

Gaudí. La búsqueda de la forma



Ajuntament de Barcelona



Generalitat de Catalunya



Museu d'Història de la Ciutat
Saló del Tinell
Barcelona

20 de marzo – 29 de septiembre de 2002

Gaudí. La búsqueda de la forma

Espacio, geometría, estructura y construcción

DANIEL GIRALT-MIRACLE (director)



EDITORES

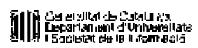


Ajuntament de Barcelona



Editorial Santillana

Con la colaboración de



Patrocinador oficial



Colaboradores

TRIANGLE ▼ POSTALS

iGuzzini

Medios de comunicación oficiales



LA VANGUARDIA

EXPOSICIÓN**Organización**

Ayuntamiento de Barcelona
Institut de Cultura

Sociedad Estatal para la Acción Cultural Exterior

Producción

Museu d'Història de la Ciutat
CTT de la Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Estructuras en la Arquitectura. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura

Idea y comisariado

Daniel Giralt-Miracle
Comisario general del Año Internacional Gaudí

Comisariado de arquitectura

Josep Gómez-Serrano

Comité Científico

Dr. Claudi Alsina, catedrático de Matemáticas. Departamento de Estructuras en la Arquitectura. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya

Dr. Jordi Bonet, arquitecto y director y coordinador de las obras de construcción del templo de la Sagrada Família

Mark C. Burry, catedrático de Innovación (Información Espacial – Arquitectura). School of Architecture and Design. RMIT University. Melbourne

Dr. Carles Buxadé, catedrático. Departamento de Estructuras en la Arquitectura. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya

Dr. Albert Casals, profesor titular. Departamento de Construcciones Arquitectónicas I. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya

Jordi Coll, arquitecto colaborador de las obras de construcción del templo de la Sagrada Família

Jordi Faulí, arquitecto adjunto de las obras de construcción del templo de la Sagrada Família

Dr. Josep Gómez-Serrano, catedrático. Departamento de Estructuras en la Arquitectura. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya

Dr. Josep-Lluís González, catedrático. Departamento de Construcciones Arquitectónicas I. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya

Dr. Joan Margarit, catedrático. Departamento de Estructuras en la Arquitectura. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya

Con la colaboración de
Jordi Cussó
Ramon Espel
Jasmina Pérez
Àlex Vila

Coordinación de la UPC
Gemma Vidal

Coordinación

Museu d'Història de la Ciutat
Antoni Nicolau, director
Jesús Luzón, Lina Ubero
y Joaquim Vicente
Soporte técnico:
Germano Bozzelli

Dirección de Cooperación Cultural

ICUB
Rosa Mach, directora
Iu Pino

Imagen y diseño de la exposición
Lluís Pau IDP (MBM)

Diseño gráfico

Josep Bagà

Imágenes infográficas

Centro de Aplicaciones de la Informática a la Representación de Arquitectura y Territorio, CAIRAT – UPC (Joan Font i Comas y Genís Àvila i Casademont, con la colaboración de Lluís Giménez i Mateu y Borja J. Gutiérrez Febles)

Fotografías

Pere Vivas y Ricard Pla
Triangle Postals

Audiovisuales

Realización y montaje:
Lunatus. Comunicación Audiovisual
Lluís Piqué, Noemí Reñé, Bernard Schetelat
Música: Nico

Maquetas

Taller de la Junta Constructora
Templo de la Sagrada Família
Construccions Metàl·liques Soler SL
Modelfusa SL
Pendulum
Innoe SCP
Anjosmarc SL
Models Barna SL

Difusión y actividades complementarias
Judit Vives, Mariona Teruel, Júlia Quintela, Anna Alarcón (MHCB y NEXT)

Revisión y traducción de los textos
Capiletra SL: Anna Baldirà,
Sue Brownbridge, Carlos Mayor
y Mireia Oliva

Montaje de la exposición
Croquis

Iluminación
iGuzzini

CATÁLOGO

© de la edición
Ayuntamiento de Barcelona
Institut de Cultura
Lunwerg Editores SA

Dirección

Daniel Giralt-Miracle

Asesoramiento científico
Claudi Alsina
Josep Gómez-Serrano

Documentación
Aleix Catasús

Diseño gráfico
Josep Bagà

© de los textos, los autores

Revisión y traducción de los textos
Capiletra SL: Carlos Mayor
y Mireia Oliva

© fotografías
Fondo Lunwerg (Marc Llimargas, Xurxo S. Lobato, Ramon Manent, Domí Mora, Francisco Ontañón y Manel Pérez)
Fundació Caixa Catalunya (Pau Giralt y Humberto Rivas)
Institut Amatller d'Art Hispànic – Arxiu Mas
Junta Constructora Templo de la Sagrada Família (archivo y Jordi Tarrés)
Reial Càtedra Gaudí (UPC)

Josep-Lluís González
Ramon Manent
Fructuós Mañà

© fotografía de la cubierta
Miquel Badia

© imágenes infográficas
Centro de Aplicaciones de la Informática a la Representación de Arquitectura y Territorio, CAIRAT – UPC (Joan Font i Comas y Genís Àvila i Casademont, con la colaboración de Lluís Giménez i Mateu y Borja J. Gutiérrez Febles)

Jordi Coll

© dibujos técnicos
Amadeu Monreal

Producción
Lunwerg Editores

ISBN: 84-7782-724-9 (cartoné)
ISBN: 84-7782-727-3 (rústica)
DL: B-13529-2002 (cartoné)
DL: B-13533-2002 (rústica)

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida, ni en todo ni en parte, ni registrada en, o transmitida por, un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electroóptico, actual o futuro, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de los titulares de los copyrights.

La exposición «Gaudí. La búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción», que presentamos con motivo de la celebración del Año Internacional Gaudí, supone uno de los actos más destacados y ambiciosos que ha preparado el Ayuntamiento de Barcelona para conmemorar esa efeméride.

Para dar a conocer todos los aspectos de la obra de Gaudí, hemos querido que hubiera una exposición centrada en la vertiente más técnica de su arquitectura, particularmente los aspectos relacionados con los conceptos de espacio, geometría, estructura y construcción.

No puede entenderse la obra de Gaudí sin comprender la sociedad en la que se sitúa esa producción. Gaudí y Barcelona son un binomio indivisible. En Barcelona, y básicamente en el barrio del Eixample, donde se encuentra la mayor parte de la obra gaudiniana, se da una mezcla singular: por un lado, la creatividad del arquitecto, que no sigue la tradición académica y que con pocos medios y materiales nuevos experimentó como si fuera científico, aportando soluciones técnicas que respondían a las nuevas necesidades de la ciudad en el cambio de siglo, y, por el otro, la racionalidad de Ildefons Cerdà en la concepción de ese ensanche urbano. Ambas figuras se complementan y dan una visión insuperable de nuestra ciudad.

Gaudí sintetizó lo que conocía de las escuelas geométricas y constructivas de Francia y Alemania y la información que tenía de la evolución estética que se daba en Inglaterra y en Austria; de ese modo consiguió una arquitectura independiente, singular e innovadora, técnica y artísticamente diferente de la que se hacía en Europa durante los mismo años. Así lo ponen de manifiesto los estudios que se han dedicado a su obra y que demuestran que fue un creador en todos los ámbitos, un creador que entendía su obra como un reto constante y que siempre estuvo dispuesto a buscar nuevos lenguajes y nuevas alternativas a su arquitectura.

Esta exposición nos acercará, precisamente, al descubrimiento de esa faceta de Gaudí: los nuevos lenguajes y las nuevas soluciones a los que llegó el genial arquitecto inspirado por la pasión por las formas de la naturaleza y por la búsqueda constante de un estilo original y propio.

JOAN CLOS

Alcalde de Barcelona

La figura de Antoni Gaudí es una de las más universales de las generaciones de artistas que, en el tránsito del siglo xix al xx, protagonizaron una auténtica revolución de la cultura europea, identificada con la modernidad tal y como se ha entendido hasta nuestros días. El gran maestro del modernisme catalán, intérprete apasionado de la tradición y fuente de fecundas innovaciones, es también, probablemente, el mejor arquitecto español desde Juan de Villanueva. Gracias a él, Barcelona figura, junto a Viena, Bruselas, Glasgow o Milán, entre las grandes ciudades de nuestro continente que impulsaron la renovación del lenguaje arquitectónico con mayor decisión y envergadura. Por ello, el 150 aniversario de su nacimiento en 1852 constituye una oportunidad singular para reflexionar sobre los complejos entramados ideológicos y formales de una obra que desborda cualquier clasificación convencional y se muestra aún hoy capaz de suscitar las más diversas sugerencias.

Esta muestra pretende ayudarnos a leer las creaciones del maestro a la luz de su tiempo, a través de su configuración del espacio, de la geometría de sus formas, de la estructura que las sustenta y de los procesos de su construcción. Las ideas y los métodos desarrollados en un conjunto excepcional de edificios erigidos en Barcelona, en algunas otras poblaciones de Cataluña y en otros lugares de España, como Comillas, Astorga o León, aparecen explicados a partir de los soportes más idóneos para hacer comprensible un mensaje complejo pero fascinante como el que se desprende de la personalísima visión gaudiniana. Ése es el itinerario que aparece expuesto en este montaje, que conjuga con especial intensidad el rigor científico y la capacidad divulgativa. Por ello, al sumarse gustosamente a la organización de esta muestra, impulsada por el Institut de Cultura de l'Ajuntament de Barcelona con ocasión del Año Internacional Gaudí 2002, la Sociedad Estatal para la Acción Cultural Exterior espera cumplir uno de sus objetivos esenciales: dar a conocer las mejores contribuciones de la cultura y el arte españoles de todos los tiempos.

JUAN CARLOS ELORZA GUINEA

Presidente de la Sociedad Estatal para la Acción Cultural Exterior

El espíritu indagador de Antoni Gaudí es uno de los rasgos que mejor definen las propuestas artísticas y arquitectónicas que planteó a través de su obra.

Su concepción libre y experimental de la arquitectura le llevó a reflexionar constantemente sobre su labor recogiendo de la tradición todo lo que le parecía válido y buscando siempre soluciones en las que el saber constructivo, la lógica estructural y la creatividad geométrica se fundieran en un todo.

A simple vista, lo que más nos sorprende y atrae de la obra gaudiniana es su dimensión plástica, la fuerza de las formas, la expresividad de los materiales y, muchas veces, la variedad de los colores utilizados. Sin embargo, Gaudí entendía los edificios como una unidad, por lo que su originalidad no se limitó a la dimensión más externa de la obra, sino que también se dirigió a la búsqueda de soluciones tridimensionales al servicio de las estructuras que debían soportar los edificios y de la renovación de la arquitectura de su época.

Gaudí abrió las puertas a experimentaciones posteriores con su investigación de las superficies regladas y del mundo espacial de los arcos funiculares y catenarios, de difícil cálculo numérico, por medio de maquetas, modelos y cálculos gráficos, lo que le permitió llegar a aplicar soluciones prácticas y económicas en su arquitectura.

Precisamente a través de maquetas, fotografías, planos y dibujos es como la exposición «Gaudí: la búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción» nos acerca de forma atractiva y clara al lenguaje imaginativo e innovador de Antoni Gaudí.

Esta muestra supone para los que ya conocen la obra del genial arquitecto una nueva oportunidad de profundizar en ella y de renovar su admiración, mientras que para quienes aún no se han acercado a la labor gaudiniana es una ocasión de descubrirla.

FERRAN MASCARELL

Concejal de Cultura del Ayuntamiento de Barcelona

ÍNDICE

PREFACIOS

- 11** Joan Clos, alcalde de Barcelona
13 Juan Carlos Elorza, presidente de la SEACEX
15 Ferran Mascarell, concejal de Cultura
del Ayuntamiento de Barcelona

16 INTRODUCCIÓN

Daniel Giralt-Miracle

26 GEOMETRÍA GAUDINIANA

Claudi Alsina y Josep Gómez-Serrano

46 ESTRUCTURA Y ESPACIO

Carles Buxadé y Joan Margarit

58 GAUDÍ Y LA CONSTRUCCIÓN

Josep-Lluís González y Albert Casals

LA BÚSQUEDA DE LA FORMA

72 BÓVEDAS CONVEXAS

Josep-Lluís González y Albert Casals

82 INTERSECCIÓN DE PARABOLOIDES

Carles Buxadé y Joan Margarit

88 CONOIDES

Claudi Alsina

96 ARCOS CATENARIOS

Josep Gómez-Serrano

104 COLUMNA DE DOBLE GIRO

Jordi Bonet i Armengol

112 BÓVEDAS HIPERBÓLICAS

Carles Buxadé y Joan Margarit

118 MACLA DE GEOMETRÍAS

Claudi Alsina

126 PRINCIPALES OBRAS DE GAUDÍ

Santi Barjau

158 BIOGRAFÍA

Santi Barjau

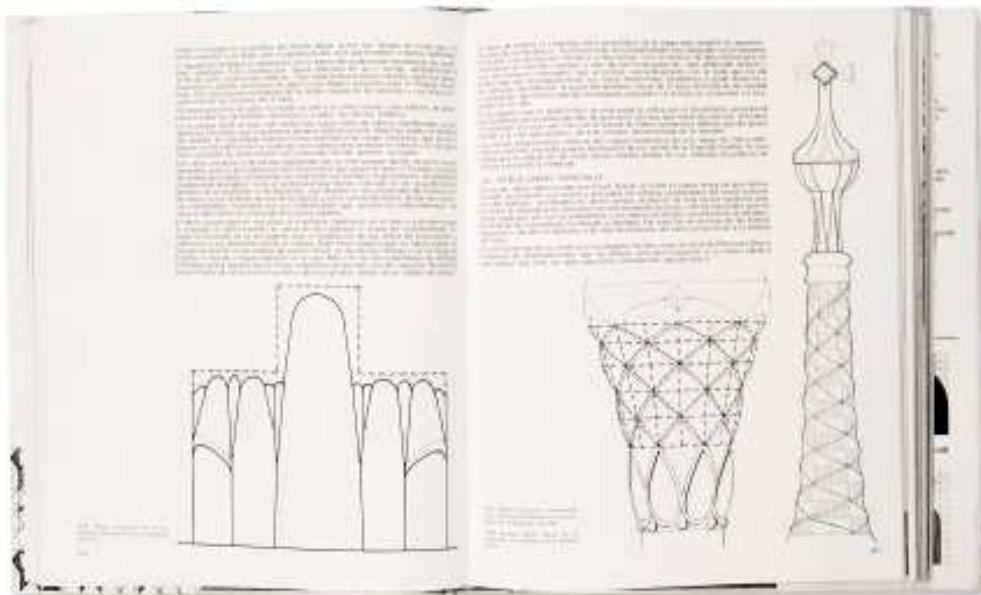
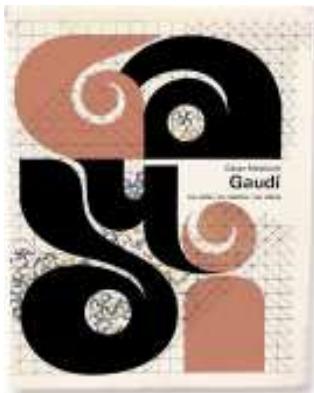
163 BIBLIOGRAFÍA

ES PROBABLE QUE EN LA
CONTINUA EVOLUCIÓN DE LA
ARQUITECTURA MODERNA LAS
ÚLTIMAS EXPERIENCIAS
GAUDINIANAS AUMENTEN DE
VALOR Y SEAN APRECIADAS
PLENAMENTE. ENTONCES SE
RECONOCERÁ LA GRANDEZA DE
SU PAPEL DE PIONERO Y DE
PRECURSOR.

JOSEP-LLUÍS SERT (1955)

INTRODUCCIÓN

DANIEL GIRALT-MIRACLE

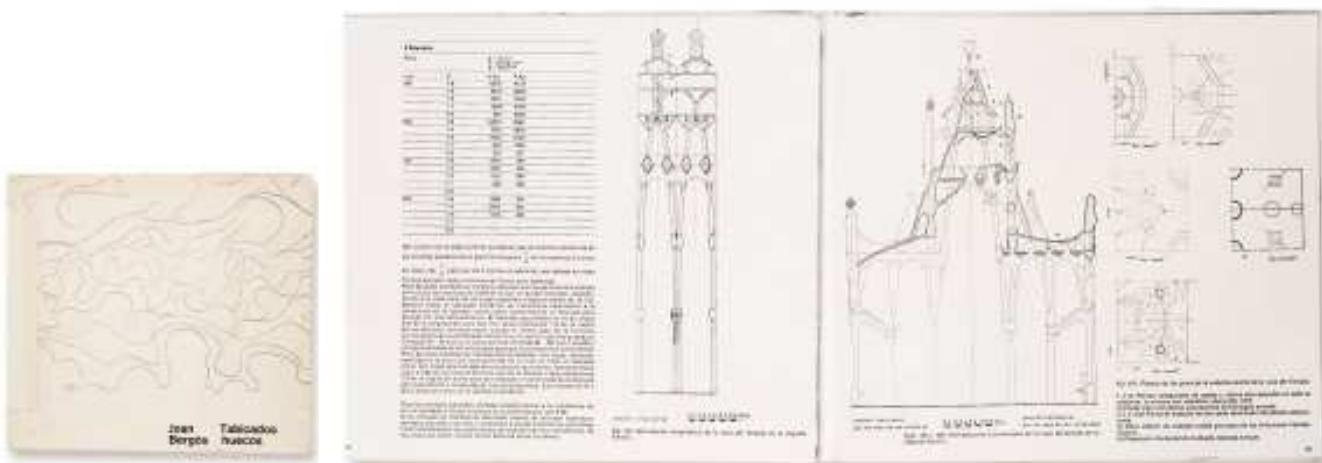


En 1967, y como culminación de su trayectoria como historiador de la arquitectura, y biógrafo de Gaudí Cèsar Martinell publicó el libro *Gaudí: su vida, su teoría, su obra*, en el que daba a los aspectos artísticos de la obra gaudiniana la misma importancia que a los técnicos.

La idea germinal de esta exposición se remonta a 1967, cuando en el acto de presentación del libro *Gaudí: su vida, su teoría, su obra*, de Cèsar Martinell (1967), en la sede del Colegio de Arquitectos de Cataluña, tuve el privilegio de conocer al autor y de hablar largo y tendido con él, uno de los discípulos más próximos a Gaudí y, a mi parecer, uno de los mejores intérpretes del arquitecto. Fue allí donde descubrí la importancia de las componentes geométricas y estructurales de su obra. Acostumbrados como estábamos a disertar sobre la morfología gaudiniana y sus explícitas cualidades plásticas, oír hablar del «espíritu de síntesis» de Gaudí fue, como mínimo, sorprendente. Martinell, moviendo las manos, ayudándose del lápiz y de esbozos que iba haciendo sobre el papel al ritmo del discurso, nos explicaba de la forma más sencilla las soluciones más complejas que dan forma a la arquitectura de Gaudí. Sin dejar de utilizar un lenguaje técnico, pero sin necesidad de recurrir a fórmulas algebraicas enrevesadas, se refería a figuras como el paraboloid hiperbólico, el helicoide o el hiperboloid, y conseguía que el público prestase atención a la representación visual de cada una de esas formas, de modo que esa geometría del espacio se convertía en algo asequible a todo el mundo.

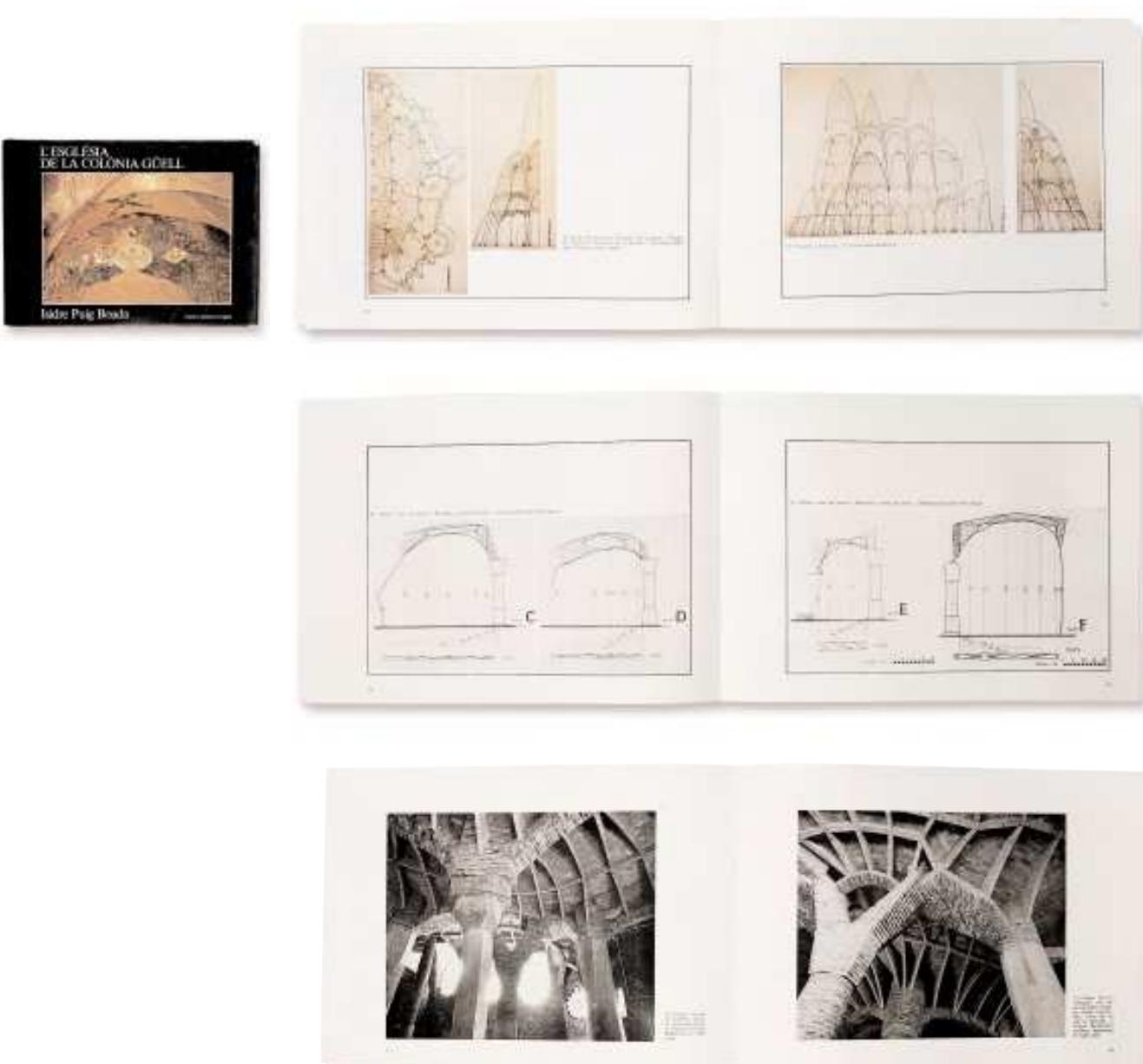
Con aquella iniciación nos adentramos en la lectura del libro de Martinell, definitiva para acabar de abrir un amplio horizonte y desvelar un gran interés por conocer a Gaudí en profundidad, tanto en la dimensión más externa de su obra como en la razón de ser de todo lo que la sostiene y estructura. Años más tarde, en otro libro de Martinell, *Gaudí i la Sagrada Família, comentada per ell mateix* (1999), descubrí el texto «Ensenyament de la geometria per la visió», en el que el autor recordaba cómo Gaudí explicaba todas las proyecciones del parabolóide hiperbólico jugando con listones e hilos de colores con los que construía un instrumento que, puesto de una forma determinada en la trayectoria de un rayo de sol, proyectaba las sombras de la figura. Llegado ese punto, Martinell preguntaba, parafraseando a Gaudí: «¿No sería bonita una gran geometría explicada así?». Y subrayaba que esa forma de hacer las cosas al mismo tiempo que se ven permite que no se olviden nunca: «Es la mejor demostración; cuando uno ha visto algo, dice: "Sí, es cierto, yo lo he visto". Cuando en matemáticas queda demostrado algo, se dice que "es evidente". La "evidencia" es a los ojos del espíritu lo que la "visión" a los del cuerpo». Se trata de una teoría muy próxima a la que años después formularía Rudolf Arnheim (1986, 1999), que afirmaba que todo lo que se percibe visualmente es pensamiento; los razonamientos, intuición, y la observación, invención.

Cabe señalar que experiencias y estudios posteriores me ayudaron en ese proceso de visualización de la obra de Gaudí y reafirmaron mi voluntad de conocer su génesis, los métodos que seguía el arquitecto y los resultados que consiguió. En ese sentido,



Tabicados huecos: bases para las dimensiones de las bóvedas y cubiertas del Templo Expiatorio de la Sagrada Família (1965), de Joan Bergós, arquitecto y colaborador de Gaudí, es uno de los estudios más interesantes que se han escrito sobre los aspectos técnicos y constructivos de la obra de Gaudí.

quiero destacar los libros de Joan Bergós (1954, 1965) y de Isidre Puig Boada (1952, 1976), los ensayos posteriores de Joan Bassegoda (1989, 1992) y, sobre todo, la miscelánea *Gaudí, rationalist met perfecte materiaalbeheersing*, del Gaudí-groep Delft, publicada por la Universidad de Delft en 1989, pero también la memoria *Das Modell* (Tomlow, 1989) y *La Sagrada Familia. De Gaudí al CAD* (Gómez-Serrano, 1996), editados por la Universidad de Stuttgart (1989) y la Politécnica de Cataluña (1996), respectivamente. El mundo interior gaudiniano se hace mucho más difícil de entender, aunque las descripciones sean muy precisas y ajustadas, sin esas contribuciones, y algunas más, como la del libro *L'últim Gaudí* (2000), de Jordi Bonet, que recoge la tradición del taller de Gaudí y la documentación preexistente, y nos descubre las leyes de proyecto y de construcción que rigen el proyecto de la Sagrada Família.



En esta monografía (1976), Isidre Puig Boada analiza e interpreta con precisión las bases y el proceso constructivo de la iglesia de la Colònia Güell.

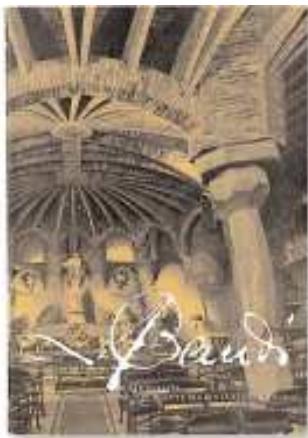
Estas aportaciones, desde las más históricas hasta las más actuales, que se sirven de las nuevas tecnologías, demuestran que los recursos visuales, especialmente los que tienden a la síntesis, tanto si son dibujos como si son perspectivas o maquetas, son totalmente necesarios para captar la esencia de la obra de Gaudí.

La geometría del espacio, tan fácil, pues, de comprender visualmente, pero tan difícil de explicar con palabras, apasionó a Gaudí desde su juventud, y es lo que le obsesionó progresivamente en el transcurso de su vida. De hecho, está presente en todos sus edificios, si bien los exponentes más emblemáticos del uso creativo que le dio son la iglesia de la Colonia Güell y el proyecto de la Sagrada Família.

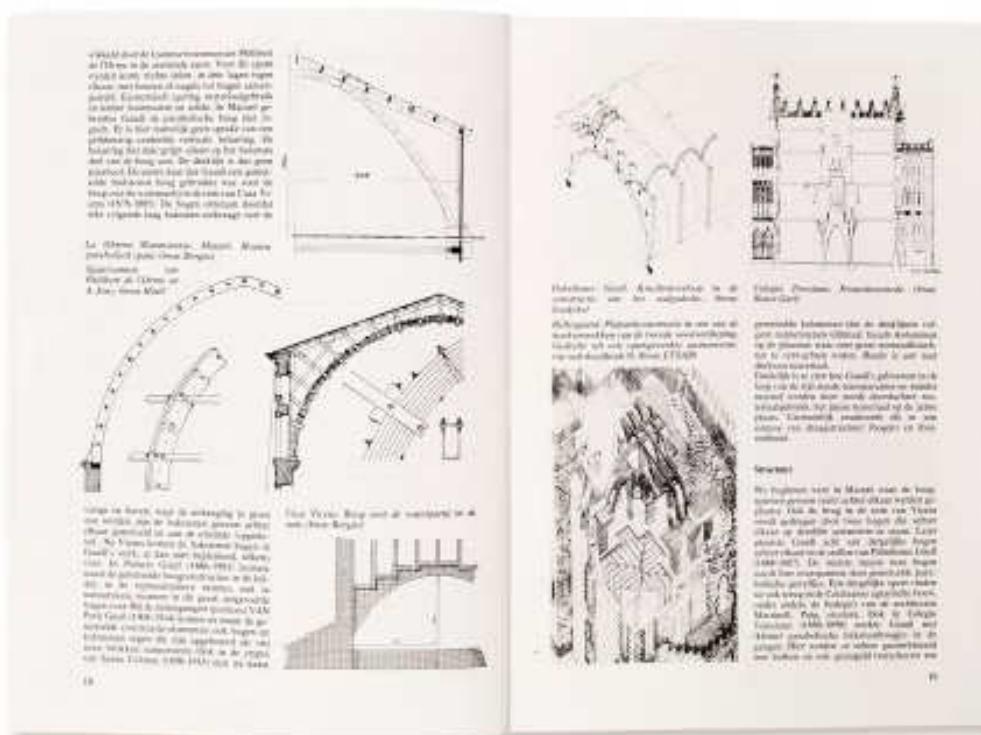
En general, y evidentemente hay excepciones, la arquitectura convencional se ha hecho a partir de una geometría que, a pesar de utilizar formas simples (como los triángulos,

los cuadrados y los círculos en el plano, y los prismas, los cubos, las pirámides, los cilindros, las esferas, etcétera, en el espacio), es el resultado de la aplicación rigurosa de la regla y el compás. Por eso, cuando Gaudí descubrió (que no inventó, evidentemente) las denominadas superficies regladas, compuestas por líneas rectas, que determinan superficies curvas en el espacio, como el paraboloide, el hiperboloide, el helicoide y las que se derivan de ellos, encontró un campo de exploración que le fascinó tanto que le dedicó los últimos años de su vida. Y es que las superficies regladas (que, por otro lado, son fáciles de resolver constructivamente) le permitieron ampliar el repertorio de sus formas y conseguir soluciones hasta entonces inéditas, tanto en los muros como en las bóvedas o las cubiertas.

Dos son las vías que llevaron a Gaudí a trabajar con la geometría del espacio reglado: una es el análisis que desde la infancia había hecho de las formas naturales (troncos



La aportación de los arquitectos y los estudiosos del llamado Grupo de Delft (de la universidad de esa ciudad), que impulsó Jan Molema, se recoge en *Gaudí: rationalist met perfecte materialbeheersing* (1979), libro que sintetiza los estudios anteriores y abre las puertas a numerosas interpretaciones posteriores.



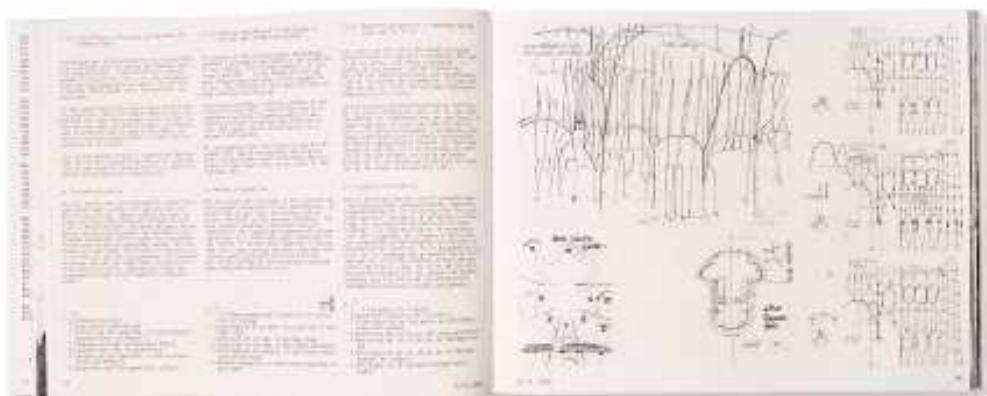
de árboles, huesos, crustáceos, etcétera), y la otra, su dominio de la geometría del espacio y la necesidad que tenía de experimentar con las tres dimensiones.

Es cierto que Gaudí se inspiró en las formas orgánicas, en los modelos naturales y, sobre todo, en el espíritu de síntesis al que aludía Martinell, pero también lo es que detrás de los elementos más simbólicos de su obra hay un apoyo estructural, un planteamiento funcional, una economía de la forma basada en la experiencia y la observación de los hechos. Su conocida sentencia «Ser original es acercarse a los orígenes» (Puig, 1981; Gaudí, 1982) no debe interpretarse como un simple retorno a las formas y las estructuras procedentes de la naturaleza (geología, mineralogía, botánica y anatomía) o una imitación de éstas, que, como hemos dicho, ejercieron una gran influencia en su obra, sino como un volver a recorrer el camino que hace hincapié en el «proceso inventivo como

tal» y «no repite un lugar común» (Pane, 1984), como ha apuntado Roberto Pane; es decir, como «una búsqueda de las problemáticas en su propio origen» (Varios autores, 1978), en palabras de Alexandre Cirici.

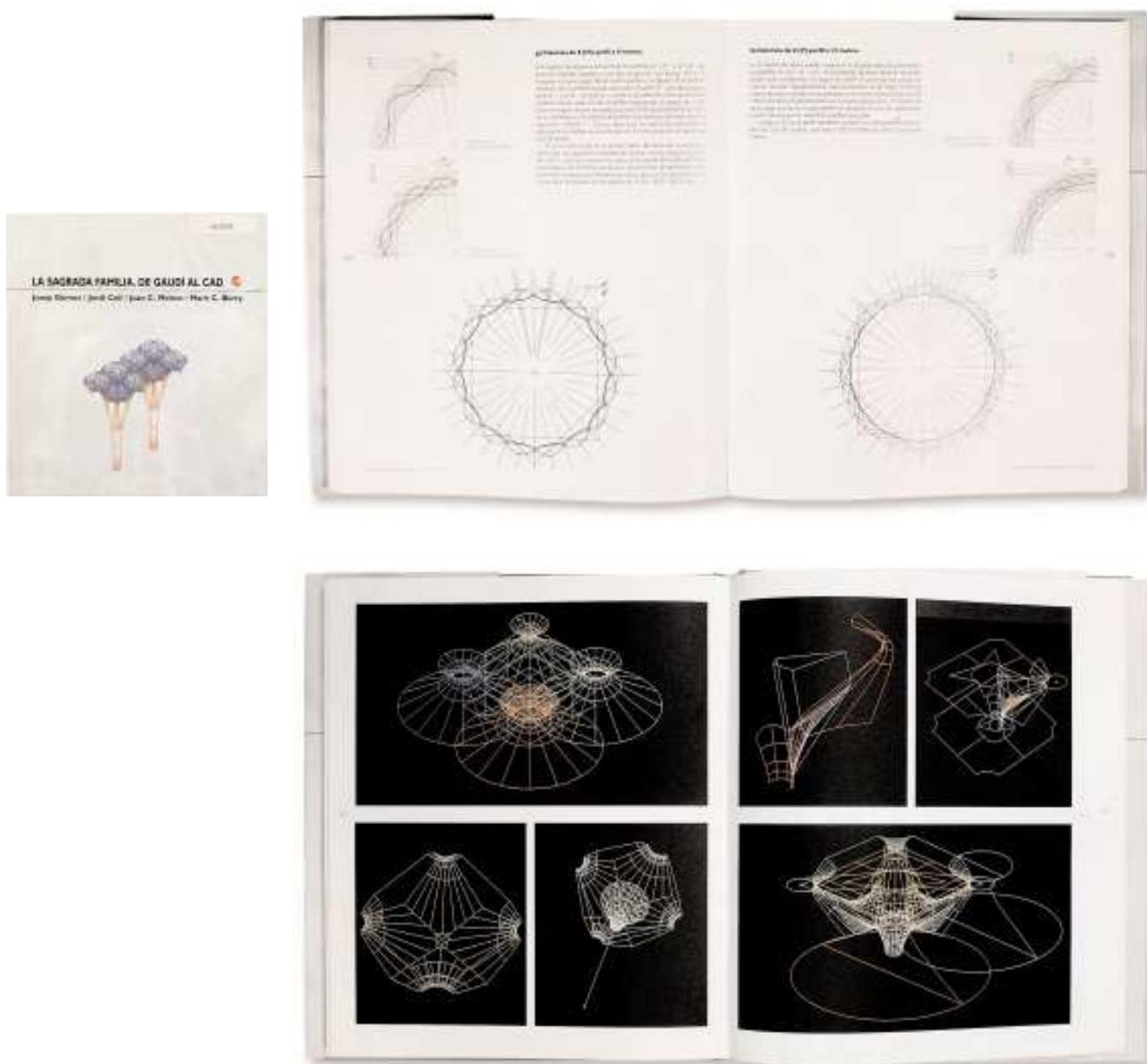
También puede tener que ver con ese retorno a los orígenes el reconocimiento de Gaudí por el mundo de los oficios, en el cual se había formado y que, sin duda, le había influido. Al arquitecto le gustaba conjugar la visualidad y la manualidad, por eso se inclinó enseguida hacia las experiencias tridimensionales, por el mundo de las maquetas, a pequeña o gran escala, elementos que al natural o fotografiados manipuló hasta conseguir alternativas formales, fácilmente visualizables, como puede comprobarse en los estudios de la iglesia de la Colonia Güell. El de Gaudí era un mundo de pruebas, de tanteos, de errores, de correcciones que le permitían aproximarse al máximo a la solución de los problemas, y en eso invirtió el camino seguido por las técnicas de la construcción hasta aquel momento: Gaudí no pasó del cálculo y la teoría a la realización del proyecto, sino de la maqueta al cálculo, y posteriormente procedió al dibujo y a la construcción. Vemos, pues, que llegó a esas conclusiones por la vía del ensayo, recorriendo de nuevo, una y otra vez, el camino iniciado y descubriendo propiedades o encontrando soluciones sobre la marcha. Quizás por eso se atrevía a afirmar: «Mis ideas estructurales y estéticas son de una lógica indisputable».

La forma que tenía Gaudí de entender la ciencia y la técnica se acercaba a la de Leonardo, que lo pasaba todo por el cedazo de la experimentación. Ambos llegaron a la teoría a partir de la observación y del análisis y, en ese proceso, el dibujo, las maquetas, las probaturas, etcétera, son esenciales. Por eso Leonardo y Gaudí, Gaudí y Leonardo



En 1989, y como iniciativa de Harald Szeemann para una exposición de la Kunsthaus de Zurich, los arquitectos Frei Otto, Rainer Graefe, Arnold Walz y Jos Tomlow no sólo reconstruyeron la maqueta estereofuncilar de Gaudí, sino que también editaron un estudio a fondo sobre ella: *Das Modell*.

pudieron ir más allá de las superficies y descubrir las fuerzas internas de los cuerpos. No obstante, la de Gaudí no es una geometría como la que Leonardo denominó *De ludo geometrico* (Varios autores, 1984), que permite jugar con las formas y las proporciones. Al contrario, la suya está destinada a facilitar los procesos constructivos, para sacar el máximo provecho de las fórmulas tradicionales y asegurar la estabilidad de los edificios. La de Gaudí es una geometría que nace de los descubrimientos personales que hace después de una investigación continuada. Gaudí ve las formas y, una vez las tiene determinadas mentalmente, busca los medios para transformarlas en objetos físicos construibles. Por ese motivo su estudio no tenía nada que ver con un despacho de arquitecto convencional, sino que se parecía más a un obrador, donde podía trabajar con los recursos, los elementos y los materiales más variados: el dibujo, la fotografía, maquetas de pequeña y



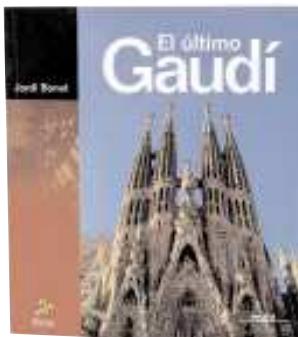
La informática aplicada a la arquitectura permite iniciar una nueva línea de investigación en torno a la geometría y las estructuras de la obra gaudiniana. *La Sagrada Familia: De Gaudí al CAD* (1996) es el primer gran estudio basado en esos recursos.

gran escala, focos de luz eléctrica, espejos, moldes, cerámica, cristal, metales, etcétera. Todo estaba permitido en ese espacio, a medio camino entre el taller del artista romántico y los laboratorios de ensayo modernos.

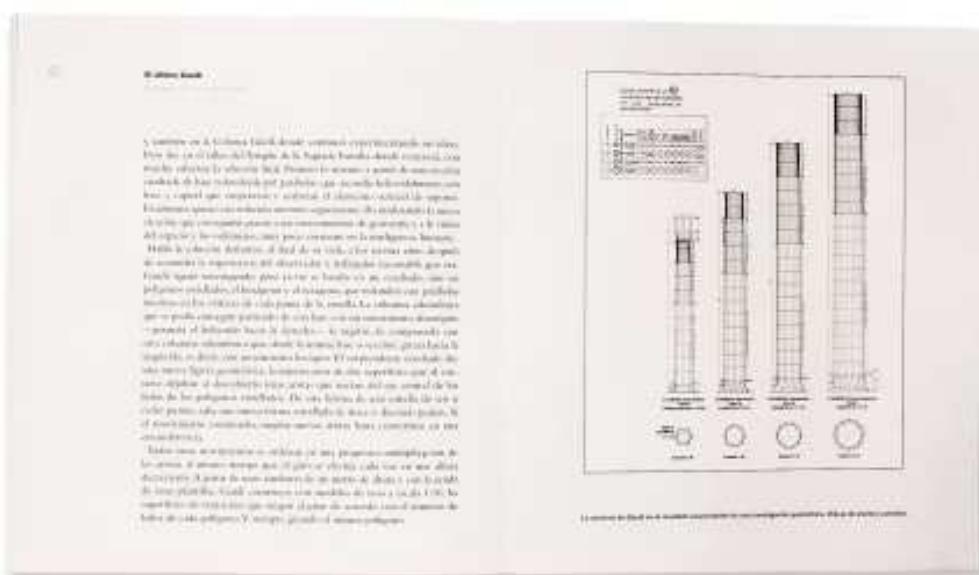
Según Gaudí, «para que una obra arquitectónica sea bella, es necesario que se ajusten todos sus elementos en cuanto a situación, dimensión, forma y color», pues todas esas cualidades de la obra arquitectónica están íntimamente relacionadas. Si entendemos la belleza en el sentido platónico, es sinónimo de bondad, de autenticidad y de validez, y ése es el sentido de lo bello, lo ético y lo estético que utilizaba Gaudí. Sus formas, además de la excelencia estructural, tienen una gran calidad estética. En su obra, forma y función se identifican y se funden en una sola cosa. Quizás por eso es un lugar común recurrir a los orígenes de Gaudí y situarlo en el mundo del artesanado, el de los

oficios o, incluso, el de la escultura. El propio Pevsner, en una primera época, le consideró «esencialmente un artesano» (Pevsner, 1992), y otros críticos se han limitado a hablar de su prolífico y variado mundo formal y de su marcado carácter expresionista. Es evidente que Gaudí tenía un gran conocimiento de las técnicas artesanas, aprendidas, como hemos dicho, en la casa paterna y en los talleres de los mejores artesanos de la época (forjadores, vidrieros, carpinteros, etcétera), pero esa vertiente no puede hacer nunca que obviemos el alto nivel de preparación científica y técnica que llegó a alcanzar. Gaudí era esencialmente un arquitecto, un arquitecto que conocía muy bien los recursos del oficio, capaz de utilizar todas las formas de las geometrías planas y espaciales, un apasionado de la construcción que se había formado en una escuela de arquitectura recién creada que llevaba al más alto nivel universitario los estudios de la construcción, hasta entonces impartidos por la Escuela de Maestros de Obras.

Es cierto, no obstante, que no han faltado a lo largo de la historia estudiosos que, quizás desde un nivel teórico muy especializado, ya han explicado e interpretado la geometría y la construcción gaudiniana en detalle. Cabe mencionar aquí trabajos tan importantes como los de Joan Rubió (1913), Domènec Sugrañes (1923) o Francesc Folguera (1928), o

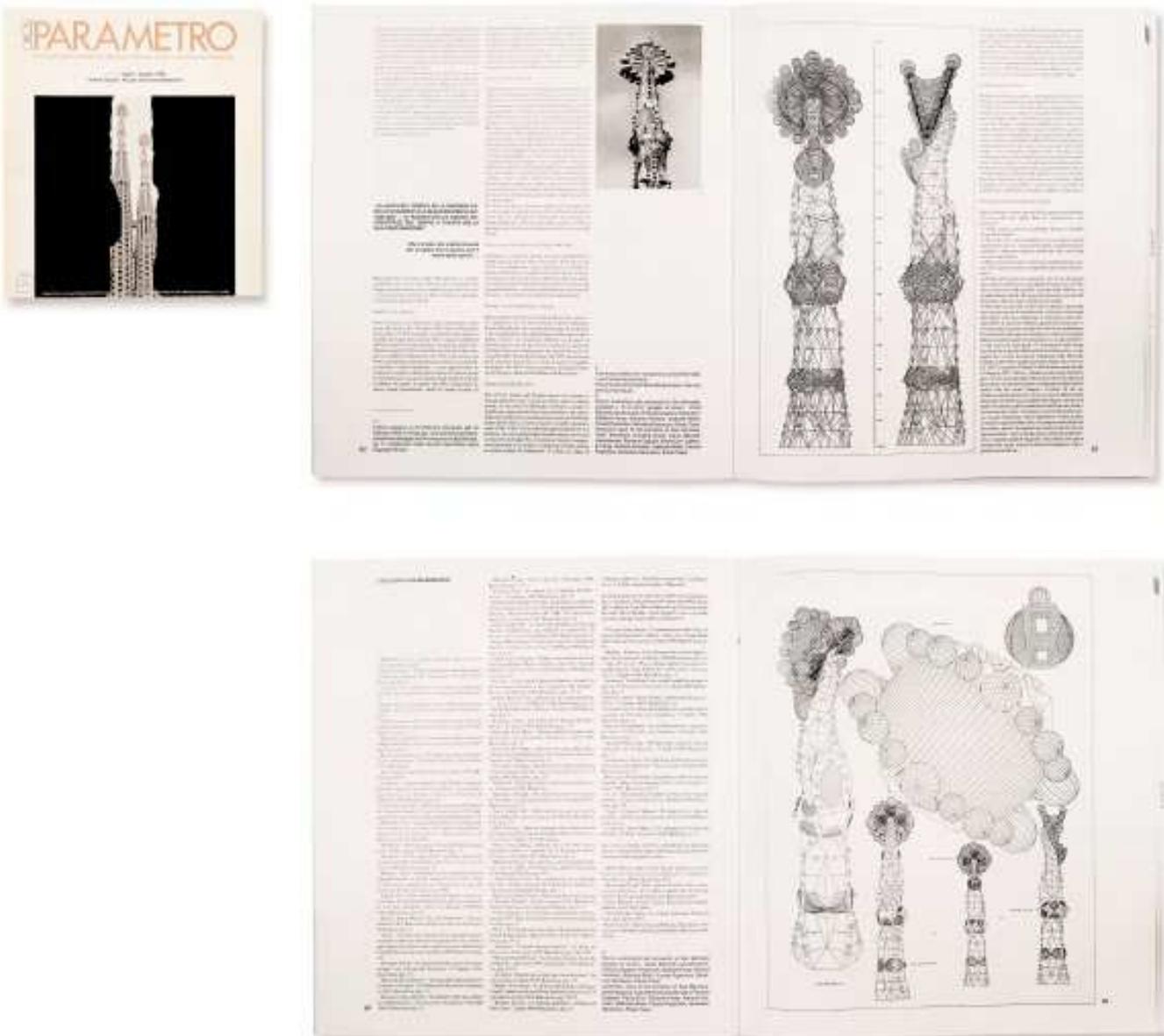


Como culminación de un largo proceso de análisis y verificación de la geometría gaudiniana, Jordi Bonet publicó en 1999 *L'últim Gaudí*, que pone de manifiesto las leyes arquitectónicas y la modulación geométrica a partir de las que se proyectó la Sagrada Família. Posteriormente se ha editado en otros idiomas.



aportaciones posteriores como las de George R. Collins (1960), Salvador Tarragó (febrero 1981), Joan Bassegoda i Nonell (1986) o Carlos Fernández Casado (2000), contribuciones todas de un interés indiscutible que se han convertido, me atrevo a afirmar, en la base o el punto de partida de la investigación que hoy se lleva a cabo con ayuda del soporte informático, lo cual, por otro lado, facilita mucho la comprensión de la geometría gaudiniana.

Con todo, la literatura crítica y los estudios sobre Gaudí han otorgado hasta ahora una importancia menor o secundaria a esa vertiente más científica de su obra. En muchos casos se prefiere hacer elucubraciones especulativas sobre su vida, sus ideas y su creación plástica, y se deja a un lado el trasfondo conceptual; pero no es lícito no profundizar en la obra de un arquitecto que hizo afirmaciones tan rotundas como las siguientes: «soy geómetra, es decir, sintético», «yo lo calculo todo», «la geometría en la ejecución de las



El número monográfico de la revista italiana *Oikos. Parametro*, publicado en 1993, destaca el importante papel de la técnica en la obra de Gaudí.

superficies no complica, sino que simplifica la construcción», «para que una obra arquitectónica sea bella, es necesario que se ajusten todos sus elementos en cuanto a situación, dimensión, forma y color». Debemos buscar, pues, tras las formas austeras o la ornamentación más ostentosa de Gaudí, la geometría que las articula, porque eso es lo que nos permitirá descubrir que teoría y práctica, y arte y técnica, están presentes en su obra, del mismo modo que forma y estructura coinciden en ella porque Gaudí optó por prescindir de todos aquellos elementos de la tradición arquitectónica que no cumplían una función operativa.

Por todos esos motivos, en 1999, cuando empezamos a preparar la programación del Año Internacional Gaudí, vimos claro que había que incorporar una exposición y una publicación centradas en este aspecto de la obra del arquitecto. Con ese objetivo solicitamos la colaboración de un grupo de expertos en este tema, para que nos ayudaran a explicar,

conceptual y visualmente, la estrecha relación que mantienen en la obra gaudiniana el espacio con la geometría, ésta con las estructuras y éstas últimas con la construcción. La exposición y el catálogo son el resultado de su aportación.

Por tanto, analizar el tratamiento del espacio y explicar las soluciones geométricas, estructurales y constructivas de Gaudí es la finalidad de esta exposición, que, a pesar de su apariencia técnica, desea acercar también a los profanos las formas más paradigmáticas del repertorio gaudiniano, de la manera más clara posible, tanto a partir de dibujos gráficos o infográficos como de fotografías, maquetas o modelos corpóreos. Lo que pretendemos es que los visitantes entiendan que Gaudí construyó formas complejas de una manera práctica y lógica. Y en este punto nos ha sido muy útil el lenguaje multimedia, que nos ha permitido visualizar las formas geométricas y asociarlas con la obra construida de Gaudí.



Uno de los estudios más profundos del conjunto de la obra gaudiniana, que pone de manifiesto la rigurosa metodología de los proyectos del arquitecto reusense, es *Il mondo organico di Gaudí. Architetto costruttore*, de Claudio Renato Fantone (1999).

Tenemos que reconocer que muchas veces la geometría de Gaudí y sus planteamientos constructivos se esconden tras un envoltorio o una decoración exuberantes, unas formas cargadas de energía, riqueza textural y color que, muy probablemente, son las que la han hecho más popular y universal. Sin embargo, ha llegado la hora de equilibrar forma y fondo, arte y técnica, simplicidad y complejidad, en la obra de Gaudí. Por eso hemos titulado esta exposición «Gaudí. La búsqueda de la forma», porque parte de los experimentos de Gaudí, de sus intuiciones, ensayos y comprobaciones más significativos, para poner de manifiesto la vertiente científica y técnica de su obra.

D. G.-M.



GEOMETRÍA GAUDINIANA

**CLAUDI ALSINA
JOSEP GÓMEZ-SERRANO**

El objetivo de este texto es mostrar la excelencia de Gaudí en la creatividad arquitectónica gracias a una combinación perfecta entre el buen oficio constructivo y una visión estructural profunda con una sorprendente investigación geométrica de formas, transformaciones y operaciones espaciales. Nuestra aproximación a la geometría gaudiniana pretende poner de manifiesto que la genialidad del arquitecto fue en gran parte el resultado de un análisis geométrico profundo, de una investigación espacial sin precedentes en el mundo de la arquitectura. Esa labor garantiza ahora, por encima de la admiración por un hombre y una obra, la proyección de ideas y recursos arquitectónicos que formarán parte, para siempre, del repertorio compositivo con soporte científicotécnico.

