which after start loading them, valued deformations and adequacy of the double curvature surfaces of the concrete structures. But I do not propose a return to these systems surely overcome today by new technologies, but the goal is the previous use these models of study for



the project design based on singular surfaces. A clear example of updating methodologies would be the use of three-dimensional printers that enable faster realization of models in various materials. ■

References

- 0/ SANCHIS SAMPEDRO, Francisco Javier. La geometría de las superficies arquitectónicas. Análisis formal geométrico de la Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia. Valencia: Doctoral Thesis - Universitat Politècnica de València, 2013.
- 1/ VITRUVIO POLIÓ, Marco. Los diez libros de arquitectura. Madrid: Alianza, 1995.
- 2/ CANDELA OUTERIÑO, Félix. El escándalo de la Ópera de Sidney. Madrid: Arquitectura, 1968.
- 3/ VALLEJO LOBETE, Esther – Fadón Salazar, Fernando – Cerón Hoyos, José Enrique. La geometría, soporte de la idea en el proceso del diseño. Graphica 2007 conference, Brasil.
- 4/ ENGEL, Heino. Sistemas de estructuras. Barcelona: Gustavo Gili, 1997.
- 5/ MKAMI, Yuzo – Murai, Osamu. Utzon's sphere: Sydney Opera House, how it was designed and built. Tokyo: Shokokusha, 2001.
- 6/ GARCÍA VALLDECABRES, Jorge. La métrica y las trazas en la iglesia de San Juan del Hospital de Valencia. Valencia: Doctoral Thesis – Universitat Politècnica de València, 2010.
- 7/ CRESPO CABILLO, Isabel. Control gráfico de formas y superficies de transición. Barcelona: Doctoral Thesis - Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- 8/ Developed by DeCasteljau and Bezier engineers (the one they take name of) at companies Citroën and Renault separately, getting to the same conclusions.
- 9/ ARAUJO ARMERO, Ramón. Geometría, técnica y arquitectura. Madrid. Tectónica nº17 Journal.
- 10/ DOCCI, Mario. Il disegno come strumento per l'analisi grafica dell'architettura. Conference at Universitat Politècnica de València, 1995.
- 11/ MONTES SERRANO, Carlos. Representación y análisis formal: lecciones de análisis de formas. Valladolid: Universidad de Valladolid, 1992.
- 12/ GENTIL BALDRICH, Jose María. "Sobre la proporción y los trazados geométricos de la arquitectura" en: Felipe Soler Sanz, Trazados reguladores octogonales en la arquitectura clásica, Valencia, General de Ediciones de Arquitectura, 2008, pp. 7-34. Reissued in 2014.
- 13/ CALATRAVA VALLS, Santiago. Santiago Calatrava's creative process: Sketchbooks, parte 2. Basel: Birkhäuser, 2001.
- 14/ GIRALT-MIRACLE, Daniel. Gaudí. La búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción. Barcelona: Ayto. de Barcelona, 2002.
- 15/ CHIAS NAVARRO, Pilar – Abad Balboa, Tomás. Eduardo Torroja: Obras y proyectos. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2005.

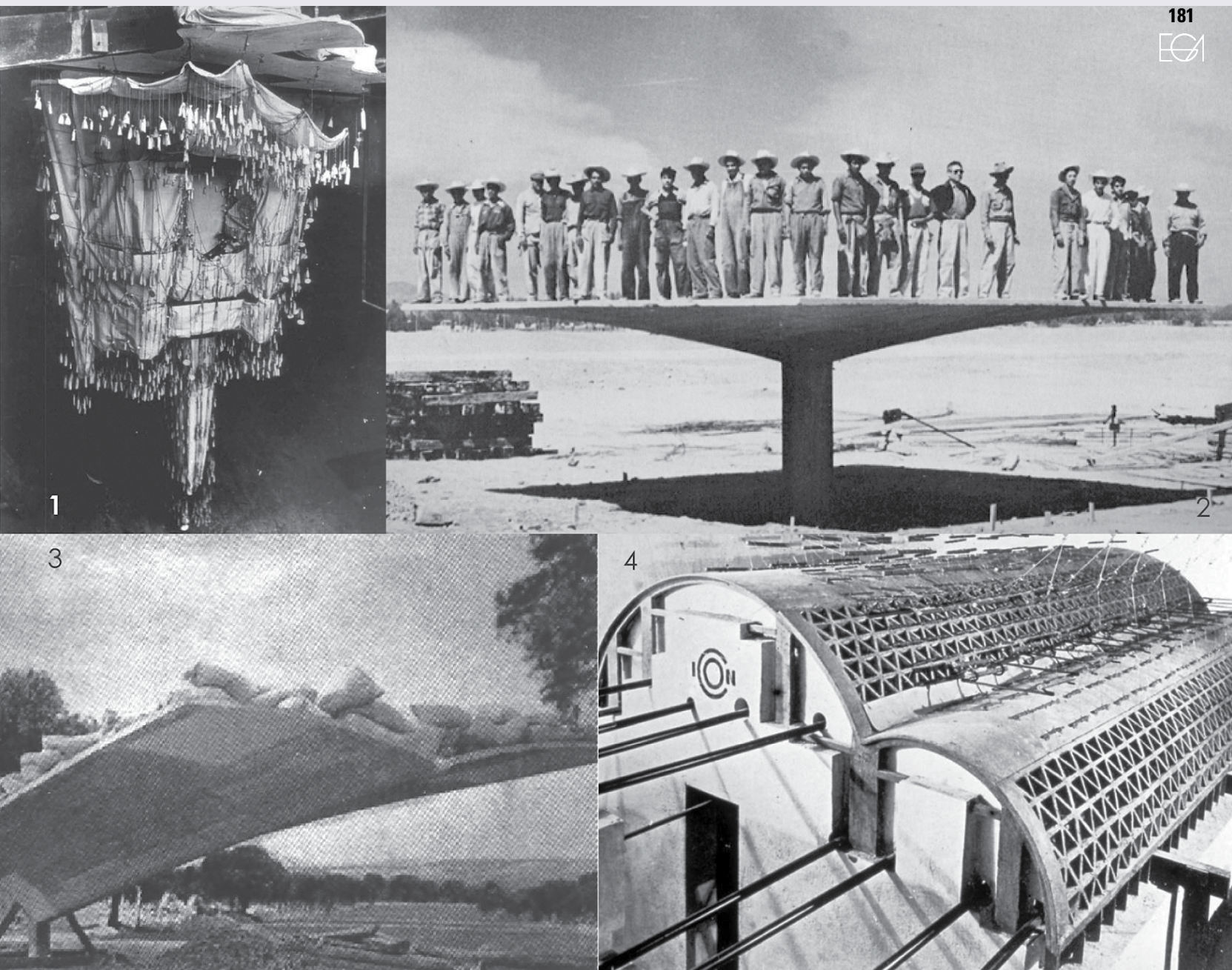
lencioso, como protagonista dentro de un programa de diseño asistido, la Geometría sigue siendo incuestionable para la ejecución de las grandes estructuras” 3.