Referentes culturales y naturales de Gaudí

«El interior del templo será como un bosque.»
Antoni Gaudí

Una parte de la geometría inherente a la obra de Gaudí podría considerarse asociada a los referentes naturales y culturales que observó el arquitecto con una complacencia especial durante su juventud. Durante su primer período, el conocimiento de estilos adquirido en la biblioteca de la Escuela de Arquitectura, las observaciones en los campos de Reus, las innumerables excursiones por toda Cataluña, etcétera, constituyeron una fuente de inspiración formal, el poso de un eclecticismo inicial. Era tanto su interés por la naturaleza que, por ejemplo, en 1871, pendiente aún de aprobar la asignatura de Mecánica racional, se matriculó, entre otras cosas, en Historia natural, y, aunque no era una materia necesaria para estudiar Arquitectura, se examinó y la aprobó.

Las decoraciones de la Alhambra de Granada, los arcos de Poblet, las rocas de Montserrat, las formas de los frutos y los árboles, la torsión de los troncos y los huesos..., toda una serie de elementos se convirtió en referentes naturales o artísticos que explican parcialmente muchos detalles del primer Gaudí. No obstante, a pesar de las muchas explicaciones orales que confió a sus seguidores y discípulos sobre la maestría de la naturaleza, tampoco hay que sobrevalorar la influencia formal directa de esos elementos. Las soluciones gaudinianas son, raramente, la expresión literal de algo preexistente. Gaudí hacía pasar la inspiración por el tamiz de una creatividad personal inagotable. Así, la famosa afirmación «Este árbol cercano a mi obrador: éste es mi maestro» expresa muy bien la

A la izquierda:
Arborescencia de las columnas
del templo de la Sagrada Família

devoción por la obra de Dios, pero las columnas arborescentes de la Sagrada Família van mucho más allá en cuanto a complejidad geométrica que el crecimiento helicoidal del tronco de los eucaliptos o el desarrollo en el espacio natural del ramaje de los plátanos.



Maclación de paraboloides hiperbólicos, hiperboloides de una hoja y columnas (1926)

Una investigación experimental en el obrador

«Yo soy geómetra, que quiere decir sintético.»
Antoni Gaudí

En el estudio de Gaudí, tanto el material bibliográfico como el gráfico se reducían a lo imprescindible. En su obrador había un taller fotográfico, un espacio para hacer esculturas, un almacén para guardarlas, una amplia zona para confeccionar maquetas de yeso, espejos para ensayar visiones indirectas, campanas tubulares para estudiar sonoridades, techos móviles para experimentar la iluminación y una infinidad de «modelos» de los que se servía para investigar activamente soluciones óptimas.

Gaudí se formó a sí mismo resolviendo sus propios problemas: «En los libros raramente se encuentra lo que se busca y, cuando se encuentra, a menudo está mal, de modo que al final siempre acaban pensándose las cosas directamente».

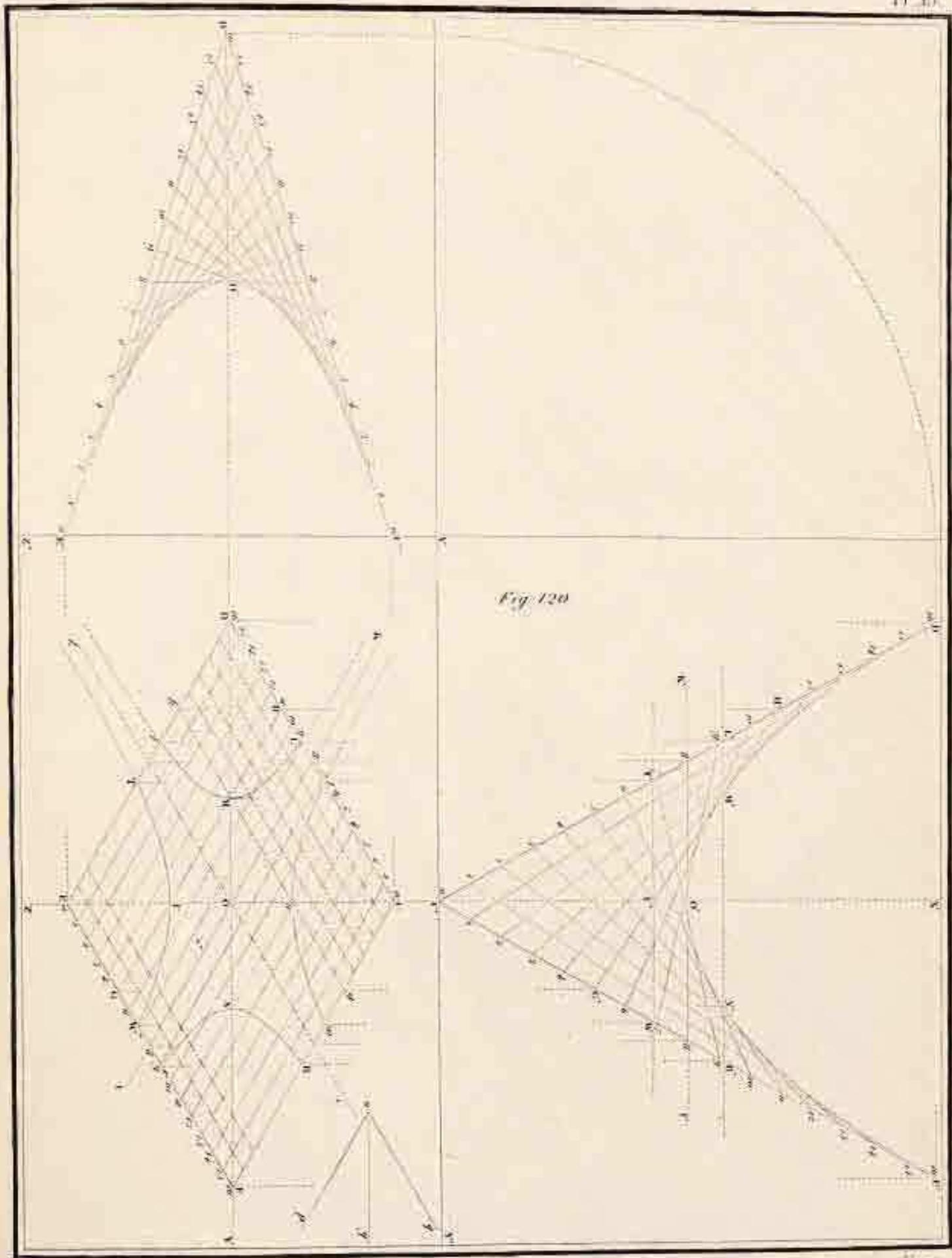
Gaudí limitó su interés geométrico a lo necesario, y nunca dejaba de sorprenderse cuando lo que encontraba era innovador: «Mis ideas estructurales y estéticas son de una lógica “indisputable”. Me ha dado mucho que pensar el hecho de que no hayan sido aplicadas antes, el que tenga que ser yo el primero en hacerlo. Eso sería lo único que, en todo caso, me haría dudar. No obstante, creo que, convencido del perfeccionamiento que representan, tengo el deber de aplicarlas».

Hay que destacar que Gaudí utilizaba el término «indisputable» en el sentido de «indiscutible». Esta firme defensa de sus resultados es la clave a partir de la cual podemos empezar a entender su trabajo a partir del año 1883 y el resultado de su legado: la obra final es siempre el fruto de una profunda reflexión experimental geométrica



Maqueta de las columnas y los techos del obrador (1926)

A la derecha:
Paraboloide hiperbólico representado en el tratado de C. F. A. Leroy (1855)



guiada por la funcionalidad, las posibilidades de construcción y la estructura que darán sentido arquitectónico a la creación. Sin embargo, antes de hacer la maqueta a escala (1:10 o 1:25) que debía concretar cualquier proyecto, Gaudí descartaba mil soluciones parciales siguiendo una reflexión metódica y sistemática, ajena a las prisas y a los compromisos temporales o económicos.

Cabe señalar también que para Gaudí hacer un proyecto de arquitectura era desarrollar y ejecutar una obra «íntegramente», cuidarse de todos los aspectos, hasta los detalles más mínimos. La acústica, la iluminación, la higiene, la ventilación, los cierres, la decoración, el mobiliario, etcétera, todo podía concebirse e integrarse en el proyecto. Aquí Gaudí puso en práctica el profundo conocimiento que tenía de los oficios relacionados con la arquitectura de su tiempo, desde el de picapedrero hasta el de albañil, sin olvidar a los ceramistas, los herreros, los pintores, los modelistas, los fundidores, los jardineros, etcétera.

Creatividad tridimensional

«La evidencia es a los ojos del espíritu lo que la visión a los del cuerpo.»
Antoni Gaudí

Crítico con los procedimientos académicos de expresión gráfica, Gaudí fue capaz de desarrollar la creatividad tridimensional combinando al mismo tiempo cuatro elementos clave: una extraordinaria inteligencia espacial innata; una contemplación profunda de la realidad; una investigación sobre modelos tangibles, y una visión pragmática de las posibilidades constructivas, estructurales y compositivas.

Sin embargo, ese dominio del espacio nunca le llevó a crear objetos escultóricos. Sus «formas» son siempre elementos arquitectónicos, pendientes de una funcionalidad imprescindible y con elementos de una gran belleza de cara al exterior: la derivada de la decoración, la de la propia originalidad compositiva y la ligada a la propia coherencia estructural.

A continuación vamos a sintetizar algunas de las características de los recursos de exploración del espacio que utilizó Gaudí:

LA TRASLACIÓN. Es el proceso de repetir mediante desplazamientos, lo que crea el efecto de ceneta. Gaudí lo utilizó también espacialmente en Bellesguard, en los arcos del colegio de las Teresianas, en el rosario de esferas del Parc Güell, etcétera.



Traslación de arcos catenarios de la Casa Milà. Modelo catenario del Espacio Gaudí

LA SIMETRIZACIÓN. Se trata del proceso que utiliza planos de simetría para generar objetos de simetría specular. Las fachadas de las casas Calvet y Batlló, la escalinata de acceso al Parc Güell, las plantas del Palacio Episcopal de Astorga y de la Sagrada Família, etcétera, son ejemplos claros de simetrización, lo mismo que los estudios «estereofuncionales» que hizo Gaudí con hilos, cadenas y cargas para obtener una simulación de la estructura buscada.

LA MODULACIÓN. El uso de módulos prefabricados en el Parc Güell, el sistema de medidas (módulo de 7,5 metros) y proporciones de la Sagrada Família (1, 1/3, 1/4, 1/2, 3/4, 2/3, 1) y el reticulado de la estructura de la Casa Milà son ejemplos definitivos del gusto gaudiniano por ordenar el espacio a partir de la modulación.

LA GENERACIÓN HELICOIDAL. Este principio combina de forma compleja una o dos rotaciones en torno a un eje y traslaciones en la dirección de éste, lo que origina un intere-



Simetrización



Modulación



Generación helicoidal



Redondeo de formas



Maclación



Vaciado



Disección



Fractalidad

sante movimiento vertical ligado a las hélices cilíndricas, al helicoide y a las rampas helicoidales. Muchas columnas, escaleras de caracol, chimeneas, etcétera, gaudinianas nos muestran este principio.

Si se añade la posibilidad de hacer homotecias, se crea un efecto propio de las hélices en conos. Las chimeneas del Palau Güell y la aguja del pabellón de entrada al Parc Güell son ejemplos espectaculares de ello.

EL REDONDEO DE FORMAS. Se trata del proceso de suavizar ángulos y puntas añadiendo contornos suaves a partir de paráolas, arcos de círculo, perfiles sinusoidales, etcétera. En el caso extremo tendríamos la deformación topológica suave de un cuerpo. Encontramos ese efecto en la entrada del Parc Güell, en la fachada de la Casa Milà, en las columnas de la Sagrada Família, etcétera.

LA MACLACIÓN. La operación, compleja, de intersecar o acoplar diversas figuras geométricas culmina en la obra gaudiniana en la Sagrada Família, con la maclación de superficies regladas y elipsoidales y, muy especialmente, con la creación de los pináculos.

EL VACIADO. Este procedimiento consiste en obtener un cuerpo espacial por sustracción de unas partes determinadas. En la obra de Gaudí lo encontramos, por ejemplo, en el arco de la puerta principal del Palacio Episcopal de Astorga, en León; o en el friso creado en la moldura de algunas puertas de la Casa Milà después de haber retirado el material correspondiente con un dedo, o en algunas figuras geométricas de la Sagrada Família como los nudos culminantes de las columnas o las intersecciones de superficies que se observan en los techos.

LA DISECCIÓN. Gaudí aplicó muy selectivamente ese principio de hacer una disección de figuras espaciales (especialmente superficies) y aprovechar solamente una parte, lo que a veces hace difícil descubrir el molde de procedencia. Por ejemplo, utilizó magistralmente partes del hiperboloide de una hoja y del paraboloide hiperbólico en los techos y los ventanales de la Sagrada Família.

LA FRACTALIDAD. Gaudí aprovechó el principio natural de la fractalidad en el crecimiento de las ramas de los árboles para diseñar las columnas de la Sagrada Família: el «tronco» origina, a partir de los «nudos» elipsoidales, nuevas «columnas rama», una manera genial de distribuir y transmitir las cargas superiores.

LA AUTOSEMEJANZA. Es el principio según el cual se utiliza a la vez una misma forma de medidas muy diferentes, a escalas distantes. Gaudí la empleó magistralmente cuando, por ejemplo, en la Sagrada Família aplicó paraboloides hiperbólicos gigantescos a las bóvedas y, a un tiempo, usó modelos minúsculos de la misma superficie para decorar la carga de las columnas al suelo, o en la leve decoración de algunas partes del techo de la Sagrada Família (techo de paraboloides) o en la inclusión de las luces en el techo.

Formas poligonales gaudinianas



Mosaico de parquet basado en la división del hexágono regular en triángulos rectángulos

«La disposición constructiva debe dominar la mecánica.»
Antoni Gaudí

Las formas poligonales planas son omnipresentes en la obra de Gaudí en dos ámbitos: como determinantes de elementos constructivos (plantas, ventanas, separadores, baldosas, etcétera) y como generadoras de decoración (cerámica, letras, *trencadís*, etcétera).

Los polígonos planos regulares más usuales son los triángulos, los cuadrados, los pentágonos, los hexágonos, los octágonos, los decágonos y los dodecágonos. Un ejemplo emblemático es el de los triángulos de ladrillo de Bellesguard, las baldosas cuadradas de la Casa Vicens, las ventanas pentagonales de El Capricho o las baldosas hexagonales del paseo de Gràcia.

Como muestra de la creatividad poligonal gaudiniana podemos observar el diseño de las piezas de madera utilizadas para embaldosar algunas dependencias de la Casa Milà. Gaudí descubrió el hexágono regular como reunión de triángulos rectángulos. Así obtuvo una subdivisión (en dos colores) del hexágono en 12 triángulos rectángulos. Como éste es una baldosa perfecta, el mosaico generado presenta un efecto sorprendente.

En el ámbito espacial las formas poligonales tienen un triple protagonismo: estructuralmente, como formas con cargas para estudiar los funículos; como poliedros en las cruces y los pináculos, y como generadores de las columnas de la Sagrada Família.

Gaudí estudió el diseño de los arcos y las bóvedas a partir de hilos con saquitos de perdigones como pesos para visualizar las distribuciones de las cargas poligonales. La meticulosidad del arquitecto a la hora de hacer esos estudios puede observarse en la descripción siguiente: «Lo calculo todo: primero, supongo unos pesos para buscar el funículo, y después visto el funículo hallado con formas y materiales cuyos pesos vuelvo a revisar, y a veces varío ligeramente los funículos. De ese modo sale la forma lógica nacida de las necesidades. Los funículos de la Sagrada Família los he encontrado gráficamente, y los de la Colònia Güell experimentalmente, pero ambos procedimientos son lo mismo, y el uno es hijo del otro.»



Mosaico hexagonal cerámico para la Casa Escofet. La decoración incluye espirales

A la derecha:
Hiperboloide de una hoja representado en el tratado de C. F. A. Leroy (1855)

Fig. 46.

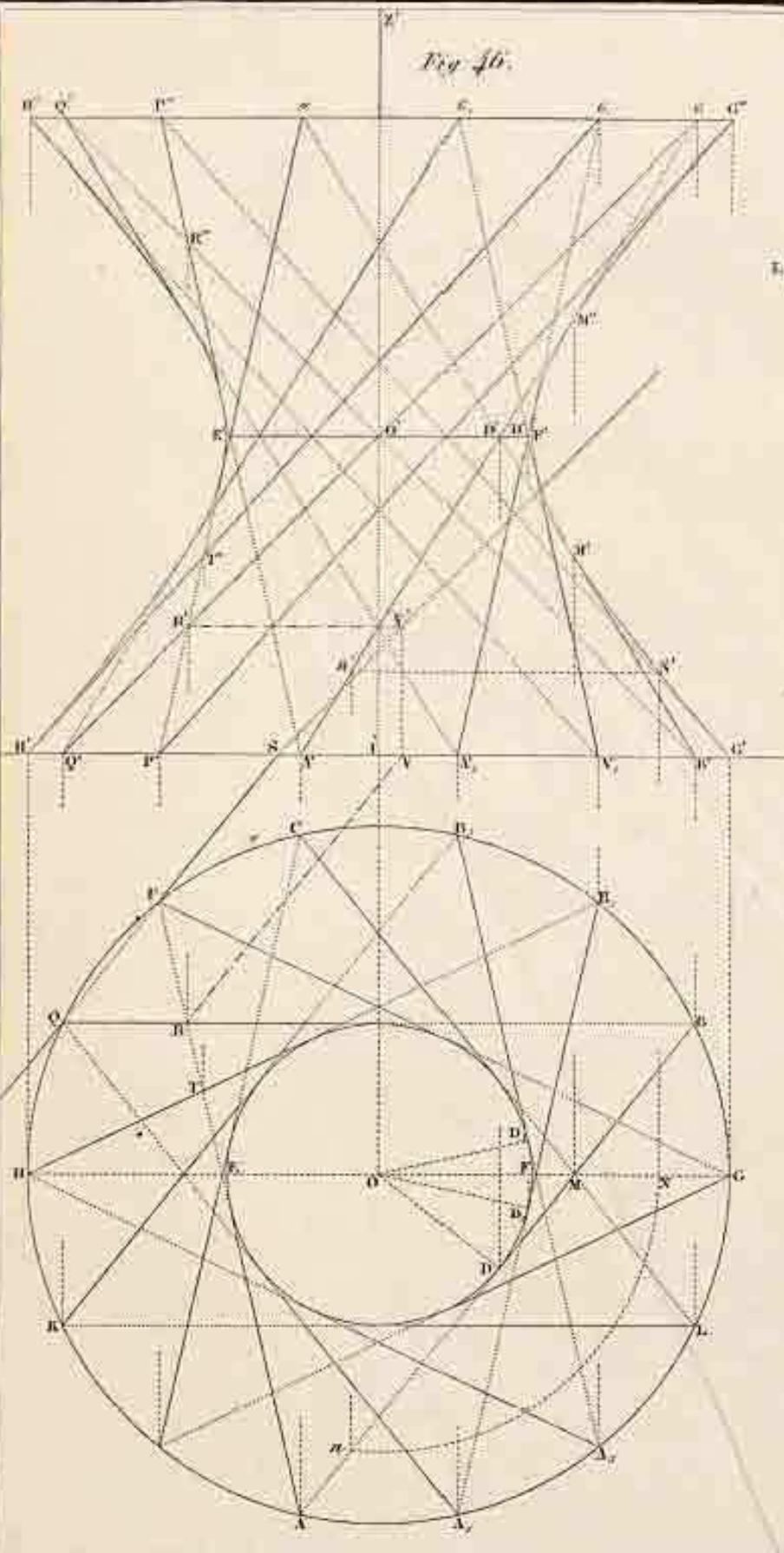
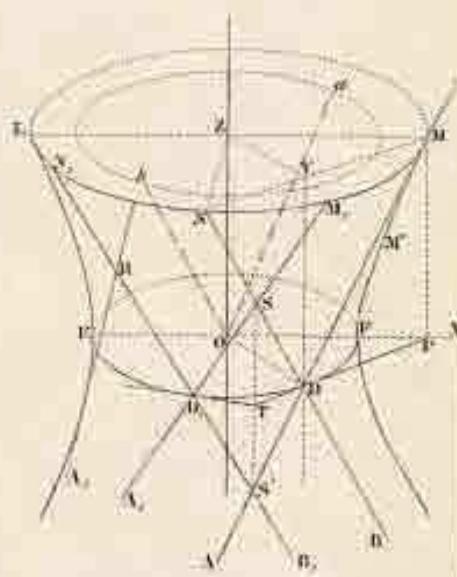


Fig. 47.



En esta última frase puede constatarse la aproximación que hace Gaudí de los «resultados experimentales» a la «estática gráfica».

En cuanto a los poliedros, encontramos polígonos asociados a cubos, octaedros, dodecaedros o sus intersecciones (ver el apartado «Macla de geometrías», p. 118).

En lo referente a las columnas (ver el apartado «Columna de doble giro», p. 104), hay que recordar que las columnas para $n = 6$, $n = 8$, $n = 10$ y $n = 12$ están hechas en la Sagrada Família con hormigón armado en el centro y piedra (de Montjuïc) alrededor para $n = 6$; de granito para $n = 8$; de basalto para $n = 10$, y de pórfido para $n = 12$.

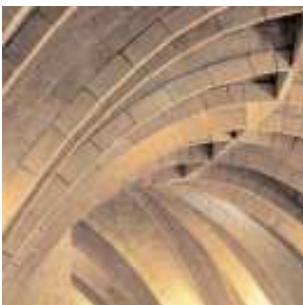
Las columnas de la Sagrada Família nacen de un juego geométrico finísimo en el que se mueven polígonos y se intersecan volúmenes, y representan sin duda la culminación del mesurado y profundo itinerario geométrico de Gaudí.

Curvas planas gaudinianas

«Las formas continuas son las perfectas.»

Antoni Gaudí

Hay cinco tipos de curvas con un protagonismo especial en la obra de Gaudí: las catenarias, las espirales, las sinusoidales, las cónicas y las redondeadas. A continuación mencionamos las características y los ejemplos principales de cada uno.



Arcos catenarios de la Casa Milà

CATENARIA. La curva catenaria se había estudiado en física y matemáticas mucho antes de Gaudí. Se corresponde con la forma de una cadena que cuelga libremente de dos extremos y su ecuación es $y = a \cosh(x/a) = a(\exp(x/a) + \exp(-x/a))/2$, en la cual a es constante, \cosh indica el coseno hiperbólico y \exp , la función exponencial que tiene por base el número e . Cerca de su mínimo la catenaria se aproxima muy bien mediante la parábola $a + x^2/2a$ (para valores grandes de x , sin embargo, diverge mucho de esta parábola), y eso ha llevado a menudo a la confusión entre parábola y catenaria.

No obstante, Gaudí fue el primero en descubrir que la simetrización de la catenaria daba lugar a uno de los arcos más perfectos: el que se aguanta a sí mismo. Encontramos bellos arcos gaudinianos en la Cooperativa Obrera Mataronense, en el colegio de las Teresianas, en el mirador de la Finca Güell, en las puertas del Palau Güell, en las cuadras de los pabellones de la Finca Güell y en la Casa Milà. Según Joan Bergós, el escudo de la familia Güell tenía forma de catenaria en el diseño gaudiniano como agradecimiento por haber podido hacer arcos de ese tipo en el Palau Güell.



Sinusoides del Parc Güell

ESPIRALES. Con hilos que se bobinan o se rebobinan en torno a cilindros o conos (por ejemplo, en conchas marinas), podemos dibujar las espirales más bellas. En la espiral de Arquímedes, la distancia al palo central cilíndrico es proporcional al ángulo girado. En la logarítmica, equiangular o logística, las rectas desde el origen se cortan con un ángulo igual. Esos dos tipos de espirales son omnipresentes en la naturaleza (conchas de caracol, girasoles, cuernos, colas, etcétera). En la obra de Gaudí tienen un papel decorativo importante: en las rejas del parque de la Ciutadella, en el balcón de la Casa Vicens, en el dragón de la Finca Güell, en el mosaico del paseo de Gràcia, en el timbre de la Casa Calvet y, por descontado, en la Sagrada Família.

SINUSOIDES. Las formas sinusoidales son propias de los movimientos serpenteantes, de las olas del mar, de las sombras de hélices espaciales, y las encontramos en la obra



Espirales de la Casa Milà



Curvas redondeadas del Parc Güell

gaudiniana en el respaldo del banco del Parc Güell, en el muro de la Casa Miralles, en diversas decoraciones y, de una manera sorprendente y magistral, en las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família y en su propio obrador (ver el apartado «Conoides», p. 88).

CÓNICAS. Las circunferencias, las elipses, las paráolas y las hipérboles son curvas presentes en muchas formas gaudinianas porque constituyen secciones principales de las superficies regladas, las cuales, como veremos, son piezas clave del repertorio geométrico de la época. Ese hecho motivó a Gaudí a estudiar en profundidad las cónicas, sus trazados y sus propiedades ligadas a la acústica y la iluminación en las superficies correspondientes. El uso de los círculos en el banco del Parc Güell merece, en ese sentido, un reconocimiento especial.

CURVAS REDONDEADAS. Son curvas topológicamente equivalentes a un círculo que se obtienen por deformación continua de éste y que se erigen en sello característico del modernismo. En la obra de Gaudí las encontramos en la decoración de puertas, sofás,

fachadas, balcones, ventanas, escaleras, etcétera, y también determinando plantas (pabellones de la entrada del Parc Güell) y en las formas exuberantes de la Casa Milà.

Superficies regladas gaudinianas

«El uso de las superficies regladas es lógico por su superioridad plástica y su facilidad constructiva.»

Antoni Gaudí

Una de las grandes aportaciones de Gaudí a la arquitectura moderna ha sido el uso constructivo de las superficies regladas. Muchas de ellas contaban con una historia destacada en el ámbito geométrico, pero fue precisamente Gaudí el primer arquitecto que se dio cuenta de su interés arquitectónico. Las descubrió en su época de estudiante, especialmente a partir de los estudios de geometría descriptiva del texto de C. F. A. Leroy de 1855, aunque fue a raíz de su redescubrimiento experimental, trabajando con modelos y maquetas, cuando incorporó progresivamente a sus proyectos todo el repertorio reglado.



Portada del tratado de C. F. A. Leroy (1855), estudiado por Gaudí



Torre cilíndrica de El Capricho



Columnas helicoidales del Parc Güell



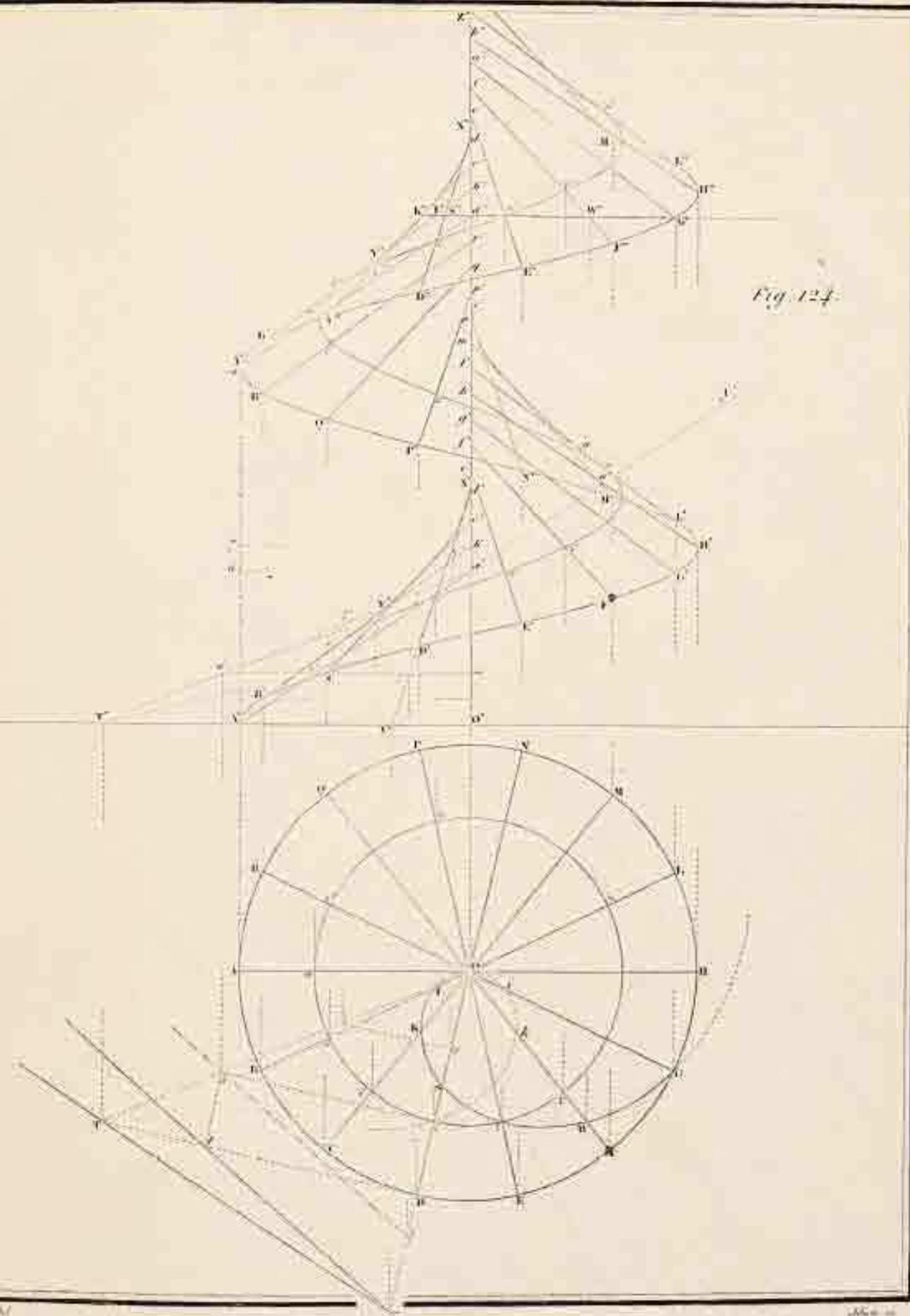
Rampa helicoidal de la Casa Milà

CILINDROS. Los cilindros circulares son superficies regladas generadas por una recta que gira paralelamente en torno a un eje. En general, dada cualquier curva plana, las rectas perpendiculares a los puntos de la curva forman una superficie cilíndrica; cuando la curva es una circunferencia hablamos de un cilindro circular.

El uso clásico de formas cilíndricas lo encontramos en las primeras obras de Gaudí: en las bases de las torrecillas de la Casa Vicens, en las torrecillas y las cubiertas de los pabellones de la Finca Güell, en el Parc Güell, en la torre principal de El Capricho, en las torres del Palacio Episcopal de Astorga o en la Casa Fernández Andrés (Casa de los Botines) de León.

HELICOIDES. Un helicoide es una superficie generada por el movimiento de una recta que se mueve paralela a un plano y se apoya en una recta perpendicular a éste y en una hélice asociada a un cilindro perpendicular al plano y que tiene como eje central la recta fijada. Así, pues, se origina al provocar un movimiento helicoidal (rotación, en torno al eje, compuesta con translación de dirección paralela a éste).

A la derecha:
Helicoide representado en el
tratado de C. F. A. Leroy (1855)



Por tanto, estamos ante la típica forma de la superficie inferior de una losa de escalera de caracol, tan fácilmente construible con madera, piedra o bóveda catalana. La pendiente constante de la hélice es el punto clave para entender el uso del helicoidal como escalera.

Encontramos escaleras de caracol espectaculares, por ejemplo, en El Capricho y en la Sagrada Família en diversos lugares de las torres.



Cono del cupulín del Palau Güell

RAMPAS HELICOIDALES. La rampa helicoidal que D. J. Struik denomina «helicoide desarrollable» es la superficie que nace a partir de un cilindro y una hélice fijada a la superficie cilíndrica, considerando todas las rectas tangentes a la hélice. La rampa helicoidal puede apoyarse sobre rectas del helicoide interior al cilindro prolongadas hacia fuera.

La rampa helicoidal admite un sencillo modelo de cartulina: para formar la rampa se hace una corona circular con pequeños cortes que permiten la flexión de la cartulina. En el Palau Güell, en la Casa Milà y en la cripta de la Colònia Güell encontramos interesantes rampas helicoidales de acceso.

CONOS. Todas las rectas que, al pasar por un punto, se apoyan en una curva espacial (que no contiene el punto dado) dan lugar a una superficie conoidal. Cuando esa curva es una circunferencia o una elipse, tenemos los conos circulares o elípticos tradicionales.

En el Palau Güell encontramos formas conoidales en los capiteles de las columnas interiores de los comedores, en el soporte del sol del panel que simboliza los rayos solares y, por descontado, en las chimeneas de la azotea. También en la Casa Batlló descubrimos chimeneas que culminan en conos y en una bolita vértice, posiblemente una evocación del apagavelas de metal.

En el Palacio Episcopal de Astorga tenemos torres conoidales siempre rematadas con paneles artísticos de hierro, de formas similares a las de las torres de las esquinas de la Casa de los Botines de León. Hay destacar que también en Astorga, en el porche de la entrada del Palacio Episcopal, encontramos un uso inteligente y espectacular de la superficie conoidal: los arcos conoidales de acceso son el resultado de intersecar el cilindro que configura el porche con semiconos de eje perpendicular al del cilindro. En el Parc Güell encontramos un cono de piedra que forma un tejadito al lado de los edificios de portería, como un sombrero debajo del cual pueden refugiarse los visitantes.



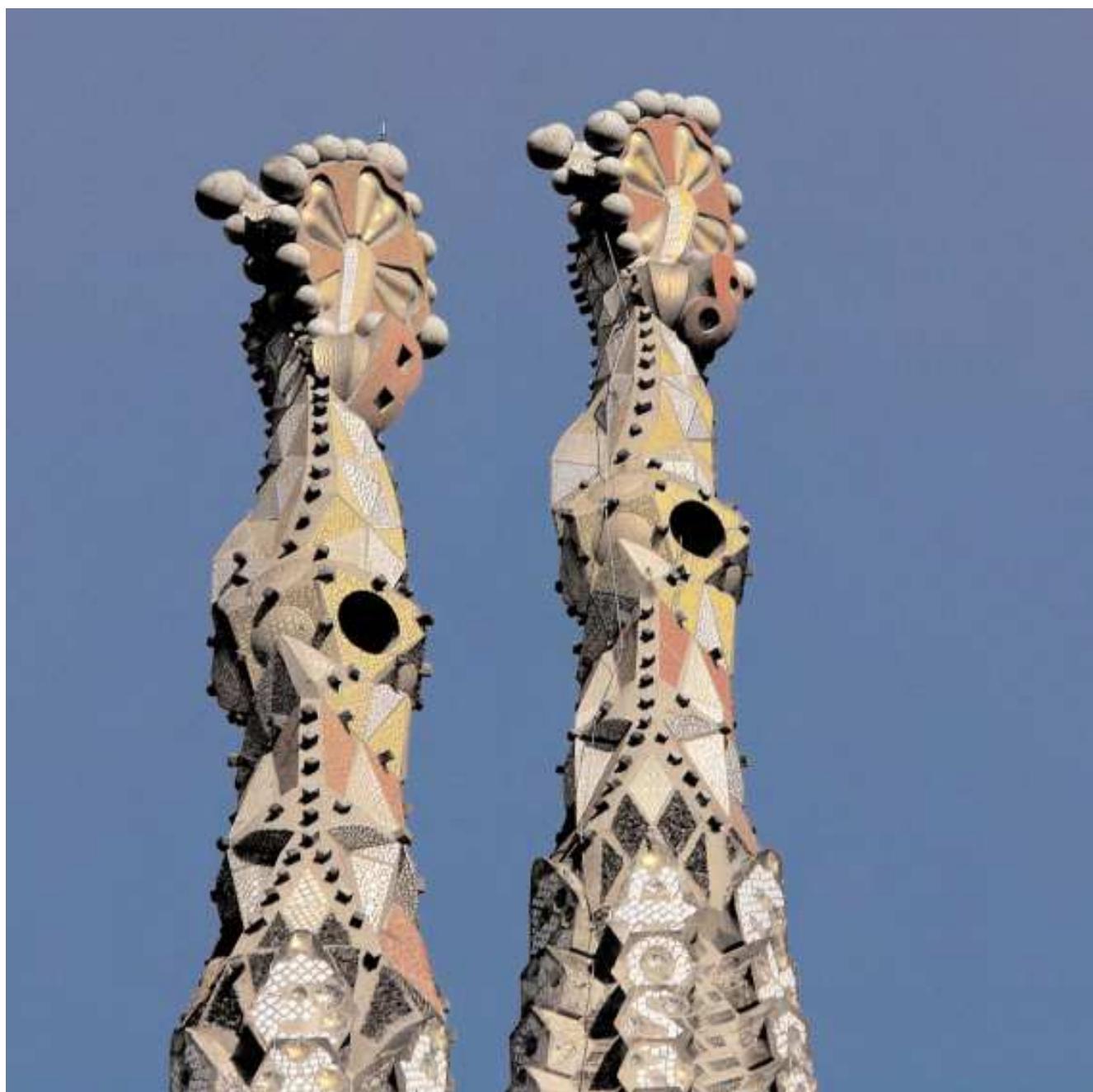
Hiperboloide de una hoja del Parc Güell

SUPERFICIES CONOIDALES RECTAS. Estas superficies regladas están determinadas por una recta, un plano perpendicular y una curva en el espacio, y formadas por todas las rectas que se apoyan en la dada y en los puntos correspondientes de la curva fijada, y todas esas rectas son paralelas al plano dado.

En las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família y en la cubierta del almacén de esculturas del obrador de Gaudí encontramos usos especiales de esas superficies (ver el apartado «Conoides», p. 88), al considerar curvas sinusoidales.

HIPERBOLOIDES DE UNA HOJA. Estas notables superficies están formadas por rectas que se apoyan entre dos elipses iguales y paralelas, y que unen un conjunto bien definido de puntos correspondientes entre las dos elipses. Tienen dos familias de rectas generadoras, las unas en un sentido y las otros en el contrario, y representan un caso especial entre los conos elípticos y los cilindros elípticos.

El caso común de revolución se origina a partir del giro de una hipérbola en torno al eje de simetría que no corta la curva. Esta superficie reglada también puede describirse como el conjunto de rectas que se apoyan simultáneamente en una terna de



Una geometría compleja de los pináculos del templo de la Sagrada Família

rectas que se cruzan de dos en dos; ninguna pareja se encuentra en el mismo plano y las rectas no son todas paralelas a un mismo plano.

Es fácil hacer modelos con hilos elásticos y bases girables, o una construcción con yeso entre dos circunferencias dadas, o modelos con barras articuladas.

Gaudí incorporó a la arquitectura el hiperbolóide de una hoja después de descubrir que era una forma óptima como campana. La empleó en algunas columnas de la entrada del Parc Güell, en el Palau Güell, en las cuadras de la Finca Güell y de la Casa Calvet, y en bóvedas o ventanales de la Sagrada Família, siempre ligada a la iluminación del templo.



Paraboloides hiperbólicos de los soportales de la iglesia de la Colònia Güell



El primer paraboloid hiperbólico hecho por Gaudí en la glorieta del campo de les Figueres de la Finca Güell

PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS. El paraboloid hiperbólico, una de las superficies más importantes y originales usadas por Gaudí, es una superficie reglada formada por rectas que se apoyan en dos rectas que se cruzan en el espacio de una forma ordenada, es decir, estableciendo una correspondencia biyectiva entre los puntos de apoyo correspondientes (por ejemplo, haciendo que las rectas generadoras sean todas paralelas a un plano dado, perpendicular a una de las rectas directrices). De acuerdo con un teorema de Jacques Binet, dada cualquier superficie S torcida, reglada y no desarrollable, y una recta r de S , la superficie formada por todas las rectas de los vectores normales a S a lo largo de r es el paraboloid hiperbólico. En consecuencia, esa superficie tiene un papel relevante en toda la geometría diferencial de superficies regladas. Hay que subrayar que la superficie del producto $z = x \cdot y$ de números reales es un paraboloid hiperbólico.

Gaudí utilizó un modelo tradicional en el que, en lugar de hilos flexibles, se usaban hilos acabados con pesos que quedaban tensos por la acción de esos mismos pesos. Es fácil hacer modelos con hilos elásticos o construirlos con yeso. Con un perfil de alambre sumergido en agua de jabón, la película de jabón forma una superficie mínima que visualmente se aproxima mucho al paraboloid hiperbólico.

La primera obra en la que Gaudí utilizó la forma del paraboloid hiperbólico fue, en 1884, la glorieta del campo de las Higueras de la Finca Güell, en Les Corts de Sarrià (Bassegoda, 1989). Se trata de una pareja de paraboloides simétricos hechos de ladrillo que soportan una parte del suelo del mirador. En los acabados de alguna chimenea del Palau Güell se observan unos pequeños paraboloides hiperbólicos. Las primeras presencias un poco más importantes las encontramos en alguna zonas del techo de la cripta de la Colònia Güell, especialmente en la del pórtico, y en la cubierta del pabellón de la entrada al Parc Güell, una forma decorada con *trençadís* multicolor. Fue sin embargo en la Sagrada Família donde los paraboloides hiperbólicos hallaron su culminación.

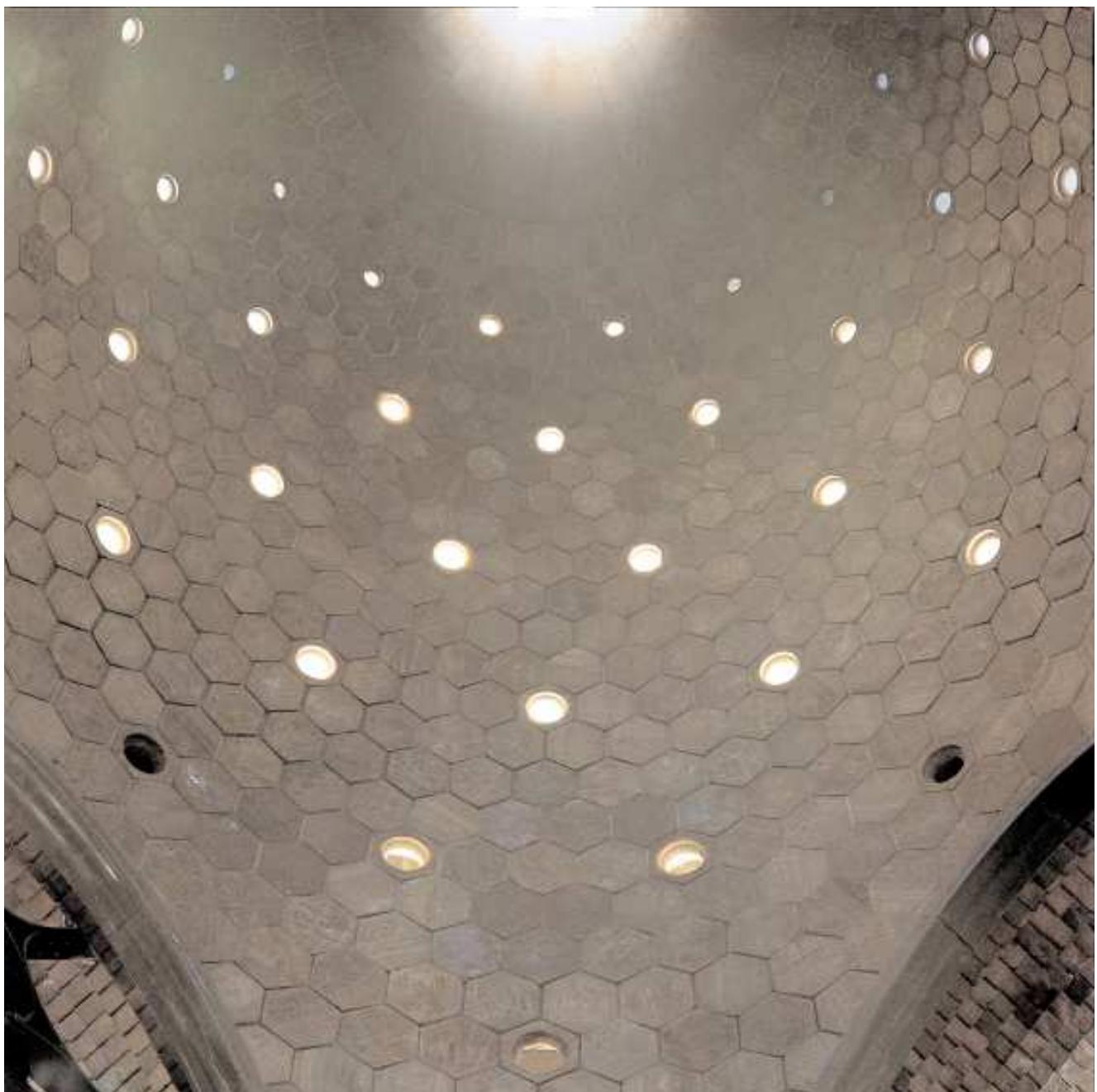
Uno de los primeros ejemplos del templo lo encontramos en los ventanales laterales, donde los paraboloides hiperbólicos se acoplan a las complejas formas de los hiperboloides de una hoja presentes en torno al centro elíptico, en el que forman parte del ventanal. Un segundo caso lo conforman las bases de las grandes columnas, que crean una transición suave entre el suelo plano y el principio de las columnas, con parejas de medios paraboloides hiperbólicos de 16 centímetros simetrizados. En el techo de las naves laterales, los árboles de columnas están rematados por capiteles hiperboloidales, y los paraboloides hiperbólicos se utilizan como solución para suavizar la intersección de los hiperboloides de una hoja, aprovechando restos de los hiperboloides implicados para construir las generatrices de los hiperbólicos. También en la base de los pináculos de la fachada del Nacimiento de la Sagrada Família se observa una combinación interesante de formas. La culminación del uso de los paraboloides hiperbólicos se encuentra en la cubierta superior de las naves y las sacristías, donde las dimensiones son mayores, y también en los campanarios y en el cimborrio, donde estas superficies, que exteriormente muestran la parte cóncava, alcanzan una gran altura.

Las demás superficies

«Para que un objeto sea extraordinariamente bello es necesario que su forma no tenga nada de superfluo.»

Antoni Gaudí

Entre las superficies no regladas, Gaudí hizo un uso singular del paraboloid de revolución en la cúpula del Palau Güell, de los elipsoides en los nudos de las columnas



Paraboloid de revolución del Palau Güell, con decoración hexagonal y entradas de luz cenital inspiradas en la Alhambra de Granada

de la Sagrada Família, y de las esferas en el terreno simbolicorreligioso en el rosario de piedra del Parc Güell, en las chimeneas de la Casa Batlló y de la Milà, etcétera.

Hay otras formas gaudinianas que surgen de la imitación directa del natural cuando miramos esculturas, frutos, árboles, etcétera.

Un campo abierto de investigación lo constituye el estudio de las muchas superficies gaudinianas que no responden a ningún referente geométrico clásico (las formas

de la fachada y la azotea de la Casa Milà, los balcones de la Batlló, las deformaciones del Parc Güell, etcétera).

Los medios computacionales y de representación actuales (como el CAD) permitirán estudiar estas superficies alejadas del repertorio tradicional con ecuaciones algebraicas de grado dos (cuádricas), y posiblemente se descubrirán formas de proyectar «gestualmente» ideadas por Gaudí, pero que hoy pueden dar lugar a realidades arquitectónicas muy nuevas y creativas. Los nuevos materiales también serán decisivos a la hora de hacer factibles, constructivamente, esos proyectos.



La esfera, metáfora de una cuenta de rosario, del Parc Güell

Metáforas geometrizadas

«La curva cerrada es el sentido de la limitación, de la misma forma en que la recta es la expresión del infinito.»

Antoni Gaudí



Representación explícita de una tortuga de la fachada del Nacimiento del templo de la Sagrada Família

Las formas geométricas gaudinianas nacen a menudo de una investigación funcional o plástica, pero también podemos encontrar bellos ejemplos de figuras al servicio de una metáfora, para transmitir un mensaje o dar concreción formal a un significado que el observador, como reto, debe descubrir. En ese sentido, hemos encontrado cuatro grados de cripticidad utilizados por Gaudí.

FORMAS QUE EVOCAN EXPLÍCITAMENTE FORMAS NATURALES Y QUE TODO EL MUNDO PUEDE APRECIAR. El dragón del Parc Güell, el árbol de la fachada del Nacimiento, los frutos, las palmeras, las tortugas, los ángeles, los santos, etcétera, son piezas escultóricas que forman parte de la obra gaudiniana y que expresan siempre el máximo realismo.



Representación explícita de vegetación en los balcones de la Casa Milà

FORMAS QUE EVOCAN EXPLÍCITAMENTE ALGUNOS ELEMENTOS RELATIVOS AL PROPIETARIO DE LA OBRA Y QUE PUEDEN LLEGAR A DEDUCIRSE SI SE LE CONOCE. Gaudí incorporó a menudo al encargo civil, de forma explícita, las personalidades de sus clientes, o, al menos, algunas de sus características. Así, la loa del señor Vicens, de la casa que lleva su nombre, queda perfectamente plasmada en la composición de la fachada y en la decoración interior. Algunos detalles de la Casa Calvet evocan la dedicación del cliente al ramo textil. Los elementos grecorromanos de la entrada del Parc Güell no dejan de ser una señal que remite a la admiración que sentía el conde Güell por la cultura griega antigua.

FORMAS QUE EVOCAN MUY IMPLÍCITAMENTE ALGUNOS HECHOS CONCRETOS Y QUE EN PRINCIPIO SOLAMENTE PUEDE APRECIAR UN NÚCLEO REDUCIDO DE ENTENDIDOS. Constituye un ejemplo muy bien documentado en ese sentido (Lahuerta, 1993) la famosa puerta de hierro del dragón de los pabellones de la Finca Güell, que presenta un dragón-serpiente que, junto con muchos otros elementos del conjunto, glosa los ideales nacionales que puso en verso Verdaguer en *La Atlántida*.

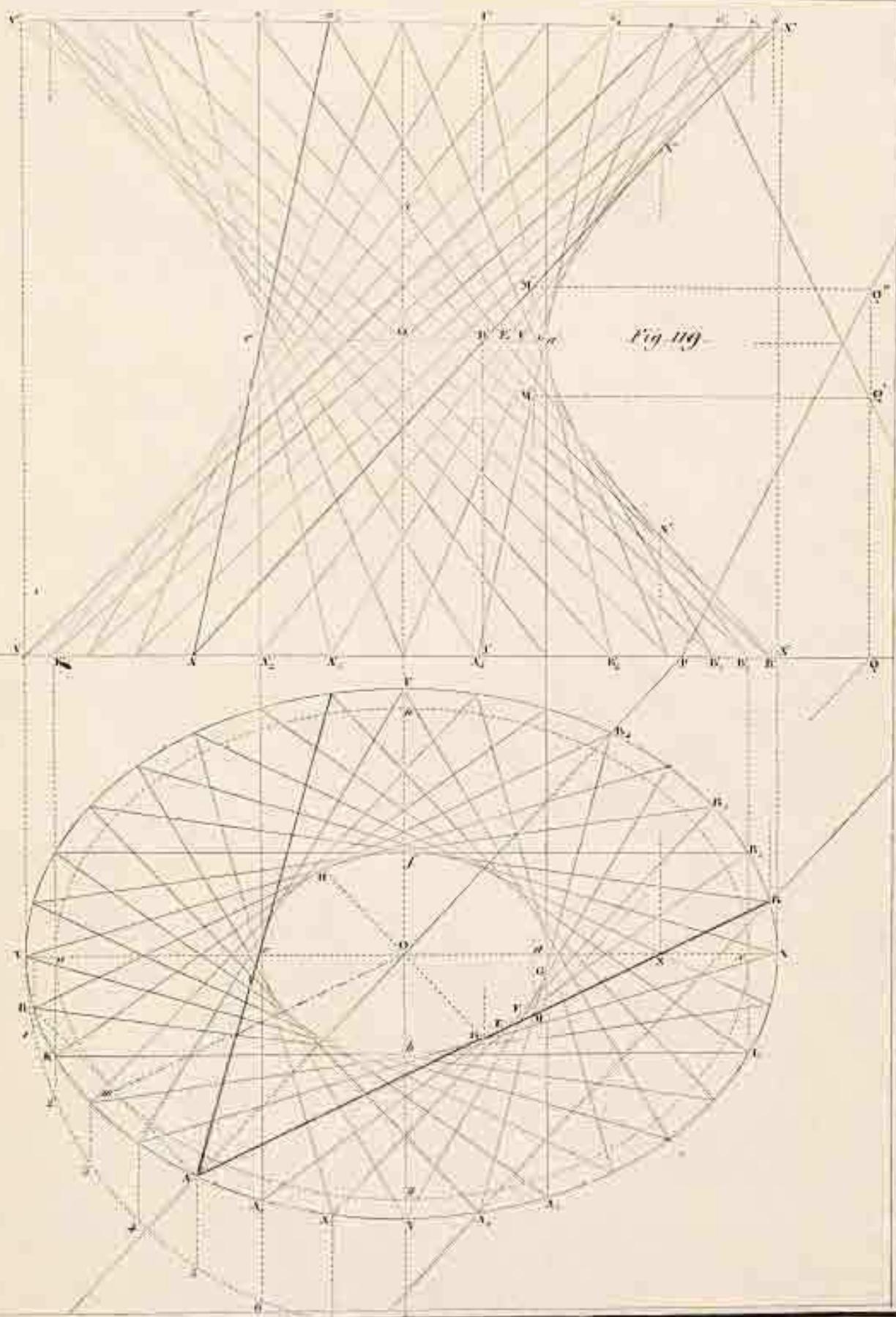
FORMAS QUE EVOCAN MUY SUBLIMINALMENTE ALGUNOS HECHOS QUE FORMAN PARTE DEL PENSAMIENTO ÍNTIMO DEL ARQUITECTO. Esas formas son más sutiles que las anteriores y han originado interpretaciones diversas. En la Casa Milà observamos la puerta de hierro de formas redondeadas, como reflejo del agua del mar o las burbujas de

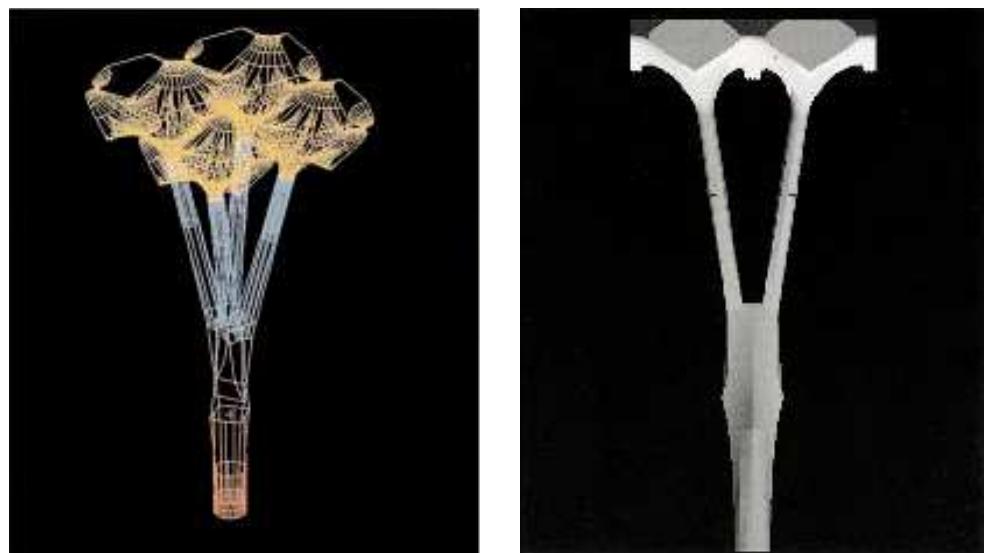


Dragón de la puerta de la Finca Güell.
El conjunto del acceso es una evocación
de *La Atlántida* de Jacint Verdaguer

jabón aplastadas... Y las baldosas del paseo de Gràcia ¿no son quizás un fondo marino, del mismo modo que los techos de yeso de La Pedrera representan el agua del mar?

Esa capacidad metafórica de Gaudí siempre dará lugar a múltiples interpretaciones o lecturas, pero en eso consiste, precisamente, uno de los grandes atractivos de la obra gaudiniana para profesionales muy diversos.





Representación informática (CAD) de columna y techo del templo de la Sagrada Família, utilizada en la construcción del proyecto de Gaudí

La geometría gaudiniana hoy

La obra de Gaudí forma un apartado sustancial de nuestros patrimonio arquitectónico con proyección mundial. Su uso magistral de las técnicas tradicionales constructivas y las originales soluciones estructurales que consiguió forman parte ya de unas de las páginas más brillantes de la arquitectura catalana del siglo xx.

Sin embargo, hay algunos aspectos del legado gaudiniano que hoy en día siguen muy vivos. Por un lado, la construcción de la Sagrada Família (Bonet, 2000) es un reto para la tecnología y la arquitectura del siglo xxI. Paralelamente, la investigación científica sobre la geometría gaudiniana, y las posibilidades computacionales y del CAD en ella, presentan hoy cuestiones interesantes, tanto en el sentido de poder entender el porqué de muchas soluciones adoptadas como en el de investigar, matemática y estructuralmente, nuevos mundos de curvas, superficies y relaciones espaciales que planteó Gaudí. Y hay que esperar que esos descubrimientos geométricos sirvan también para espolear a nuevas generaciones de arquitectos a encontrar su propia creatividad.

C. A. y J.G.-S.

A la izquierda:
Hiperboloid de una hoja elíptico,
representado en el tratado de
C. F. A. Leroy (1855)



ESTRUCTURA Y ESPACIO

CARLES BUXTADÉ
JOAN MARGARIT

La falta de documentación escrita directamente por Antoni Gaudí hace que, para saber cuáles fueron los puntos de vista sobre arquitectura que utilizó para proyectar y construir su importante y vasta obra, haya que recurrir a la expresividad de las propias formas y a los testimonios de sus discípulos y colaboradores.

Siguiendo esas fuentes, pues, encontramos lo que Cèsar Martinell denomina la ruta «Verdad, Estructura, Belleza», el camino simbólico que intentó recorrer Gaudí a lo largo de su vida de arquitecto. Si analizamos ese recorrido, vemos que en la Verdad previa a la Estructura, el arquitecto sitúa las cargas, los sistemas de cálculo y los recursos constructivos.

En cuanto a las cargas, la Verdad histórica le aporta sólo las verticales como actuan tes y, en consecuencia, «el factor horizontal» tan sólo se encuentra en los empujes que pueden generar los arcos y las bóvedas. Curiosamente, al principio Gaudí resuelve el problema por partes y con timidez; en cambio, en su obra final, la Sagrada Família, lo hace de forma plena y rotunda, invirtiendo la imagen del gótico, sin duda el estilo que representa el punto de partida estructural de su arquitectura. En efecto: Gaudí da la vuelta a la imagen gótica de una estructura «estrecha» en la parte más alta (la bóveda) que se ensancha hacia abajo mediante los contrafuertes y los arbotantes, y plantea unos pilares que se abren en ramificaciones sucesivas hacia arriba haciendo una especie de figura invertida del gótico (fig. 1).

Los primeros planteamientos del cálculo moderno a partir de la relación de las deformaciones con las tensiones y, por tanto, con los esfuerzos, son del año 1849 (Émile Clapeyron, que relacionó ángulos y momentos en los extremos de la barra con la carga repartida), de 1855 (J. Bertot, que planteó la ecuación de los tres momentos en vigas continuas), de 1860 (Otto Mohr, que desarrolló el análisis general de la viga continua), de 1880 (Alberto Castigliano, con el cálculo matricial), de 1914 (Axel Bendixen, que analizó las estructuras de barras ortogonales y nudos rígidos), y de 1923 y 1932 (Calisev, Hardy Cross y Newlind Morgan, que recuperaron el cálculo general de estructuras de barras mediante aproximaciones sucesivas).

Las realizaciones estructurales más importantes que marcaron esa época fueron, en primer lugar, las construcciones que surgieron de la escuela de Chicago, hacia 1875: edificios con pilares metálicos y vigas continuas, también metálicas, todo ello trabado por los muros de la fachada, fundamentalmente de fábrica. En segundo lugar tenemos la torre Eiffel (1888), como culminación de un proceso que había empezado mucho antes y que determinó la utilización de las estructuras metálicas trianguladas en la investigación de la compresión y la tracción de las piezas.

Gaudí representó un camino especial que se resume en el pensamiento siguiente: si existe una posición de equilibrio interno para la estructura, ésa es la que utilizará la

A la izquierda:
Columnas de pórfido y de basalto.
Esfuerzos axiales característicos de
6.200 y 4.500 toneladas, y momentos
de flexión de 140 y 60 metros
por tonelada, respectivamente (fig. 1)



Inversión estructural de la imagen del gótico en la nave del templo de la Sagrada Família (fig. 2)

estructura para resistir. Para entendernos: cuando dimensionamos una viga, ésta se sostiene siempre que pueda encontrar una posición de equilibrio compatible con su capacidad resistente. Gaudí planteó eso mismo en estructuras mucho más complicadas que una viga, incluso (y plenamente) en algunas complejísimas estructuras como las de la Sagrada Família (fig. 2).

Gaudí no tuvo en cuenta las acciones horizontales, pero cuando proyectó y construyó las torres del Nacimiento las dotó de secciones que hacían posible el equilibrio sin contrafuertes, a pesar de la acción del viento.

Otra cuestión es la de la seguridad. Siguiendo con su obra más importante, la Sagrada Família, si se hubiera construido con piedra u hormigón en masa, que seguramente es lo que preveía Gaudí cuando la proyectó, se habrían aguantado, como lo han hecho, las torres de la fachada del Nacimiento, pero con un nivel de seguridad muy inferior al que se exige hoy en día en un edificio público, que es lo que se ha conseguido al construirla con hormigón armado.

Ese camino es, de hecho, el de la sensibilidad respecto de la resistencia y la estabilidad de un gran arquitecto y un gran geómetra y estructuralista, que permite dar a la estructura las proporciones y las medidas idóneas sin tener que recurrir a los recursos del cálculo, cada vez más complejos, que ya hemos comentado y que empiezan con Clapeyron y acaban en los métodos actuales de los elementos finitos. En consecuencia, no es un camino que pueda enseñarse siguiendo una metodología general estándar en las escuelas de arquitectura, lo que explica, además, por qué la arquitectura de Gaudí tuvo unos planteamientos estructurales que nacieron y murieron con él, salvo algún intento aislado de continuidad, como los casos de Cèsar Martinell y de Josep Maria Jujol.

Si nos fijamos en los recursos constructivos (uno de los tres elementos previos a la verdad estructural del catálogo del gran arquitecto), serían, desde las primeras obras (el Palau Güell, por ejemplo), la fábrica en los muros, las pilastras y las bóvedas, la piedra natural de los pilares, el hierro de los pilares y las jácenas, y la mampostería con mortero de cal de los muros y los macizos de los cimientos.

Sólo habría que añadir a esa lista, en la última etapa de Gaudí en la Sagrada Família, el hormigón armado de los pináculos de las torres de la fachada del Nacimiento, es decir, hacia el final de su ejecución, aproximadamente en 1925. Podríamos encontrar algún antecedente, aunque no propiamente hormigón armado, en la utilización del hierro combinado con el mortero y la piedra para soportar la compleja fachada de la Casa Milà.

El individualismo de Gaudí y, como resultado, su alejamiento del camino que siguió la arquitectura en el siglo XX se caracterizan por la complejidad de las formas que crea, a las que aplica los sistemas constructivos mencionados, a veces forzándolos hasta el límite. Esa complejidad se refleja en la forma en que utilizaba la geometría. Hasta entonces se habían utilizado desde la forma más sencilla del plano hasta las curvas de los cruceros de las naves, pero siempre eran variaciones en torno al arco y la bóveda como elementos básicos. Ése había sido, desde el Partenón hasta la catedral gótica o las cúpulas renacentistas, el camino de la arquitectura. Gaudí incorporó figuras geométricas mucho más complejas, y con esas formas definió la novedad de sus espacios. Así, el paraboloides hiperbólico y el hiperboloides de revolución son elementos característicos de su arquitectura (fig. 3, p. 49). No obstante, ese aumento de la complejidad de las formas fue siempre acompañado del mantenimiento de las superficies regladas, que le permitían apoyarlas con generatrices o directrices comunes. Es de suponer que, con los medios actuales, Gaudí habría intentado utilizar suficientemente (algo que nunca hizo) el acoplamiento por medio de las hipérbolas, que son cónicas comunes a esas



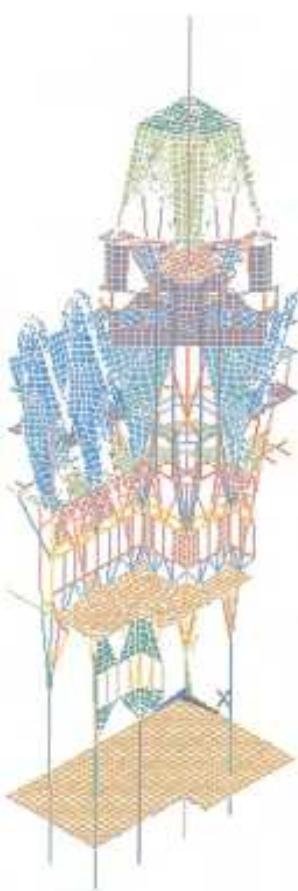
Hiperboloides de una hoja y paraboloides hiperbólicos. Superficies regladas en la cubierta del templo de la Sagrada Família (fig. 3)

dos cuádricas, lo cual habría originado unos espacios más complejos aún y, posiblemente, mucho más sorprendentes.

Por otro lado, la relación entre la estética y la estructura se pierde cuando se imponen y se utilizan sistemáticamente unos sistemas constructivos. Es el caso de los edificios altos de oficinas y de viviendas de nuestra sociedad actual. Fue Le Corbusier quien, en la primera etapa de esas construcciones, afirmó que eran un canto a la libertad y que por vez primera los usos en las distintas plantas no dependían de una rígida estructura de muros de carga. Lo cierto es que se inauguró una época en la que la monotonía fue más poderosa que nunca, en la que los edificios altos, en lugar de «elevar», amontonaban.

En cambio, Gaudí rompió con los espacios tradicionales, y esa voluntad de volver a empezar continuadamente le convirtió en un vanguardista *avant-la-lettre* y le obligó a separarse del camino que condujo, a pesar de los pomposos manifiestos racionalistas iniciales, a la monotonía y la resignación que han conformado las ciudades actuales. Ésa es, al mismo tiempo, la cara y la cruz de la obra gaudiniana: a pesar de (o quizás gracias a) sus posiciones ideológicamente conservadoras (en eso siguió la vía intelectual de Ferdinand Céline o Pierre Drieu la Rochelle), construyó un universo solitario cuya grandeza sorprende tanto por las formas como por la marginalidad de su esfuerzo.

De hecho, como indicó Eduardo Torroja, en lo que llamamos la «arquitectura moderna» puede separarse, como nunca antes, la estructura resistente del resto de la obra. En la arquitectura de Gaudí todo pasa a ser una única cosa. Eso aportó (sobre todo en la última etapa del arquitecto) la posibilidad de una intuición, a cargo del espectador,



Resultado del programa ANSYS correspondiente al cimborrio del templo de la Sagrada Família

de la parte oculta de la obra, es decir, de los gruesos. Todo eso, irremediablemente, apartó la obra gaudiniana de la característica que durante el siglo xx se erigió en valor emblemático de la arquitectura, la funcionalidad, la posibilidad de que las formas transmitan al exterior su uso interior.

Las estructuras gaudinianas se han estudiado casi siempre utilizando los medios de análisis que empleaba él, básicamente la estática gráfica y los modelos antifuniculares (fig. 4). Hay otra manera de acercarse a esas formas estructurales, calculándolas con las técnicas más modernas, concretamente con el método de los elementos finitos que permiten, con programas tipo ANSYS, analizar conjuntamente elementos lineales y laminares, en primer y segundo orden, y sometidos a acciones estáticas y dinámicas. De la comparación entre los estudios y los cálculos hechos por nuestro equipo en el Palau Güell y, sobre todo, en la Sagrada Família, con el mismo tipo de investigación realizada en el edificio y en la torre de acceso del Hospital de Sant Pau, de Domènec i Montaner, se observa en la obra de Gaudí un sentido de las proporciones estructurales más preciso, valiente y franco que en la mayor parte de arquitectos modernistas. Como ya se ha indicado, esa intuición no llega a cubrir los efectos horizontales de las acciones sísmicas y del viento que hoy en día exige la seguridad, pero sí que ha permitido, con las técnicas y los materiales actuales (sobre todo aceros y hormigones de alta resistencia y cimientos profundos), absorber, en todos los casos, esos efectos con las secciones y los acabados previstos en sus proyectos.

En el análisis tensional de las estructuras gaudinianas se observa perfectamente que la masa se acumula allí donde es más denso el plexo tensional, que las aperturas se sitúan en los remansos, fuera de las corrientes de los esfuerzos axiales, y que siempre se encuentran núcleos rígidos, torres, campanarios, etcétera, en las direcciones más desfavorables de los esfuerzos horizontales.

Así, pues, si como es natural la seguridad que se exige en las construcciones aumenta en el futuro al ritmo actual, es probable que, en el caso de la Sagrada Família, todavía en construcción, haya que aligerar las zonas más altas, a partir de los 60 a los 90 metros de altura, para mantener una firmeza admisible en los pilares y a los muros inferiores, ya levantados con la seguridad actual. Este aligeramiento sólo podrá conseguirse utilizando nuevos materiales, más resistentes y mucho menos pesados, como el titanio o el carbono.

Así, por vez primera, a lo largo de la ejecución de una catedral, en general en torno a los 150 años (la construcción de la Sagrada Família empezó en 1882 y es posible que acabe, si todo sigue como ahora, en torno al año 2040), los conocimientos y las técnicas han evolucionado de una forma tan impensable que es lógico que se reflejen en los materiales y en las soluciones constructivas utilizadas. La obra más importante y emblemática de Gaudí no sólo mostrará su elaborada concepción de la arquitectura, sino que también será el reflejo de las diferentes épocas a lo largo de las cuales se habrá construido.

Gaudí, con sus formas complejas, con su arquitectura intensa pero marginal, debe permanecer en los territorios simbólicos de la gran arquitectura del pasado. Por eso es lógico que el territorio religioso y su acaparamiento inacabable de posibilidades simbólicas hayan llenado la última parte, la más importante, de la vida del arquitecto, que vuelve a plantearnos una paradoja en ese terreno. Un geómetra de su complejidad y riqueza, un estructuralista convencido, capaz de manejar las formas, por ejemplo, de las naves y las torres de la Sagrada Família, es capaz, en la misma obra, de levantar un gran retablo barroco en la fachada exterior del Nacimiento.

Esa primera entrada conceptual en los planteamientos gaudinianos nos lleva, pues, a la última de sus paradojas, la más importante del personaje. Por un lado, tenemos





Rampa de bajada a las cuadras del Palau Güell (fig. 7)

En el vestíbulo del Palau Güell se observa la importancia de las formas y texturas de la plementería (fig. 5)



al geómetra preciso y de un nivel difícil de encontrar en ningún otro ejemplo en el mundo de la arquitectura, el profundo conocedor de la estática gráfica y aplicada que, al mismo tiempo, no plantea ningún tipo de análisis de las acciones horizontales. Otro aspecto de la misma paradoja es el hecho de que la obra de Gaudí es la de un arquitecto capaz de afrontar brillantemente cualquier problema constructivo, pero tan sólo con los materiales (fábrica, mampostería y el hierro más primitivo) utilizados siempre en compresión y tracción simple. Es

dicho, que Antoni Gaudí, de algún modo, queda al margen del mundo estructural que empezaba en 1875, el mundo que lógicamente debería haber atraído a un joven arquitecto con sus condiciones y sus ambiciones, el mundo de la escuela de Chicago, el del hormigón armado y el de los pórticos de hierro y hormigón, el mundo que más adelante configuró las estructuras de toda la arquitectura del siglo xx.

El espacio, definido por la geometría, la estructura y la textura, evoluciona, se acumula y se mezcla en las diferentes etapas de la obra gaudiniana. Esta evolución se acelera en los últimos años, pero es un desarrollo que no presenta los mismos presupuestos



Estructura de soporte del patio circular de la Casa Milà (fig. 8)

Deformaciones no previstas solucionadas con platinas del Palau Güell (fig. 6)

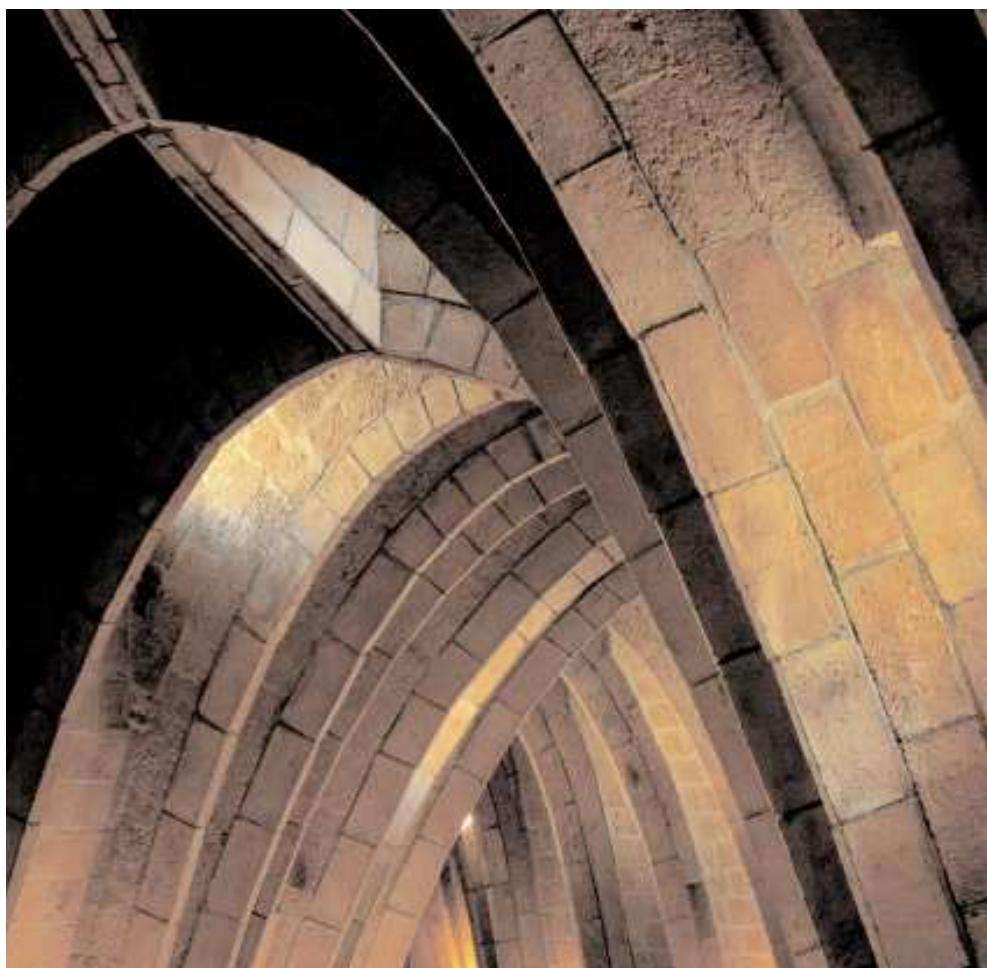


teóricos o filosóficos de la arquitectura de principio a fin. Si nos fijamos únicamente en la disposición de la plomería, de lo que no es estructural pero cierra el espacio, encontramos las recargadas soluciones del vestíbulo del Palau Güell, una de las primeras obras globales (con proyecto y dirección; fig. 5, p. 52), en la que también, paradójicamente, se refleja la sorpresa del arquitecto ante comportamientos que no había previsto (fig. 6). Sin embargo, en el mismo edificio puede observarse la pureza de la rampa de bajada (fig. 7, p. 52) y del sótano de las cuadras. Veinte años más tarde encontramos esos puntos extremos en la escenografía de los espacios de La Pedrera y de la Casa Batlló, donde se mezclará con la pureza racionalista, por ejemplo, de la estructura de soporte del patio circular del primer edificio (fig. 8) o de las buhardillas parabólicas de ambos (fig. 9 y 10, p. 54).

Normalmente, en la obra de Gaudí las formas más puras, sin ornamentación, se localizan en los espacios poco relevantes (los sótanos y las buhardillas en los edificios, las zonas inferiores en el Parc Güell; fig. 11, p. 54), hasta que, en la última obra, la Sagrada Família, la pureza se reserva para el interior de una forma rotunda, y el embrollo y

A la derecha:
Arcos catenarios de la buhardilla
de la Casa Milà (fig. 9)

Abajo:
Arcos catenarios de la buhardilla
de la Casa Batlló (fig. 10)



Fachada del Nacimiento del templo de la Sagrada Família (fig. 12)

A la derecha:
Muro de contención y pilares de soporte de un viaducto del Parc Güell (fig. 11)

la escenografía, para las fachadas exteriores (fig. 12). Esa pureza de complejas formas geométricas, en el caso de la columnata que sostiene la plaza del Parc Güell, con los basamentos de *trençadís* y el capitel, puede recordar el orden dórico (fig. 13, p. 56), pero también sugiere las columnas y los techos de Frank Lloyd Wright. Es indudable que en la complejidad de Gaudí pueden encontrarse elementos de modernidad que se originan en su profunda racionalidad.

En los recursos constructivos esa racionalidad se traduce, para Gaudí, en la utilización ya indicada de superficies regladas, que son de concepto sencillo, pero, en general, complicada construcción. La simplicidad se mantiene cuando se trata de curvaturas suaves y muy grandes, como los conoides que definen los muros de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família (fig. 14, p. 56), pero se pierde cuando la curvatura es fuerte y las diferentes superficies y materiales se intersecan y cambian constantemente. La racionalidad de Gaudí, de la que tanto hemos hablado, es, pues, más conceptual que constructiva. Se trata de un discurso que recorre cada obra, más que de una actitud a la hora de proyectar. Y ese recorrido deja su huella en cada elemento, manteniendo, sin embargo y sorprendentemente, la coherencia del conjunto. La forma en que la racionalidad lleva a una complejidad coherente es uno de los rasgos más atractivos de la obra de Gaudí; se trata de una complejidad muchas veces diluida, también, en un racionalismo ortodoxo.





Columnata que soporta la gran plaza del Parc Güell y que recuerda formas del orden dórico (fig. 13)



Conoides de los muros perimetrales de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família (fig. 14)

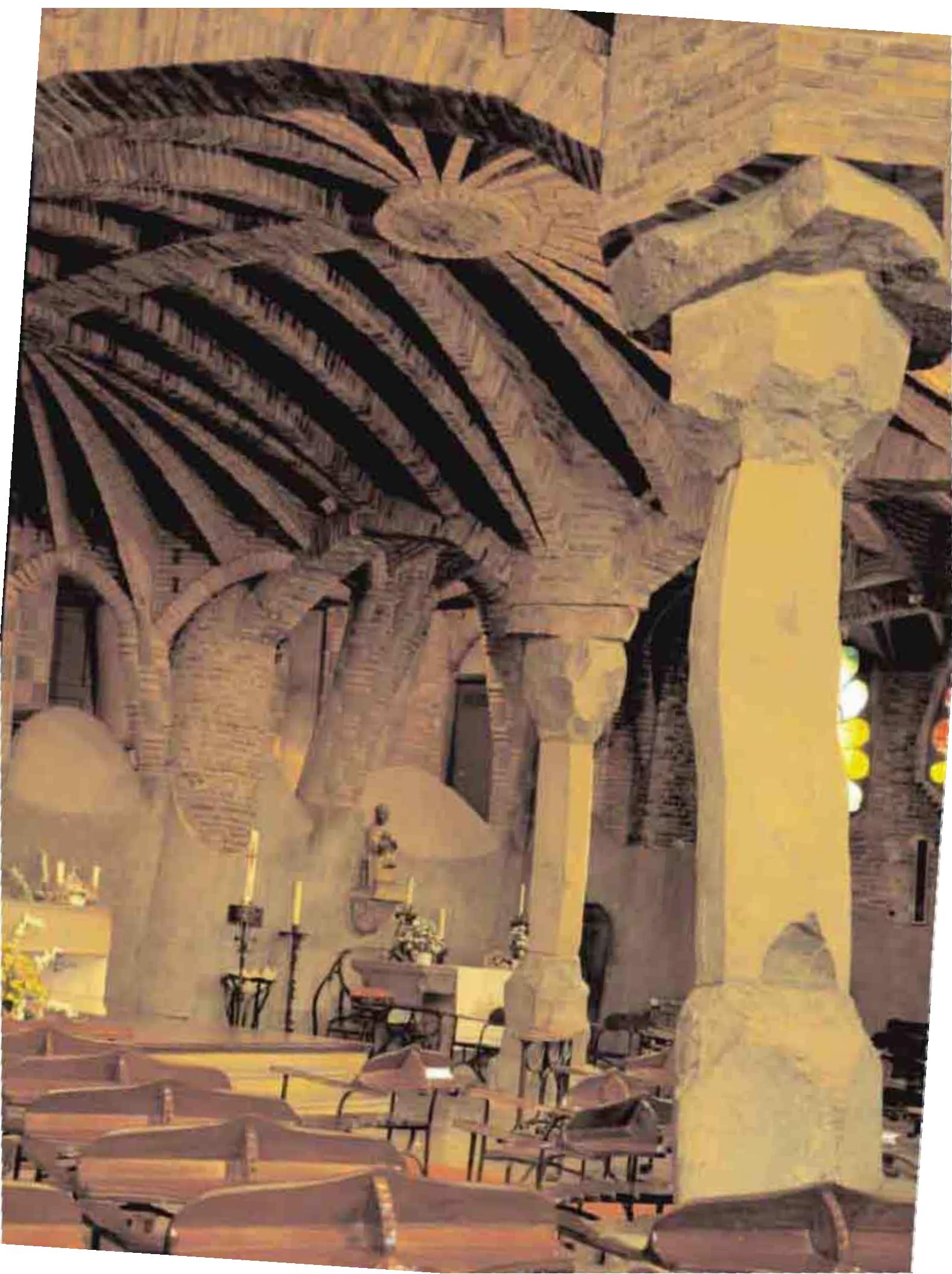
Un ejemplo de ese rasgo tan específico de Gaudí es la cripta de la Colònia Güell (fig. 15). Las columnas de basalto, macizas, pétreas y cortadas, aparentemente, de cualquier forma, siguen con unos arcos concéntricos de una geometría precisa. Esa racionalidad a simple vista opuesta en cuanto a los pilares y las bóvedas origina uno de los espacios interiores más ricos y sorprendentes de la arquitectura del siglo xx.

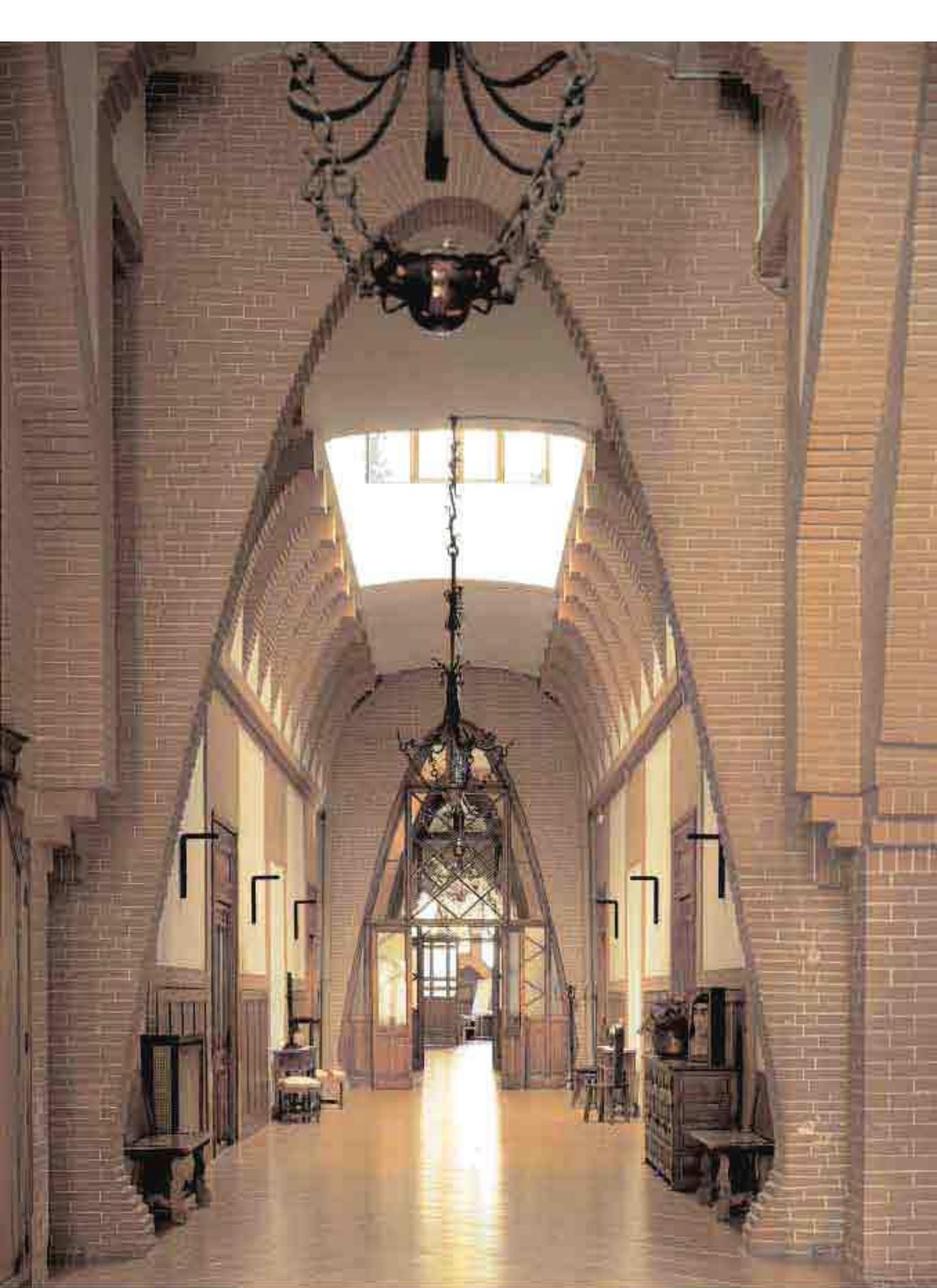
La sorpresa es siempre el resultado de un proceso, de un recorrido que no acaba de entenderse. Ese alejamiento que se observa en la obra de Gaudí por la dificultad de penetrar en su proceso creativo es otro de los motivos que justifican que la arquitectura gaudiniana prácticamente no haya tenido discípulos y haya acabado con él. Sin embargo, no fue ajena a su tiempo y participó de las características de lo que dio en llamarse modernismo: preeminencia de las formas curvas y abigarramiento decorativo combinados con la utilización al límite de los recursos constructivos tradicionales. Dentro de ese marco, Gaudí se distinguió porque se centró básicamente en el orientalismo y en el gótic como estilos inspiradores principales, el primero en cuanto a la decoración y el segundo en cuanto a la estructura. También constituye una de sus peculiaridades llevar al límite (mucho más que sus compañeros de generación) el diseño global, desde la estructura hasta el mobiliario. En ese aspecto hay que añadir el peso de toda la investigación y el trabajo que realizó con la finalidad de incorporar a la arquitectura los elementos simbólicos, los cuales invadieron por todas partes su última y tantas veces mencionada obra, la Sagrada Família. En ella el simbolismo lo alcanza todo, desde el material puro (pórfido, basalto, granito y calcárea, según las cargas que reciban las columnas), hasta las esculturas y los elementos que coronan las torres y las bóvedas. Todo ese exceso apasionado, la utilización de los efectos barrocos tanto en la superficie como en el espacio, y la auténtica obsesión por extraer imágenes decorativas de la naturaleza, una de sus fuentes de inspiración más importantes, ocultan al gran racionalista que encuentra formas de la arquitectura moderna que tan sólo surgen a partir del uso de estructuras avanzadas de hormigón armado.

La evolución de Gaudí entre todas esas características es, en resumen, un camino que va del eclecticismo a la pureza y la racionalidad. Es un recorrido que empezó en las primeras obras, parciales o de mobiliario urbano, que podrían resumirse en el posterior y medievalista Palau Güell, importante sobre todo por un trabajo de decoración exhaustivo, pero que ya plantea la serenidad y la austereidad de las cuadras en el sótano. Más adelante surgió el Gaudí más importante, el del Parc Güell, La Pedrera y la Casa Batlló. Es el período de las rupturas con las esquinas, los ritmos de las aperturas, el nuevo concepto de azotea, la fascinación cromática y formal. Finalmente, tenemos el Gaudí maduro, definitivo, el de la cripta de la Colònia Güell, las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família y la propia Sagrada Família; el hombre solitario que construye su propia soledad, que deja atrás todas las reglas previas y los eclecticismos del pasado. Es la búsqueda de la expresividad en sí, el riesgo en cada decisión, la depuración (e inversión al mismo tiempo) increíble del gótic, el constructivismo y el cubismo del futuro vislumbrados en detalles, perspectivas y recursos constructivos. Y el cenit de su rigor y su pureza.

C. B. Y J. M.

A la derecha:
Visión general del interior
de la iglesia de la Colònia Güell
(fig. 15)





GAUDÍ Y LA CONSTRUCCIÓN

**JOSEP-LLUÍS GONZÁLEZ
ALBERT CASALS**

No puede llegar a entenderse cómo materializó Gaudí su arquitectura si sólo se considera alguna de las vertientes en las que a menudo se descompone su complejidad: una exuberancia formal desbordada, una racionalidad estricta o una originalidad superlativa, por poner tres ejemplos.

Es muy cierto que en la obra de Gaudí el ingenio constructivo y la gran capacidad de conciliar los múltiples problemas prácticos se encuentran siempre bajo la potente dirección de sus razones estéticas, con una capacidad creativa casi ilimitada. Sin embargo, también es verdad que Gaudí no es un artista plástico que cree formas que se justifiquen en sí mismas, sino que siempre son consecuencia de una voluntad decidida de resolver, desde la raíz misma (o, como decía él mismo, desde el origen), todos los problemas de tipo práctico.

Y ésa es la clave: su originalidad no se basa ni en materiales nuevos ni en nuevas formas extrañas, sino en soluciones nuevas, resueltas con un extraordinario ingenio constructivo, que surgen de analizar los problemas de siempre, pero desde la raíz, desde el origen (Flores, 1983). Para entender, pues, la manera gaudiniana de construir, debemos abordar todas las vertientes a un tiempo, teniendo siempre presente, en primer lugar, ese carácter radical (u original), y después el sintético, o, mejor dicho, arquitectónico (A. González, 1995).

El objetivo de este texto es mostrar, por medio de algunos ejemplos, esa forma de trabajar tan propia de Gaudí.

Materiales y fábricas

Gaudí casi no utilizó otra cosa que los materiales propios de la arquitectura de los siglos anteriores al xix. Con el acero laminado, muy frecuente ya desde mediados del xix para salvar grandes luces, hizo tan sólo vigas o elementos de poco vuelo. Las escasas excepciones las encontramos en una obra temprana, el Palau Güell, en unas jácenas al servicio de una idea espacial radical (A. González, 1990b), y en otras dos obras de madurez, la Casa Milà y el Parc Güell, en las que el acero hace posibles formas imposibles. Otra excepción la constituye el uso sistemático del cemento pórtland en la iglesia de la Colònia Güell (Vendrell, 1997-2001).

Durante la primera etapa, hasta el cambio de siglo, definida por un eclecticismo experimental (Solà-Morales, 1983; Tarragó, 1981) con el ladrillo y la piedra, Gaudí hizo fábricas revestidas o sin revestir con los aparejos usuales. Las fachadas del Palau Güell, la Casa de los Botines, la Casa Calvet, Bellesguard o la parte construida

A la izquierda:
Planta baja del colegio de las Teresianas. Las ménsulas que sobresalen de las paredes laterales sostienen los pasillos de la planta superior (fig. 7)



Cuatro tablones apoyados en el suelo y en otro tablón inclinado soportan una superficie alabeada (fig. 1)



La habilidad del albañil es fundamental para la construcción de una bóveda tabicada (fig. 3)

de la Sagrada Família no presentan, desde el punto de vista de la organización como fábricas, prácticamente ninguna novedad. No era muy usual en la época, aunque tampoco extraña, la combinación de fábricas muy contrastadas, como sucedía en el colegio de las Teresianas, o en la Casa Vicens, con baldosa de cerámica como revestimiento y mampuesto visto, y elementos parecidos con ladrillo en El Capricho, donde encontramos el único aparejo no usual en un muro del jardín.

En la segunda etapa, la de madurez, Gaudí mantuvo los materiales tradicionales y al mismo tiempo empezó a incorporar las fábricas, aunque no demasiado, a su creatividad más propia, más gaudiniana: los muros del Parc Güell, la fachada de la Casa Milà y, especialmente, la iglesia de la Colònia Güell.

La otra fábrica posible, el hormigón armado, no la utilizó nunca (Bassegoda, 1996), aunque durante la segunda mitad de su período de actividad profesional, a partir del año 1900, se convirtió en un procedimiento de construcción normal en edificios más o menos singulares de Europa y también de Barcelona. La única excepción, bastante tardía, se encuentra en el coronamiento de la torre de San Bernabé de la Sagrada Família (Bonet, 1997).

Para completar el repertorio plástico de Gaudí debemos mencionar el revestimiento con fragmentos de baldosas de cerámica, una especie de mosaico que se denomina habitualmente *trencadís* y con el cual podía revestir cualquiera de las formas inusuales que daba a sus elementos.

Como ya se ha indicado, Gaudí creó formas nuevas únicamente con los materiales y las fábricas habituales. Pero ¿cómo las hizo? Y, sobre todo, ¿por qué? Veamos primero lo uno y después lo otro.

Técnicas y formas

Gaudí consiguió formas nuevas de la única manera en que podía hacerlo: yendo a la raíz de las técnicas de toda la vida de los albañiles.

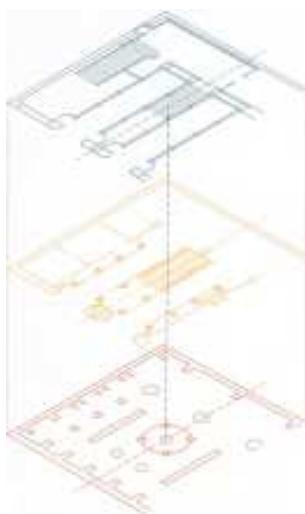
Con la ayuda de reglas puestas a plomo e hilos extendidos entre ellas, con ladrillos o mampuestos, el albañil levanta paredes o cualquier otro elemento de fábrica. Gaudí introdujo en esa sencilla operación las variaciones que le permitieron llegar, por primera vez en la historia, al repertorio de formas torcidas y regladas. Como decía él mismo, podían construirse muy fácilmente, ya que tan sólo inclinando una de las reglas los albañiles obtenían, sin saberlo, por ejemplo, un paraboloid hiperbólico (fig. 1).

Utilizó por primera vez esas formas para realizar elementos de cierto tamaño, como fachadas o bóvedas, en la iglesia de la Colònia Güell, una experiencia que le sirvió para desarrollar la propuesta formal que superó posteriormente la primera idea neogótica de la Sagrada Família. Sin embargo, también en una obra temprana, el Palau Güell, encontramos esas formas torcidas en algunos lugares: los sombreretes de las salidas de ventilación y de humos (Nocito, 1997). Organizados a partir de unas reglas geométricas complejas, nos revelan a un joven Gaudí geómetra experto y, al mismo tiempo, capaz de conseguir, mediante unas órdenes sencillas, que sus operarios hicieran formas muy elaboradas. Y, por descontado, lo lograba partiendo de las reglas del buen funcionamiento de las salidas de humos o las ventilaciones (fig. 2).

Con la variante de la técnica del tabicado, con la que se hacían las bóvedas de escala, o de cañón, o de Bohemia, conocidas en todas partes como bóvedas catalanas (J.-L. González, 1999a, 2000a; fig. 3), Gaudí creó formas nuevas casi siempre torcidas: la linterna del Palau Güell, las cubiertas de Bellesguard y los pabellones del Parc Güell,

A la derecha:
Complejidad geométrica de
una chimenea del Palau Güell (fig. 2)





Plantas sótano, baja y entresuelo del Palau Güell organizadas con pilares para permitir un uso flexible (fig. 4)

la buhardilla de la Casa Milà, las cubiertas y las paredes de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família, y algunas de las bóvedas de la iglesia de la Colònia Güell (Bergós, 1953, 1965).

Para completar la relación de técnicas de Gaudí hay que añadir la prefabricación de piezas de medida pequeña con ladrillos, baldosas o piedra artificial, un procedimiento aplicado en muchas de las obras del Parc Güell. Teniendo en cuenta las dimensiones de cualquier elemento del parque, hizo bastantes diseños basados en una repetición intencionada de elementos con el fin de facilitar su producción prefabricada (Paricio, 1981).

Así, pues, puede afirmarse que Gaudí, excepto en los pocos casos mencionados, no consideró necesario para obtener los elementos de su arquitectura utilizar las técnicas que aportaba la gran novedad de mediados del siglo XIX o principios del XX: la gran resistencia a la tracción del acero, solo o combinado con el hormigón. Y ese hecho, como no podía dejar de suceder, también tuvo unas consecuencias trascendentales en el repertorio gaudiniano de formas arquitectónicas.

En los elementos verticales (pies derechos, pilares, columnas, paredes), por el hecho de que casi siempre trabajan a compresión, ese factor no influyó demasiado, pero sí que lo hizo en los elementos que tienen que salvar una pequeña luz, como la parte superior de las ventanas, o en los elementos estructurales que deben salvar un gran espacio. Si bien en los edificios de viviendas esa cuestión no tiene una gran importancia, sí que la tiene, y mucha, en los dos edificios religiosos que hizo Gaudí, cuyas formas no producen ninguna tracción.

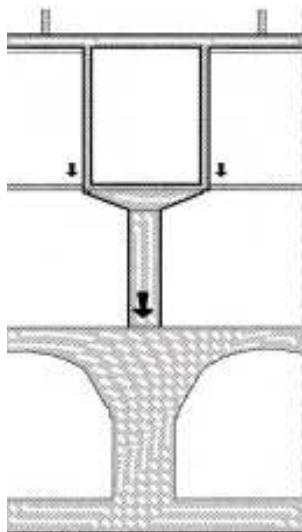
Por tanto, es razonable afirmar que la gran aportación de Gaudí consiste en una extraordinaria capacidad de inventar, a partir de los materiales, las fábricas y las técnicas del pasado más remoto, novísimas formas arquitectónicas no gratuitas, es decir, relacionadas con un uso concreto según su posición vertical u horizontal, o su función, como, por ejemplo, crear espacios que soporten cargas o ambientes aislados del exterior. Además, el arquitecto catalán planteaba, siempre que podía y el cliente se lo permitía (A. González, 1990a), tanto el problema como la solución desde la misma raíz, desde el origen. Veámoslo.

Pilares, paredes y fachadas

PILARES. Ya en obras tempranas se percibe una original utilización funcional de los pilares o pies derechos para crear espacios flexibles. Es el caso, por ejemplo, del Palau Güell, cuyas tres primeras plantas (el sótano y las dos dedicadas a las oficinas del propietario) se han resuelto con pilares, de ladrillo o piedra de una sola pieza, que permiten un uso flexible de ese espacio administrativo (fig. 4). También en la Casa de los Botines las plantas bajas se han resuelto con pilares de fundición siguiendo el modelo del Eixample de Barcelona (J.-L. González, 2002).

En cambio, no es nada habitual, sino todo lo contrario, la utilización de los pilares aislados y jácenas en los que se apoyan las vigas de los forjados de la Casa Milà (Heide, 1979). En este caso la intención de Gaudí no es conseguir un espacio de uso flexible a lo largo del tiempo, sino buscar la total libertad formal a partir de la distribución con tabiques de trazado encorvado que crean unos espacios internos muy singulares. Esta voluntad de forma habría quedado muy limitada en el caso de haber seguido el sistema habitual de paredes de carga (fig. 5, p. 63).

Otra nueva técnica propia de Gaudí es la combinación insólita de los elementos verticales con los horizontales, de la cual tenemos dos ejemplos tempranos muy representativos: el Palau Güell y el colegio de las Teresianas. En el palacio, también en el



Descenso de cargas de la planta entresuelo a la baja con un cambio de ubicación de los elementos verticales (fig. 6)



Estructura de pilares y jácenes de la Casa Milà que permite una distribución totalmente libre de los tabiques (fig. 5)



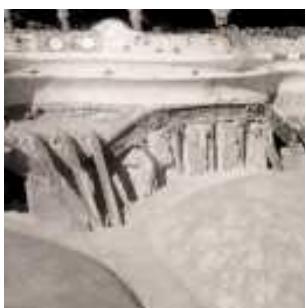
Anclajes de acero fijados a la estructura del edificio para sostener los sillares de la fachada (fig. 8)

primer proyecto (J.-L. González, 2001a), encontramos elementos con una forma en alzado que podemos denominar arborescente, en la que de un pilar se pasa a dos mediante dos ménsulas equilibradas con la ayuda del acero (fig. 6). Ese mismo sistema se desarrolla en el colegio de las Teresianas solamente con fábrica de ladrillo, con lo cual se consiguen unos efectos espaciales interiores únicos: de una pared en la planta baja se pasa, mediante dos pequeñas ménsulas, a unos pasillos que se cubren con arcos de perfil parabólico, unos pasillos que rodean el patio central y que forman uno de los conjuntos espaciales más interesantes de la obra temprana (fig. 7, p. 59; Tomlow, 1979b).

Es posible que estos ejemplos sean la raíz a partir de la cual se desarrollaron, en la etapa de madurez, las estructuras arborescentes como las de las últimas versiones de la nave de la Sagrada Familia.

PAREDES. Con paredes de carga muy finas, propias del uso catalán de la época (J.-L. González, 2001b), Gaudí resolvió muchas de las obras menos singulares, como la Casa Vicens, la Calvet y la de los Botines. En ésta última, sin embargo, una transposición no muy acertada del tipo habitual de vivienda del Eixample barcelonés a un solar a cuatro vientos de León, muy interesante como distribución (Molema, 1992), dio como resultado un edificio casi sin margen de seguridad (J.-L. González, 1995, 1996) que, además, se apoyaba sobre unos cimientos también problemáticos (Martinell, 1967; Casals, 1996). Gaudí, naturalmente, también se equivocó alguna vez.

FACHADAS. No obstante, el caso más singular de elemento vertical es sin duda la fachada de la Casa Milà, que representa un cambio radical sin precedentes, ya que las fachadas, y las de Gaudí no eran ninguna excepción, actuaban siempre como transmisores de cargas hacia los cimientos. En este caso, los sillares no aguantan nada, sino que se cuelgan con anclajes de acero de los elementos portantes interiores (Asarta, 1998; Vila, 1990; fig. 8), los cuales, tal como se ha indicado antes, también buscan la máxima libertad en la confi-



Conjunto de perfiles de acero, a la vista debido a las obras de reparación, que soporta los voladizos que hay encima de la sala hipóstila del Parc Güell (fig. 9)

guración de los espacios interiores. La Casa Milà constituye un ejemplo de la investigación radical de la libertad de formas sin las limitaciones de los elementos que deben transmitir cargas hacia los cimientos, pero con contrapartidas.

La utilización del hierro se convirtió en motivo de debate entre los arquitectos a lo largo del siglo XIX (J.-L. González, 1993b). Un autor, Viollet-le-Duc (1863), bien conocido por todos los modernistas, y también por Gaudí, aconsejaba dejar el hierro a la vista, ya que, como sabían perfectamente todos los arquitectos desde los tiempos de los griegos, el hierro se oxida, aumenta de volumen y destroza la fábrica que lo esconde. Gaudí fue uno de los muchos arquitectos de la época que, a pesar de todo, no renunciaron a conseguir formas solamente posibles con hierro escondido. Las encontramos en la Casa Milà y, con todas sus consecuencias, también en los entablamentos y otros elementos menores de cerámica armada de la sala hipóstila del Parc Güell (Bassegoda, 1989; Mañá, 2000; Rovira, 1990; fig. 9).

Arcos, forjados de techo y cubiertas

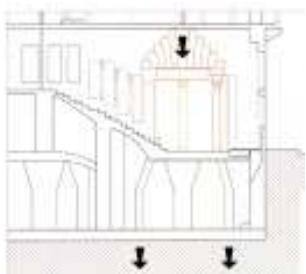
ARCOS. La manera de construir los arcos de Gaudí responde a una voluntad de innovación radical basada en la profundización máxima de las leyes de la mecánica: un perfil parabólico o antifunicular en un elemento arcado significa reducir el canto del elemento y los empujes sobre los elementos adyacentes, ya que la forma del arco coincide con la de la línea natural de los empujes. La obra en la que el arquitecto sacó el máximo provecho de esa ley es la iglesia de la Colònia Güell.