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.

Por otro lado, la recuperación de metodologías de estudio de arquitectura en las que se utilicen superficies geométricas singulares para su diseño se hace imprescindible. Una de estas metodologías podría ser la utilización de maquetas de trabajo, tal y como ya hacía Antoni Gaudí con sus conocidas maquetas catenarias para la cripta de la colonia Güell o el mismo templo de la Sagrada Familia de Barcelona **14**, Eduardo Torroja para ensayar sus estructuras singulares como la que diseñó para la cubierta del Frontón de Recoletos **15** y Félix Candela con sus maquetas o prototipos a gran escala con los que tras la puesta en carga de los mismos valoraba las deformaciones e idoneidad de las superficies de doble curvatura de hormigón armado. Pero no propongo una vuelta a estos sistemas, con toda seguridad superados hoy en día por las nuevas tecnologías, sino que el objetivo es la utilización de estos modelos de estudio previo para la concepción del proyecto basado en superficies singulares. Un ejemplo claro de la actualización de las metodologías sería la utilización de las impresoras en tres dimensiones que permiten una rápida realización de modelos en diversos materiales. ■

Referencias

- 0/ SANCHIS SAMPEDRO, Francisco Javier. La geometría de las superficies arquitectónicas. Análisis formal geométrico de la Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia. Valencia: Tesis doctoral - Universitat Politècnica de València, 2013.
- 1/ VITRUVIO POLIÓ, Marco. Los diez libros de arquitectura. Madrid: Alianza, 1995.
- 2/ CANDELA OUTERIÑO, Félix. El escándalo de la Ópera de Sidney. Madrid: Arquitectura, 1968.
- 3/ 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.
- 4/ ENGEL, Heino. Sistemas de estructuras. Barcelona: Gustavo Gili, 1997.
- 5/ MKAMI, Yuzo – Murai, Osamu. Utzon's sphere: Sydney Opera House, how it was designed and built. Tokyo: Shokokusha, 2001.
- 6/ 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.
- 7/ CRESPO CABILLO, Isabel. Control gráfico de formas y superficies de transición. Barcelona: Tesis doctoral - Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- 8/ 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.
- 9/ ARAUJO ARMERO, Ramón. Geometría, técnica y arquitectura. Madrid. Revista Tectónica nº17.
- 10/ DOCCI, Mario. Il disegno come strumento per l'analisi grafica dell'architettura. Conferencia en la Universitat Politècnica de València, 1995.
- 11/ MONTES SERRANO, Carlos. Representación y análisis formal: lecciones de análisis de formas. Valladolid: Universidad de Valladolid, 1992.
- 12/ GENTIL BALDRICH, Jose María. "Sobre la proporción y los trazados geométricos de la arquitectura" en: Felipe Soler Sanz, Trazados reguladores octogonales en la arquitectura clásica, Valencia, General de Ediciones de Arquitectura, 2008, pp. 7-34. Se ha reeditado en 2014.
- 13/ CALATRAVA VALLS, Santiago. Santiago Calatrava's creative process: Sketchbooks, parte 2. Basel: Birkhäuser, 2001.
- 14/ GIRALT-MIRACLE, Daniel. Gaudí. La búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción. Barcelona: Ayto. de Barcelona, 2002.
- 15/ CHIAS NAVARRO, Pilar – Abad Balboa, Tomás. Eduardo Torroja: Obras y proyectos. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2005.



10

10. Maquetas y modelos de trabajo:

- 1) Maqueta catenaria para la cripta de la colonia Güell de Barcelona. Antoni Gaudí
- 2) Prueba de carga de modelo a escala real de un "paraguas invertido". Félix Candela
- 3) Prueba de carga de modelo a escala real para la cubierta del hipódromo de la Zarzuela. Eduardo Torroja.
- 4) Modelo a escala reducida del frontón de Recoletos. Eduardo Torroja

10. Mockups and working models:

- 1) Catenary mockup for the Colonia Güell crypt of Barcelona. Antoni Gaudí
- 2) Full-scale model load test of an "inverted umbrella". Félix Candela
- 3) Full-scale model load test for the Zarzuela Hipodrome cover. Eduardo Torroja.
- 4) Reduced scale model of the Frontón de Recoletos. Eduardo Torroja