En las obras tempranas descubrimos esos arcos perfilando las aperturas de las fachadas. Es el caso de los pabellones de la Finca Güell o el colegio de las Teresianas, o las dos puertas de acceso al Palau Güell (fig. 10). En ese ejemplo, son dos arcos de perfiles aproximadamente parabólicos que actúan mecánicamente como arcos; por el contrario, las ventanas y las puertas de los pabellones o del colegio (fig. 11) son lo que se denomina habitualmente arcos falsos, ya que, aunque tienen el perfil arqueado, mecánicamente no actúan como arcos, sino como voladizos sucesivos de las hiladas de ladrillos que reducen progresivamente la luz hasta que el elemento que tiene aspecto de clave trabaja a flexión con la mínima luz posible.

Dentro del vestíbulo del Palau Güell encontramos un arco que responde a otro tipo de razones muy diferentes: durante la ejecución de la obra, o bien a petición del cliente o bien por iniciativa del arquitecto, se suprimió un pilar de soporte vertical (J.-L. González, 1998b, 2000c, 2001a). Eso representa un grave descalabro, como bien saben los profesionales de la arquitectura. Gaudí, en una demostración de una habilidad y creatividad simultáneas enormes, desvió las cargas que actuaban sobre el pilar suprimido hacia dos pilares cercanos mediante el arco en cuestión. Como los empujes quedaban dirigidos hacia el plano de la fachada principal, adoptó la solución de atirantarlos con un perfil metálico oculto (fig. 12).



Uno de los primeros arcos de perfil aproximadamente parabólico de grandes dimensiones de la obra de Gaudí, en el Palau Güell (fig. 11)

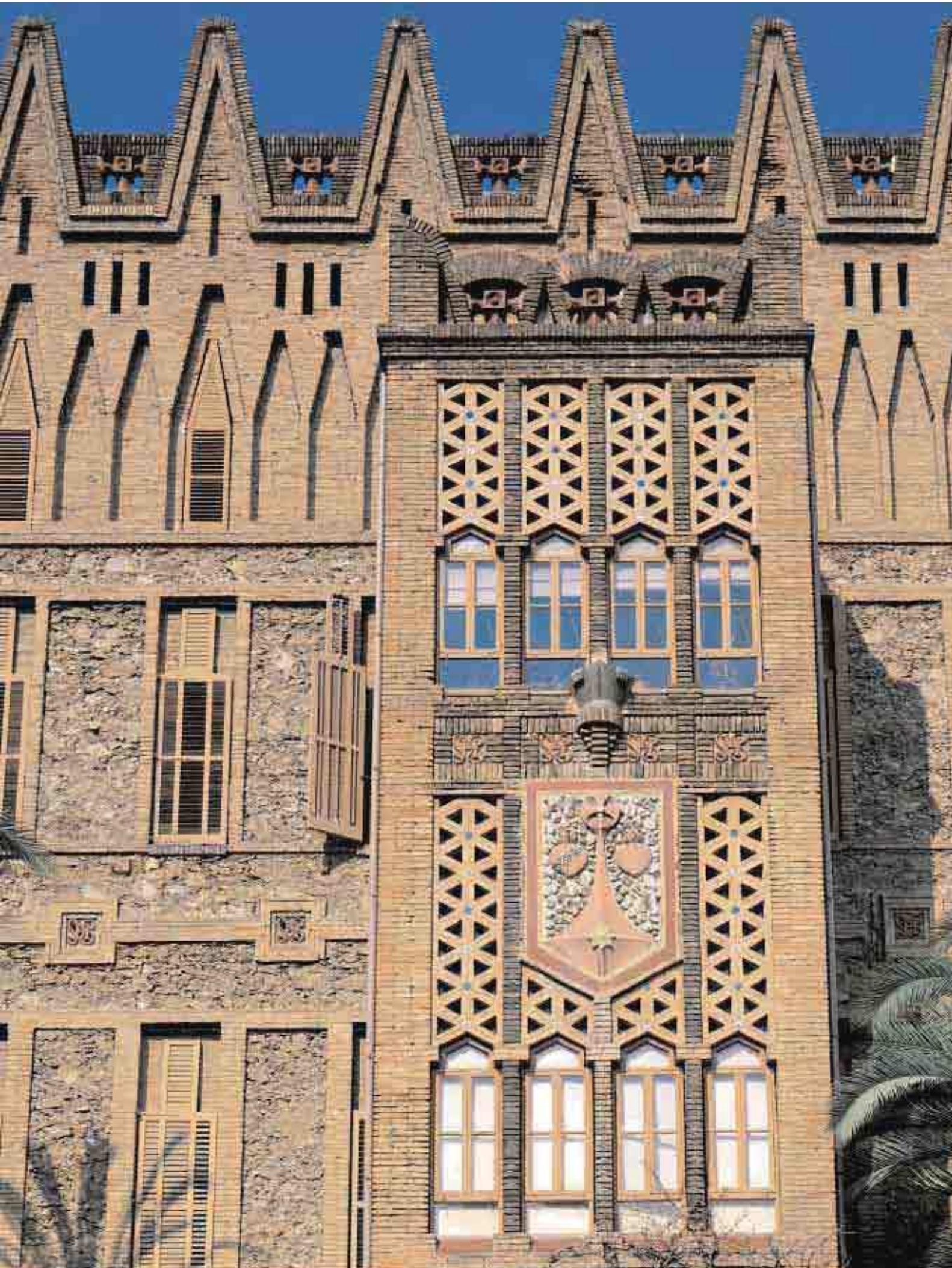


Solución con un arco atirantado adoptada para poder suprimir uno de los pilares de la planta baja del Palau Güell (fig. 12)

A la derecha:
Fachada de fábrica de tocho del colegio de las Teresianas, realizada con mucho oficio por el albañil (fig. 10)

FORJADOS DE TECHO. También los forjados de las plantas superiores del mismo palacio presentan dos rasgos característicos diferentes pero muy notables: los forjados de techo de la planta noble se han resuelto con un sistema de artesonados que, si bien pueden parecer elementos puramente decorativos, en realidad son la estructura portante de este techo (fig. 13, p. 66; Nuere, 1995-1997).

Desde el punto de vista funcional, son más importantes los forjados que separan la planta de dormitorios de los propietarios de la superior, donde se situaban los de los

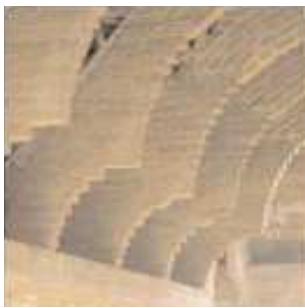




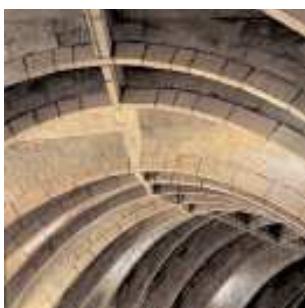
Techo artesonado de aspecto decorativo, pero con comportamiento estructural, del Palau Güell (fig. 13)



Sección de techo inusual y con condiciones acústicas singulares (fig. 14)



Demostración de las extraordinarias posibilidades de la obra de fábrica de ladrillo de la torre de Bellesguard (fig. 15)



Con el ladrillo formando elementos tabicados pueden hacerse estructuras de apoyo ligeras y resistentes, como en la Casa Milà (fig. 16)

criados, con una solución que no se ha aplicado en ningún otro edificio de Gaudí, ni de otros arquitectos, ni tampoco en ninguno de los tratados de la época (J.-L. González, 1993b). Están hechos con vigas de gran canto de 40×30 cm, con forma afilada en un caso, y en el otro de 30×30 cm, giradas 45 grados en relación con su disposición habitual, con la misma intención en los dos casos: apoyar una solera de diversas capas de mortero y piezas cerámicas hasta llegar a un grueso aproximado de unos 15 cm (fig. 14).

Se ha comprobado que esa configuración tiene unos efectos aislantes acústicos extraordinariamente elevados que resuelven el problema principal de esa situación, el ruido de impacto, y también el aéreo (Audioscan). Estamos, en consecuencia, ante un Gaudí claramente preocupado por la comodidad ambiental de sus clientes y que también consigue organizar eficazmente la ventilación de los edificios, rematada en la azotea por los sombreretes ya mencionados. Es un aspecto de Gaudí (muy poco estudiado todavía) que le muestra preocupado por el ambiente físico de sus obras (J.-L. González, 2002).

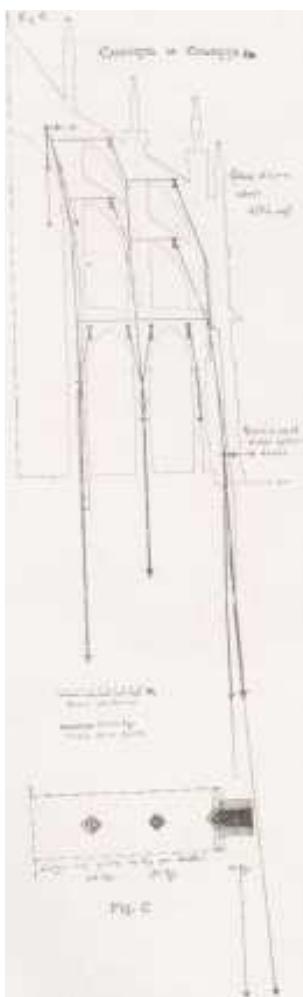
CUBIERTAS. En cuanto a los materiales utilizados como acabado final de las cubiertas, podemos destacar el de la Casa de los Botines, hecho con un revestimiento de pizarra, un material tan sólo justificado desde el punto de vista de la adaptación al lugar, y con un original sistema de evacuación de aguas (J.-L. González, 2002); el de Bellesguard (Trouerbach, Molema, 1979), que se basa en la utilización de la misma piedra de la fachada, lo que otorga una inusitada continuidad plástica de texturas y colores a todos los elementos de la envolvente, todo lo contrario del caso anterior, o el de la Casa Batlló, con las escamas de cerámica vidriada. En la Casa Milà, además de la buhardilla (Flores, 1999), encontramos una solución mixta: una azotea escalonada que, gracias al fraccionamiento, evita de raíz los problemas típicos (movimientos, grietas, etcétera) que suelen darse a causa de los tragaluces, resueltos con fábrica de ladrillo tabicado revestida con *trencadís*. Con ese mismo sistema se hicieron las dos cubiertas de los pabellones de entrada del Parc Güell (Bassegoda, 1992).

En cuanto a los sistemas de soporte, cabe notar que los de la Casa de los Botines no plantean ninguna propuesta que no sea la de utilizar los sistemas más comunes en el lugar, basados en elementos de madera. Por el contrario, Bellesguard representa uno de los casos más interesantes de uso de elementos de obra de fábrica (Trouerbach, Molema, 1979; fig. 15). Lo mismo sucede en la buhardilla de la Casa Milà, donde la utilización de arcos diafragmáticos de perfil catenario y las soleras tabicadas trabados entre sí reducen al mínimo la cantidad de material necesaria (Bergós, 1953, 1965; fig. 16).

Las dos iglesias

La función de pilares, columnas, arcos, bóvedas, fachadas y cubiertas de los dos edificios eclesiásticos que Gaudí imaginó era crear espacios dotados de un ambiente más bien austero, todo ello bajo la exigencia prioritaria de soportar la acción gravitatoria. No fue considerado el efecto de un movimiento sísmico importante, poco probable en Barcelona.

En los dos casos Gaudí sólo pensó en soluciones basadas en las fábricas tradicionales de albañilería de piedra o ladrillo que, como ya se ha indicado, sólo tienen resistencia a compresión. En consecuencia, tanto el problema como el repertorio posible



Las catedrales góticas tienen en el exterior todo el conjunto de elementos que equilibran los empujes de las bóvedas interiores (fig. 17)

de soluciones fueron los mismos que en la arquitectura religiosa histórica de los siglos anteriores.

Gaudí no consiguió acabar ninguna de las dos iglesias y, en ambos casos, lo que llegó a construirse fue fruto de un complejo y larguísimo proceso de elaboración, aunque con dos puntos de partida muy diferentes.

Para la iglesia de la Colònia Güell, Gaudí, que estaba ya en el inicio de su etapa de madurez, prescindió totalmente del repertorio del pasado y, gracias a su portentosa imaginación arquitectónica, creó unas formas nuevas de raíz, a pesar de utilizar los mismos medios históricos, es decir, la fábrica monorresistente (sólo resistente a compresión, aun utilizando cemento pórtland).

LA SAGRADA FAMÍLIA. Sin embargo, pocos años antes, en la Sagrada Família, sin duda muy condicionado por el proyecto inicial del arquitecto Villar, había optado por una solución neogótica, aunque (no podía ser de otra manera) también con una aportación personal muy grande. Según sus discípulos, la primera propuesta para el templo suponía un perfeccionamiento del gótic, ya que, gracias a la utilización de los arcos parabólicos muy peraltados, no eran necesarios los contrafuertes y los arbotantes, tildados por Gaudí de muletas de la arquitectura gótic (Martinell, 1951 y 1954; Puig Boada, 1981).

La segunda versión, de 1917, supuso un cambio radical en las propuestas formales tanto particulares como globales, como consecuencia de la experiencia de la iglesia de la Colònia Güell (Puig Boada, 1981). Del lenguaje neogótico se pasaba definitivamente al gaudiniano. La fábrica seguía siendo la monorresistente de piedra, y la idea del perfeccionamiento del gótic se mantenía en la concepción global, lo que se demostraba mediante la comparación con la catedral de la ciudad alemana de Colonia (Sugrañes, 1923; fig. 17). El nuevo procedimiento, que culminaba el sistema arborescente iniciado ya en las Teresianas o el Palau Güell, ya no se basaba en los arcos equilibrados, sino en la inclinación de los pilares centrales, experimentada en la iglesia de la Colònia Güell.

Sin embargo, en realidad, el procedimiento se fundamentaba, sobre todo, en la poca luz de las bóvedas y el lastre de unas cubiertas pesadísimas que verticalizaban las cargas (Puig Boada, 1952). En el fondo es el método gótic de los pináculos llevado al extremo, con lo que la tesis de que el gótic se perfecciona, defendida por todos sus discípulos (Sugrañes, Martinell, Puig Boada) y todavía sostenida hoy (Gómez, 1996; Bonet, 1995) es más que discutible (J.-L. González, 2002).

La tercera versión de la obra no supuso ningún cambio sustancial, salvo el enriquecimiento extraordinario del lenguaje fundado en formas geométricas regladas relativamente fáciles de construir. La composición basada en la fábrica monorresistente se mantenía. La verticalización de las cargas se incrementaba mediante un mayor volumen de la cubierta. La altura de la nave central era equivalente a la de la catedral de Mallorca; la del volumen de la cubierta que la cubría, semejante a la de la nave principal de la catedral de Barcelona.

No obstante, Gaudí no pudo llevar a cabo ninguna de esas ideas, salvo en el ábside y en las cuatro torres, tres de ellas sin rematar y todas con formas basadas en la fábrica de piedra monorresistente. La única excepción fue el remate de la torre de San Bernabé, en la que la ya citada utilización del hormigón armado le permitió, por primera vez, conseguir una forma imposible con una fábrica monorresistente.

Cualquier afirmación sobre cómo habría seguido la obra si un tranvía no se hubiera cruzado en su camino no deja de ser una hipótesis incontrastable, a no ser que aparezca algún documento desconocido hasta ahora.

Como una hipótesis más, es razonable afirmar que, en los muchos años que podía haber seguido viviendo, Gaudí podría haber extendido de manera decidida el uso del hormigón armado al proyecto de toda la estructura del templo, y no sólo a algunas piezas, para facilitar la puesta en obra (Sugrañes, 1920). Considerando el rigor que adoptó en sus dos ideas de iglesia al relacionar forma y materia, y que el hormigón armado ya era una técnica que había producido obras arquitectónicas singulares, también es lógico suponer que nos habría dejado una nueva versión, la cuarta, basada en la fábrica birresistente (a compresión y tracción) y, además, estable frente a posibles sismos. Y, como siempre, dado lo imprevisible que era el arquitecto, nos habría sorprendido, aunque, obviamente, habría perdido sentido aquella idea de perfeccionar las obras maestras de las fábricas monorresistentes góticas.

LA IGLESIA DE LA COLÒNIA GÜELL. Donde no es necesario formular hipótesis es en la parte que acabó de la iglesia de la Colònia Güell, en la que, además, se comprueba de manera radical esa imprevisibilidad.

Es razonable afirmar que, a pesar de ser de un tamaño bastante menor, se trata de la obra en la que pudo desarrollar, desde la raíz, desde el origen y con toda libertad, su inmenso potencial creativo. Las características mecánicas del cliente y el prolongado lapso de tiempo de que dispuso para llevar a cabo el proyecto supusieron unas condiciones inmejorables para ello.

Güell le hizo el encargo en 1898 y las obras del proyecto definitivo de cripta e iglesia (en realidad, dos iglesias superpuestas) no dieron comienzo hasta 1908. Se suspendieron en 1914, cuando sólo estaba construida la iglesia baja, cuyo pórtico sostenía la escalera de acceso a la alta (Puig Boada, 1976).

El método que utilizó Gaudí para establecer la forma general del edificio es bien conocido, pero no sobra recordarlo: fue una compleja y laboriosa maqueta funicular (Tomlow, 1989), es decir, de hilos colgados traccionados con pesos representativos de las diferentes partes del edificio, cuya inversión de 180 grados, mediante croquis o fotografías, daba la posición y la dirección en el espacio de los ejes de los elementos constructivos de fábrica monorresistente exclusivamente lineales, pilares o arcos, que estarían sometidos sólo a esfuerzos de compresión axiales (fig. 18 y 19, p. 69).

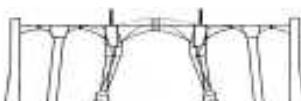
Ese procedimiento es de una gran singularidad en el panorama de la historia de la arquitectura. La utilización de las líneas funiculares ya era conocida desde épocas anteriores; sin embargo, ningún edificio relevante había sido levantado siguiendo ese principio, y menos todavía como conjunto de líneas funiculares trenzado en tres dimensiones.

Para Gaudí los funículos no eran sólo una forma potencialmente antigravitatoria, sino que los utilizaría intencionadamente para la recreación del espacio, aunque fuera forzando el criterio general aplicado a todo el edificio, como queda claro en el presbiterio de la iglesia baja construida. La inclinación dramática de dos de los pilares basálticos es totalmente intencionada, y no consecuencia automática de las leyes de los funículos. Gaudí era consciente de que dos pilares casi verticales en el centro del espacio no satisfacían la intención expresiva que perseguía y decidió inclinarlos también. Esa oblicuidad la consiguió por medio de los empujes no equilibrados de los arcos situados justo encima de esos pilares en planos inclinados, y no de las cargas de la iglesia alta, lo cual crea no pocas paradojas sobre la factibilidad de esa conclusión final de la obra (fig. 20 y 21; J.-L. González, 1990).

Sin embargo, donde la creatividad actúa con mayor fuerza es en el paso del hilo a la materia, en su encarnación, aunque es muy consciente de las leyes de la estática y, en consecuencia, genera los elementos portantes con una corporeidad suficiente para



Desequilibrio y deformación teórica (muy aumentada en el dibujo) en la situación actual de la planta inferior de la iglesia de la Colònia Güell (fig. 20)



Desequilibrio y deformación teórica (muy aumentada en el dibujo) en el supuesto de que se hubiera terminado el edificio de la iglesia de la Colònia Güell (fig. 21)



Detalle del techo de la iglesia de la Colònia Güell. Si el lector gira el libro 180 grados podrá ver que los arcos parecen realmente hilos colgados (fig. 22)

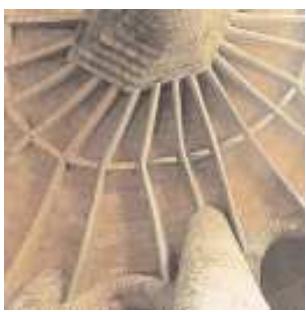
Fotografía de la maqueta anterior, girada 180 grados y repintada encima, con una vista del ábside de la iglesia de la Colònia Güell (fig. 19)



Maqueta de hilos colgados con la cual, mediante fotografías giradas 180 grados, se determinó la forma del edificio de la iglesia de la Colonia Güell (fig. 18)



no sufrir los efectos del pandeo. Por ello, en contraste con los cuatro pilares basálticos, aparecen los gruesos pilares de obra con una sección que les permite responder con sobrada capacidad mecánica a los esfuerzos de compresión producidos por la iglesia alta sin riesgos de deformaciones. Los arcos se interconectan con una riostra que acentúa formalmente el carácter de deambulatorio, que a su vez subraya la idea de centralidad espacial buscada por Gaudí (fig. 22, p. 68, puesta al revés). Todo ello, como ya también se ha demostrado, es lo que lleva a que la parte construida tenga, en realidad, un comportamiento mecánico bien diferente al del edificio inverso de una hipó-



Pruebas de formas diversas, hechas con mortero de cemento pörtland, para dar un acabado más rico a los arcos del techo de la iglesia de la Colonia Güell (fig. 23)



Formas alabeadas de fábrica de piedra tendida entre dos líneas de fábrica de ladrillo (fig. 24)



Los aparentes contrafuertes son en realidad ondulaciones del muro que le dan rigidez (fig. 25)



Las formas aparentemente libres que rodean la ventana tienen en realidad la función de desagüe (fig. 26)

tética maqueta de hilos a la cual hubiéramos quitado su parte inferior, o sea, la superior del edificio (J.-L. González, 1993a).

Son paradojas que con toda probabilidad Gaudí conocía a la perfección y que resolvió correctamente para esa construcción parcial. No podremos saber si el éxito habría sido total una vez concluido todo el conjunto.

La falta de documentación y la inconclusión de la obra dan lugar a las interpretaciones más aventuradas; por ejemplo, la que afirma que el sistema de arcos y costillas del techo de la capilla es una muestra de un brutal despliegue de un vocabulario elemental y primitivo (Solà-Morales, 1983). Sólo puede asegurarse lo anterior si no se comprueba que la desnudez de arcos y costillas obedece a la inconclusión de la propia obra; en un rincón de la misma se encuentran indicios de cómo acabar y camuflar esa configuración constructiva (fig. 23) que dejan claro que Gaudí no era, en absoluto, partidario de lo que se ha dado en llamar «sinceridad constructiva». Como mucho, sólo los pilares de basalto desbastado podrían entenderse como algo primitivo, pero también puede argumentarse que Gaudí escoge un material mucho más resistente para conseguir, al reducir el diámetro de los pilares, un espacio del presbiterio más diáfano. Que los dejara casi como salieron de la cantera también se explica por la extraordinaria dureza del material y su resistencia a la labra.

Donde no hay dudas de lo que quiso hacer Gaudí es en las partes que podemos considerar totalmente acabadas: las fachadas y el pórtico.

Las *fachadas*, por su carácter superficial, no podían realizarse dando corporeidad a los hilos, lo cual llevó al arquitecto a resolverlas mediante superficies regladas. El método era sencillo y, naturalmente, reflejaba con una fuerza muy expresiva la maqueta generadora del edificio: los hilos se materializaron con fábrica de ladrillo recocho con un ancho de varias sogas, y entre «hilo» e «hilo», que no eran paralelos, se tendió la fábrica oscura de ladrillos requemados o escorias (Vendrell, 1997-2001) que representaba el vacío entre ellos. Su falta de paralelismo generaba una superficie alabeadas (fig. 24).

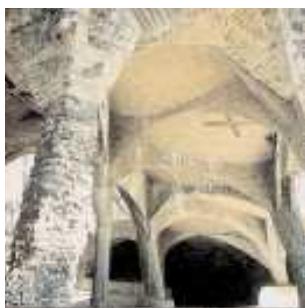
El conjunto arrancaba de un polígono estrellado, lo que dio a algunos tramos de la fachada una forma que puede entenderse como propia de unos contrafuertes (fig. 25); nada más erróneo, ya que lo que pretendía Gaudí era precisamente evitarlos, como ya se ha indicado. En realidad, lo que parece un contrafuerte es un muro plegado que responde a la forma buscada en la maqueta y que aporta mayor rigidez que la del muro recto, siguiendo el mismo principio mecánico aplicado en el delgado tabique, en forma de conoide, que cierra las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família (Looise, 1979).

En esos muros se abrieron las ventanas, y en los recercados de éstas encontramos un ejemplo nítido de la continuidad que siempre buscó. No existen ni jambas ni dinteles, ni arcos, ni alfizares; es un todo continuo para el que no son de aplicación los anteriores términos, pero la extraordinaria expresividad del *trencadís* no impide que, además, todo el conjunto responda a una razón práctica: la expulsión controlada del agua (fig. 26).

En el *pórtico* vuelve a quedar patente el esfuerzo de pasar del hilo al arco y a la columna, a lo que se añade un elemento que quizás habría estado mucho más presente en la parte superior del edificio de haberse acabado: una versión absolutamente genial y novedosa de la forma de las bóvedas.

Antes de entrar en ellas, sin embargo, es preciso ver los elementos sobre los que descansan, los arcos, y en ellos encontramos a un Gaudí que podemos considerar divertido, de buen humor, aunque consecuente con esa búsqueda inagotable, mediante el dominio de los elementos constructivos, de recursos expresivos sin contradicciones.

El pórtico está formado por un conjunto de pilares, arcos y bóvedas que forman una retícula triangular que da soporte a dos plataformas y dos tramos de escalera que habrían permitido acceder a la iglesia alta. De acuerdo con lo prescrito por la maque-



Soportal de la iglesia de la Colònia Güell. Si el lector gira 180 grados el libro verá que los arcos tienen la misma forma que los hilos de la maqueta invertida (fig. 27)



Los arcos que soportan todo el conjunto no tienen forma circular, sino poligonal (fig. 28)



Los dos tramos de forma circular no se encuentran en la clave (fig. 29)

ta funicular, los pilares y los arcos siguen los criterios antifuncionales sin ningún tipo de transgresión en la forma general, aunque sí en la particular (fig. 27).

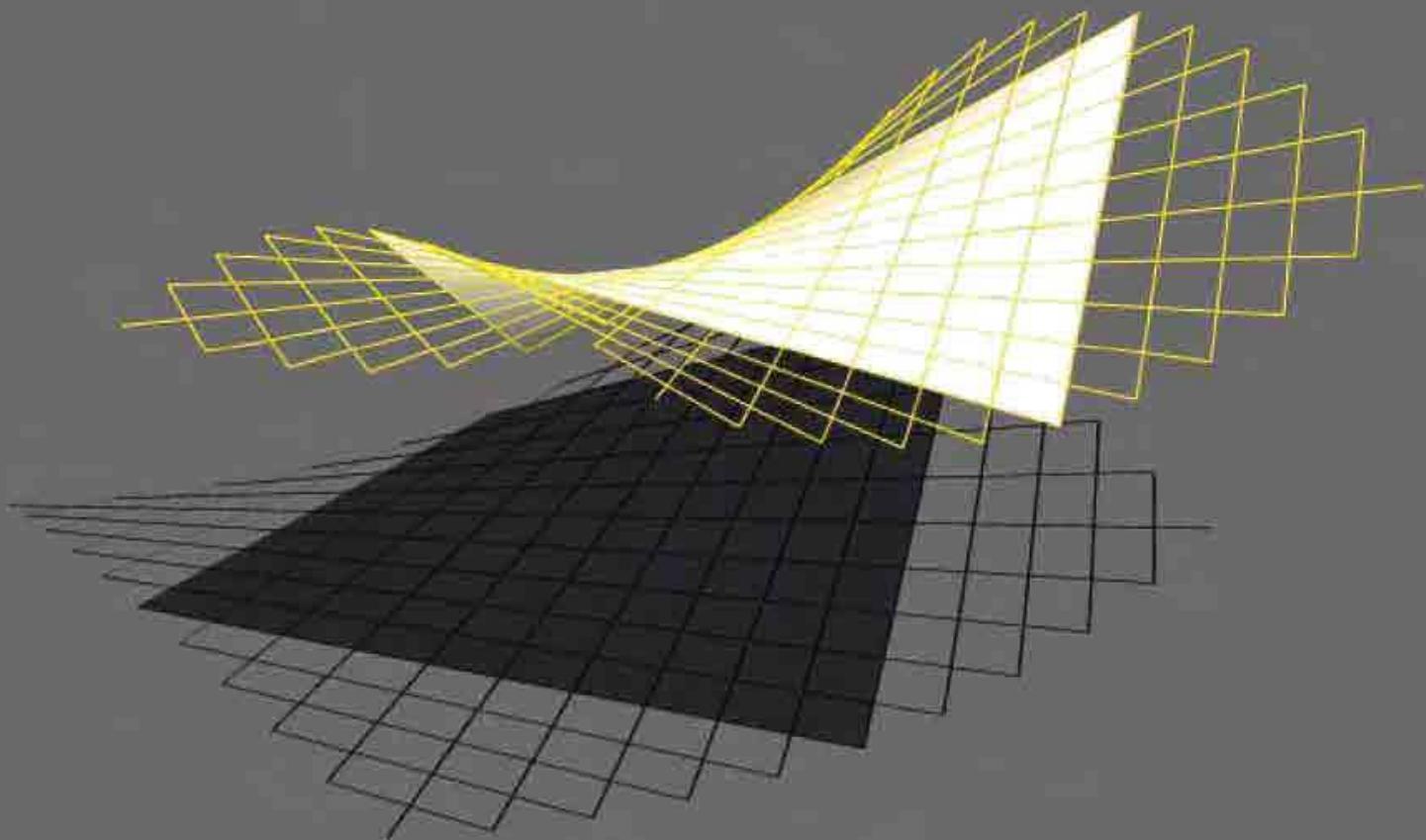
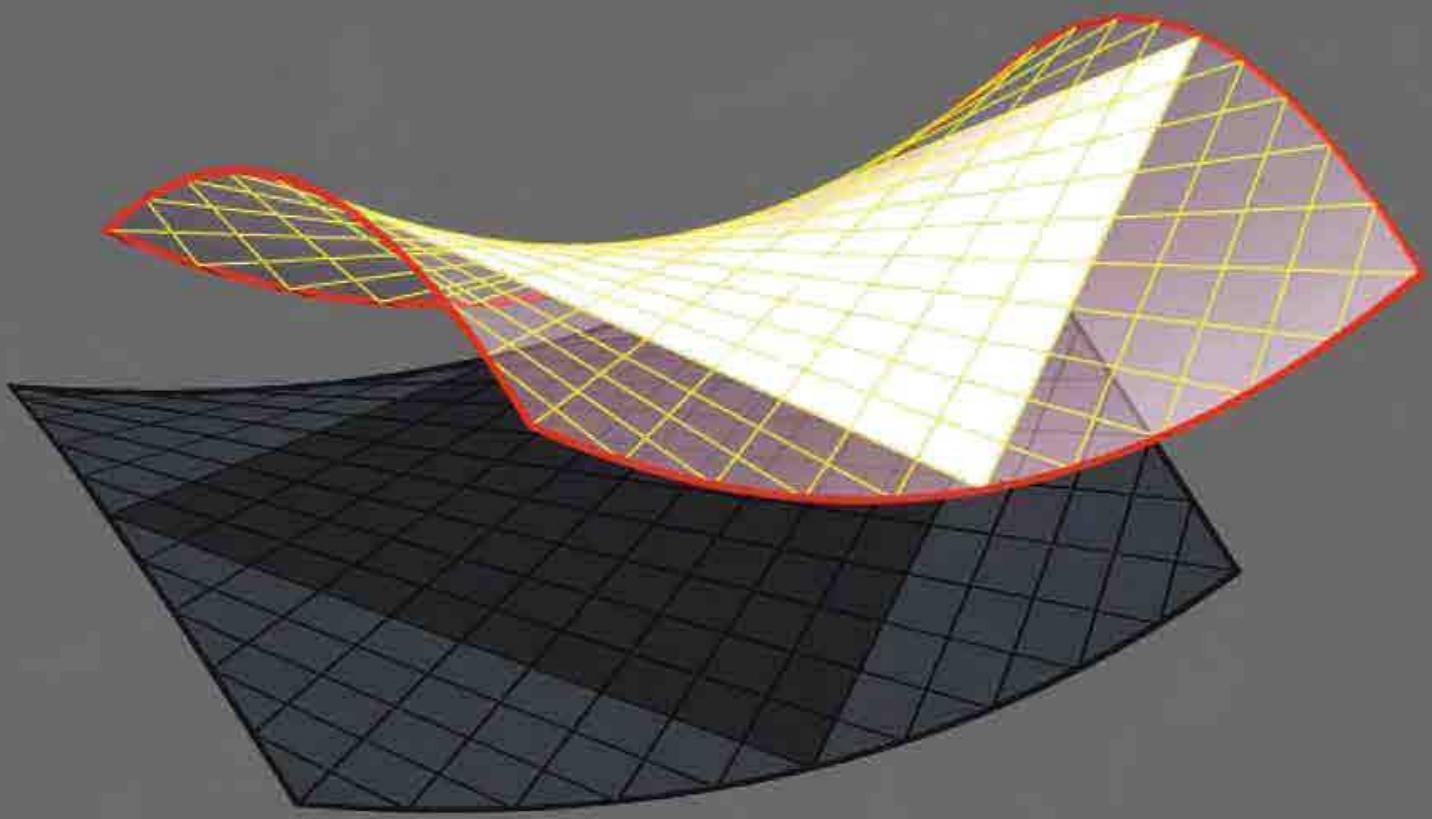
El análisis de su configuración constructiva permite observar la creatividad lúdica de Gaudí: se basa, paradójicamente, en tres elementos rectilíneos, dos cónsolas salmer y un arco recto a sardinel, de manera que el funículo invertido se transforma en un arco de tres lados rectos (fig. 28). No obstante, haciendo gala de su maestría vuelve irónicamente a la forma funicular, aunque no continua, por medio de dos semiarcos no portantes que no se encuentran, sino que se eluden precisamente en su clave. A fin de subrayar ese efecto, parte del salmer se esculpe para aparentar una inverosímil continuidad entre el intradós y el frente del arco (fig. 29). Es difícil hacer un juego de virtuosismo expresivo, irónico y constructivo de mayor riqueza.

Como puede observarse, se trata de un sentido del juego irónico totalmente opuesto a lo que algunas inverosímiles interpretaciones atribuyen al pórtico: un mortificador, sacrificado y durísimo trabajo redentor de una supuesta maldición divina original (Lahuerta, 1993).

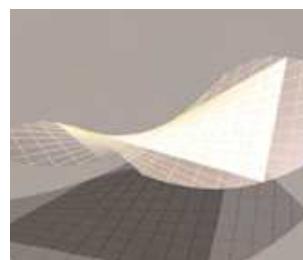
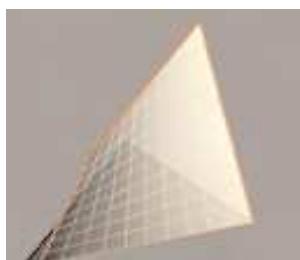
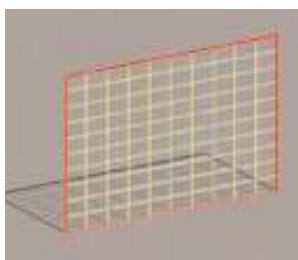
Es difícil encontrar casos como el pórtico de la iglesia de la Colònia Güell en los que se manifieste tan meridianamente que quien manda, de manera lúdica si se tercia, no es una maqueta, ni la construcción, ni una inverosímil presión mística, sino, sencillamente, el arquitecto. En el pórtico no hay, ni más ni menos, que un arquitecto disfrutando apasionadamente de su trabajo.

Y ése es también el origen de la solución de las bóvedas: una demostración extrema de su maestría arquitectónica. Precisamente por el hecho de no estar en absoluto definidas en la maqueta funicular (fig. 18, p. 69), es en ellas donde puede encontrarse con mayor fuerza la prodigiosa manera de concebir durante el mismo proceso de construcción (ver el apartado «Las bóvedas convexas», p. 74).

Es posible añadir ejemplos y ejemplos que abunden en la misma dirección, pero hemos llegado al límite del texto. Con todo, creemos que los expuestos han sido suficientes para demostrar la tesis inicial: Gaudí entiende la construcción como un medio para alcanzar una portentosa y original síntesis arquitectónica, precedida siempre de una incansable búsqueda del origen de todas las cosas.



BÓVEDAS CONVEXAS



**JOSEP-LLUÍS GONZÁLEZ
ALBERT CASALS**

Forma y superficie

Tal como ya se ha indicado en el texto «Gaudí y la construcción» de este catálogo, el pórtico de la iglesia baja de la Colonia Güell está formado por un conjunto de pilares, arcos y bóvedas que forma una retícula triangular que da soporte a dos plataformas y dos tramos de escalera que habrían permitido acceder a la iglesia alta. Las bóvedas ocupan los vacíos triangulares de la estructura de arcos.

La solución normal habría sido construir unas bóvedas de doble curvatura, baídas o de traslación, es decir, cóncavas, muy comunes en la manera de hacer de los constructores catalanes de la época (J.-L. González, 1999a), pero las construidas en la práctica son bien diferentes (fig. 1). Les hemos aplicado el calificativo de «convexas» (J.-L. González, 1998a) por su particular forma, opuesta a la de las habituales o cóncavas.

Su análisis morfológico básico nos revela que estamos ante las primeras bóvedas de la historia de la arquitectura con forma de paraboloides hiperbólico (ver el apartado «Geometría gaudiniana», p. 26).

Gaudí resolvió el conjunto mediante tres tipos de bóvedas. El primero es el más fácil de trazar (fig. 2-3, p. 76), ya que es la bóveda mitad del tetraedro (Tomlow, 1979a). Los dos lados rectos se entregan en los frentes de los arcos; el tercero es una parábola convexa de gran flecha. Este rasgo morfológico comporta que sólo sea una solución útil cuando el tercer lado sea un

muro, como ocurre en cinco de las bóvedas del nivel inferior del pórtico.

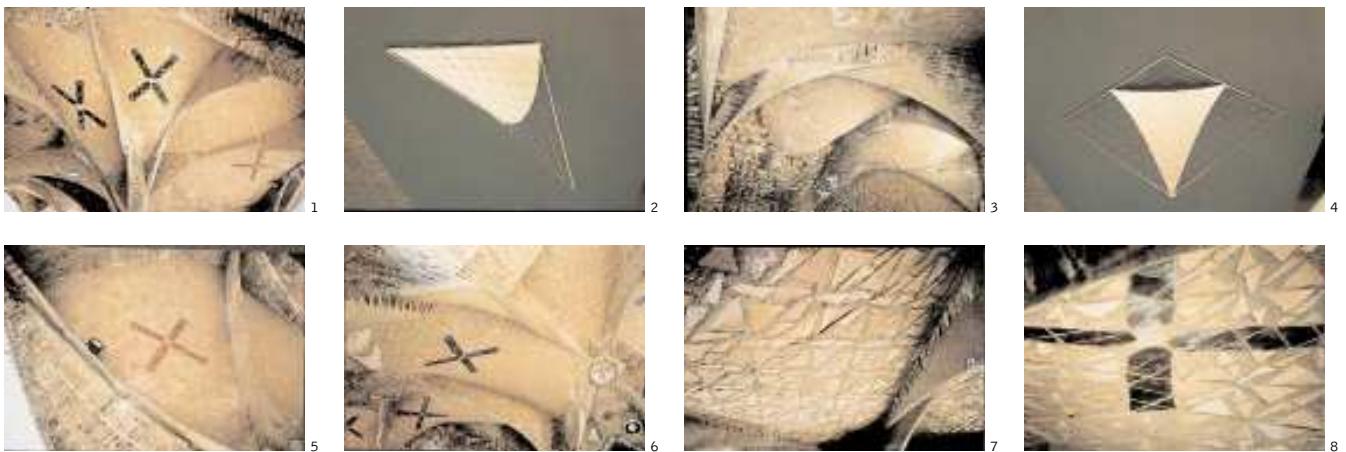
Para las otras dos bóvedas de este nivel y para las del tramo en rampa fue preciso buscar una segunda solución, ya que los lados son los arcos que no permiten tanta flecha; Gaudí la encontró en la intersección de un prisma triangular (formado a partir de los frentes de los arcos) con la parte central del tetraedro antes citado. Las líneas de intersección pasan a ser tres parábolas, dos convexas y una cóncava, o al revés, mucho más rebajadas, que se alojan fácilmente sobre las superficies laterales de los arcos de apoyo (fig. 4-5, p. 76).

El tercer tipo de bóveda, de contorno trapezoidal, no añade nuevas dificultades, ya que se genera por la intersección de un prisma de ese contorno con el paraboloides, lo que da lugar a cuatro parábolas rebajadas, dos cóncavas y dos convexas (fig. 6, p. 76).

La superficie de las bóvedas está acabada con una compleja textura obtenida a partir de los elementos más sencillos de la albañilería: granos de arena y trozos triangulares de rasilla. La arena está adherida a un soporte de mortero que no queda a la vista. Los retales cerámicos están como embutidos en la arena. La decoración se completa mediante trozos de cerámica vidriada que forman un aspa o cruz de San Andrés.

Secuencia geométrica de imágenes de un paraboloides hiperbólico y su sección parabólica

A la izquierda:
Modelado informático de la generación de partes de un paraboloides hiperbólico

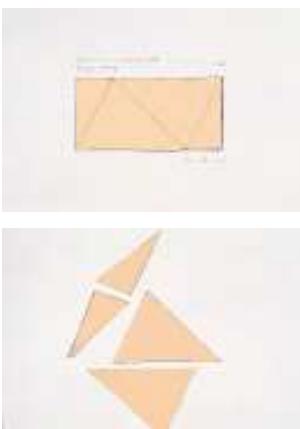


Visión global de las bóvedas (fig. 1)

Modelos e imágenes reales de dos de las bóvedas del soportal de la iglesia de la Colonia Güell (fig. 2-3-4-5)

Visión global de las bóvedas (fig. 6)

La decoración de baldosas sigue las rectas directrices y generatrices (fig. 7-8)



Cortes hechos en la baldosa del techo y ordenación de las piezas cortadas (fig. 9-10)



Sección constructiva de una de las bóvedas (fig. 11)

Pues bien, la maestría de Gaudí se afirma una vez más cuando se advierte que toda esta composición plástica superficial está basada en las mismas propiedades geométricas del paraboloide hiperbólico. Las dos familias de rectas que generan la superficie son las trazas de la extraordinaria decoración de rasilla; el aspa destaca dos de esas rectas (fig. 7-8).

En los dos primeros tipos de bóvedas, las dos familias de generatrices se cruzan formando ángulos de 60 y 120 grados. Las paráboles de la trama de rasillas son las que se obtienen con intersecciones de planos paralelos al eje menor que acaban de completar la malla de triángulos equiláteros.

En el tercer tipo, las generatrices se cortan a 90 grados. El dibujo pasa a ser otro muy distinto y añade todavía más riqueza a todo el conjunto.

Como no podía ser de otra forma, el método para conseguir todos los trozos de rasilla es sorprendentemente sencillo: se trocea por medio de tres rectas que la cortan según la figura. De cada rasilla obtenemos dos piezas anchas y dos estrechas. Una de las familias de generatrices y la de las paráboles se dibujan con las piezas estrechas, y la segunda familia de generatrices se delinea por una junta ancha entre los retales triangulares grandes (fig. 9-10).

Es difícil obtener mayor complejidad con tan reducido número de elementos, y no es nada fácil imaginar de qué manera los albañiles dirigidos por Gaudí pudieron conseguir toda esta extraordinaria complejidad geométrica, aunque no podremos averiguarlo sin saber antes cómo fue la realización de su soporte. Decoración y soporte forman una unidad indisoluble.

Pues bien, no tenemos ningún documento, ni escrito ni gráfico, que nos aporte ninguna pista de cómo se construyeron.

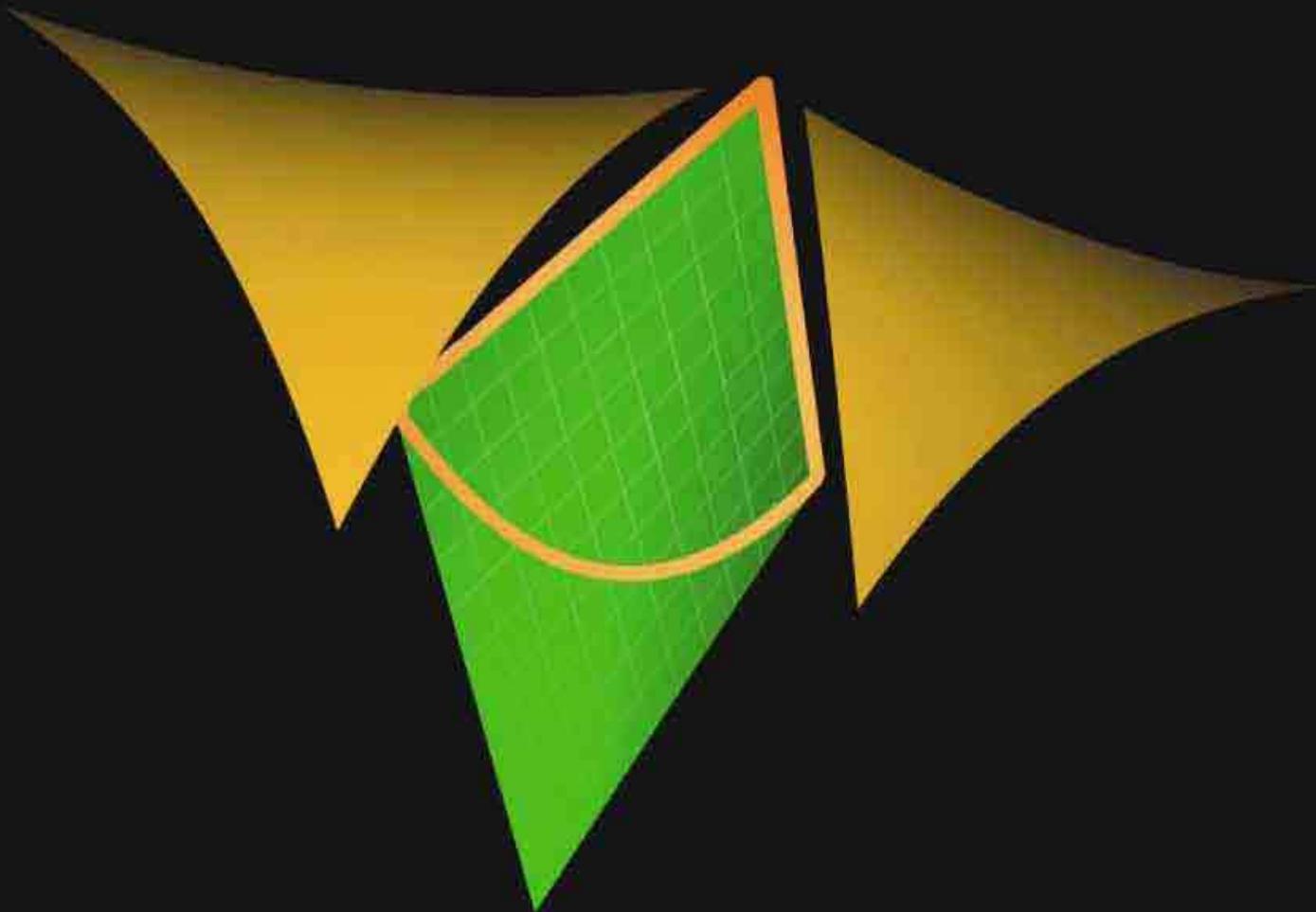
Configuración constructiva

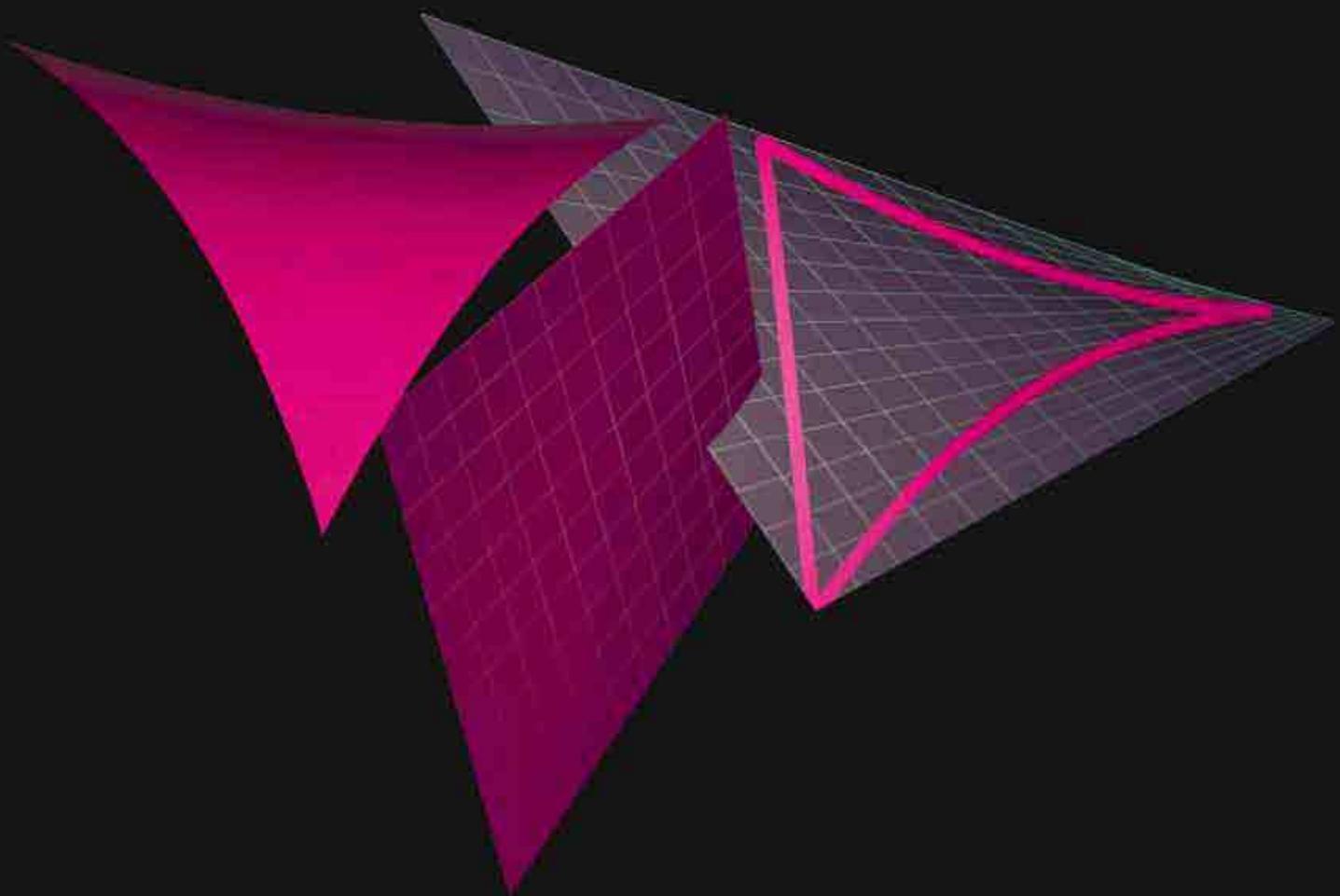
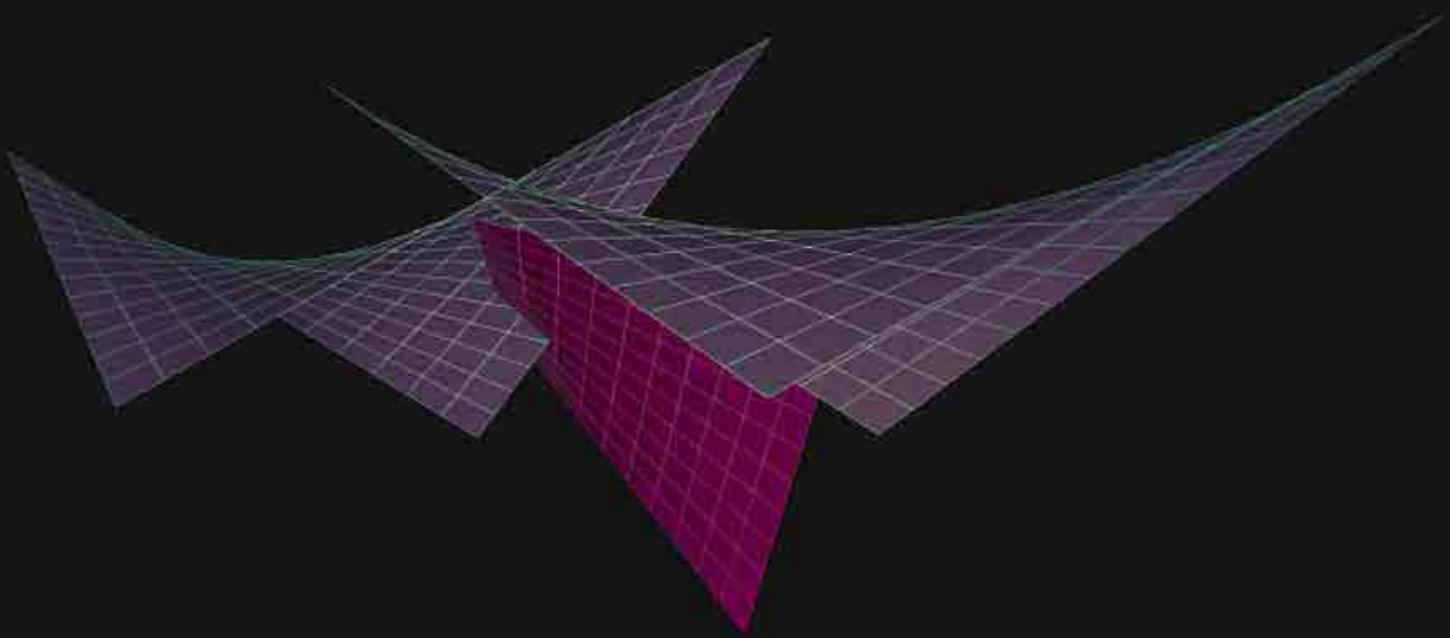
Las hipótesis formuladas hasta hoy que intentan explicar el proceso constructivo han sido dos: la de la bóveda tabicada y la del hormigón sobre encofrado. La primera versión es la que tiene mayor número de seguidores, aunque ni la apariencia ni ninguna documentación la avalan. La segunda, no muy verosímil, tiene como base documental lo escrito por el escultor Matamala en sus memorias (Puig Boada, 1976) unos cincuenta años después de haberse construido las bóvedas.

Las pequeñas catas o prospecciones que han podido realizarse (J.-L. González, 1999b) con motivo de los trabajos de restauración del edificio (financiados por la Diputación de Barcelona) permiten pasar de las hipótesis no documentadas a las que se basan, cuando menos, en su configuración constructiva visible.

El desperfecto que creó una salida de humos de una cocina militar de campaña de la guerra de 1936 ha permitido realizar una cata de la sección de la bóveda. La observación directa, junto con los análisis petrográficos de los materiales (Vendrell, 1997-2001), permite detallar la sección. De abajo a arriba encontramos (fig. 11):

- Capa de acabado con granos de arena.
- Capa de mortero de cemento pórtland que recibe los retales de rasilla de las rectas generatrices.
- Capa también de mortero que contiene pequeños trozos de rasilla como relleno.
- Capa continua de sólo una hoja de rasillas con juntas muy finas de mortero de cemento pórtland (lo cual anula la hipótesis de la bóveda tabicada, que necesita como mínimo dos hojas de la primera tomada con yeso).





- Capa gruesa de conglomerado de mortero, piedras y trozos de ladrillo.
- Preparación del pavimento de la escalera o plataforma.

Gracias a las técnicas microscópicas, ha podido advertirse que los granos de arena de la primera capa se adhieren sólo en su mitad superior, con lo que se explica esa microtextura tan granada. Si se retira uno de ellos de su posición, se comprueba que la superficie de contacto está revestida de lechada de cal.

El repicado de una parte de las capas de mortero ha permitido ver que la capa continua de rasillas responde a una disposición muy regular a rompejuntas, similar a la del tablero techo de la iglesia baja.

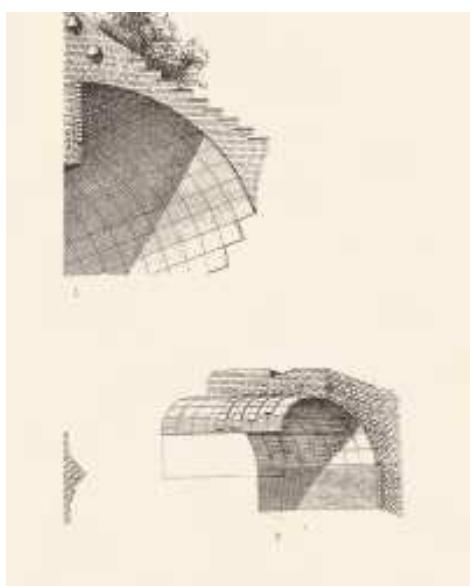
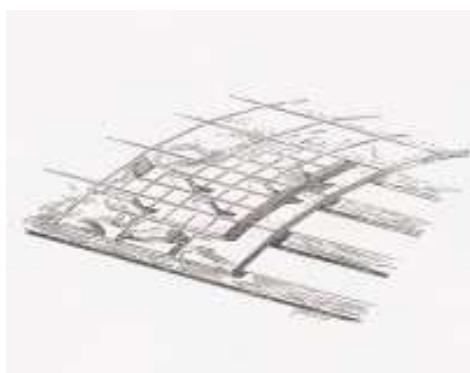
Una explicación constructiva de esta disposición puede ser: la tercera capa es un enlucido que regulariza la superficie poliédrica de la hoja de rasillas; la segunda es la que, una vez dispuesta sobre la anterior, permite embutir en ella las rasillas siguiendo las dos familias de generatrices del paraboloides; la primera capa es consecuencia de haber lanzado la arena sobre una lechada de cal. Todo lleva a que la hoja continua de rasillas ya estaba acabada cuando sobre ella se realizó el revoco. Esta versión contradice la de Matamala, que suponía un encofrado sobre el que se colocaban la arena y, encima de ella, los retales de rasilla.

Todavía es preciso contestar, pues, a dos cuestiones clave: ¿quién actúa como elemento portante? y, en definitiva, ¿cómo se construyó?

El proceso de construcción

Una hipótesis que reúne con elegancia todas las preguntas y los indicios visibles puede formularse (J.-L. González, 2000b) a partir de la comparación de la sección descrita con algunas figuras de Auguste Choisy (1873), precisamente aquéllas con las que el ingeniero francés explicaba la construcción de las bóvedas de hormigón de la arquitectura imperial romana. En ellas aparece lo que se ha considerado siempre como un antecedente de las bóvedas tabicadas catalanas: las bóvedas delgadas de piezas cerámicas que actuaban como encofrado perdido de las auténticas bóvedas resistentes, que eran las de hormigón (fig. 12-13). A la vista de esas figuras, es razonable afirmar que en el pórtico de la iglesia de la Colonia Güell nos encontramos con unas bóvedas construidas a la manera romana. No sólo es un procedimiento totalmente factible, sino además el más apropiado a las características de la obra.

La primera operación es la realización del soporte del encofrado mediante tablones según



GRABACIONES DE G. B. SARTORIUS
— THERMES DE CARACALLA
NR. SETTE SALE

Imágenes de cómo hacían los constructores romanos las bóvedas de hormigón con la ayuda de piezas cerámicas apoyadas sobre tablones de madera (fig. 12-13)

A la izquierda y anterior:
Representación informática de la generación de tres bóvedas del soportal de la iglesia de la Colonia Güell



Maqueta de una construcción hipotética de las bóvedas convexas (fig. 14)

el haz de directrices, apoyados en puntales y elementos auxiliares. Sobre ellos se coloca una serie de cabios que actúan como las generatrices del parabolóide. Encima de éstos se sitúan las rasillas de la hoja única tomadas con mortero de cemento pórtland, de manera similar a la del tablero del techo de la iglesia baja (J.-L. González, 1990), que actúa como encofrado perdido, y sobre ellas se fabrica definitivamente el hormigón (fig. 14). Dada la configuración morfológica antedicha, trasmite su peso y las sobrecargas de uso sobre los arcos, mediante la sección abovedada cóncava.

El hormigón acaba de dar corporeidad al volumen necesario hasta enrasar, o bien con la superficie más o menos plana del tramo horizontal o bien con las superficies inclinadas de las rampas de la escalera.

Sobre las dificultades del replanteo para colocar tablones y cabios siguiendo el trazado de directrices y generatrices, no se olvide que ya

se había conseguido replantar el edificio entero a partir de las medidas tomadas de la maqueta funicular, por lo que el pórtico no suponía una mayor complicación.

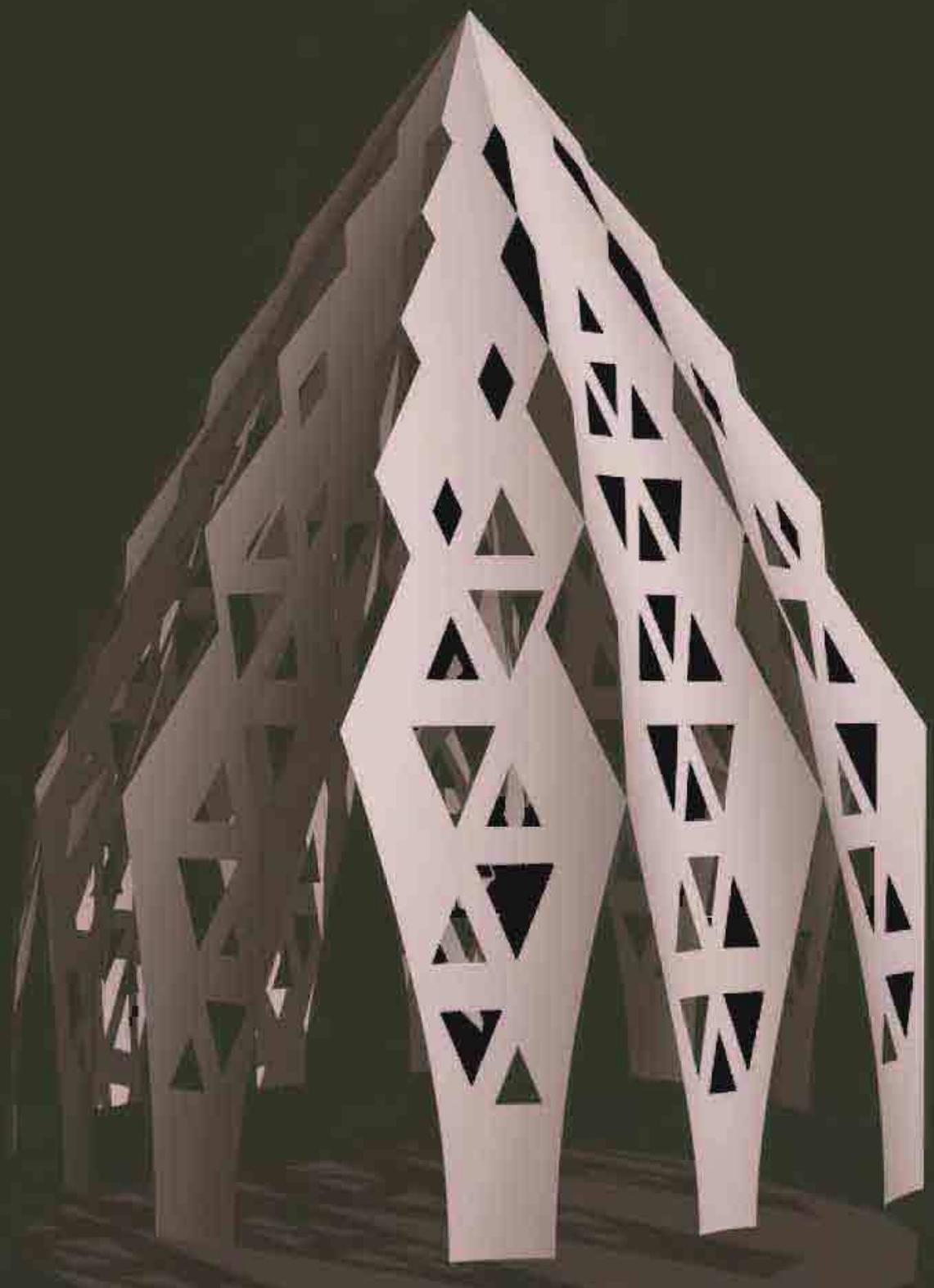
Una vez desmontada la cimbra se realiza la decoración final. La capa mortero busca una regularización de la superficie poliédrica que necesariamente generan las rasillas, y la siguiente es la que recibe los retales triangulares de rasilla. Su replanteo, ahora, ya no parece tan difícil, ya que se dispone de las referencias que han permitido situar tablones (directrices) y cabios (generatrices).

La última operación consiste en el proyectado de la arena sobre una lechada de cal fresca que consigue camuflar toda referencia del proceso.

Nos encontramos con un extraordinario juego sutil que permite adivinar cosas, pero esconde otras; Gaudí nos muestra la compleja ley de formación geométrica, pero no nos explica en absoluto cómo se ha construido y, es más, intenta hacer desaparecer cualquier señal de su realización mediante ese proyectado de arena que nos da una superficie continua y casi abstracta.

En definitiva, nada más lejos del «dolor de un construir redentor» apuntado por algunos (Lahuerta, 1993). Al revés: estamos ante el placer que supone, con un dominio virtuoso del propio oficio y del de los operarios, poder construir con una expresión sin límites, pero con el mínimo de medios y sin transgredir (sino todo lo contrario) las razones prácticas de la arquitectura; es decir, estamos ante la manera de entender la construcción de Gaudí.

J.-L. G. y A. C.



INTERSECCIÓN DE PARABOLOIDES



Entrada catenaria/parabólica del Palau Güell (fig. 1)



Arcos parabólicos de la entrada del colegio de las Teresianas (fig. 2)

**CARLES BUXTADÉ
JOAN MARGARIT**

Las superficies que utilizó Gaudí para definir sus espacios arquitectónicos fueron, fundamentalmente, el plano, las superficies conoidales y diversas cuádricas: empleó los conjuntos de paraboloides hiperbólicos intersecados como cierres, los hiperboloides de una hoja para definir las aperturas para dejar entrar la luz, y los elipsoides para conformar elementos macizos, normalmente en los nudos y en los capiteles. También utilizó cilindros, conos y paraboloides de revolución. Si nos centramos en el caso de los paraboloides hiperbólicos, la irrupción de esos elementos en la obra de Gaudí coincidió con la inclinación del arquitecto por la reinterpretación del gótico.

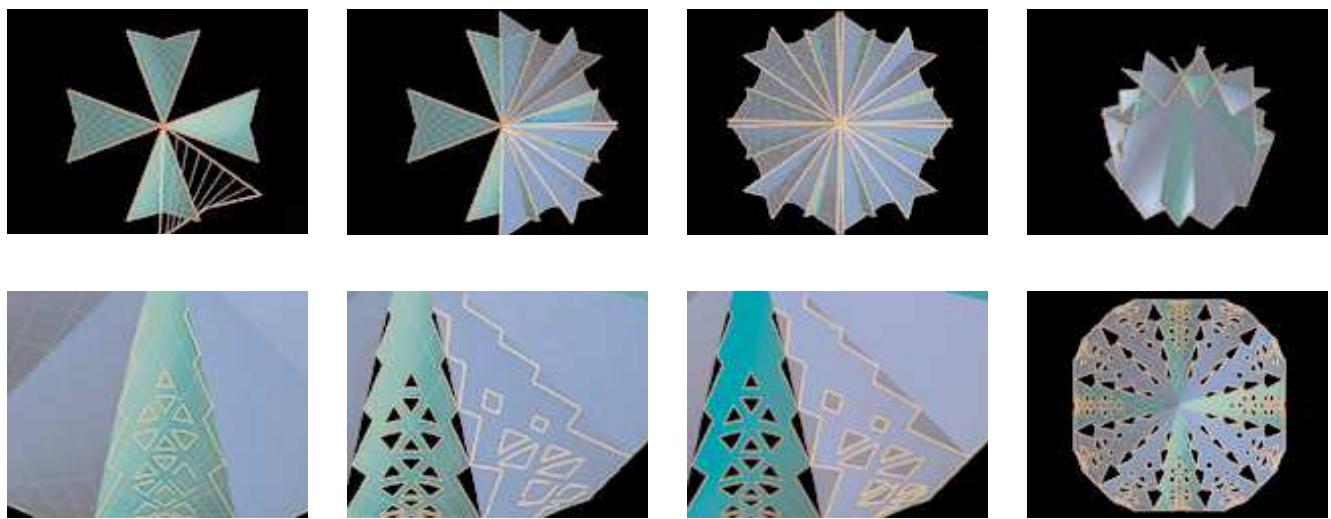
En el Palau Güell (fig. 1) tenemos los arcos de los dos accesos, que se repiten en el exterior del recinto con variantes, siempre muy peraltados, en una simbiosis entre el potencial mecánico que aumenta al bajar los radios de curvatura y el indudable afán de originalidad. Esos arcos, como en el caso del colegio de las Teresianas y



Arcos parabólicos sobre columnas del Palau Güell (fig. 3)

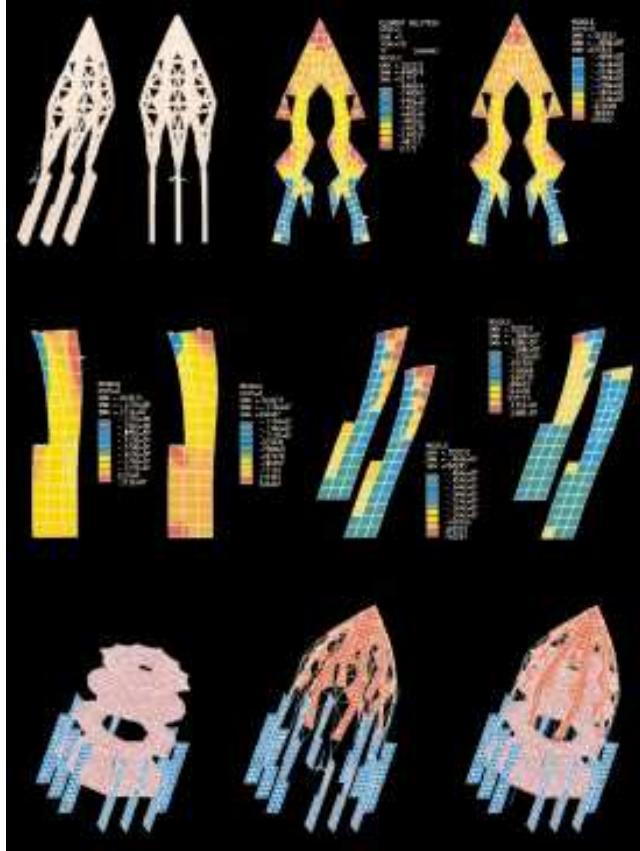
A la izquierda:
Modelización informática de la cúpula de la sacristía del templo de la Sagrada Família

del Palacio Episcopal de Astorga (fig. 2), son elementos planos que configuran aperturas para atravesar muros, a veces por sí mismos (entradas al Palau Güell) o bien situados en combinación con las columnas para llegar al suelo a modo de alargamiento finísimo de la misma parábola (fig. 3).

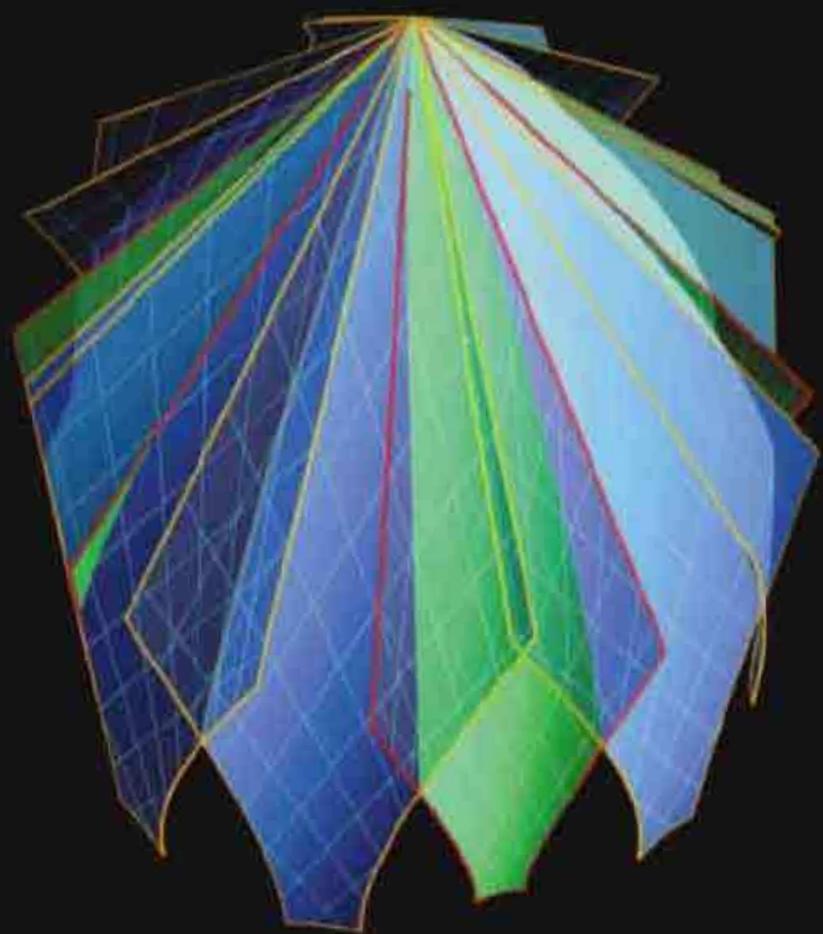
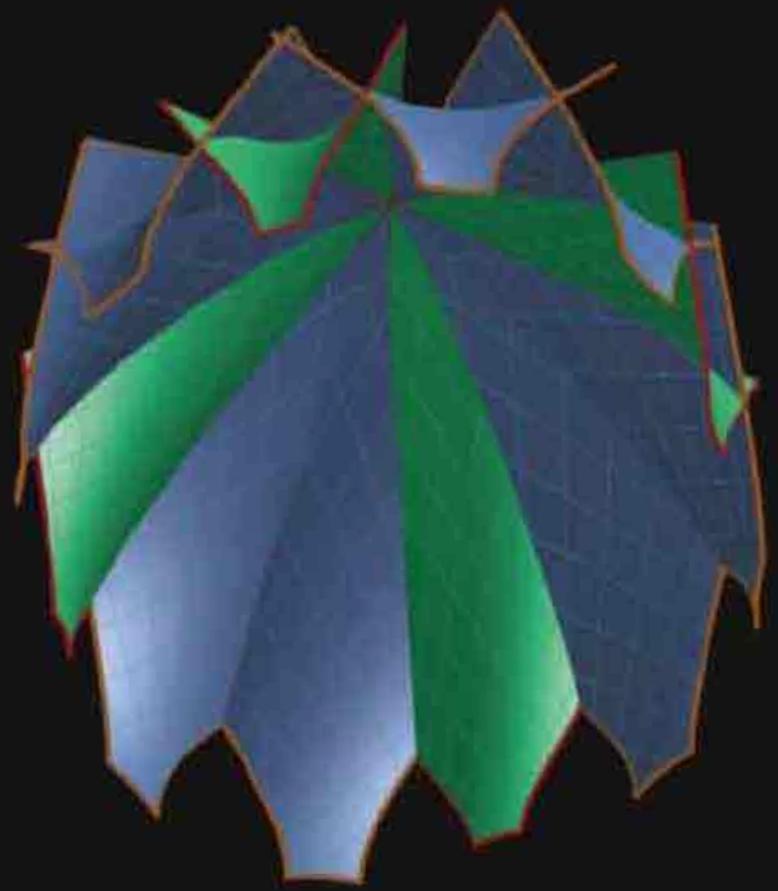


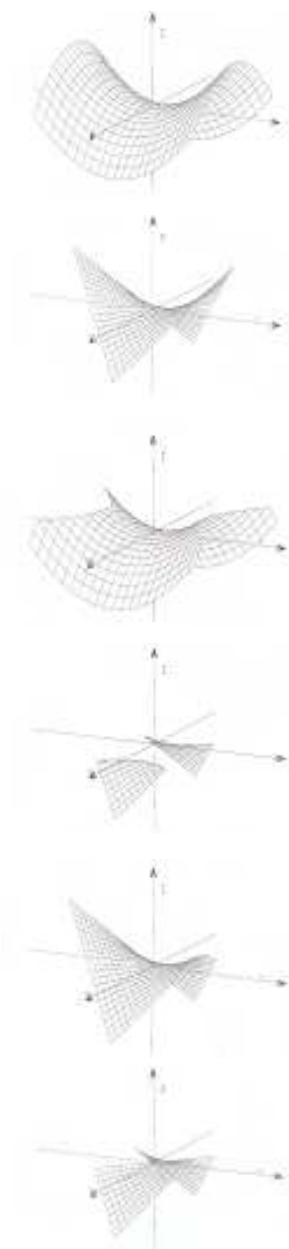
Secuencia geométrica de imágenes de conjunto de paraboloides hiperbólicos

Conjunto de resultados obtenidos en el cálculo de una de las torres de la sacristía del templo de la Sagrada Familia, utilizando el programa ANSYS (Fig. 6)



A la derecha:
Imagen geométrica sin intersecciones de los paraboloides hiperbólicos de la cúpula de la sacristía del templo de la Sagrada Família





Diferentes visiones del paraboloide hiperbólico y de sus secciones (fig. 7)

A la derecha:
Modelización informática de la planta y axonométrica de la cúpula de la sacristía del templo de la Sagrada Família

El continente espiritual que significó para Gaudí el movimiento modernista le liberó de la excesiva sumisión estilística, en este caso al gótico, y así pudo destinar sus energías a refrenar los excesos de los ritmos en movimiento para sujetarlos gracias a la geometría. Fue entonces cuando la propia geometría le llevó a desarrollar las curvas parabólicas con el fin de generar la cuádrica correspondiente, el paraboloide hiperbólico, y esa misma forma le llevó a desarrollar los soportes y los pilares inclinados siguiendo la dirección de las tangentes a las curvas correspondientes. En el caso de la Colonia Güell todas las resultantes inclinadas, las tangentes a los paraboloïdes hiperbólicos, se unen por medio de los muros, que estarán por fuerza torcidos y serán, por lo tanto, también paraboloïdes hiperbólicos.

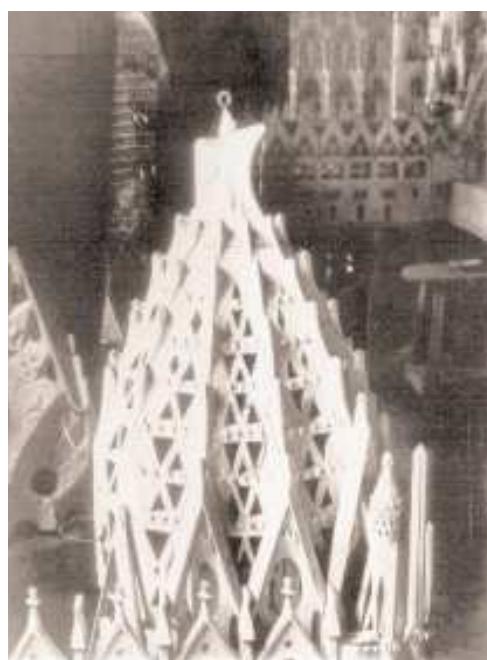
Asimismo, esa figura geométrica se incorporó de pleno a la obra más importante de Gaudí, la Sagrada Família, y resolvió todo el sistema de torres y cúpulas del templo (fig. 4). Con el paraboloide hiperbólico Gaudí descubrió un mundo de técnicas y ritmos espaciales que rompían con todos los ritmos y las soluciones rectilíneas habituales; también gracias a esa figura se alejó del punto del arco gótico y llegó a la plenitud de su libertad creadora.

El primer resultado de esa evolución gaudiniana en la Sagrada Família fueron las cuatro torres del Nacimiento (fig. 5), formadas por paraboloïdes de curvaturas muy fuertes que por primera vez rompían con la torre rectilínea de gran altura que había pasado por el gótico, por el renacimiento y por el barroco sin originar ningún cambio geométrico de la importancia del que tratamos aquí.

Sin embargo, esas cuatro torres no son más que el principio del conjunto de 20 (12 de los Apóstoles, 4 de los Evangelistas, 1 de la Virgen, las 2 sacristías y la de Jesucristo) que proyectó Gaudí para el templo, todas ellas formadas por conjuntos de paraboloïdes hiperbólicos que se intersecan y que vacía rítmicamente con triángulos. Dos lados de uno de esos triángulos corresponden a dos de las generatrices, mientras que el tercero, el horizontal, es, lógicamente, la parábola que corresponde a la intersección propia de un plano con la superficie.

En el caso de las torres de las sacristías, la piel está formada por 12 paraboloïdes hiperbólicos, cuatro simétricos y ocho asimétricos, que definen una superficie resistente óptima, como pone de manifiesto el cálculo hecho con elementos finitos utilizando el programa ANSYS (fig. 6, p. 84). Precisamente, como se sabe, Gaudí proyectó las torres de las sacristías con mucho cuidado, ya que quería que sirvieran de ejemplo para el diseño de las demás.

Para mostrar las posibilidades de la macla entre los hiperboloides de una hoja, los parabo-



Modelo de yeso construido por Gaudí de la torre de la sacristía del templo de la Sagrada Família (fig. 4)

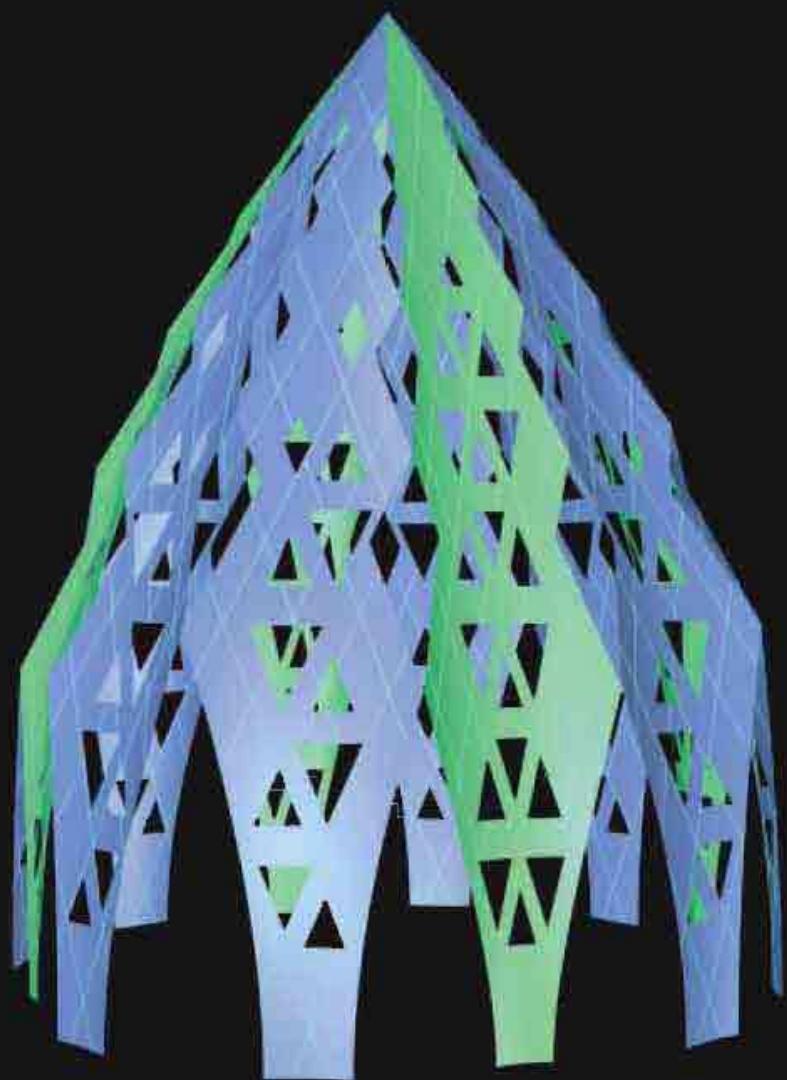
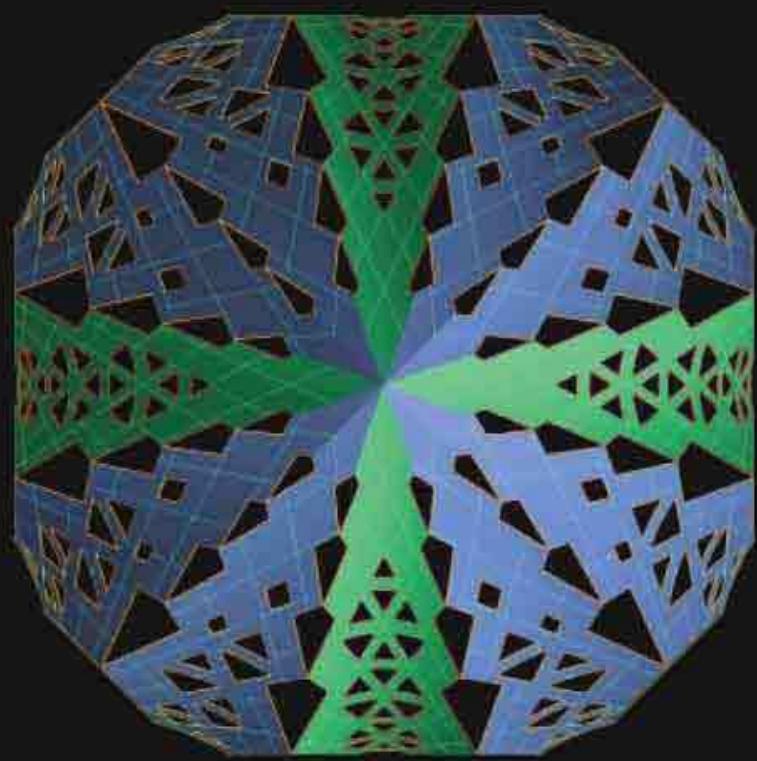


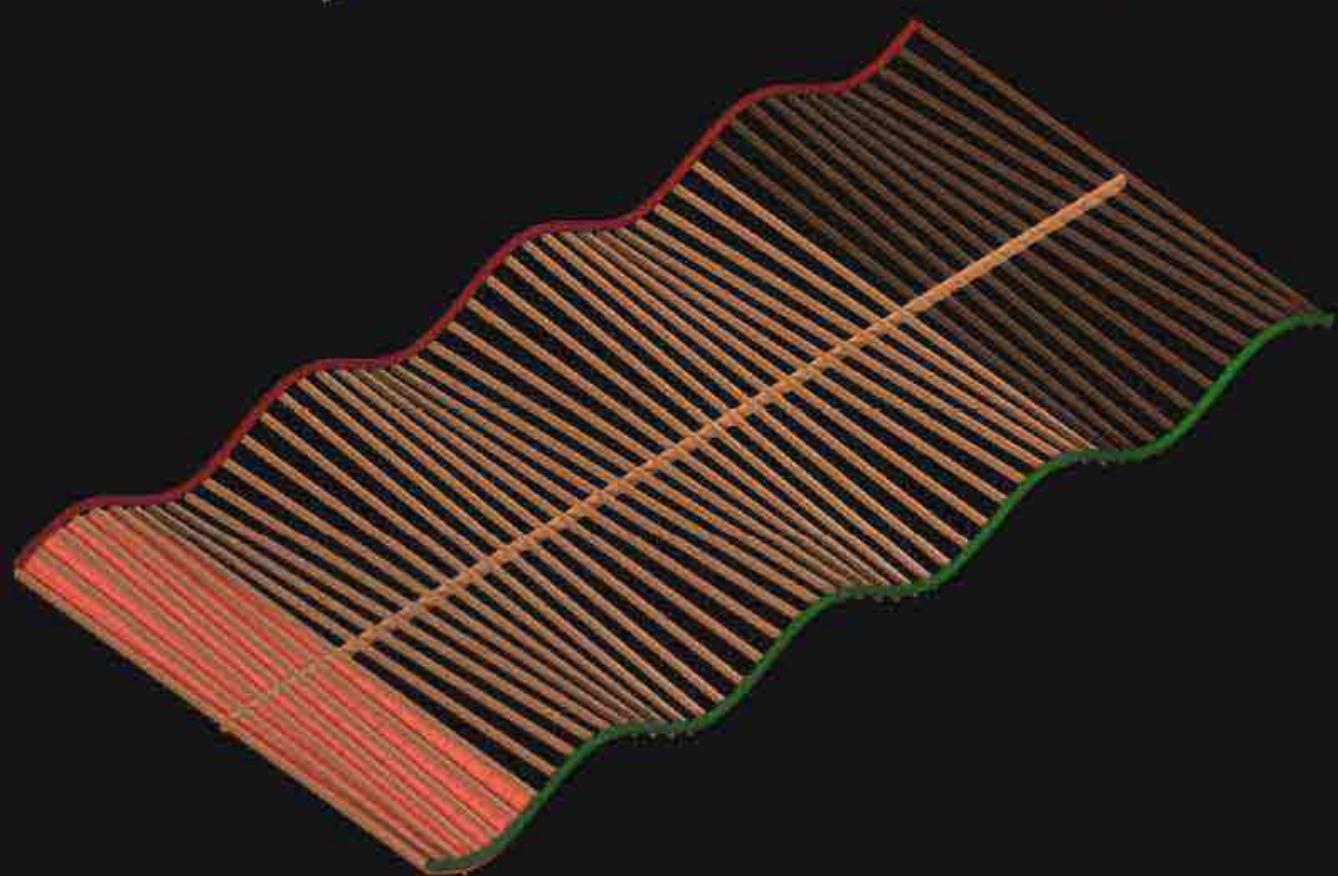
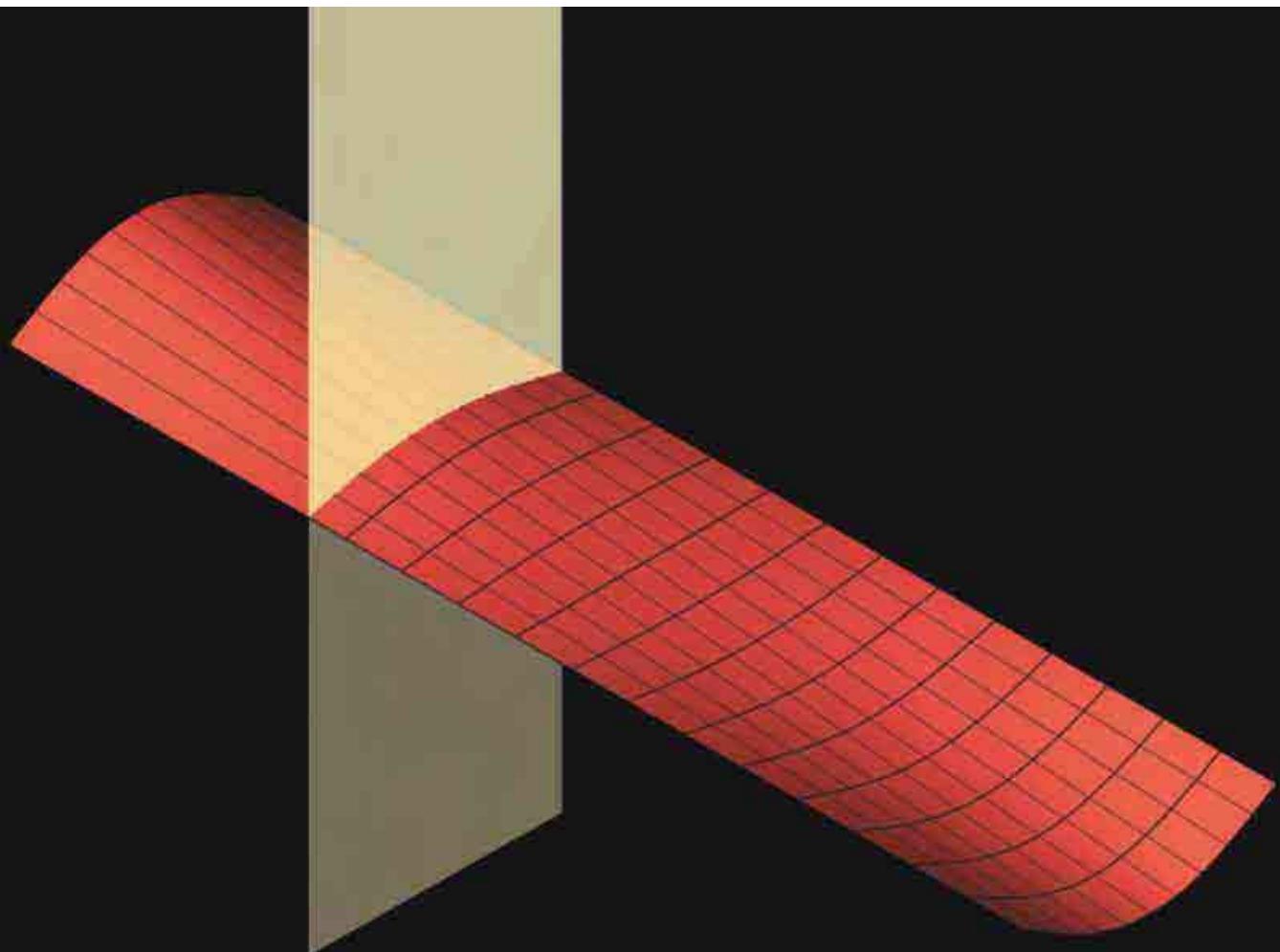
Torres de la fachada del Nacimiento del templo de la Sagrada Família (fig. 5)

loides hiperbólicos y los planos, a continuación se indican las diferentes curvas que se definen al cortar esa cuádrica, el paraboloide hiperbólico, por diversos planos (fig. 7). En las figuras pueden observarse la riqueza y la variedad de las posibilidades de combinaciones y ritmos espaciales que permite el camino seguido por Gaudí, aunque, como ya se ha comentado, por falta de herramientas matemáticas y de dibujo solamente pudo utilizar las intersecciones por medio de las generatrices rectas de esas superficies.

Nota. Desde el punto de vista geométrico, el paraboloide hiperbólico es una superficie reglada formada por una recta generatriz que avanza, siempre paralela a un plano, sobre dos rectas directrices situadas en planos diferentes.

C. B. Y J. M.





CONOIDES

CLAUDI ALSINA

En este apartado describiremos una de las aportaciones más originales de Gaudí a la arquitectura moderna: el uso de las superficies regladas conoidales introducidas en el modesto diseño de su obrador y en las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família.

Hay dos afirmaciones de Gaudí que podríamos recordar aquí. Cuando pensaba en la geometría, el arquitecto decía que, «para la ejecución de superficies, no complica, sino que simplifica la construcción». Y, en cuanto a las bóvedas, aseguraba que buscaba que sus formas tuvieran «propiedades geométricas adecuadas a sus finalidades utilitarias, ornamentales y constructivas».

Como veremos, esas dos citas tienen, en el uso de las superficies conoidales, una materialización evidente.

Sobre las superficies conoidales en general

Estas sugerentes e imaginativas superficies regladas quedan determinadas en el espacio por una recta, un plano perpendicular a ella y una curva. Están formadas por todas las rectas que se apoyan ordenadamente en la recta dada y en los puntos correspondientes de la curva fijada, y todas las rectas son paralelas al plano dado. Podríamos considerar (y de ahí procede el nombre) que esas superficies extienden el caso de los conos, ya que sus rectas generatrices no pasan por un vértice, sino por toda una recta directriz.

Las superficies conoidales están presentes en la naturaleza vegetal, especialmente en las hojas y en las flores, en las que la materia fibrosa tiende a adoptar la forma de una superficie conoidal entre los tallos rectos centrales y las curvas que delimitan los perfiles externos.

A la izquierda:
Modelización informática de la cubierta de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família

Con cordeles elásticos, doblando papel, con alambres o con barro o yeso, es posible hacer modelos creativos de esas superficies, y, según la curva considerada, los efectos son sorprendentes.

Entre los casos más conocidos de superficies conoidales tenemos un plano (cuando la curva de apoyo es una recta paralela a la dada), un helicoide (cuando la curva de apoyo es una hélice cilíndrica y la recta inicial, el eje de ese cilindro) y un paraboloide hiperbólico (cuando la curva de apoyo es una recta que se cruza con la de partida).

En este apartado describiremos dos casos excepcionales: los perfiles helicoidales y los sinusoidales.

Sobre el perfil helicoidal

Un tradicional y bello ejemplo de conoide es el de la superficie helicoidal, soporte de las escaleras de caracol. La bóveda catalana ha sido un recurso sencillo y emblemático para construir helicoides. En la Sagrada Família encontramos escaleras de caracol espectaculares hechas de piedra.

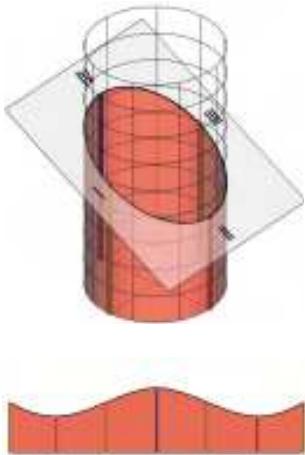
En la helicoide, las rectas se apoyan perpendicularmente en el eje del cilindro y en una hélice determinada en la superficie de ese mismo cilindro (hay que recordar que un tramo de hélice procede de una recta en el desarrollo plano del cilindro, y por eso las hélices tienen una pendiente constante). Conviene tener presente, sin embargo, que Gaudí siempre pensó en este conoide de una forma dinámica, generado por una recta que se mueve perpendicularmente al eje y que combina al mismo tiempo la traslación y la rotación, el famoso «movimiento helicoidal», que también fue un instrumento clave en la creación gaudiniana de las columnas.



Conoide de la cubierta del obrador de Gaudí



Conoides de la cubierta y los muros de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família



Sección elíptica de un cilindro. Al desplegar la superficie cilíndrica secciónada se genera una sinusoide

A la derecha:
Modelización informática del conoide de los muros de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família

Sobre el perfil sinusoidal

En la cubierta de las Escuelas Provisionales, el perfil sinusoidal de un lado implica necesariamente el correspondiente perfil en el otro. Es curioso constatar que los perfiles de este tipo son muy corrientes cuando se trabaja experimentalmente la geometría en el espacio. Una hoja delgada de cartulina sobre la cual se ejerza presión con las manos simultáneamente por ambas caras adquirirá una forma sinusoidal. Asimismo, si cortamos un cilindro de papel según un plano inclinado respecto del eje del cilindro, obtenemos la sección elíptica del cilindro, que, desarrollada, da la curva sinusoidal. También puede obtenerse una sinusoide a partir de la sombra de una hélice de alambre. Desconocemos la forma exacta en que trabajó Gaudí las sinusoides, pero los experimentos que acabamos de indicar muestran una forma muy sencilla de conseguir esas curvas.

En la naturaleza podemos observar formas sinusoidales en las olas del mar, en los movimientos serpenteantes, cuando miramos líneas de cresta lejanas, o en suaves perfiles presentes en formas vegetales y animales. Según el estudioso George R. Collins, los perfiles de la concha del taclobo, utilizada a menudo por el arquitecto en el interior de las iglesias para poner agua bendita, podrían haberle inspirado la forma de

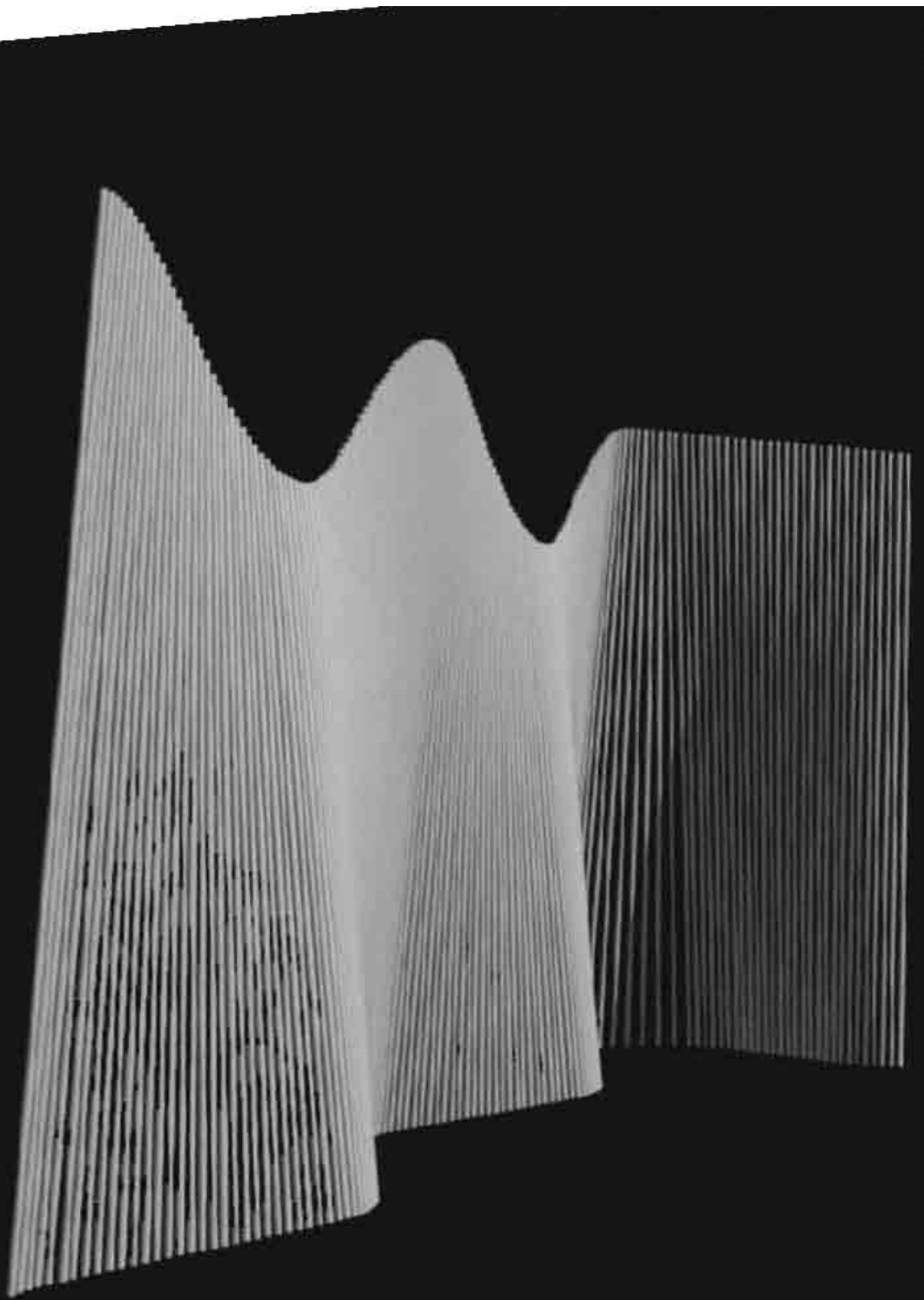
la cubierta del obrador y también de las Escuelas Provisionales.

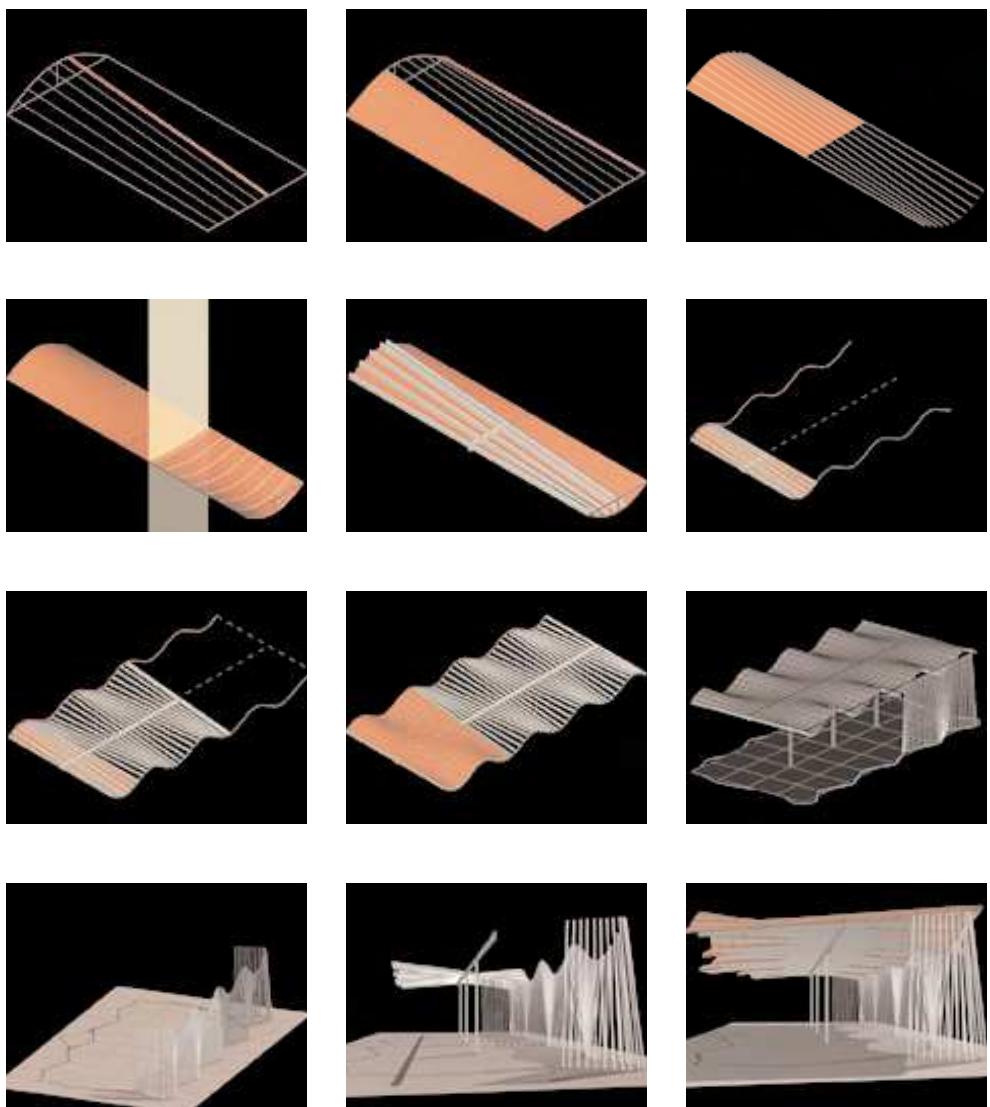
Conoides sinusoidales gaudinianos

El primer conoide sinusoidal que hizo Gaudí fue en su obrador, concretamente en la cubierta del almacén de modelos, al lado del estudio fotográfico, que seguía las direcciones del chaflán de las calles Provença y Sardenya de la Sagrada Família, con jácena central siguiendo el chaflán. Esta intersección se resolvía con un tetraedro de poca altura que se construyó a finales del siglo XIX, al mismo tiempo que el estudio fotográfico adjunto. Tenía cubierta móvil y en él estaba, a escala 1:10, el modelo de la nave del templo. El edificio fue destruido parcialmente en 1936.

Durante los años 1909 y 1910 se construyeron las Escuelas Provisionales, proyectadas por Gaudí con conoides tanto en la cubierta como en todos los cierres. El eje recto central de la cubierta es una viga horizontal de doble T en la que se apoyan los tablones generadores de la cubierta. Esta viga central tenía tres pilares de apoyo (uno a cada extremo y otro en el medio).

Gaudí se dio cuenta de que los tablones de pendiente variable determinantes de los tabiques laterales que se colocasen balanceándose en la





Secuencia geométrica de imágenes de los conoides de la cubierta y de los muros de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família

viga longitudinal central, según un perfil sinusoidal en los extremos, harían que las rectas perpendiculares a ellos definieran también una nueva superficie sinusoidal.

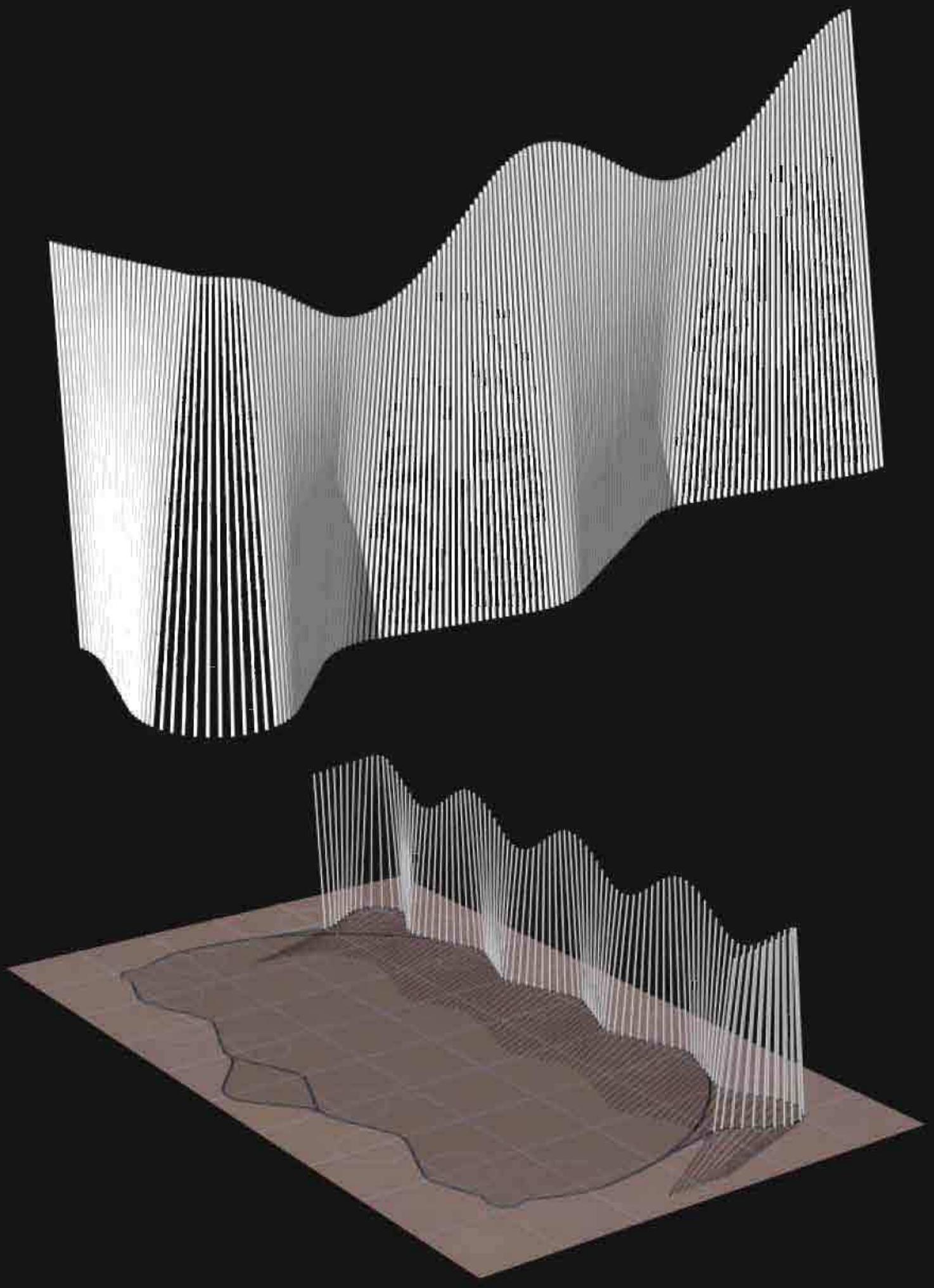
He aquí, pues, la razón de esa sinuosidad, presente en diversos lugares de la obra, tanto en la cubierta como en los cierres, siempre con bóveda de ladrillo de plano.

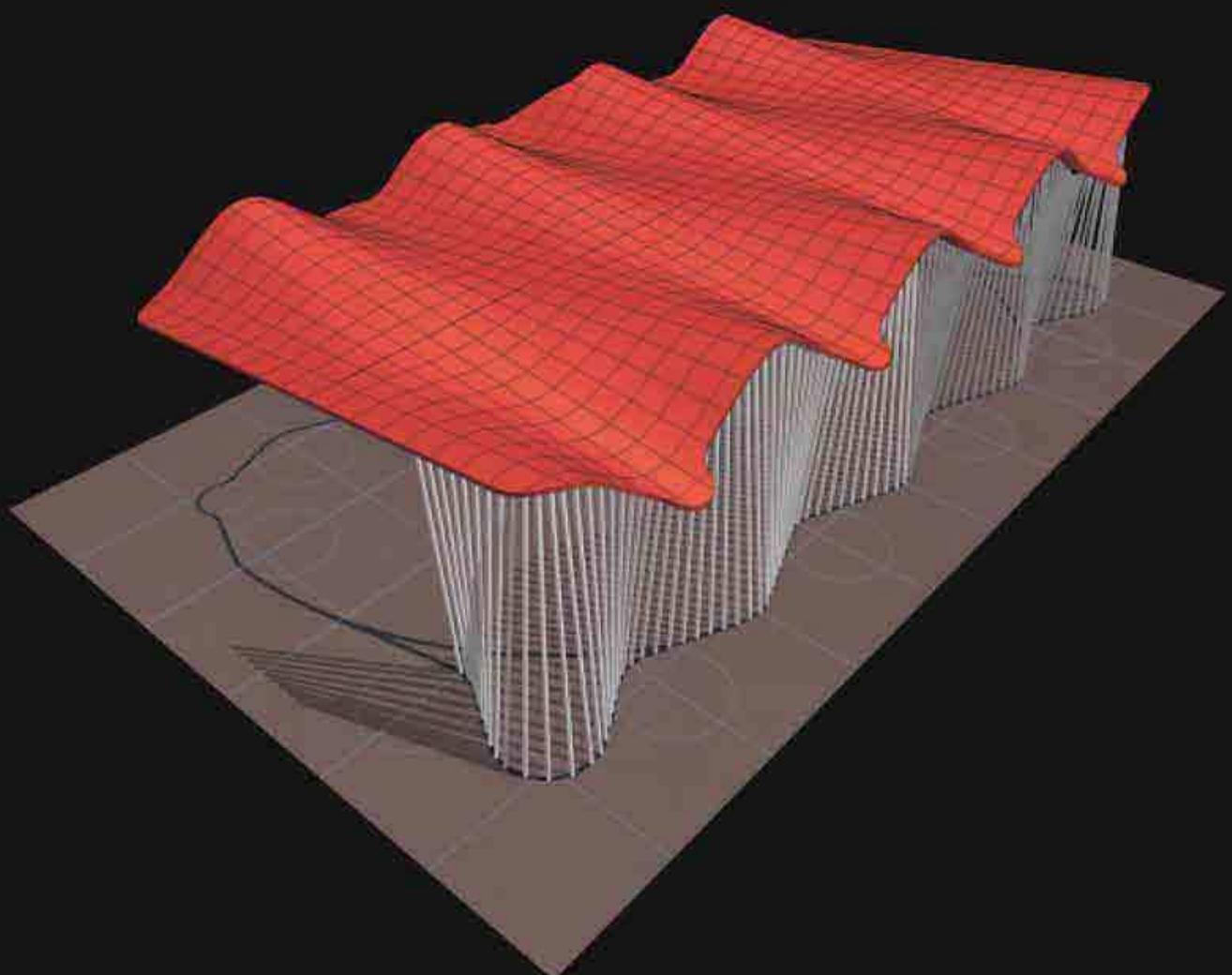
Hay que observar, sin embargo, en cuanto a la construcción, que las partes inclinadas parcialmente de las Escuelas tienen, como extremo superior, la cubierta sinusoidal, y como inferior, un perfil «sinuoso» formado, de hecho, por pequeños arcos de círculo y segmentos rectos tangentes a los arcos de círculo correspondientes.

Estas soluciones sencillas y económicas requerían un material mínimo, y las paredes y el techo se hicieron de ladrillo. La curvatura de la cubierta (tres capas de ladrillo) aumentaba notablemente la resistencia de esa ligera construcción, y aseguraba un desague perfecto de la cubierta como consecuencia del fino juego alternado de la concavidad y la convexidad y de un acabado impecable de los bordes.

Este edificio compacto de las Escuelas Provisionales fue pensado por Gaudí especialmente para los niños, ya que el efecto sinusoidal se alejaba de la monotonía tradicional de las paredes planas. A pesar de que las dimensiones de la planta eran muy reducidas (10 × 20 metros), el edificio acogía tres aulas independientes,

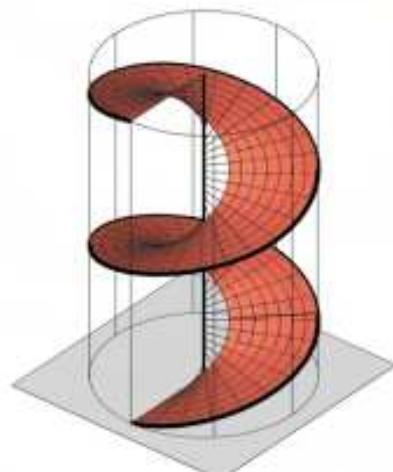
A la derecha:
Modelización informática del conoide de los muros de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família, con la planta del conjunto



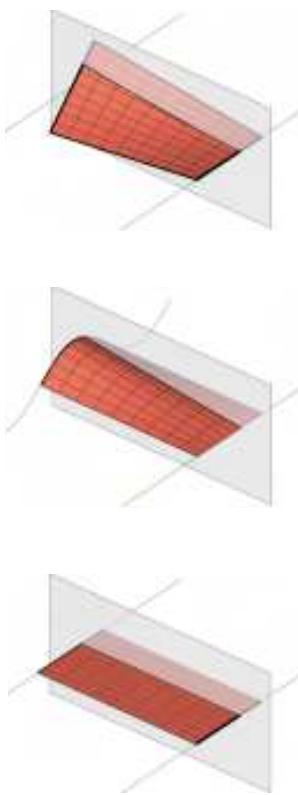




Escalera de caracol en una torre del templo de la Sagrada Família



Modelo geométrico de escalera de caracol



Modelos geométricos de paraboloid hiperbólico, conoide sinusoidal y plano

A la izquierda:
Modelización informática de los conoides de la cubierta y de los muros de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família

un espacio de acceso con capilla y un pequeño patio exterior en el que se situaron los sanitarios, con una cubierta en forma de paraboloid hiperbólico.

La cubierta y el interior fueron destruidos en 1936, y en 1938 Domènec Sugrañes los reconstruyó con los pocos recursos de los que disponía el CENU (Consejo de la Escuela Nueva Unificada) durante la Guerra Civil para recuperar edificios escolares. Desgraciadamente, la obra se quemó en 1939. Unos cuantos años más tarde se hizo una segunda reconstrucción, a cargo de Francesc de Paula Quintana. En esas restauraciones se introdujeron variaciones en los tabiques interiores y en los coronamientos de la parte superior y la cubierta, sin las gárgolas de desagüe que se habían colocado en los extremos.

Así pues, en vista de la explicación anterior, no es de extrañar que actualmente se haya proyectado una nueva reconstrucción digna del edificio de las Escuelas Provisionales que permita apreciar la singular belleza de las cubiertas y los cierres.

La influencia moderna de Gaudí

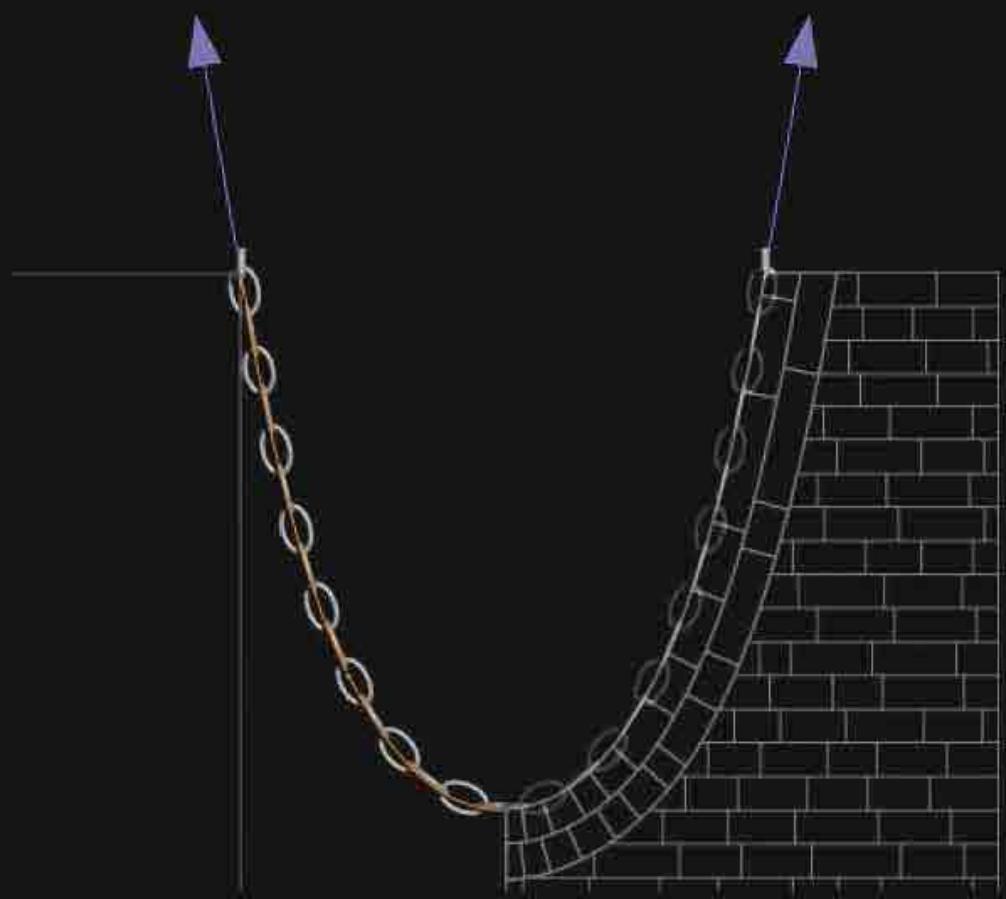
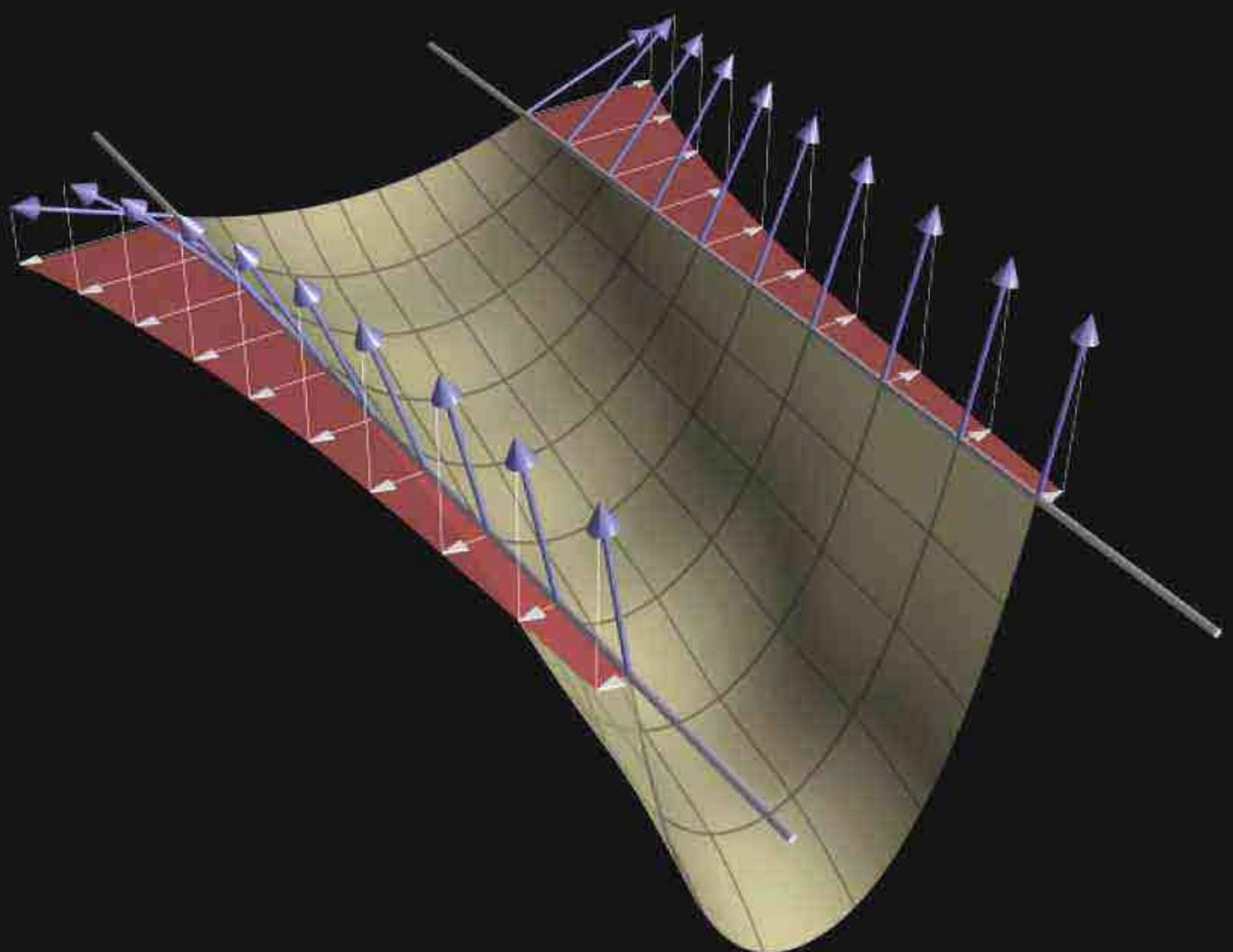
Si bien las grandes obras de Gaudí son singulares proyectos irrepetibles, con un exclusivo sello personal e intransferible, esta obra provisional tan modesta de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família puede considerarse una aportación original que ha inspirado a muchos otros creadores.

Para entender ese hecho sólo hay que observar que el edificio de las Escuelas es un objeto geométricamente puro, vacío de toda decoración o referencia natural o histórica y arquitectónicamente ejemplar en cuanto a sencillez constructiva, minimalismo estructural y funcionalidad libre.

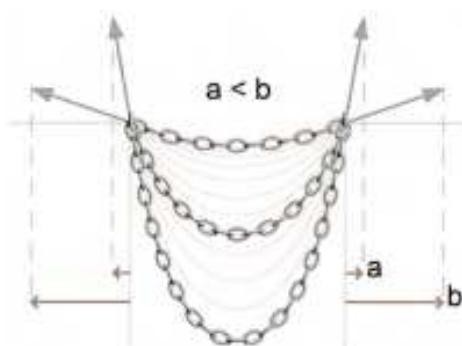
En ese sentido, se conservan los dibujos que hizo Le Corbusier de estas Escuelas en una visita a Barcelona, y se tiene constancia de los numerosos elogios que dedicó ese padre de la arquitectura moderna a la obra mencionada.

El uso imaginativo de las cubiertas regladas, que superan la monotonía de la superficie plana, ha influido tanto en la obra de Le Corbusier como en la de Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi, Félix Candela (quien, en el exilio, creó importantes cubiertas regladas en iglesias y edificios singulares) y Santiago Calatrava, entre otros.

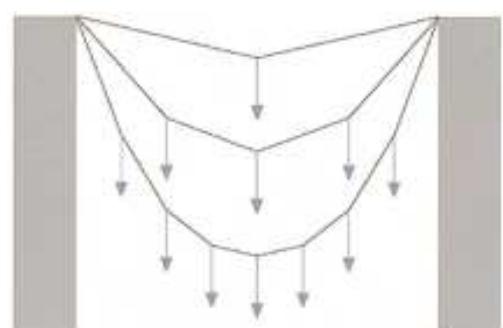
C. A.



ARCOS CATENARIOS



Catenarias con distintos empujes



Funículos según las cargas actuantes

JOSEP GÓMEZ-SERRANO

«La gravedad es una tracción radial (no paralela) y, por tanto, una catenaria comprimida es una curva que se cierra hacia el centro de la Tierra.»

«Lo calculo todo: primero, supongo unos pesos para buscar el funículo, y después visto el funículo hallado con formas y materiales cuyos pesos vuelvo a revisar, y a veces varío ligeramente los funículos. De ese modo sale la forma lógica nacida de las necesidades.»

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

Las formas inversas de los arcos colgantes catenarios, funiculares o parabólicos, que soporan su propio peso o cargas y que siempre están traccionados, corresponden a las formas comprimidas que, con las mismas longitudes, soportarían las mismas cargas.

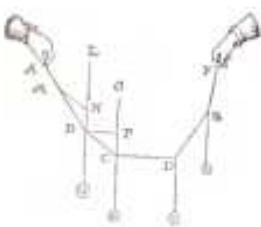
En los arcos catenarios o funiculares de la misma longitud, cuanto mayor es la altura, menor es el empuje horizontal en el arranque y en la cla-

ve del arco, y cuanto menor es dicha altura, mayor es dicho empuje, por las condiciones de equilibrio. Por tanto, los arcos más altos o esbeltos son los que menos empujes laterales tienen, y eran uno de los elementos que utilizaba habitualmente Gaudí. El arco catenario ideal puede modificarse en lo relativo a la forma por la acción gravitatoria de pesos insertados a lo largo que produzcan un arco funicular: cuando un gran peso central supera el resto de cargas simétricas, se obtiene la forma de un arco funicular apuntado en el centro; cuando las cargas son mayores en los laterales, la forma del arco funicular se acerca al carpintero o elíptico; cuando la carga es uniforme horizontalmente, la forma es la de una parábola.

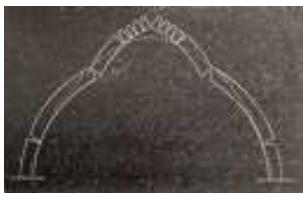
A pesar de la óptima calidad del arco funicular o catenario en cuanto a resistencia, durante mucho tiempo se consideró que tenía una forma poco elegante y de difícil carga en los pilares, y no se utilizó en la arquitectura tradicional, para la cual se consideraban mejores las formas de arcos circulares, elípticos, etcétera.

Gaudí aceptó la corrección formal del arco funicular o catenario y la aplicó desde sus primeras obras: la Casa Vicens, las vallas y las caballerizas de la Finca Güell, la Cooperativa Obrera Mataronense, el Palau Güell, etcétera.

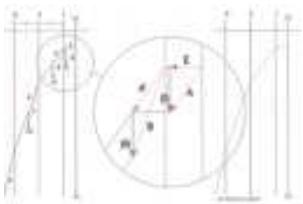
A la izquierda:
Conjunto de catenarias con distintos
empujes según sus inclinaciones



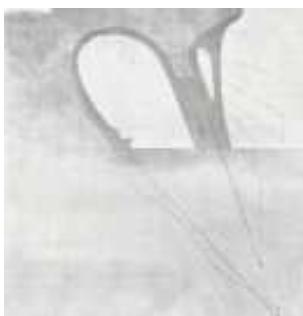
Representación funicular de Sterin
(siglo XVIII)



Rotura de arcos y funiculares según el
texto de Scheffler, estudiado por Gaudí



Modelo de cálculo gráfico utilizado
por Gaudí, según Cèsar Martinell

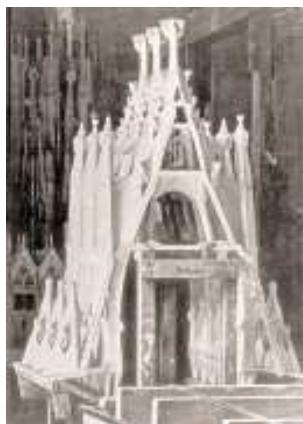
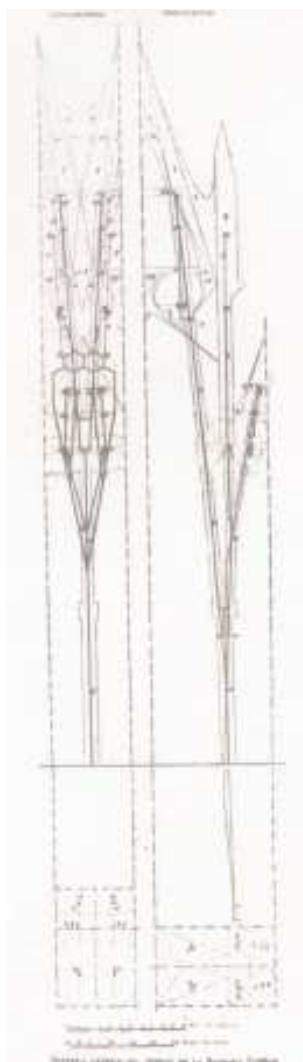


Cálculo gráfico del Parc Güell realizado
por Rubió i Bellver, siguiendo el
método de Gaudí

A lo largo de su trayectoria profesional, Gaudí adquirió los conocimientos que después le permitieron investigar y experimentar el comportamiento estructural de sus obras. El experimento del modelo catenario en el plano («la forma traccionada que adopta un hilo colgado con cargas es la inversa de la línea comprimida que adoptaría un arco con la longitud del hilo y las mismas cargas consideradas») ya era tenido en cuenta por algunos autores, tal como se ha explicado en el apartado de geometría. Esos métodos gráficos evolucionaron durante la primera mitad del siglo XIX (Gabriel Lamé, Émile Clapeyron, Claude-Louis-Marie-Henri Navier, Jean-Victor Poncelet, etcétera) y resultaron más efectivos y aplicables en la segunda (Karl Culman, Hermann Scheffler, Luigi Cremona, Carl Ritter, M. Williot, etcétera). En la asignatura de mecánica aplicada que impartía el catedrático Joan Torras i Guardiola se mencionaba y se explicaba el método de Scheffler, que Gaudí aprendió más adelante. Joan Martorell le inició en el cálculo gráfico, pero una singularidad de este arquitecto en el campo estructural fue, precisamente, simplificar los métodos de cálculo gráfico a la hora de aplicarlos. El arquitecto Joan Bergós, experto en temas técnicos que mantuvo muchas conversaciones y una gran amistad con Gaudí, escribió estas palabras: «También ideó el procedimiento gráfico reproducido: se divide la luz en un número impar de partes iguales d y se trazan verticales por los puntos de división, partiendo de un peso en la clave E que se compone con el primer peso I proporcional a E; su resultante A (valor y dirección del segundo funículo), trasladada sobre el segundo lado del funículo, se compone con el otro peso proporcional II, de forma que se obtiene B (valor y dirección del tercer funículo), y así sucesivamente» (Bergós, 1953). Hay que entender que las cargas I, II y III se aplican a las verticales de las particiones d , pero, con vistas a una forma más operativa y a facilitar su construcción gráfica, las cargas se sitúan en el extremo de A' y B'. Del mismo modo, la composición de fuerzas debería hacerse, estrictamente, en el punto siguiente a aquél donde se hace. Con esas irregularidades introducidas por Gaudí el método es más operativo a la hora de aplicarlo.

Los diversos cálculos gráficos de Gaudí publicados por sus colaboradores y los documentos de cálculo gráfico de éstos (Joan Rubió, Francesc Berenguer, Domènec Sugrañes y Joan Bergós) siguen las pautas indicadas anteriormente. Podemos decir que este método práctico fue utilizado por Gaudí y por sus ayudantes en sus cálculos gráficos.

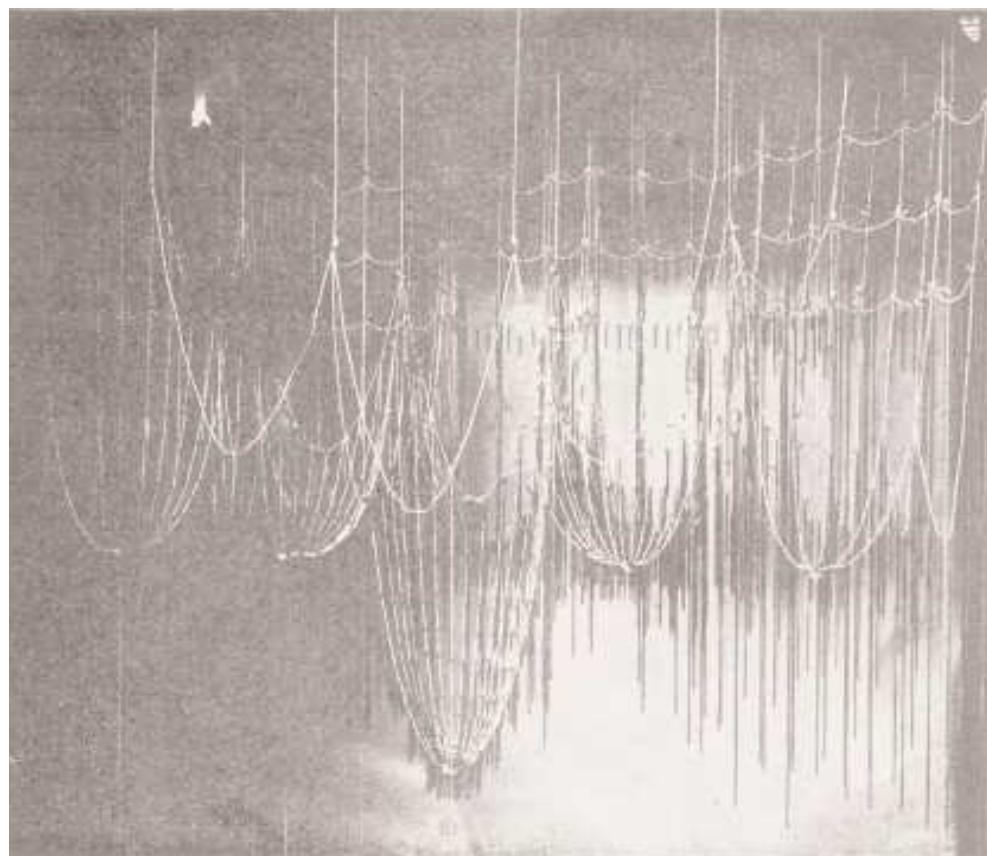
En la nave de la Cooperativa Obrera Mataronense, Gaudí determinó un arco parabólico de madera que transmitía las cargas hasta el suelo. Formado por tres tablones de madera unidos con pernos, ese arco determinaba la estructura resistente



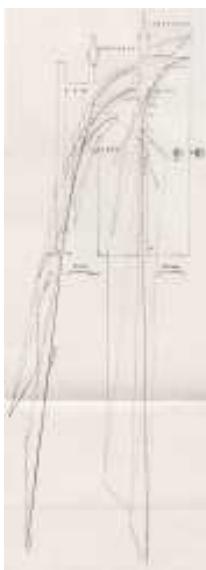
Cálculo funicular de la nave del
templo de la Sagrada Familia,
publicado en 1923 en el *Anuario de
Arquitectos*, y maqueta de la cubierta
correspondiente a la parte superior
del esquema de cálculo gráfico



Modelo funicular de la iglesia de la Colònia Güell



Primer estereofuncular utilizado por Gaudí y publicado en 1928 por Ràfols

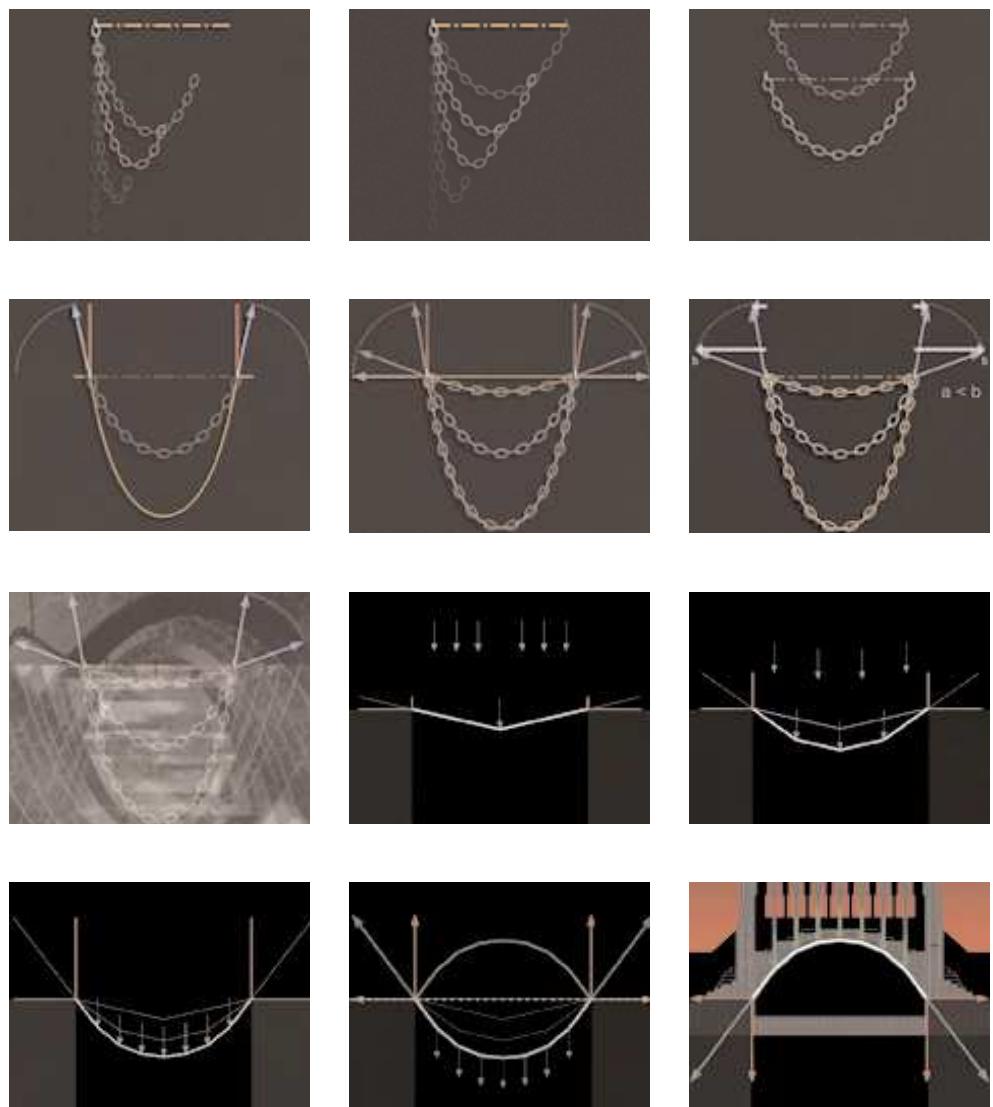


Modelo funicular de cálculo de la catedral de Palma de Mallorca, realizado por Rubió i Bellver siguiendo el método de Gaudí

que había que calcular con el método gráfico. El valor de la fuerza en el arco funicular y el descentramiento del arco funicular respecto del eje real de la estructura fijaban los esfuerzos en cuanto a su dimensionamiento. En otro proyecto, el de la cascada de la Casa Vicens (actualmente desaparecida), el arco inferior recogía claramente el resultado gráfico funicular de las cargas que los montantes de ladrillo le transmitían desde la parte superior. En los muros de contrafuerte con soportal del Parc Güell, la forma resultante se obtiene con el arco funicular de las cargas actuantes. Los documentos publicados por Joan Rubió i Bellver, ayudante de Gaudí, así lo corroboran, y siguen las condiciones gráficas mencionadas anteriormente sobre el método utilizado por Gaudí, en el cual las cargas son las gravitatorias y los empujes de contención de las tierras. En otras obras, como las caballerizas de la Finca Güell, el Palau Güell, el colegio de las Teresianas, Bellesguard, las buhardillas de la Casa Batlló y la Milà o la Sagrada Família, los arcos parabólicos o catenarios intentan seguir el arco funicular que soportan las cargas.

No obstante, la singularidad de Gaudí consiste en aplicar el arco catenario espacialmente y

crear la maqueta de diseño de la iglesia de la Colònia Güell. Primeramente estudió la formación de las cúpulas por medio de unos elementos de cuerda de los cuales colgaban, como peso, unas cadenas, y así obtenía una forma móvil según las cargas (cadenas) que hubiera considerado. La longitud de la cadena daba la carga considerada. Tan sólo se conserva una sola fotografía del experimento de la primera maqueta, de la cual podemos deducir que sólo trabajaba con la mitad de las bóvedas centrales, ya que fijaba el eje de las cúpulas centrales a partir de un cable vertical tensado que le permitía trabajar con la mitad de la maqueta. De ese estudio pasó a hacer una maqueta con saquitos de perdigones pesados que representaban las cargas de cada elemento de la cubierta. Reproduciendo en la maqueta la totalidad del modelo, obtenía las cargas en las bases de las columnas al situar unos dinamómetros en los arranques de los hilos que simulaban las columnas. De la lectura del dinamómetro deducía las tensiones que soportaban las columnas. Colocando una tela en el interior de la maqueta de la nave obtenía el espacio interior, y también la inversa del proyecto de la iglesia de la Colònia Güell,

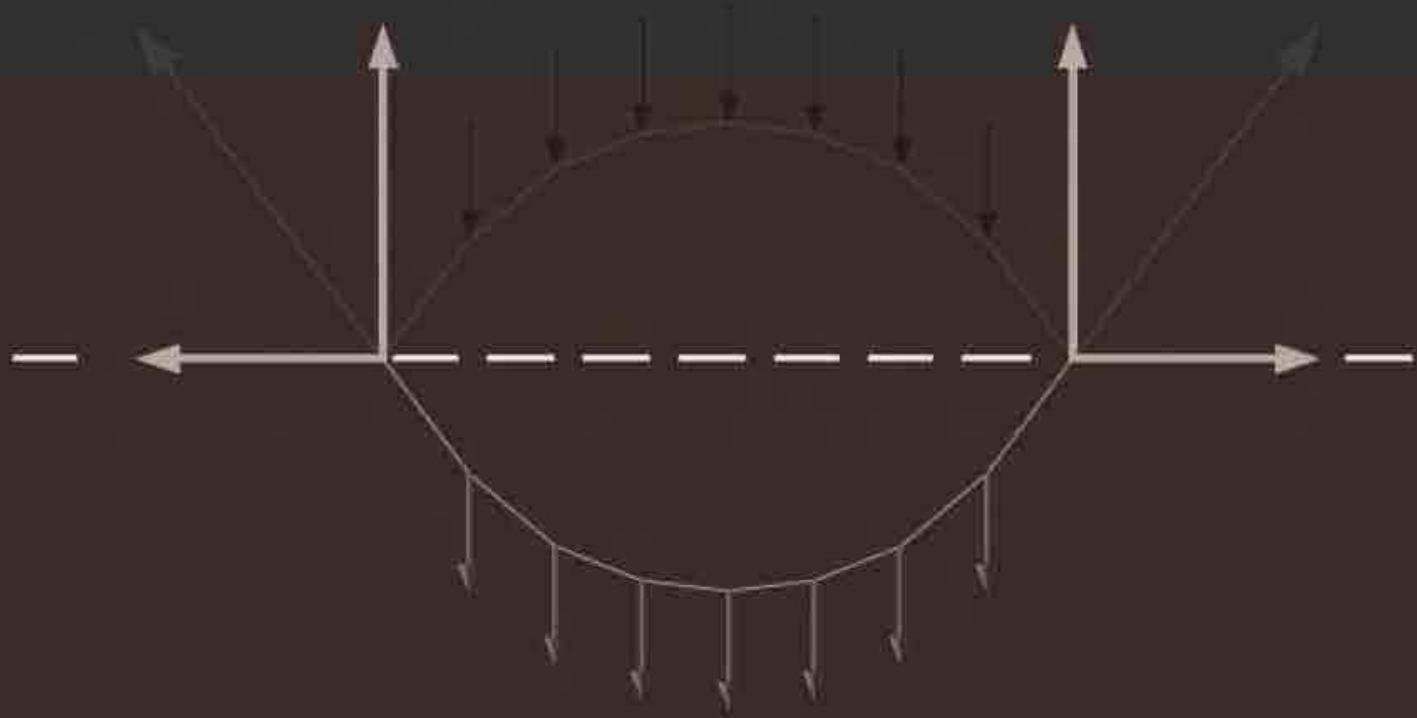
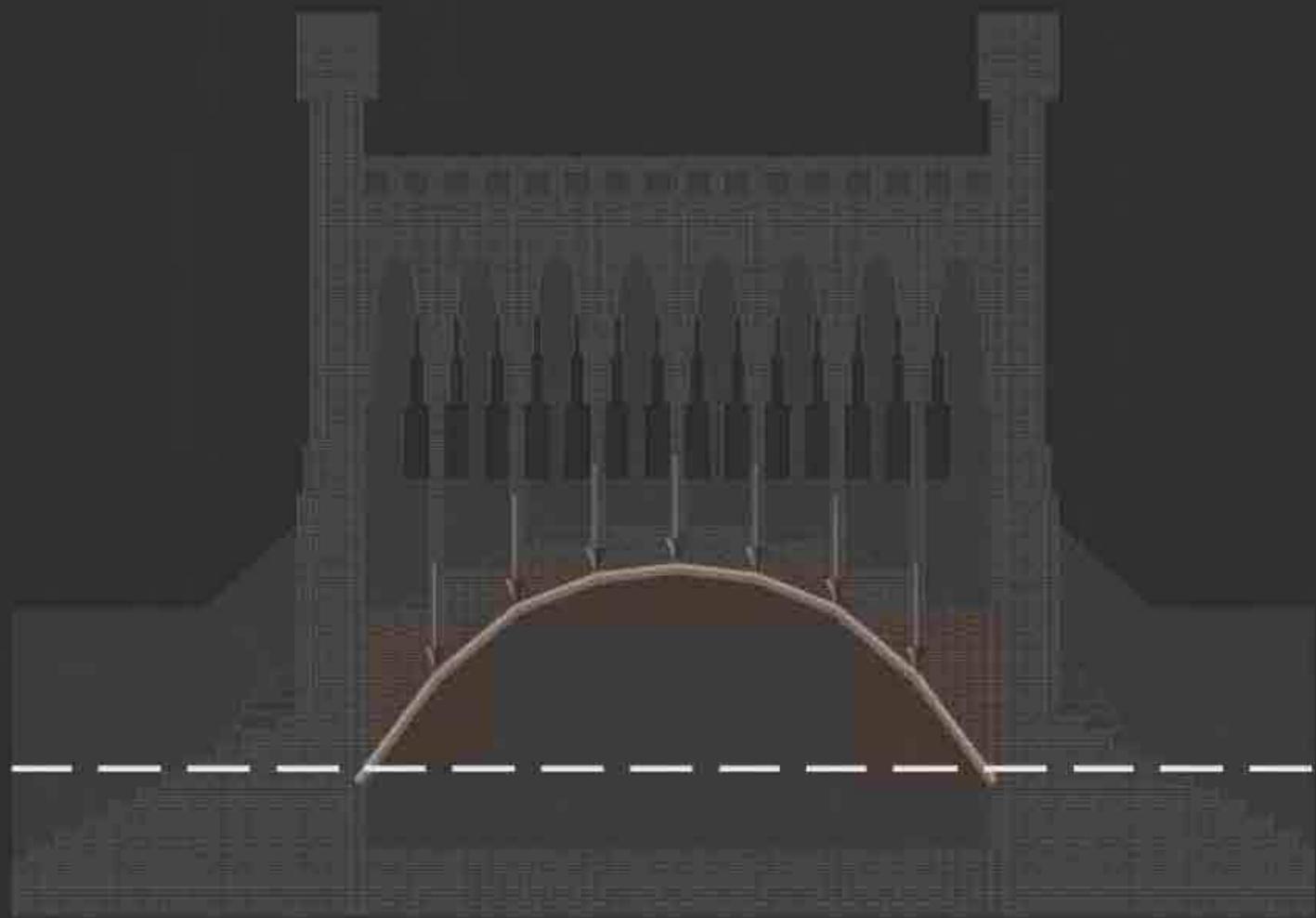


Secuencia geométrica de imágenes de arcos catenarios y funiculares y su comportamiento

Catenarias utilizadas por Gaudí en la construcción de la buhardilla de la Casa Milà



A la derecha:
Representación del arco funicular de la cascada de la Casa Vicens





Arcos catenarios de las casas Milà y Batlló y del colegio de las Teresianas

Arriba y a la derecha:

Fotografía de época del arco y la cascada de la Casa Vicens

Fotografía del arco catenario de la glorieta del Camp de les Figueres de la Finca Güell

A la derecha:
Modelos funiculares y cascada
de la Casa Vicens

que después redibujó sobre la fotografía obtenida. Ese proceso fue lento y laborioso. La paralización de las obras de la iglesia de la Colonia Güell en 1914 suspendió el trabajo en la maqueta, con el deseo, sin embargo, de continuarlo.

«La estructura definitiva de la Sagrada Familia la probó primero en la Colonia Güell. Sin ese ensayo previo no se habría atrevido a adoptarla en el templo.»

«Todas las formas y todos los elementos resistentes del templo se basan en los funículos de las fuerzas actuantes, por lo que puede prescindirse de los contrafuertes.»

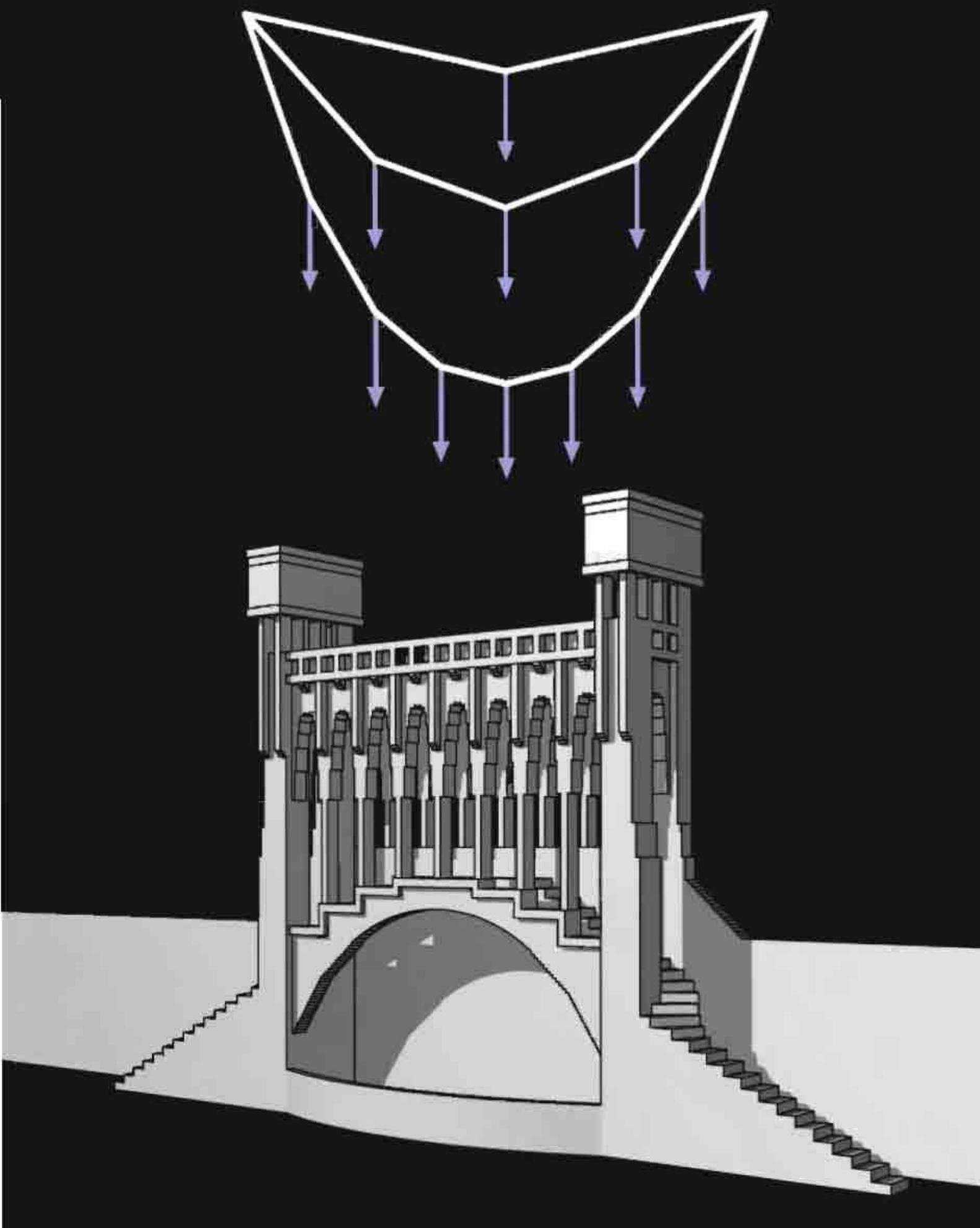
La experiencia de la iglesia de la Colonia Güell, según Gaudí, condicionó su último gran proyecto estructural: la nave y las torres del templo de la Sagrada Familia. En 1923 Gaudí explicó esa estabilidad del templo en el *Anuari del Col·legi de Arquitectes de Catalunya*, en un artículo suscrito por su ayudante Domènec Sugrañes. La estabilidad de la nave es el resultado de un cálculo espacial de funículos catenarios que se desdobra en dos planos por el hecho de ser la nave doblemente simétrica. Considerando los pesos de la cubierta de la nave (similares a los saquitos del modelo de Santa Coloma de Cervelló) y las direcciones de las columnas (parecidas a los hilos del modelo mencionado), modeló la forma y obtuvo los resultados de las tensiones en las columnas de una forma sencilla y brillante, basándose en los mismos principios que el modelo catenario de la Colonia Güell. Determinó formalmente la cubierta y el tejado de la nave de la Sagrada Familia por medio de superficies regladas y obtuvo el centro de gravedad de cada mitad componiendo los pesos parciales de cada una de las partes geométricas en que se divide. Se conseguía un rendimiento mejor de los pilares si se situaban en esos centros de gravedad. Es como sostener un sombrero con una barra que lo cruce por su centro de gravedad: las posibilidades de que se tuerza se reducen. Se aplica también el principio inverso pero similar al sostenimiento de un elemento con un cordel. Si la dirección del cordel pasa por el centro de gravedad del elemento, éste se mantendrá estático. Si no, se moverá hasta que la dirección pase por ahí. Por tanto, que la columna soporte arranque del centro de gravedad del elemento que hay que sostener es un principio correcto que Gaudí aplicó estáticamente. En este caso, con el cálculo de la nave de la Sagrada Familia el arquitecto marcó la pauta del comportamiento catenario o funicular: definió unos puntos de convergencia de la columna superior de la nave, con la resultante del peso de la fachada superior, y con la carga del tejado lateral y los pináculos, y obtuvo por fin la resultante ligeramente inclinada de las



columnas de la nave. Era un ingenio estructural para obtener de una manera sencilla una forma equilibrada que sigue los arcos funiculares o catenarios de la estabilidad de cargas verticales y que no requiere los grandes contrafuertes de las catedrales góticas. Se trataba de toda una evolución de las posibilidades del cálculo gráfico y de los funículos o catenarias que siempre acompañaron a Gaudí en el diseño arquitectónico.

«Los funículos de la Sagrada Familia los encontró gráficamente, y los de la Colonia Güell, experimentalmente, pero dice que ambos procedimientos son el mismo, el uno hijo del otro.» (Martínez, 1969)

J. G.-S.





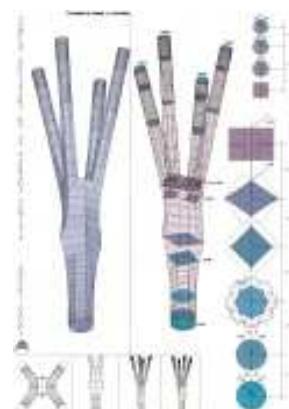
COLUMNA DE DOBLE GIRO



Tronco y ramas de un árbol



Columnas arboladas del templo de la Sagrada Família



Esquemas geométricos de la columna rectangular de la nave del templo de la Sagrada Família

JORDI BONET I ARMENGOL

Gaudí era de la opinión de que la nueva arquitectura que le inspiraba la observación de la naturaleza debía tener las características de la vida, que puede mostrarse con el color y el movimiento. Quería llegar a conseguir la síntesis entre estructura y forma, y también la continuidad que está muy presente en las figuras arboriformes y en el cuerpo humano. Concretamente, los huesos son cilindros que se transforman en hiperboloides en las articulaciones. También había observado que las superficies regladas eran más resistentes, y las utilizó cada vez más.

El uso del color llevaba ya siglos presente en la arquitectura, y Gaudí se sirvió de él ya en sus primeras obras, pero el movimiento era algo más difícil de conseguir. En el sistema de elementos de soporte, sólo la columna salomónica había mostrado un camino en ese sentido, pero no acababa de satisfacerle, posiblemente porque recordaba una resistencia estructural más pequeña, como si pudiera aplastarse.

Gaudí había probado una gran diversidad de columnas, entre las que podemos destacar las del Parc Güell. También había obtenido resul-

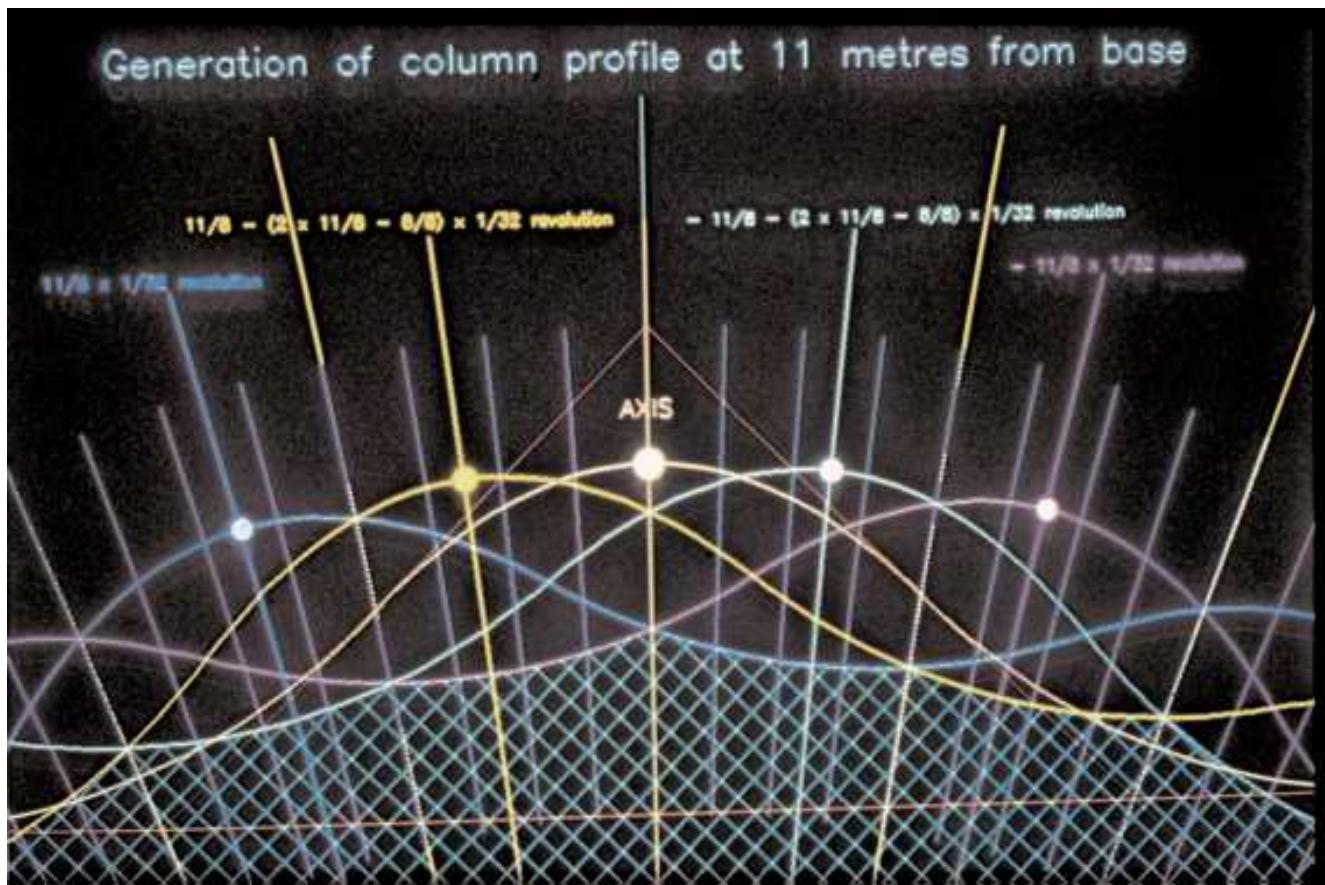
tados notables con las formas similares a olas petrificadas, como en la Pedrera. Finalmente, después de dos años de investigación, consiguió lo que quería: una columna nueva en la que el movimiento era esencialmente la fuente de su generación.

«Los astros van y vienen en sus órbitas, giran sobre sí mismos siguiéndolas en un movimiento helicoidal» (Bergós, 1974).

Así, a partir de un mismo polígono estrella-dado como base, dos superficies helicoidales se elevan y giran helicoidalmente en direcciones opuestas, la una hacia la derecha y la otra hacia la izquierda, y cuando se cortan generan unas aristas que se multiplican hasta llegar a conformar una circunferencia.

En los estudios publicados sobre el arquitecto se describieron el aspecto y el acierto del diseño de la columna gaudiniana. La generación geométrica se publicó, en parte gráficamente, en la sucesión de las secciones de las que constaba. Se restauraron las maquetas de las naves de la Sagrada Família, a escala 1:10, y se reprodujo la diversidad de formas de soporte que la

A la izquierda:
Modelo informático de la columna rectangular de la nave del templo de la Sagrada Família



Generación del perfil de la columna de 8 a 11 metros desde la base

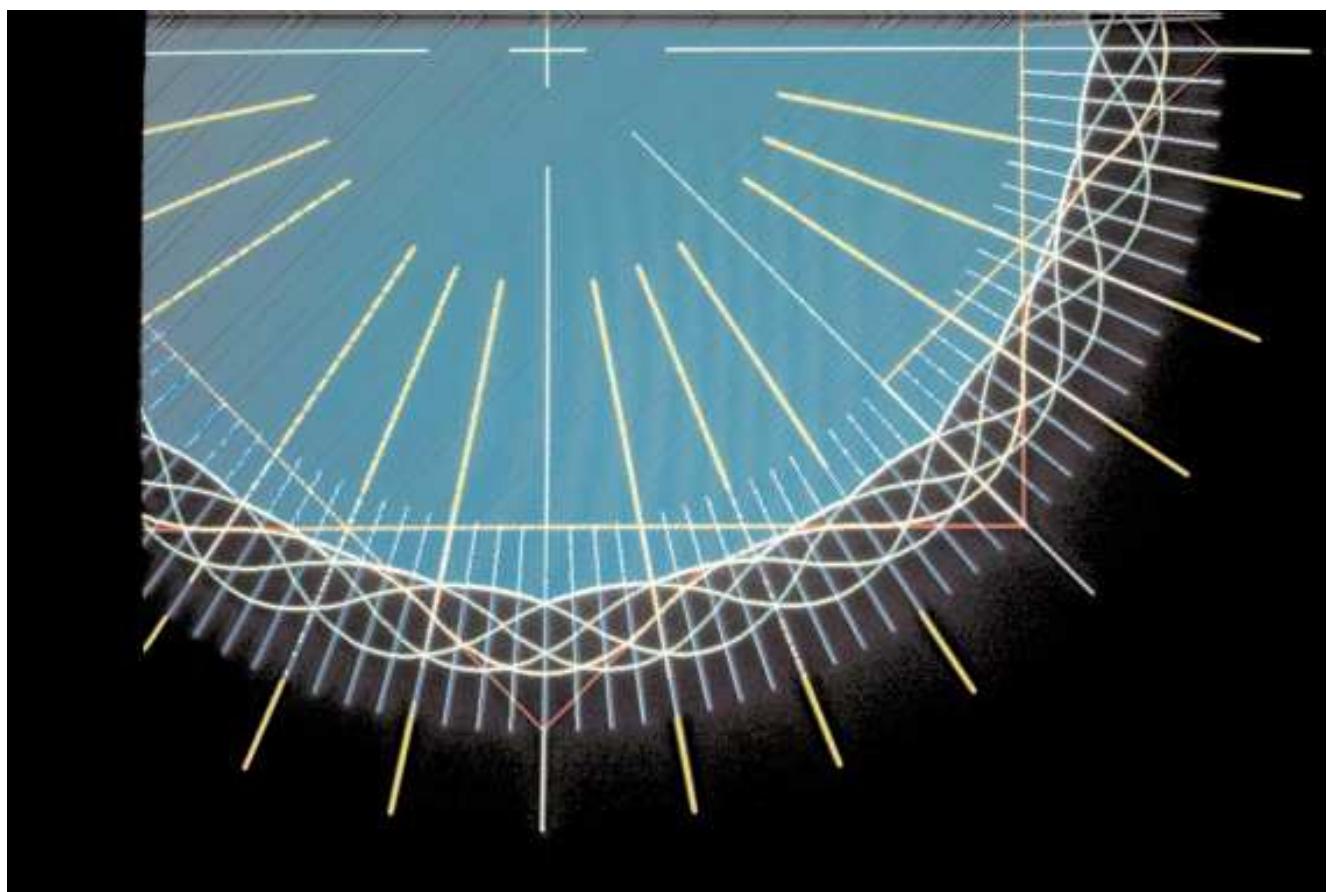
conformaban. Puig Boada aseguró, al describir esta columna: «La generación helicoidal le da movimiento y reposo al mismo tiempo» (*El Temple de la Sagrada Família*, p. 60).

Se presentó incluso a tamaño natural en la exposición conmemorativa que se celebró en el Saló del Tinell en 1956 y, gracias a la donación de la señora Malvehy, aquel mismo año se levantó en piedra granítica la columna dedicada a la diócesis de Barcelona, de unos 14 metros de altura, en el transepto del templo. Uno de los modelistas del taller de restauración de las maquetas, Jordi Brunet, ideó un artefacto que permitía obtener esa forma más fácilmente. El arquitecto Quintana, que había escrito sobre las formas regladas que utilizaba Gaudí, había dejado una nota con las alturas, los diámetros y las esbelteces de los cuatro tipos de columna que debían levantarse desde la planta del templo, que se correspondían con las que se engendraban a partir de los polígonos regulares de seis, ocho, diez y doce lados. Era necesaria aún una explicación geométrica completa y razonada que las incluyera a todas, que pudiera extenderse al resto de colum-

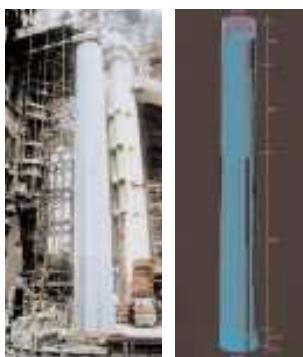
nas (que, evidentemente, se denominaban de doble giro) que completaban la totalidad del proyecto. Tampoco se conocía la generación de las ramificaciones que componían la solución estructural y plástica del conjunto.

Cuando me hice cargo de la dirección de las obras del templo de la Sagrada Família, en 1985, daba por hecho que todos esos aspectos ya se habían estudiado, y hasta que el encargado de las obras, Antoni Pastor, me planteó los problemas de ejecución de la piedra granítica de las columnas de las naves no emprendí a fondo su investigación, para dar una solución mejor a la complicadísima forma en que se había llevado a cabo la primera columna. Los defectos con los que se había construido eran importantes y evidentes, y había que ponerles remedio. Hasta entonces los giros se producían a unas alturas que no concordaban con los tambores de un metro de altura.

Afortunadamente, entre los elementos originales conservados estaban los moldes de la columna de base octogonal que había hecho Gaudí, y también las plantillas de zinc situadas a cada



Perfil de una sección superior de la columna de 8



Columna de 8 construida y modelo informático de la columna de 12

metro, y una buena parte de la columna original, con el «trenzado» que unía las plantillas con yeso. La palabra «trenzado» define el trabajo que había que hacer a partir del yeso para pasar de una plantilla a otra con la ayuda de una regla. En los originales en negativo (es decir, los moldes) y en una parte de los fragmentos de las columnas que se habían conservado era evidente que los tambores tenían un metro de altura y que los giros en ambos sentidos que originaban las aristas se producían a ocho, cuatro y dos metros de altura en la columna octogonal.

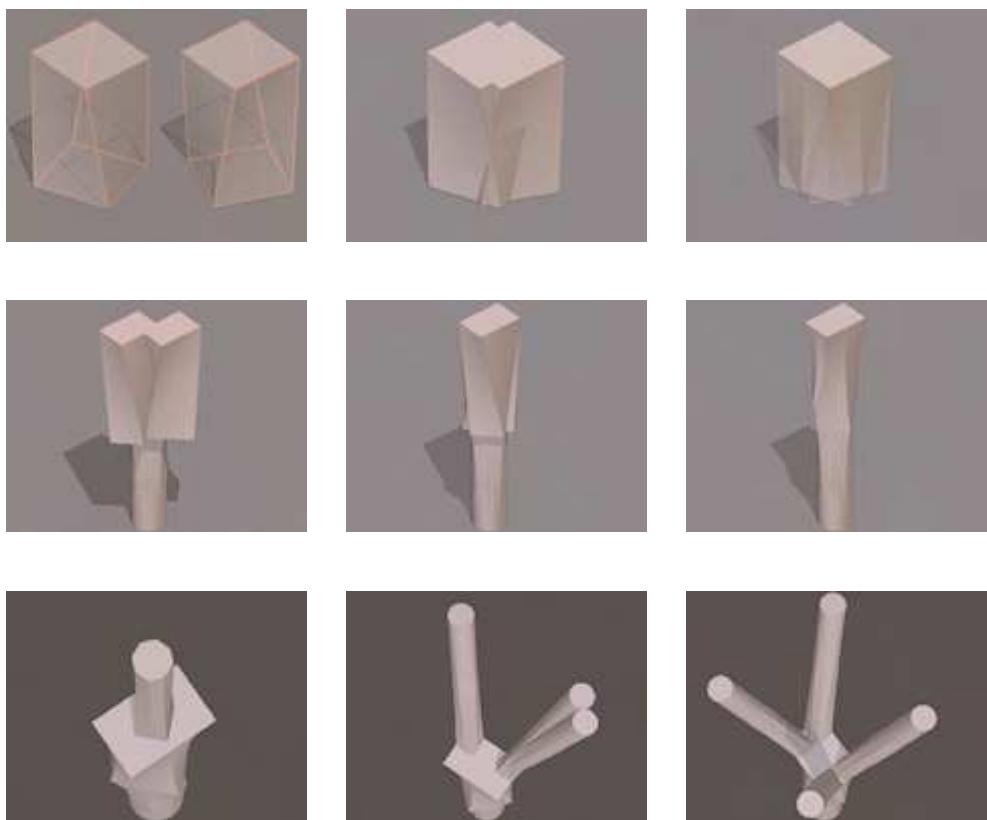
Eso comportaba que en el octágono el número de lados (ocho) correspondiera a ocho tambores de un metro y a un giro de 360° : $8 = 45^\circ$, que representaba $22\frac{1}{2}$ grados que giraban en sentido contrario, a derecha e izquierda. Así, el resultado era una curva que pasaba de 8 a 16 aristas que aparecían en el centro de las canales redondeadas por las paráolas de la base, unas aristas que se levantaban verticalmente y configuraban una curva de 16 aristas.

Después se producía un segundo giro a una altura de cuatro metros (que equivalía a la mitad

de ocho), es decir, la mitad del número de lados del octágono. Los ángulos de giro eran de $11\frac{1}{4}$ grados por lado, y a 12 metros de altura se llegaba a 32 aristas, el doble de las 16 inferiores.

Un tercer giro se producía al cabo de dos metros, es decir, a una altura correspondiente a la cuarta parte de ocho, y en un ángulo de giro de $11\frac{1}{4}^\circ$: 2, y originaba, por tanto, 64 aristas. Siguiendo ese proceso, un metro más arriba las aristas se multiplicaban por dos, 128, y así sucesivamente: a medida que decrecía la altura, se multiplicaban las aristas, de modo que, cuando se llegaba al doble de la altura, en metros, de los lados del polígono inicial (en el caso del octágono a 16 metros de altura), la sección de la columna se convertía en un círculo.

Gaudí quedó satisfecho con el resultado obtenido. «Hemos estado dos años trabajando indefectiblemente y se han gastado 4.000 duros para llegar a una solución completa de las columnas», comentó, tal como explica Joan Bergós. Así, pues, a partir de ese descubrimiento Gaudí decidió utilizarla para todas las columnas de las naves, tanto con la base poligonal en la parte



Secuencia geométrica de imágenes
la generación de la columna
rectangular de doble giro
y su arborescencia

inferior y el círculo en la superior como a la inversa. Y siguió ese proceso no únicamente con polígonos regulares, sino también con una gran variedad de formas poligonales y macías. Así resolvía la continuidad que quería para su sistema arboriforme, ya que conseguía pasar de unas macías de dos cuadrados y dos pentágonos al círculo, o bien a partir de dos hexágonos, de dos cuadrados o de la figura que mejor se adaptara a las necesidades estructurales que le planteaban los cálculos, y que resolvía con su inteligencia prodigiosa.

Una muestra clara de la manera en que resolvió magistralmente la ramificación del tronco con cuatro ramas es una imagen del árbol cercano al obrador de Gaudí.

A partir de un rectángulo, como base, surgen cuatro columnas de sección cuadrada que se levantan para entregarse sin discontinuidad a los hiperboloides macizos que se abren más arriba hacia las formas estrelladas de los hiperboloides abiertos, en el paso del collarino del hiperbolóide a la sección circular superior de cada columna.

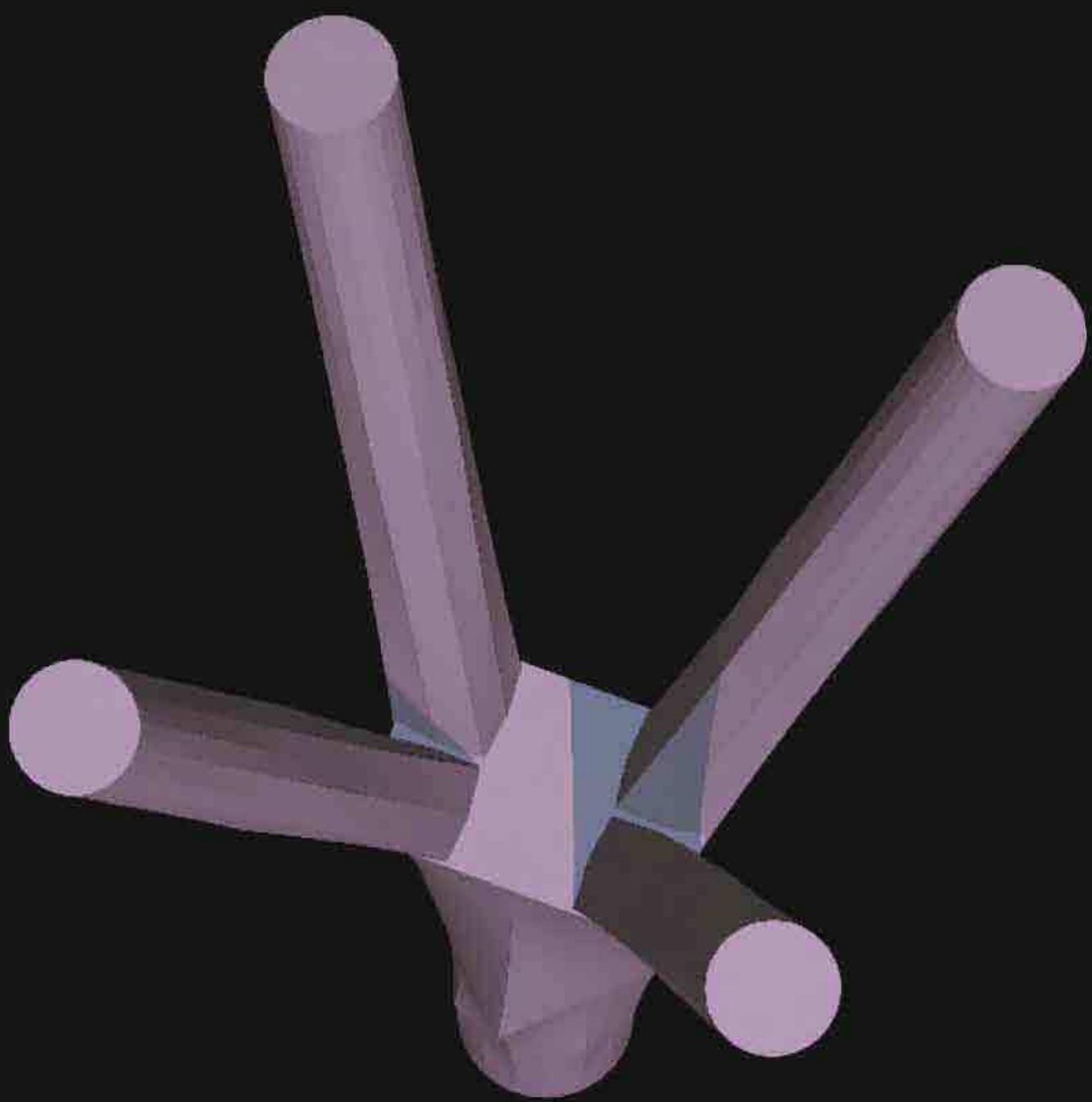
El rectángulo es el polígono que, con doble giro, se transforma en una sección circular, colo-

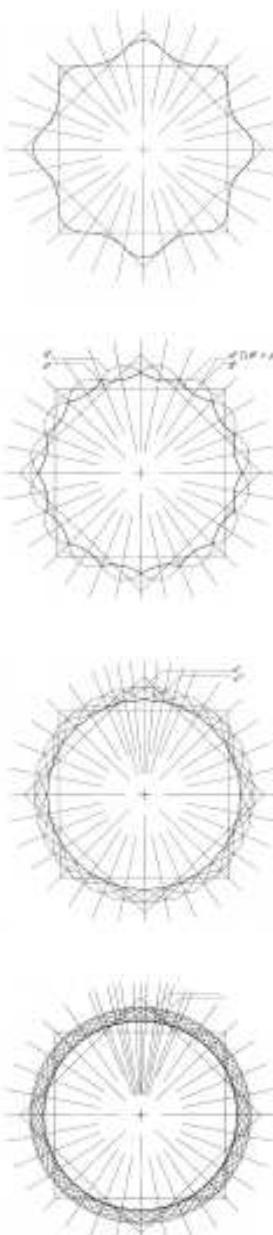
cada en el origen de las graderías laterales para los cantores, y, por tanto, en la parte inferior, que proviene de las columnas de seis lados que arrancan del nivel cero del templo.

El primer giro se produce a 90°, la cuarta parte de los 360° del círculo, y a una altura de cuatro metros correspondiente a los lados del rectángulo. De ese modo se consigue un ensanchamiento importante que permite recoger las líneas de presión de las cargas gravitatorias de las bóvedas, y el rectángulo se transforma en un cuadrado. El segundo giro se hace a dos metros, la mitad de cuatro, y el cuadrado se convierte en un octógono; el tercero, a un metro, etcétera. Y así en todas las columnas y ramificaciones, siguiendo la misma ley geométrica. Con la ayuda de la geometría, pues, se muestra la forma en que Gaudí obtuvo la síntesis entre estructura y forma.

Sin embargo, para construir este proyecto había que poder tallar la piedra siguiendo la geometría con medios industriales, para así ahorrarse la dificultad que representaba hacerlo manualmente. En aquella época se realizaban unas restauraciones en Bath, en el Reino Unido, en las que se utilizaba una máquina de la casa holandesa Van Worden con la que se construían las colum-

A la derecha:
Columnas superiores de la columna
rectangular





Secciones geométricas de la columna de 8

nas. Tras ver cómo funcionaba y hacer unas pruebas, se decidió adquirirla para construir los tambores (de piedra granítica de la Roca del Vallès) de las columnas de la nave principal de la Sagrada Família. El funcionamiento de la máquina era el siguiente: una sierra de disco de diamante hacía siempre la misma curva sobre la piedra, pasaba primero en un sentido y después en el contrario, se desplazaba y multiplicaba las pasadas. Facilitaba, pues, la ejecución del tambor, ya que cada medio centímetro cortaba unas curvas diferentes, guiada por un sencillo ordenador con el control numérico correspondiente. Así, a partir del primer tambor hicieron todas las demás columnas que arrancan del plano del templo, a partir del hexágono, el octógono, el decágono y el dodecágono, con piedra de Montjuïc, con granito de la Roca del Vallès, con basalto y pórfido, tal como quería Gaudí. La parte inferior se ha dejado pulida, ya que asegura una mejor conservación, y gran parte del resto, con la marca horizontal de cada surcido del disco, con una gran perfección, a diferencia de cuando se hacía manualmente.

Las bases, también geométricas, se han cortado a mano, del mismo modo que la parte superior en la que se abren las aristas para seguir las inclinaciones de las columnas superiores, que se ramifican a partir de los nudos o capiteles.

La investigación realizada para llegar a conocer la generación que acabamos de explicar de la totalidad de las columnas y las ramificaciones no fue fácil. A partir de los elementos originales de las maquetas a escala 1:10 que se han conservado, de los negativos y de las fotografías, el jefe de los modelistas de la obra, Jordi Cusó, y, más adelante, los ordenadores facilitaron no solamente la solución de lo que había resuelto materialmente Gaudí, sino también la de aquellos elementos que pedía la estructura arboriforme del resto de la columna y que, muy posiblemente, tan sólo era capaz de imaginar, gracias a la visión que tenía del volumen y del espacio.

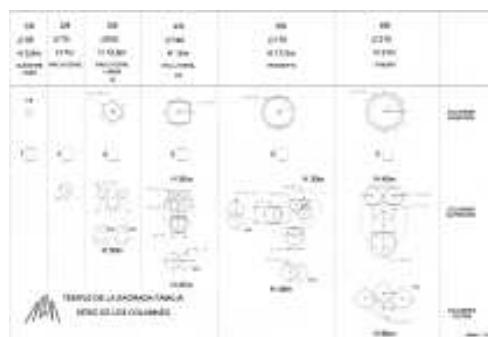
Esa investigación nos llevó a no resignarnos a pasar de los modelos de los nudos y los capiteles a escala 1:10 multiplicando por 10 cada medida, sino a seguir más allá. Así pues, se descubrieron poco a poco las modulaciones de las medidas esenciales del templo y, al mismo tiempo, la complejidad y la sencillez de aplicar una misma ley geométrica generadora de las diferentes columnas que forman el conjunto.

Se trata de una nueva aportación a la historia de la arquitectura que concibió Gaudí y que, como las naves con las bóvedas en las que las superficies regladas son las protagonistas, solamente podía observarse en las maquetas que, a escala 1:10 y 1:25, mostraban lo que proyectó él.

Sus palabras, con las que se mostraba contento de lo que había alcanzado, así lo demues-

tran: «Estoy satisfecho de la última maqueta de las naves del templo, pero me contraría no poder realizar un tramo completo» (Bergós, 1954). Ahora, 75 años después de su muerte, se presentan para que todo el mundo pueda contemplarlas.

J. B. y A.

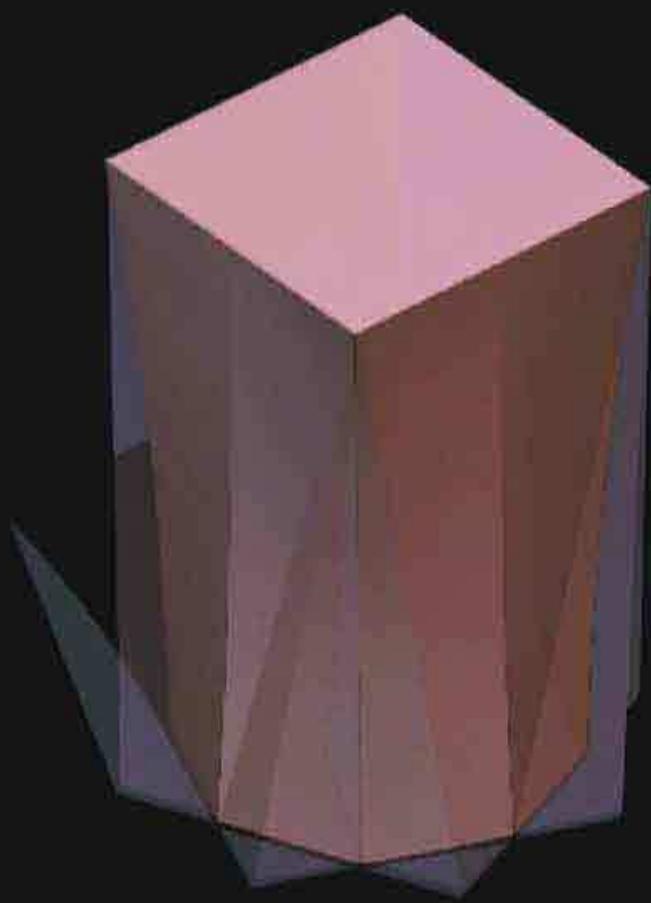


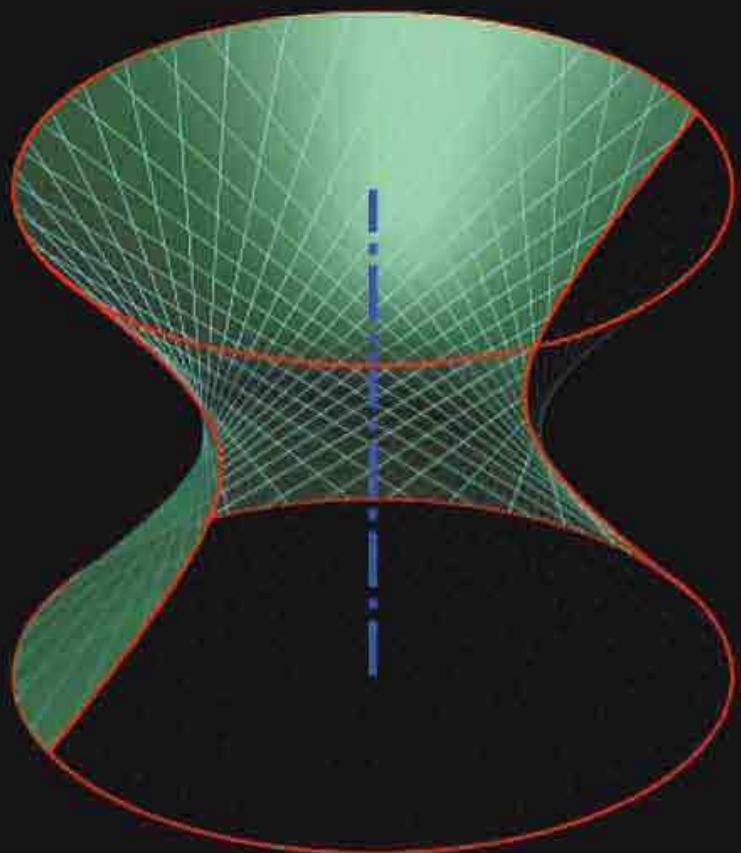
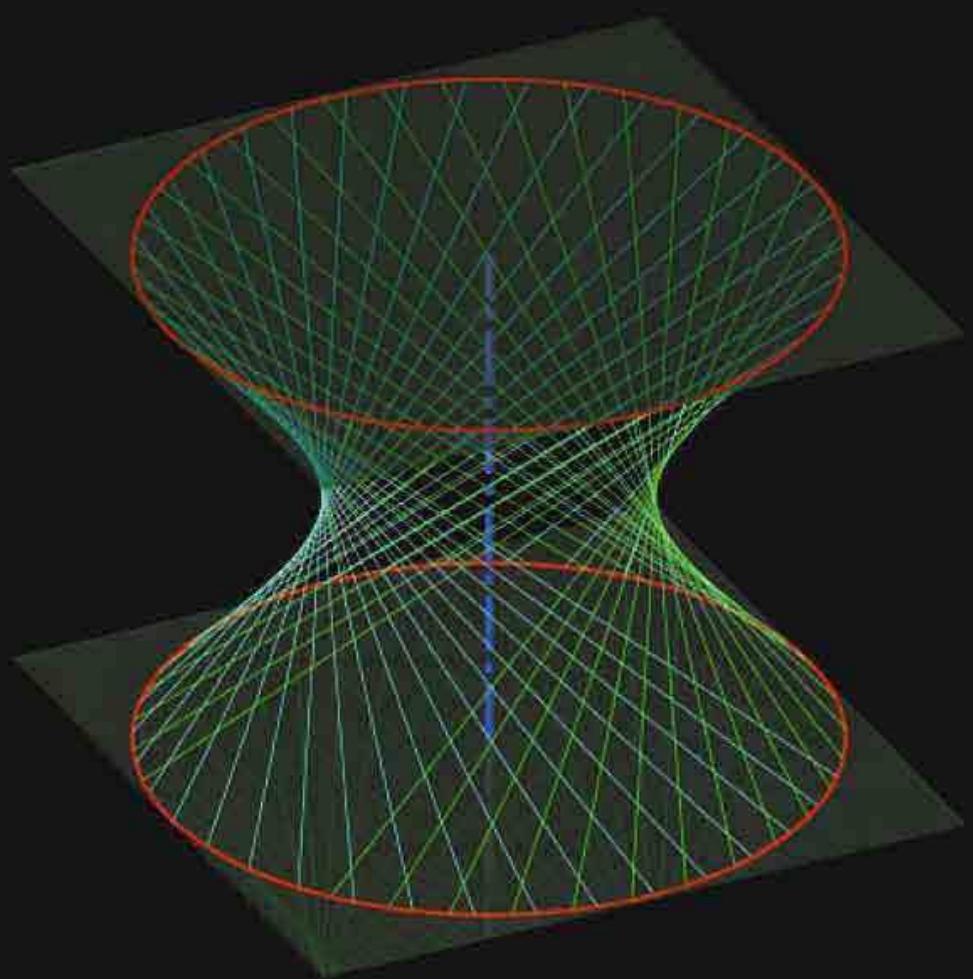
Modulación y proporciones de las columnas del templo de la Sagrada Família



Dibujo geométrico de la columna de 8

A la derecha:
Generación de doble giro de la columna rectangular





BÓVEDAS HIPERBÓLICAS



Detalle de la construcción de un hiperboloide de una hoja donde se observa el armado siguiendo sus generatrices (fig. 1)



Cúpula hiperbólica de las caballerizas de la Finca Güell (fig. 2)



Capiteles hiperbólicos del Palau Güell (fig. 3)

**CARLES BUXTADÉ
JOAN MARGARIT**

La singularidad de la arquitectura de Gaudí se basa en las características de las superficies que definen sus espacios, que se alejan de las que se han utilizado normalmente, mucho más simples, y están formadas básicamente por conoides y por cuádricas regladas, salvo el parabolóide de revolución y los elipsoides, que utilizó de forma más puntual, sobre todo en los nudos y en los capiteles.

De las superficies regladas que utilizó más, los conoides, los paraboloides hiperbólicos y los hiperboloides de una hoja de revolución, ésta última es la más compleja. Gaudí entró en contacto con estas formas cuando estudiaba geometría en la Escuela de Arquitectura de Barcelona, siguiendo el texto de C. F. A. Leroy (Leroy, 1875), sucesor de Gaspard Monge en la Escuela Politécnica de París. El interés que sintió por esas formas hizo que, a pesar de la dificultad de concepción y de construcción que presentaban (fig. 1), se convirtieran en la forma gaudiniana por excelencia de definir espacios arquitectónicos. Una de las primeras utilizaciones que hizo Gaudí del hiperbolóide de revolución fue en la cúpula central de las caballerizas de la Finca Güell (fig. 2). Más adelante se encuentran en los capiteles del Palau Güell (fig. 3), en la bóveda para el giro de carruajes del Parc Güell (fig. 4, p. 114)

A la izquierda:
Modelización informática
del hiperbolóide de una hoja
y sus generatrices

y, finalmente, en el proyecto del templo de la Sagrada Família, donde el hiperbolóide de una hoja se transformó en la pieza fundamental de los techos de las naves (fig. 5, p. 114).

En éstos últimos, medio hiperbolóide pleno forma el capitel de las columnas que soportan el techo del templo, lo que permite la continuidad con la sección circular de la parte superior de las columnas. El hiperbolóide vacío, que muestra su piel interna, es la base para formar el techo de la nave, como un conjunto de claraboyas soportadas por las columnas, por donde se filtrará la luz natural que llega de las cubiertas, y también la artificial instalada adecuadamente para producir un efecto similar.

Gaudí hizo las intersecciones de los hiperboloides de una hoja, difíciles de materializar sobre el papel por la geometría descriptiva tradicional, con modelos de yeso, en los que pudo definir cada una de ellas con la ayuda de recursos geométricos sutiles. El arquitecto resolvió el paso de un hiperbolóide de una hoja al otro con paraboloides hiperbólicos, también superficies regladas que pueden mantener la continuidad de las formas resultantes por medio de generatrices comunes. Cèsar Martinell explica que Gaudí obtenía la intersección de un hiperbolóide de una hoja produciendo un plano de luz



Diferentes visiones del hiperboloide de una hoja y de sus secciones (fig. 7)

A la derecha:
Modelización informática del
hiperboloide de una hoja y de un
elemento del techo de la nave del
templo de la Sagrada Família



Bóveda hiperbólica para el giro de carruajes
de la entrada del Parc Güell (fig. 4)



Hiperboloides de una hoja del techo
de la nave del templo de la Sagrada
Familia (fotografía de archivo de 1926
y modelos informáticos actuales)
(fig. 5)

a través de una rendija. Así conseguía la recta generatriz proyectada por ese plano de luz sobre una superficie reglada de yeso o de hilos que la materializaban. El conjunto de formas hiperbólicas se completa con lóbulos parabólicos y planos diédricos que acaban de definir la estructura resistente del techo de la nave.

Está claro que, para Gaudí, el hiperboloide de una hoja era la superficie que simbolizaba la luz. El espacio fluye por el cuello circular y se escapa hacia el exterior, a la vez que, desde fuera, la luz invade el interior al deslizarse por su piel, que trató con diferentes texturas con la finalidad de conseguir una serie de vibraciones cromáticas que enriquecen, si es que es posible, la calidad del techo de las naves (fig. 6).

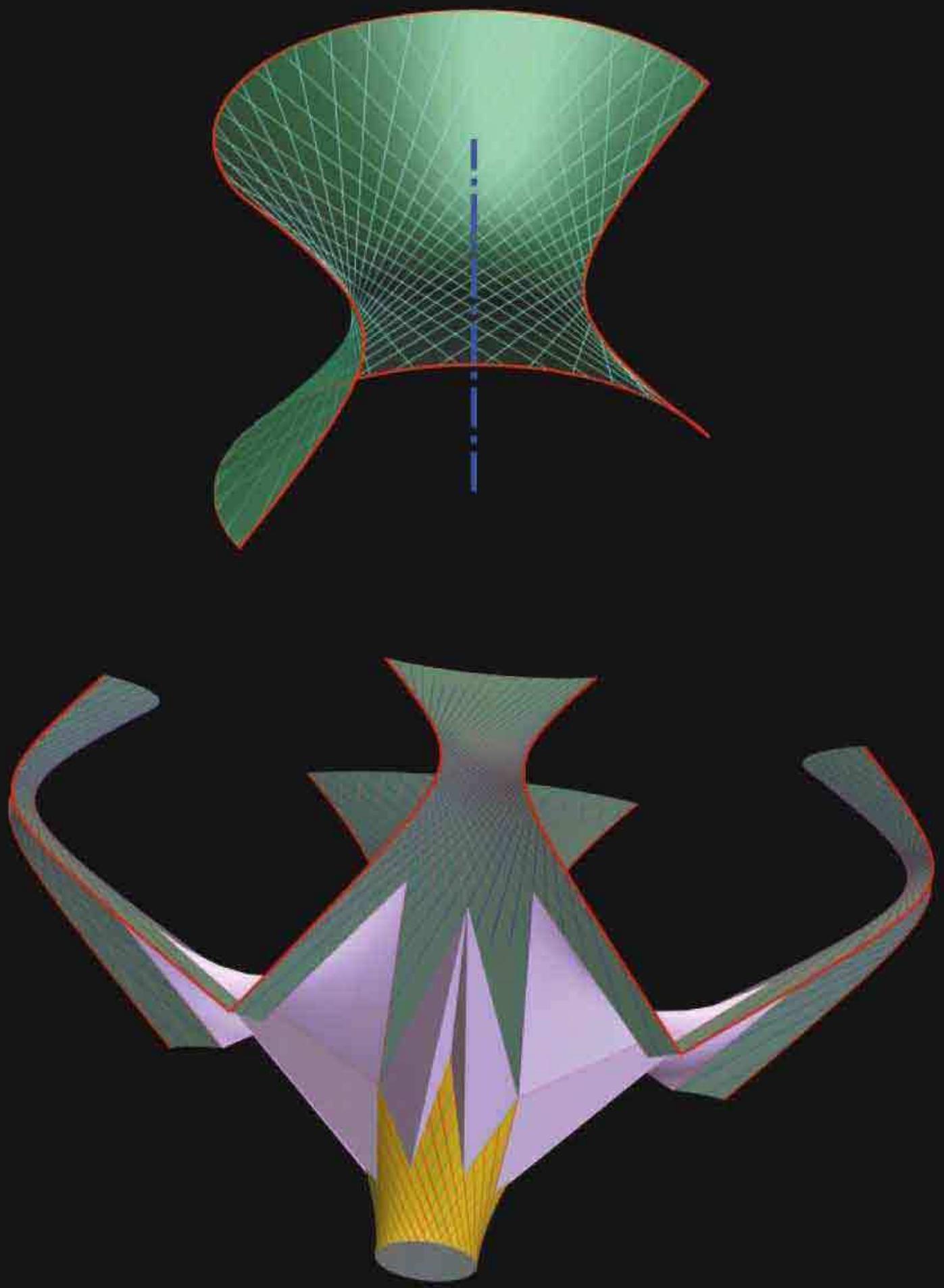
Para mostrar las posibilidades de la macla entre los hiperboloides, los paraboloides hiperbólicos y los planos, a continuación se indican las diferentes curvas que se definen al cortar esa cuádrica, el hiperboloide de una hoja, por diversos planos (fig. 7). En las figuras pueden observarse la riqueza y la variedad de las posibilidades de combinaciones y ritmos espaciales que permite el camino seguido por Gaudí, aunque, como ya se ha comentado, por falta de herramientas matemáticas y de dibujo solamente pudo utilizar las intersecciones por medio de las generatrices rectas de esas superficies.

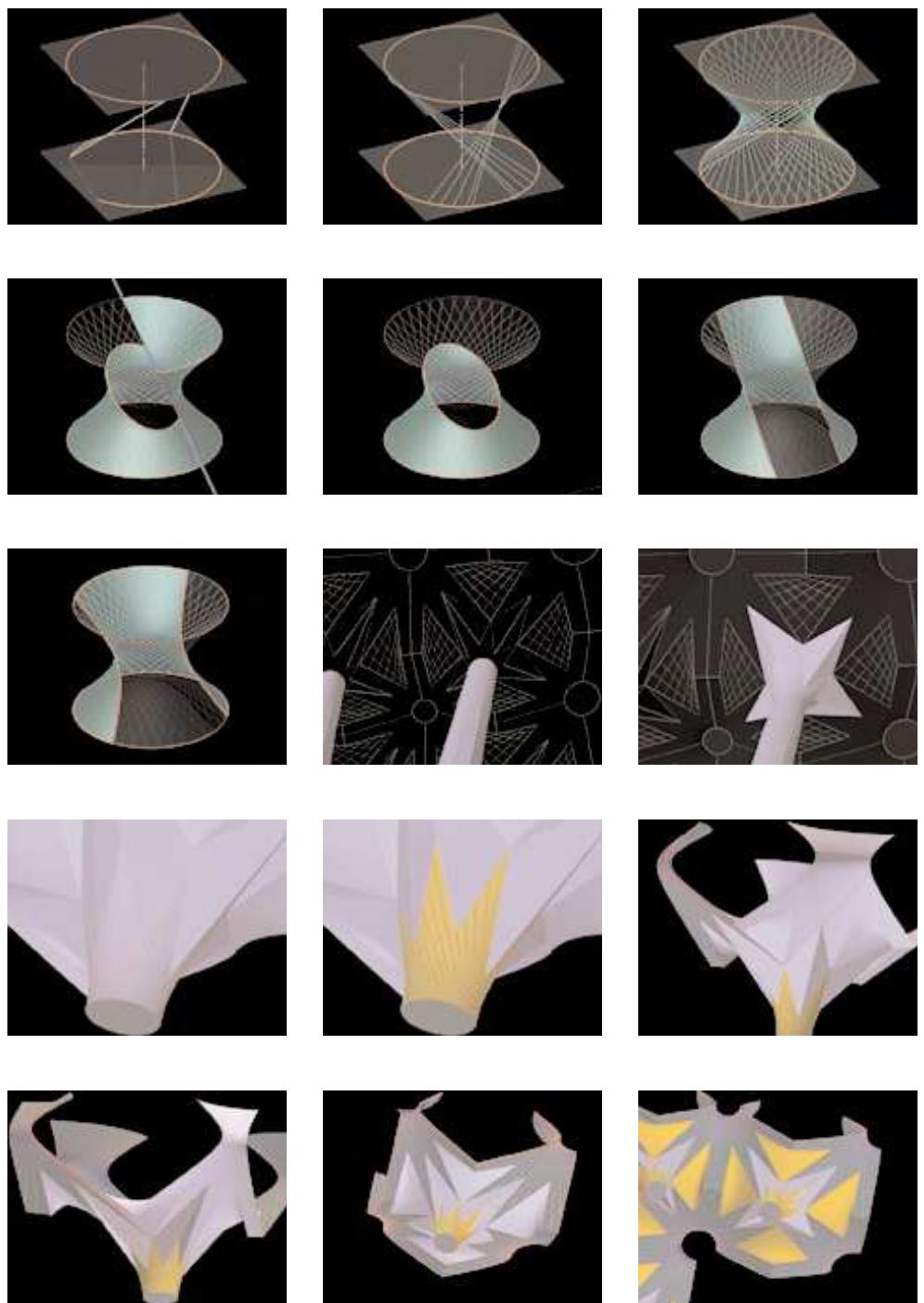
Nota. Desde el punto de vista geométrico, el hiperboloide de revolución es la superficie reglada formada por la rotación de una recta (generatriz) alrededor de otra (directriz) que no corta y que no es paralela a ella. La generatriz forma o genera la superficie, y la directriz es el eje de simetría de la figura. El cuello circular del hiperboloide es el lugar en el que la distancia entre las dos rectas es menor. Se encuentra en el plano perpendicular a la directriz y contiene el centro de la superficie. La mitad del hiperboloide generado de ese modo es la forma que normalmente tienen las campanas en la parte inferior, que se remata con media esfera en la superior.



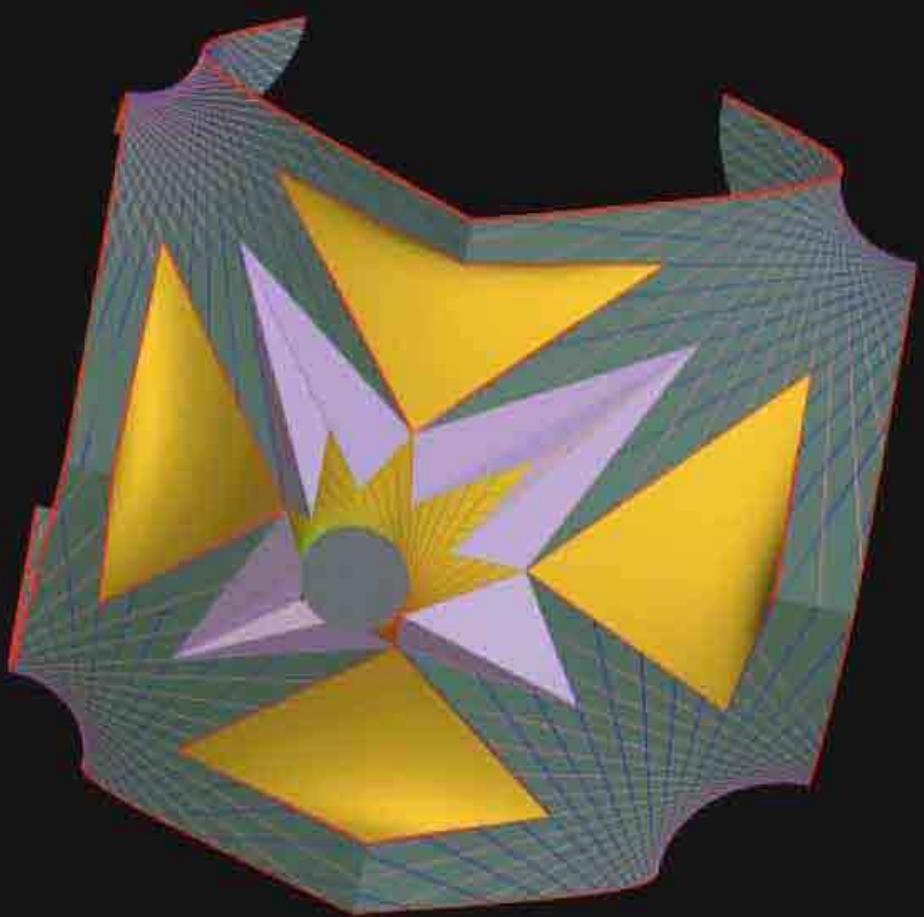
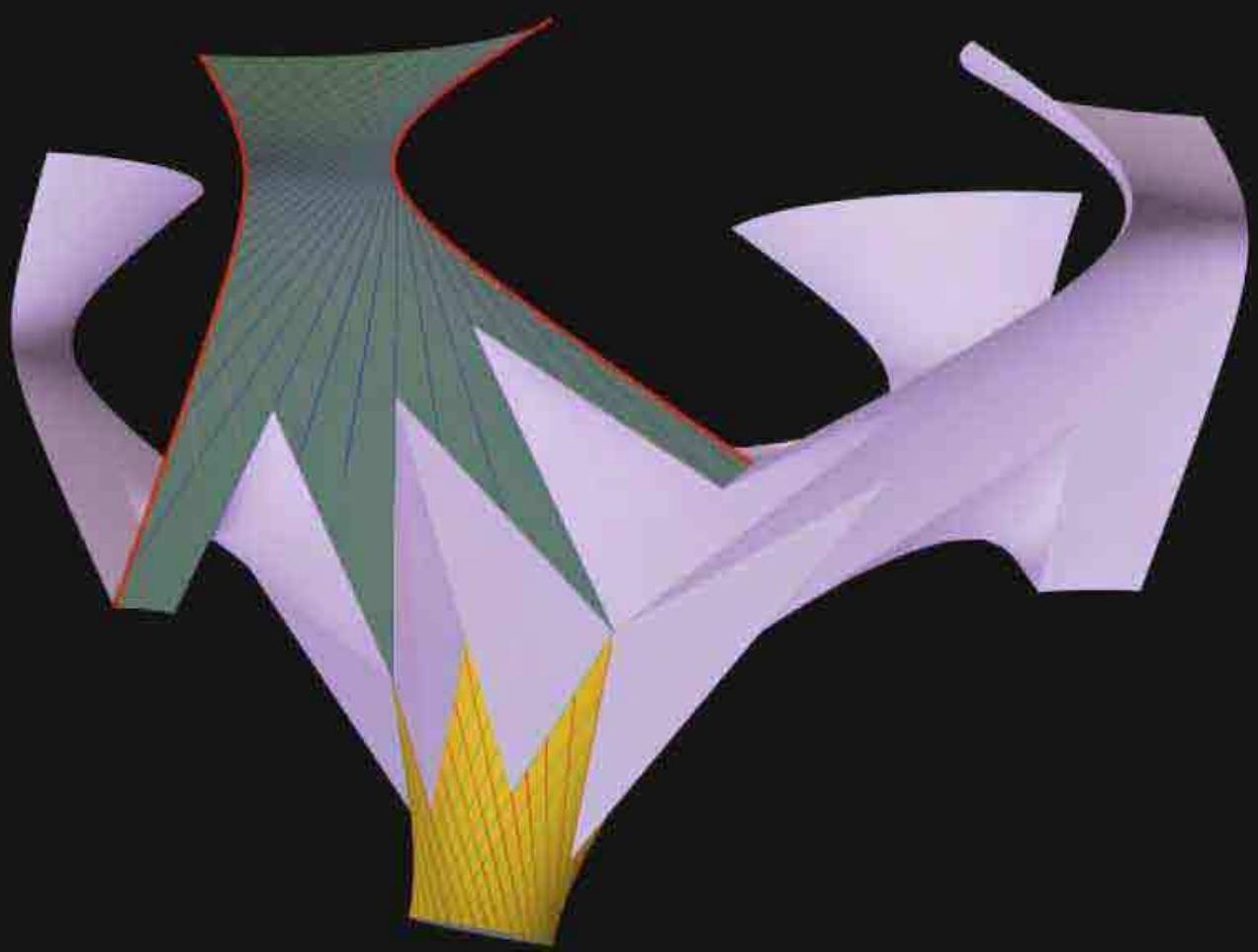
Detalle de un hiperboloide de una hoja
de la nave central del templo de la
Sagrada Familia (fig. 6)

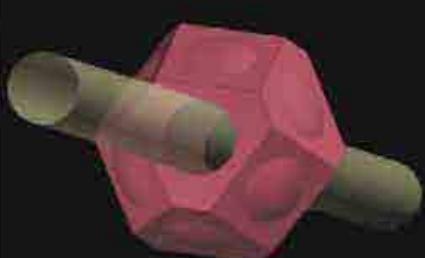
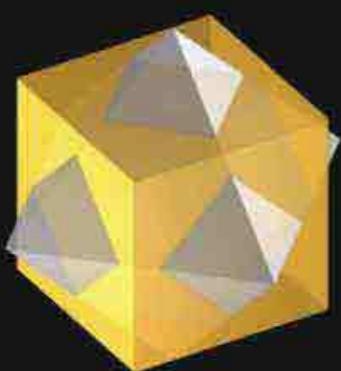
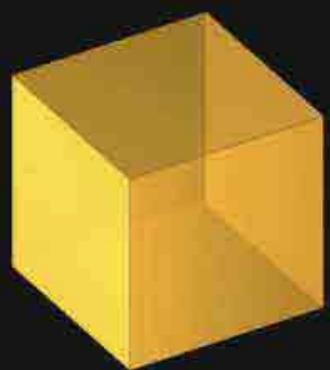
C. B. Y J. M.





Secuencia geométrica de imágenes de los hiperboloides de una hoja de revolución y generación del techo de la nave del templo de la Sagrada Família





MACLA DE GEOMETRÍAS

CLAUDI ALSINA

Guiado por una intuición espacial excepcional, Gaudí generó cuerpos tridimensionales complejos al intersecarse y ponerse en relación diversas formas geométricas. De la maclación de esas formas (Alsina y Gómez, 2002) surgen geniales soluciones arquitectónicas u objetos escultóricos que, convenientemente decorados, tienen capacidades evocadoras naturales, simbólicas y religiosas.

En los demás apartados de esta publicación se describen con detalle la maclación en la Sagrada Família de paraboloides hiperbólicos e hiperboloides de una hoja (que se encuentra en las cubiertas, en los cimborrios, en las torres y en las sacristías) y la generación helicoidal bidireccional de las columnas (Burry, 1993), con la maclación de elipsoides previa a la arborescencia en nuevas columnas (Gómez, 1996). Otros pináculos son hiperboloides y contienen frutas de la tierra geometrizadas. Aquí prestaremos una atención especial a los pináculos de los campanarios.

Los pináculos de los campanarios de la Sagrada Família

Los 12 campanarios dedicados a los 12 apóstoles son objetos singulares por sí mismos que culminan en 12 pináculos excepcionales. Basta con observar la forma en que los describe George R. Collins (Collins, 1960): «[...] encontramos: cuadriláteros de esquinas redondeadas rodeados de esferas de tamaño variable que se apartan una de otra, pirámides truncadas al lado de las cuales se proyectan otras, poliedros pseudorregulares formados al cortarse las esquinas de cubos y octaedros, pirámides triangulares que desarrollan otras hexagonales las cuales, a su vez, descansan sobre otras que se proyectan hacia abajo [...]».

Los poliedros de los pináculos

Gaudí consideraba que las formas poliédricas eran «escasas en la naturaleza», y por eso no

prestó demasiada atención a esos cuerpos. Estudió las de la galena y la fluorita, y seguramente se fijó en que los brillantes de joyería son el resultado de despuntar con mucha precisión formas de octaedros. Algunos poliedros colgaban del techo de su obrador, y utilizó luces en forma de dodecaedro tanto en la cripta de la Sagrada Família como en el altar de la catedral de Palma de Mallorca.

En los pináculos de los campanarios, tanto en la fachada del Nacimiento como en la de la Pasión, encontramos un interesante ejercicio de truncamiento de octaedros y la coexistencia del poliedro obtenido y una esfera con el mismo centro y casquitos esféricos que medio sobresalen por las caras o dejan algunos agujeros. Fijémonos en el campanario de San Bernabé, el único que Gaudí vio acabado. El poliedro presente está formado por seis cuadrados perfectos y ocho hexágonos no regulares (pero sí equiangulares y de lados opuestos paralelos). Este cuerpo se obtiene despuntando de seis vértices de un octaedro seis pirámides de base cuadrada o, lo que es lo mismo, mediante la intersección del octaedro con un cubo de las medidas convenientes (del mismo centro y girado respecto al octaedro). Contrastando, en los campanarios de la Pasión, la obtención de caras hexagonales regulares y el que, al lado de las esferas, figuren formas elipsoidales adicionales. En los cuatro pináculos de los campanarios de la fachada de la Gloria están presentes los dodecaedros regulares.

Hay que señalar que los agujeros de los poliedros son funcionales, ya que de ellos saldrá la luz que ilumine la cruz central, a 170 metros de altura, y el entorno del campanario correspondiente. Gaudí lo dejó dicho muy claramente: «Arriba del todo estarán los focos luminosos; como la luz natural, que también viene del cielo. Esos focos [...] darán en las noches de solemnidades religiosas vida y suntuosidad al templo, y, al mismo tiempo, constituirán el mejor ornamento de la ciudad».

A la izquierda:
Maclación sucesiva de un cubo, de un octaedro y de un cilindro, presente en el pináculo de San Bernabé del templo de la Sagrada Família



Pináculo de la torre de San Bernabé del templo de la Sagrada Família



Pináculo de una torre de la fachada de la Pasión del templo la Sagrada Família



Maclación de elipsoides en los nudos de las columnas de la nave del templo de la Sagrada Família

Esos poliedros, que representan las piedras de los anillos episcopales, se asocian, pues, a «la luz». En las catedrales góticas se decía que los obispos podían dirigir los reflejos de la luz que incidía en sus anillos hacia los feligreses.

El número 12 y los poliedros regulares

En el espacio hay tan sólo cinco tipos de poliedros regulares (poliedros convexos con todas las caras formadas por polígonos regulares iguales y con todos los vértices con el mismo número de aristas). En la tabla siguiente podemos observar, para cada uno de los poliedros regulares, los valores del número de caras (C), de aristas (A) y de vértices (V). Por otro lado, esos tres parámetros satisfacen la conocida relación de Euler «caras más vértices igual a aristas más dos ($C + V = A + 2$)»:

| | C | V | A |
|-------------------|----------|----------|----------|
| TETRAEDRO | 4 | 4 | 6 |
| CUBO | 6 | 8 | 12 |
| OCTAEDRO | 8 | 6 | 12 |
| DODECAEDRO | 12 | 20 | 30 |
| ICOSAEDRO | 20 | 12 | 30 |

Si en las proporciones de la Sagrada Família Gaudí optó por las relaciones $1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 1$ asociadas a los divisores de 12 (1, 2, 3,

4, 6, 12; véase Bonet, 2000) y hay 12 campanarios con pináculos, no es de extrañar que los tres poliedros regulares que intervienen en el diseño de los poliedros de los pináculos sean el cubo y el octaedro de 12 aristas y el dodecaedro de 12 caras.

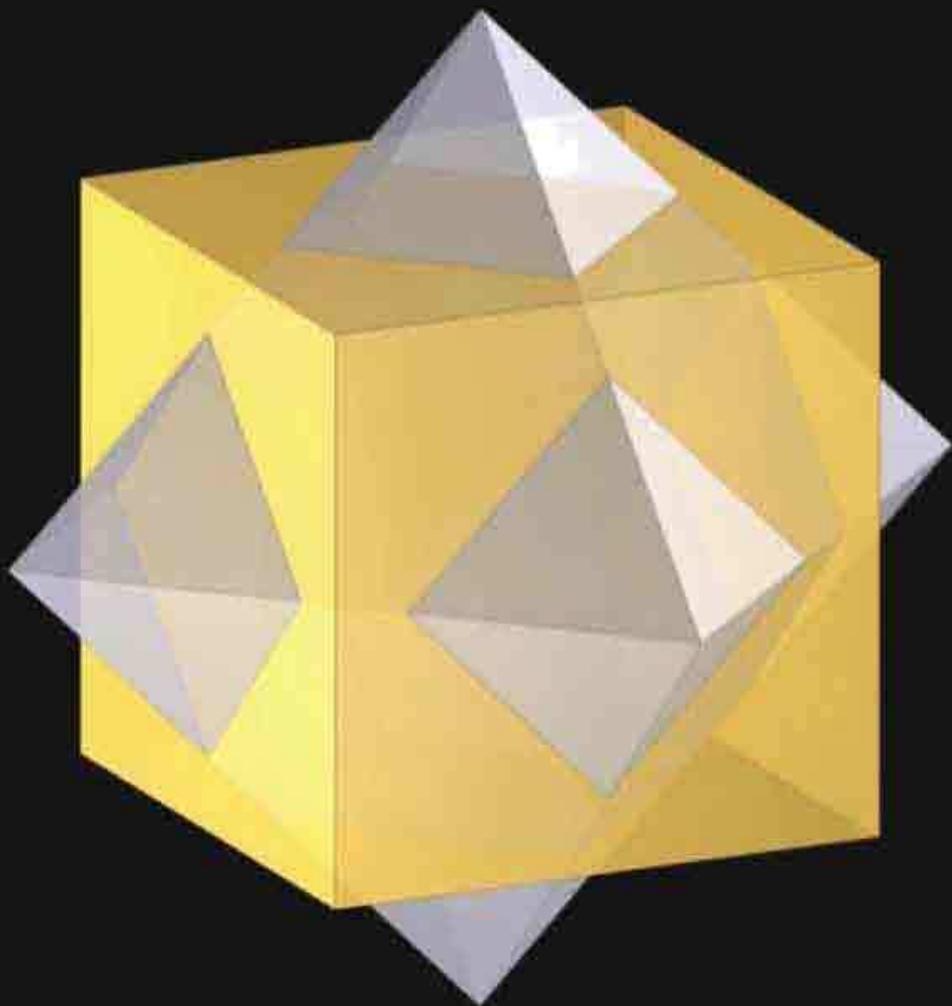
En la fachada del Nacimiento las bases de los pináculos son paraboloides estirados con hexágonos en las aristas que llegan a enlazar bien con una cara triangular del poliedro central. Los pináculos de la fachada de la Pasión sobre torres elípticas tienen en la base un cuadrado que gira ligeramente y enlaza con la cara cuadrada del poliedro. Los pináculos de la fachada de la Gloria se basan en formas pentagonales.

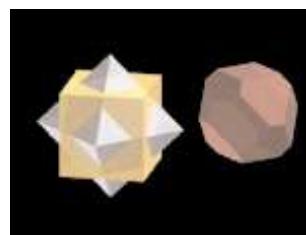
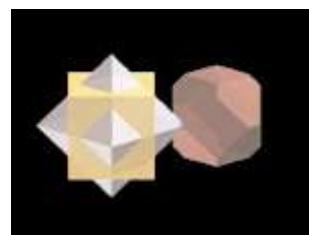
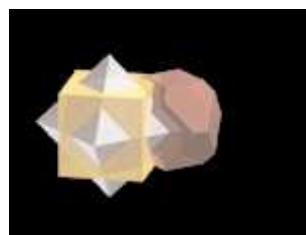
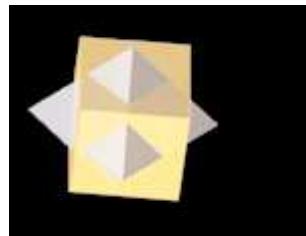
Más allá de las formas que adoptan, los pináculos simbolizan todos los elementos litúrgicos de un obispo, e incluyen oraciones escritas, la mitra, el báculo, el rosario e, incluso, el anillo. Precisamente, la necesidad de materializar geométricamente la piedra brillante del anillo es lo que anima a Gaudí a utilizar poliedros. También hay un poliedro estrellado en la torre dedicada a la Virgen.

Los nudos como macla elipsoidal

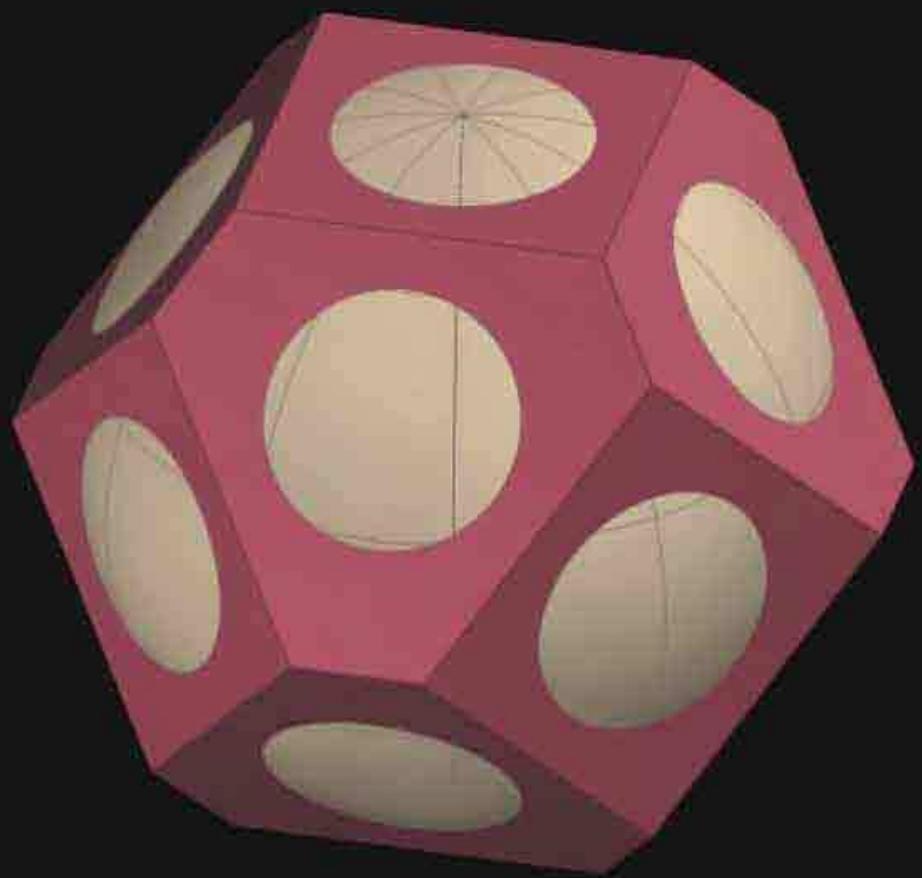
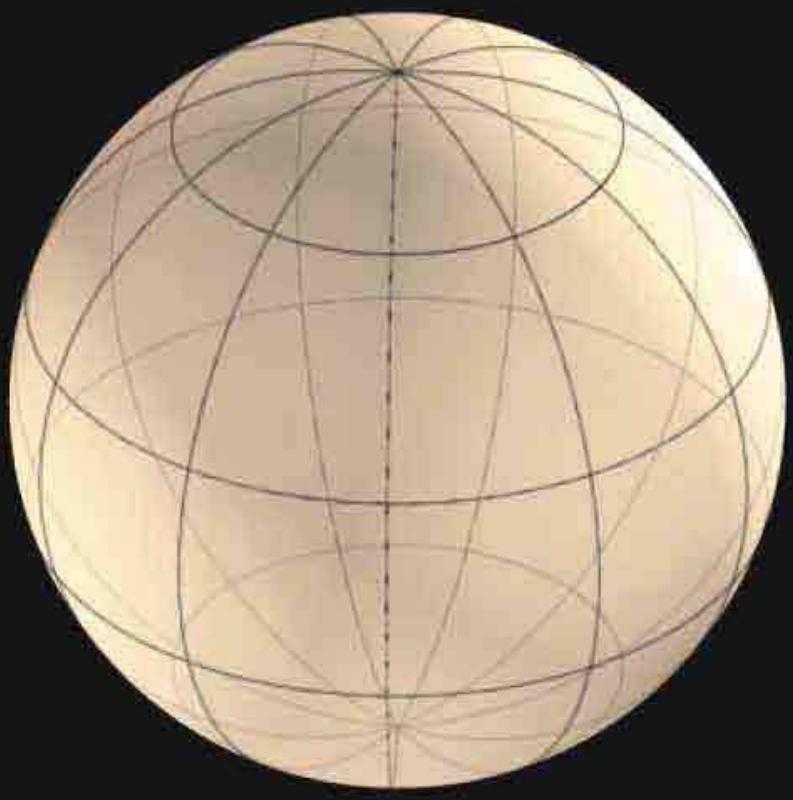
Encontramos un ejemplo de macla espectacular en el interior de la nave del templo: los nudos de elipsoides que coronan las columnas

A la derecha:
Maclación de cubo y octaedro. Esfera





Secuencia geométrica de imágenes de la generación del poliedro del pináculo de la fachada del Nacimiento del templo de la Sagrada Família



principales y de los que nacen las columnas rama siguientes. Es bien sabido que Gaudí dedicó muchos meses a ensayar unas formas que le permitieran encontrar una solución brillante para el inicio de la ramificación de las columnas (Bonet, 2000). Resultado de esa investigación fueron los nudos capitel intersección de elipsoides, cuyos semiejes guardan proporciones simples ($1, 2/3, 1/2$). Así encontramos, por ejemplo, un elipsoide grande de semiejes de 360, 240 y 180 centímetros, seguido de uno medio de semiejes de 270, 180 y 135 centímetros, y uno pequeño que mide 180, 120 y 90 centímetros. Asimismo, Gaudí dotó la macla de elipsoides estrellados de paraboloides de una gran belleza formal. Los nudos más espectaculares corresponden a la nave central, y hay un segundo tipo, de menor tamaño, en las columnas del ábside.

Otras maclas de la obra gaudiniana

En la cubierta de la sala principal del Palau Güell encontramos un interesante juego geométrico en el que las paredes interiores acaban en una cúpula constituida por un paraboloide de revolución. La luz se filtra por los agujeros de esta superficie al llegar al suelo, donde el paraboloides culmina en un prisma y en un gran cono con aberturas.

Los techos de los pabellones de la entrada del Parc Güell son estructuras complejas en las que se combinan paraboloides hiperbólicos, curvas y superficies redondeadas diversas, la aguja como hiperboloide de una hoja con hélices asociadas y formas de setas reproducidas con paraboloides de revolución.

En la cripta de la Colònia Güell encontramos una maclación interesante de columnas, arcos y paraboloides hiperbólicos como bóvedas triangulares (ver el apartado «Bóvedas convexas», p. 74, y «Arcos catenarios», p. 96).

La Casa Milà es un ejemplo de juego muy fino entre la azotea de diversos niveles, el espacio de los arcos catenarios que la soporta y la emergencia de las chimeneas, los respiradores y las salidas. Los accesos principales a la Casa de los Botines y al Palacio Episcopal de Astorga son también el resultado de una interacción ingeniosa de superficies regladas.

Cabe constatar la presencia de las maclas más espectaculares en la parte culminante, más alta, de las obras, lo cual no deja de tener un significado metafórico: la complejidad creciente en dirección al cielo.

A la derecha:

Maclación final del poliedro del pináculo de San Bernabé por motivos de iluminación

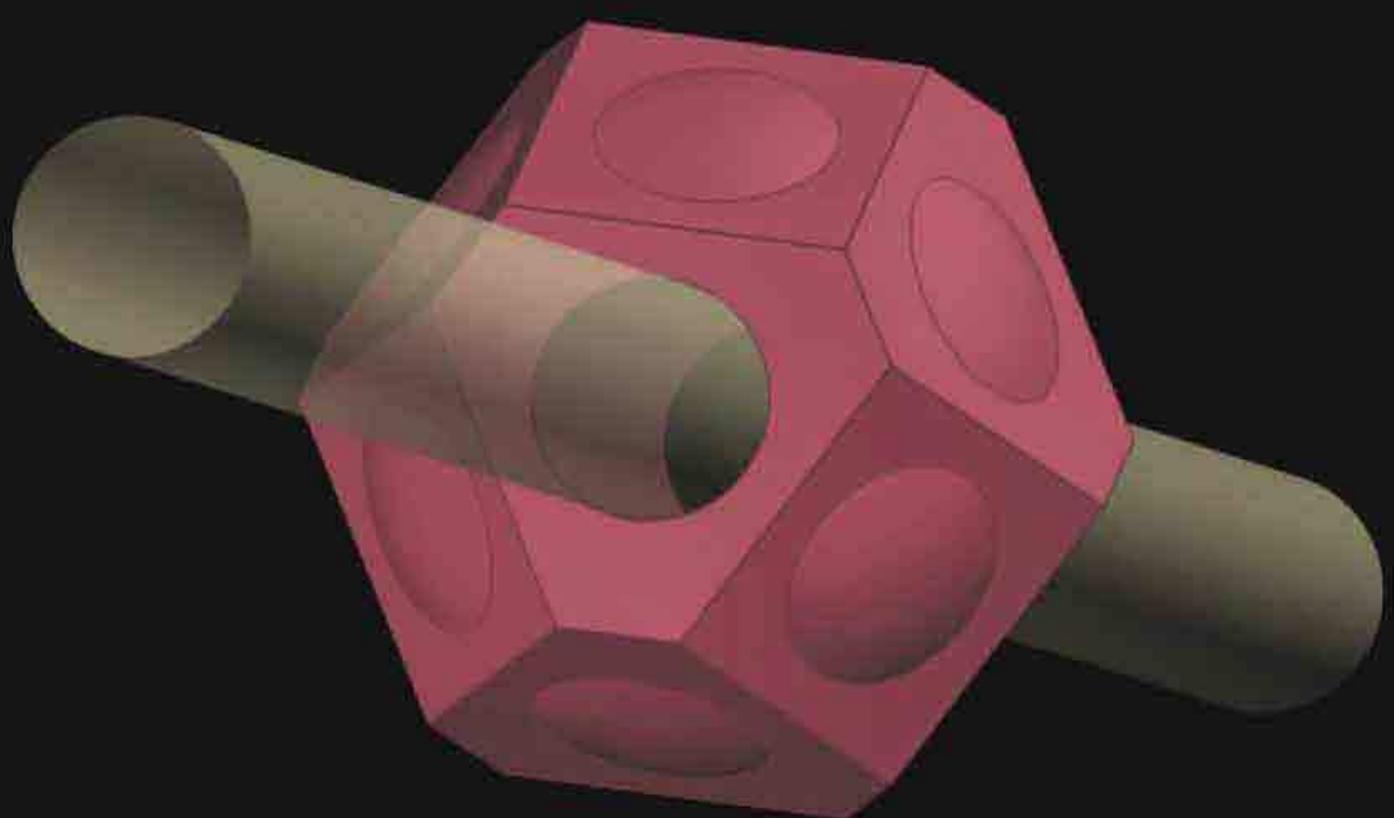
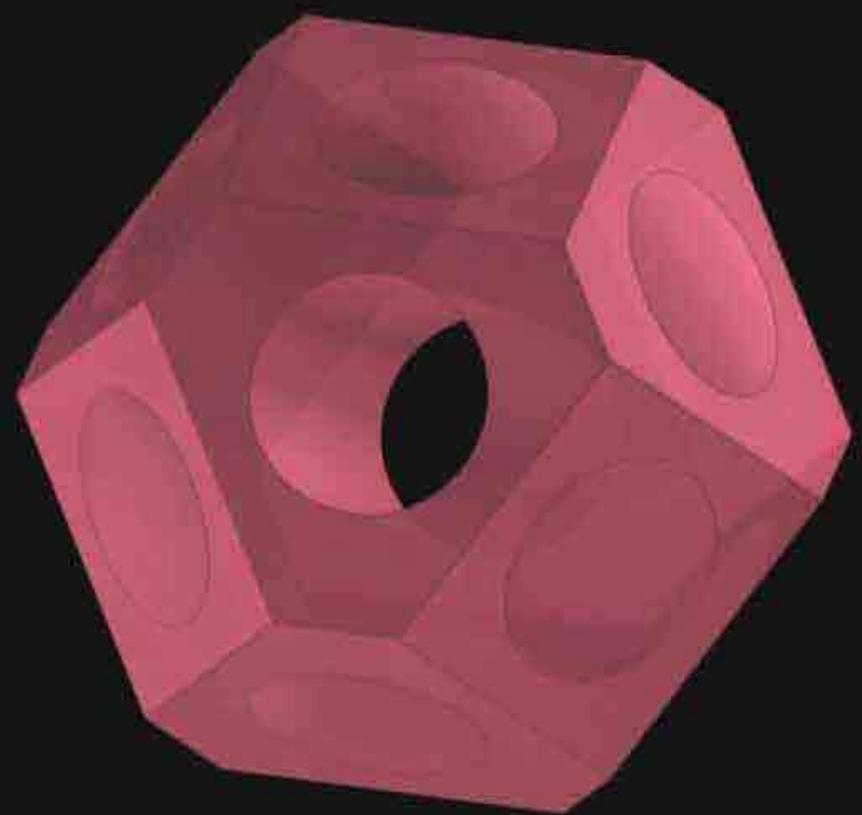


Macización de planos y elipsoides del nudo de la columna basáltica del templo de la Sagrada Família



Macización de paraboloides hiperbólicos de un pináculo de la fachada de la nave del templo de la Sagrada Família

C. A.





BIOGRAFÍA

1852. Nace el día 25 de junio en Reus, hijo de un calderero de Riudoms, Francesc Gaudí i Serra, y de Antònia Cornet i Bertran. Al día siguiente es bautizado en la iglesia de San Pedro de Reus. El oficio paterno, que Gaudí seguramente practica de joven, le ayuda a desarrollar el concepto del espacio tridimensional y la habilidad para el trabajo manual. Por otro lado, afectado de dolores articulares, de pequeño pasa largas temporadas en el campo, en el Mas de la Calderera de Riudoms. Gaudí considera esas estancias como la fuente principal de sus conocimientos y sus experiencias directas de las cosas de la naturaleza.

1860-1862. Primeros estudios en el colegio Berenguer de Reus, donde coincide con el futuro diplomático Eduard Toda. De un modo más impreciso se mencionan breves estudios iniciales en el colegio Palau, también de Reus. Alguna vez se ha indicado, erróneamente, que quien iba a ser uno de sus mejores amigos y colaborador en proyectos arquitectónicos, Francesc Berenguer (1866-1914), había sido condiscípulo suyo en la escuela primaria. En realidad se trataba del hijo del maestro del colegio, y conviene destacar que entre ambos había una diferencia de edad de 14 años.

1863-1868. Estudia el bachillerato en el colegio de los Escolapios de Reus (Instituto de Segunda Enseñanza). Su expediente no es demasiado brillante, pero mejora progresivamente.

C. 1867. Con su amigo Eduard Toda y con Josep Ribera, también condiscípulo suyo, interviene quizás en la planificación de una restauración ideal del monasterio de Poblet con la finalidad de convertirlo en una especie de comunidad cooperativa de artesanos y artistas, cultivadores de las artes y las ciencias, etcétera. De todos modos, el «manuscrito de Poblet», de 1870, en el que se recogen esas ideas, es sólo obra de Toda, y no parece que pueda considerarse a Gaudí, que aportó el dibujo de un escudo abacial, responsable de

su contenido, aunque pudiera compartir su espíritu.

1868-1869. Acaba el bachillerato matriculado como alumno libre en el Instituto de Barcelona, ciudad a la que se ha trasladado para vivir con su hermano, estudiante de Medicina.

1869-1873. En Barcelona, donde pronto se reúne toda la familia, estudia las asignaturas previas al ingreso en la Escuela de Arquitectura. Para poder sufragar los gastos de los estudios, su padre tiene que vender las propiedades familiares de Reus.

C. 1873. Empieza los estudios de Arquitectura en la Escuela de Bellas Artes (la Lonja), que a partir de 1875 pasa a ser la Escuela de Arquitectura de Barcelona en el marco de la reconstituida Universidad de Barcelona.

1875. Hace el servicio militar.

1876. Con el fin de conseguir ingresos mientras estudia, trabaja de delineante de maquinaria en Padrós y Borràs; también colabora con el arquitecto F. de P. Villar (proyecto para el camarrín de Montserrat) y con el maestro de obras Josep Fontserè (diversas obras del parque de la Ciutadella: reja, placita dedicada a Aribau, cascada, depósito de aguas).

Se conservan diversos proyectos de los años estudiantiles, como una puerta de cementerio, un patio y una escalinata para la Diputación de Barcelona o un embarcadero a la orilla del mar o de un lago. No se dedica a los estudios de forma regular, y muchas veces no asiste a clase. En cambio, analiza con detalle los repertorios fotográficos de monumentos de todo el mundo que se conservan en la biblioteca de la escuela.

En un par de meses mueren su hermano Francesc, médico acabado de titular, y su madre. Sin duda, se desencadena entonces una crisis personal que influye en su evolución ideológica y personal.

1877. Toma parte, sin éxito, en el concurso de dibujos aplicados a la industria, convocado por el Ateneo Barcelonés.

1878. Acaba la carrera con un proyecto de parainfo y obtiene el título el 15 de marzo. Se dice que Elies Rogent, director de la Escuela de Arquitectura, afirma: «No sé si hemos dado un título a un loco o a un genio».

Diseña unas farolas para Barcelona (las de seis brazos se instalan en la plaza Reial y las de tres en el Pla del Palau) y durante su ejecución, en el taller de Eudald Puntí, en la calle de la Cera, conoce al comerciante guantero Esteve Comella, para quien diseña una vitrina en la que éste presenta sus productos en la Exposición Universal de París.

Eusebi Güell se interesa por la obra del arquitecto después de ver esa vitrina, y Comella le presenta a Gaudí. Güell le encarga el mobiliario litúrgico (silla de brazos, banco y reclinatorio) de la capilla-panteón anexa al Palacio de Sobrellano, en Comillas, para su suegro, Antonio López. Eudald Puntí ultima los detalles hacia el año 1880.

Diseña el quiosco Girossi, de hierro colado, con urinarios públicos, puesto de flores, carteleras y reloj calendario. La quiebra del promotor arrincona el proyecto.

Empieza a proyectar algunas de las instalaciones de la Cooperativa Obrera Mataronense, como una valla y un conjunto de casas para los obreros, y en especial la reforma del casino de la cooperativa, de la que nos ha llegado un proyecto acuareulado que presentó en la Exposición Universal de París de 1878. En 1880 proyecta la vivienda del gerente de la cooperativa, Salvador Pagès, y al año siguiente se publican los planos generales de los terrenos. Algunos años después se encarga de otros elementos, como la báscula y la portería, y especialmente una nave industrial cubierta con arcos parabólicos de madera (1883) que es, con un pequeño pabellón para los lavabos, el único elemento que se conserva todavía.

Realiza un proyecto de relicario (dibujo en el museo de Reus).

Diseña su propia mesa de trabajo, que ejecuta Eudald Puntí.

1879. Decora la farmacia Gibert, en el paseo de Gràcia de Barcelona (actual plaza de Cataluña), para la cual también hace el mobiliario. Desaparecida.

Es miembro de la Asociación Catalanista de Excursiones Científicas, y también vocal de su junta directiva (hasta 1882) y conservador de su museo arqueológico. Participa con los demás asociados en diversas actividades patriótico-científicas. También toma parte en actos de la entidad rival, la Asociación de Excursiones Catalanas, que en 1890 se fusiona con la anterior para formar el Centro Excursionista de Cataluña.

Hace algunos dibujos para una cabalgata alemana (que no llega a realizarse) en homenaje al rector de Vallfogona, el poeta Francesc Vicent García.

Decora la iglesia del colegio de Jesús María de Sant Andreu del Palomar (Barcelona) con una sillería de coro, un altar, aparatos de iluminación y el mosaico del pavimento. Algunos elementos se trasladan al colegio que tiene esa congregación en Sant Gervasi, con la excepción del mosaico, conservado *in situ*.

Muere su hermana Rosa; desde ese momento se hace cargo de su sobrina, Rosita Egea Gaudí, que es enviada al colegio de las monjas de Jesús María de Tarragona y, más tarde, pasa a vivir con Gaudí y con su padre.

Según Ràfols, hacia los años 1878-1880 ya trabaja en sus primeros proyectos de la casa de Manuel Vicens.

1880. Diseña unas farolas (que nunca llegan a hacerse) para la iluminación de la Muralla de Mar de Barcelona; constan de unos largos palos profusamente ornamentados con nombres de almirantes catalanes de la Edad Media.

1880-1882. Diseña el altar de la capilla del colegio de Jesús María de Tarragona; conoce al vicario general de la archidiócesis de Tarragona y futuro obispo de Astorga, Joan Baptista Grau Vallespinós.

FEBRERO DE 1881. Publica su único artículo en *La Renaixensa*, con motivo de la exposición de artes industriales organizada por Foment del Trabajo Nacional.

Participa en el concurso del gran casino de San Sebastián, en el País Vasco; su proyecto no es elegido.

Diseña un quiosco para instalarlo en Comillas con motivo de la visita de Alfonso XII y las infantes Eulalia e Isabel, construido en los talleres Puntí. Después se traslada a los terrenos de la Finca Güell o Torre Satalia, y finalmente desaparece.

1882. Trabaja de ayudante en el estudio del arquitecto Joan Martorell, para el cual delinea el proyecto de nueva fachada de la catedral de Barcelona, que no llega a hacerse; también le ayuda en los proyectos de las iglesias de los jesuitas y de las salesas, igualmente en Barcelona.

Se encarga del proyecto de una iglesia para Villaricos (Almería), donde Joan Martorell quiere hacer un monasterio benedictino, trabajos ambos que no se llevan a cabo.

También hace el proyecto de un pabellón de caza en El Garraf para Eusebi Güell que tampoco llega a construirse.

1883. La Asociación Catalana de Excursiones Científicas organiza una excursión de hermanamiento entre catalanistas de ambos lados

- de la frontera en Banyuls-sur-Mer, Perpiñán y Elna. Visita Carcasona.
- Proyecta la capilla del Santísimo Sacramento de la iglesia parroquial de Alella. No llega a construirse.
- Empieza El Capricho, en Comillas, que acaba en 1885. La dirección de las obras corre a cargo de Cristóbal Cascante (1852-1889), para quien (según Josep Mainar) Gaudí podría haber diseñado un conjunto de mobiliario.
- Inicia las obras de la Casa Vicens de Barcelona, que acaba en 1888.
- Se hace cargo de las obras de la Sagrada Família (3 de noviembre), a propuesta de Martorell, en sustitución del arquitecto diocesano Francisco del Villar, que las había iniciado el año anterior.
- 1884.** Hace el proyecto de un altar para Tarragona (no llevado a cabo).
- 1884-1887.** Se hacen reformas en la Finca Güell o Torre Satalia, en Les Corts; se conservan los pabellones y la reja del dragón.
- 1885.** Proyecto de un altar para el oratorio particular de Josep Maria Bocabella.
- 1886-1888.** Construye el Palau Güell en Barcelona.
- 1887.** Construye el edificio de la casa rectoral de la Sagrada Família (esquina de las calles Sardenya y Provença), en cuyo piso superior instala su obrador, donde desarrolla la mayor parte de su labor, en especial en diversas dependencias que va anexionando en función de sus necesidades. Es también aquí donde vive el arquitecto los últimos meses de su vida. Se incendia en 1936 y se conserva alguna parte dañada.
- Viaja a Manises con el arquitecto Domènec i Montaner para rescatar los procedimientos antiguos de la cerámica vidriada.
- 1888.** Hace el proyecto de decoración del Saló de Cent y la escalera de honor del Ayuntamiento de Barcelona (no llevado a cabo), y una silla de brazos para la reina regente con motivo de su visita a Barcelona para inaugurar la Exposición Universal. En ese certamen, adapta y amplía un pabellón de la Compañía Trasatlántica, procedente de la exposición marítima de Cádiz (1887), y expone proyectos en la sección de arquitectura.
- 1889.** Se hace cargo de la finalización del colegio de las Teresianas, en Sant Gervasi. Noviembre-diciembre: retiro en Tortosa.
- 1889, 1890, 1892 Y 1893.** Hace diferentes viajes a Astorga, para construir el palacio episcopal, y a León, donde levanta (1892-1893) la Casa de los Botines. El obispo de Astorga, el reusense Joan Baptista Grau, ejerce una gran influencia en la religiosidad de Gaudí. La muerte del obispo en 1893 paraliza las obras del palacio.
- 1891.** Altar de San José de Calasanz en la basílica de Montserrat, atribuido también a una colaboración con Francesc Berenguer.
- 1892.** Viaja a Tánger para encargarse del proyecto (no llevado a cabo) de las misiones católicas de los franciscanos en África. Le absorbe tanto que centra en él su actividad entre los años 1893 y 1898.
- 1894.** Un severo ayuno cuaresmal llega a poner en peligro su vida. El eclesiástico y futuro obispo de Vic Josep Torras i Bages le disuade de continuarlo. El ayuno pone de manifiesto una crisis religiosa de Gaudí que quizás tenga alguna relación con la muerte de su amigo el obispo Grau, el año anterior.
- 1895.** Proyecto (finalmente no llevado a cabo) de capilla sepulcral para la familia Güell en Montserrat.
- Gaudí firma unos planos de la bodega Güell de El Garraf, que finalmente hace de una forma diferente (hacia 1901), quizás en colaboración con Francesc Berenguer.
- 1898-1900.** Casa Calvet, que le vale el premio del Ayuntamiento de Barcelona.
- 1898.** Primeros estudios de la iglesia de la Colònia Güell, cuyas obras empezó en 1908.
- 1899.** Se hace socio del Círculo Artístico de San Lucas, una entidad fundada en 1893 por los hermanos Llimona cuya definición ideológica es la responsabilidad de Torras i Bages. También se afilia a la Liga Espiritual de la Virgen de Montserrat, que agrupa el ala católica del catalanismo bajo la inspiración del propio obispo Torras.
- 1900.** Primer misterio de gloria en el rosario monumental de Montserrat, con esculturas de Josep Llimona, promovido por la Liga Espiritual de la Virgen de Montserrat. Queda inacabado y será terminado por Jeroni Martorell. Estandartes para el Orfeó Feliuà y para los reusenses residentes en Barcelona (este último desaparecido).
- 1900-1903.** Torre Bellesguard, en Barcelona.
- 1901-1904.** Decoración (desaparecida) de la casa de la marquesa de Castelldosrius, hija de Eusebi Güell, en Barcelona.
- Empieza los trabajos del Parc Güell, que deja inacabado en 1914.
- 1902.** Puerta de la Finca Miralles, en el paseo de Manuel Girona (Barcelona). Gaudí también proyecta para el industrial litógrafo Hermenegild Miralles unas losetas de cartón piedra en relieve que se utilizan en la decoración del establecimiento Torino del paseo de Gràcia.
- 1902, 1903 Y SIGUIENTES.** Viajes a Mallorca para trabajar en la restauración litúrgica de la catedral de Palma: traslado del coro, nuevas tribunas y nuevos púlpitos, aderezo de la capilla de la Trinidad, baldaquín suspendido. En las ausencias de Gaudí, Joan Rubió dirige

- los trabajos, Jujol hace la decoración pictórica de la sillería del coro y se instalan unas vidrieras de tricromía diseñadas por Joaquín Torres García, Iu Pascual y Jaume Llongueras. El proyecto se deja interrumpido hacia 1914.
- 1904.** Proyecta y empieza la construcción de chalet del pintor Lluís Graner, que queda inacabado. Sólo llega a hacer la puerta de la valla, más tarde desaparecida, aunque existe una réplica en Comillas. Para el mismo cliente decora la Sala Mercè, en la Rambla barcelonesa, para hacer espectáculos de cine (desaparecida).
- Inicia la reforma de la Casa Batlló, que acaba en 1906.
- 1905.** Viaja a la Pobla de Lillet, donde Güell acaba de adquirir unas minas. Hay autores que atribuyen a Gaudí algunos trabajos de la localidad.
- 1905-1910.** Construcción de La Pedrera, en Barcelona.
- 1906.** Se traslada a vivir al Parc Güell con su padre y su sobrina Rosita. El primero muere el 29 de octubre. Por esas fechas quizás presenta algunas ideas para reformar el santuario de la Misericordia de Reus que no llegan a buen puerto. Diseña el estandarte del Gremio de Cerrajeros de Barcelona (destruido). Probable inicio de la colaboración con Josep Maria Jujol. Proyecto no llevado a cabo de viaducto sobre el torrente de Pomaret, en Barcelona.
- 1907.** Proyecto de intervención en el barrio de la catedral de Barcelona y en la Via Laietana en conmemoración del séptimo centenario del rey Jaime I el Conquistador; plasma sus ideas en unos dibujos sobre fotografía que no llegan a materializarse. Decoración efímera del salón de la Lonja para los Juegos Florales de Barcelona.
- 1908.** Inicio de las obras de la cripta de la Colònia Güell. Según Joan Matamala, unos estadounidenses encargan a Gaudí el proyecto de un rascacielos en Nueva York. La noticia de ese encargo hipotético no es aceptada por todos los estudiantes.
- 1909.** Escuelas Provisionales de la Sagrada Família.
- 1910.** Participa en la exposición de la Sociedad Nacional de Bellas Artes de París. Se traslada a Vic para recuperarse de una anemia. Coinciendo con las celebraciones del centenario del filósofo Jaume Balmes, proyecta (con la ayuda de Jujol y Canaleta) dos farolas de basalto y hierro forjado para la plaza Major de Vic (desaparecidas en 1924).
- 1911.** Contrae las fiebres de Malta y las pasa en Puigcerdà con el doctor Pere Santaló, amigo suyo. En vista de la gravedad de la enfermedad, hace testamento.
- 1912.** Muere su sobrina Rosita Egea. Viaja a Mallorca para continuar la reforma de la catedral.
- 1913.** Participa en el Primer Congreso de Arte Cristiano de Cataluña.
- 1914.** Muere Francesc Berenguer. Gaudí rechaza cualquier otro proyecto y se centra desde ese momento en las obras de la Sagrada Família.
- 1915.** Participa en el Congreso Litúrgico de Montserrat.
- 1916.** Asiste al curso superior de canto gregoriano impartido por Gregori Suñol.
- 1922.** Le piden un proyecto para la iglesia de la Asunción en Rancagua (Chile). Gaudí propone reutilizar un diseño de capilla de la Sagrada Família, desestimado en el proyecto definitivo.
- 11 DE SEPTIEMBRE DE 1924.** Le detienen cuando iba a una misa por los catalanes caídos en 1714 en la defensa de Barcelona.
- 1925.** Se traslada a vivir a pie de obra en la Sagrada Família.
- 1926.** Muere en Barcelona el 10 de junio, tres días después de haber sido atropellado por un tranvía.

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO GAVELA, María Jesús: *Gaudí en Astorga*. León: Institución Fray Bernardino de Sahagún, 1972.
- ALSINA, Claudi; BASSEGODA, Joan: *Claudi Alsina i Bonafont, Mestre d'Obres de Gaudí*. Barcelona: Publ. Reial Càtedra Gaudí / UPC, 2001.
- ALSINA, Claudi; CAMP, Joaquim: *Entendre Gaudí: un taller de geometria*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 2002.
- ALSINA, Claudi; GÓMEZ, Josep: «Gaudí Ingegnere = Gaudí Engineer». *Crossing*, 2 (junio 2001), pp. 72-80.
- ALSINA, Claudi; GÓMEZ, Josep: «Gaudí: geometria, estructura i construcció». *Any Internacional Gaudí 2002*. Barcelona: Institut de Cultura de Barcelona / Ajuntament de Barcelona / Editorial Planeta, 2002.
- ARGIMON, J.: «Com es va salvar de ser volat el Temple». *Temple*, 131 (1997), p. 19.
- ARNHEIN, Rudolf: *El pensamiento visual*. Barcelona: Paidós, 1986.
- ARNHEIN, Rudolf: *Psicología del ojo creador*. Madrid: Alianza Editorial, 1999.
- ARTIGUES AMAT, R.: «Gaudí creador d'estructures». *La Veu de Catalunya*, (1928), p. 4.
- ASARTA, Francesc Xavier: «Restauració de la Pedrera». En: Varios autores: *La Pedrera: Gaudí i la seva obra*. Barcelona: Fundació Caixa de Catalunya, 1998.
- AUDIOSCAN ENGINYERIA DEL SO: *Estudi d'aïllament acústic del Palau Güell*. Barcelona: Diputació de Barcelona, 1997. [Estudio inédito.]
- BASSEGODA I NONELL, Joan; COLLINS, George R.: *The Designs and Drawings of Antonio Gaudí*. Princeton: Princeton University Press, 1983.
- BASSEGODA I NONELL, Joan; GARCÍA GABARRÓ, Gustavo: *La catedral de Antoni Gaudí. Estudio analítico de su obra*. Barcelona: Edicions de la UPC, 1999.
- BASSEGODA I NONELL, Joan: *Gaudí*. Barcelona: Nou Art Thor, 1978 (Gent Nostra; 1).
- BASSEGODA I NONELL, Joan: «Otros aspectos constructivos de la obra de Gaudí». *Revista CAU* [Barcelona], 70 (marzo 1981).
- BASSEGODA I NONELL, Joan: *Antoni Gaudí*. Barcelona: Edicions 62, 1992.
- BASSEGODA I NONELL, Joan: *Gaudí. La arquitectura del futuro*. Barcelona: Salvat, 1985.
- BASSEGODA I NONELL, Joan: *La arquitectura de Gaudí*. Barcelona: Planeta, 1982.
- BASSEGODA I NONELL, Joan: *El gran Gaudí*. Sabadell: Ausa, 1989.
- BASSEGODA NONELL, Juan: *Antonio Gaudí. Vida y arquitectura*. Barcelona: Caja de Ahorros Provincial de Tarragona, Obra Cultural, 1977.
- BASSEGODA I NONELL, Joan: «Geometría reglada y arquitectura». *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, vol. XLVIII, 10 (1989), pp. 868.
- BASSEGODA I NONELL, Joan: «L'estudi de Gaudí». Barcelona: Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família, 1996. [Selección de artículos publicados en la revista *Temple* entre los años 1971 y 1994.]
- BASSEGODA I NONELL, Joan: «Aproximación a Gaudí». Madrid: Cátedra Gaudí-Editiones Doce Calles, 1992, pp. 39-57.
- BASSEGODA I NONELL, Joan: «El arco de festón». *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona* (marzo 1986).
- BENET, Rafael: «Fent coneixença amb Le Corbusier». *La Veu de Catalunya* (1928).
- BERGÓS MASSÓ, Joan: «Conversaciones con Gaudí». *Hogar y Arquitectura* [Madrid], 112 (1974).
- BERGÓS, Joan: *Gaudí. El hombre y la obra*. Barcelona: UPC, 1974.
- BERGÓS, Joan: *Gaudí. L'home i l'obra*. Barcelona: Ariel, 1954.
- BERGÓS, Joan: *Materiales y elementos de construcción: estudio experimental*. Barcelona: Bosch, 1953.
- BERGÓS, Joan: *Tabicados huecos: bases para las dimensiones de las bóvedas y cubiertas del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia*. Barcelona: Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña y Baleares, 1965.
- BOHIGAS, Oriol: *Arquitectura modernista*. Barcelona: Lumen, 1968 (Palabra en el Tiempo; 149).
- BOHIGAS, Oriol: *Reseña y catálogo de la arquitectura modernista*. Barcelona: Lumen, 1973 (Palabra en el Tiempo).
- BONET, Jordi: *El Temple de la Sagrada Família*. Barcelona: Escudo de Oro, 1992.
- BONET, Jordi: «Experimentació tecnològica sobre l'arquitectura de Gaudí a la Sagrada Família». *Butlletí de la Reial Acadèmia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi*, 11 (1997).
- BONET, Jordi: *Gaudí. Dibuixos originals. Originals drawings*. Barcelona: Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família, 1996.

- BONET, Jordi: «L'últim Gaudí». *Butlletí de la Reial Acadèmia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi*, 9 (1995), pp. 159-177.
- BONET, Jordi: *L'últim Gaudí*. Barcelona: Pòrtic, 2000.
- BONET, Jordi: *Temple Sagrada Família*. Barcelona: Escudo de Oro, 1997.
- BURRY, Mark: *Expiatory Church of the Sagrada Familia: Antoni Gaudí*. Londres: Phaidon, 1993.
- CARDELLACH, Fèlix: «Explicació de Gaudí sobre les voltes de paraboloides, i estructura arborífera». *El Propagador*, 14, año II (15.7.15).
- CASALS, Albert; GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «Nuevos datos sobre la construcción de Antoni Gaudí: la sorprendente estructura constructiva de la Casa Botines de León». *Actas del I Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid: 1996.
- CASANELLAS, Enric: *Nueva visión de Gaudí*. Barcelona: Polígrafa, 1965.
- CASTELLAR-GASSOL, Joan: *Gaudí. La vida d'un visionari*. Barcelona: Edicions del 1984, 1999.
- CHOISY, Auguste: *L'art de bâtir chez les romains*. París: Ducher, 1873. [«El arte de construir en Roma» (trad. Manzano-Monis Mancebo, Manuel), Madrid: Instituto Juan de Herrera, 1999.]
- CIRICI I PELLICER, Alexandre: *El arte modernista catalán*. Barcelona: Aymà Editors, 1951.
- CIRICI I PELLICER, Alexandre: *La Sagrada Família de Antoni Gaudí*. Barcelona: Omega, 1952.
- CIRLOT, Juan Eduardo: *El arte de Gaudí*. 3.^a ed. Barcelona: Omega, 1965.
- COLLINS, George R.: *The Drawings of Antonio Gaudí*. Nueva York: Drawing Center, 1977. [Catálogo de una exposición celebrada en el Drawing Center de Nueva York de marzo a mayo de 1977.]
- COLLINS, George R.: *Antonio Gaudí*. Nueva York: George Braziler, Inc., 1960.
- ETSAB: *Exposició Commemorativa del Centenari de l'Escola d'Arquitectura de Barcelona*. Barcelona: ETSAB, 1977.
- FERNÁNDEZ CASADO, Carlos. «Gaudí visto desde la arquitectura del ingeniero». Barcelona: Publicacions de la Reial Càtedra Gaudí, 2000. (Serie 2000; 4).
- FLORES, Carlos: *Gaudí, Jujol y el modernismo catalán*. Madrid: Aguilar, 1983 (Imagen de España).
- FLORES, Carlos: «La lección de Gaudí». *Hogar y Arquitectura*, 46 (mayo 1963).
- FOLGUERA, Francesc. «L'arquitectura gaudiniana». A: J. F. Ràfols. *Gaudí*. Barcelona: Editorial Canosa, 1928.
- GAUDÍ, Antoni. *Manuscritos artículos, conversaciones y dibujos*. Marcià Codinachs (ed.). Murcia: Comisión de Cultura del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1982. (Arquitectura; 6).
- GAUDÍ-GROEP DELFT: *Gaudí: rationalist met perfecte materiaalbeheersing*. Delft: Delftse Universitaire Pers, 1979.
- GIRALT-MIRACLE, Daniel: *Espai Gaudí. Guia*. Barcelona: Fundació Caixa de Catalunya, 1997.
- GÓMEZ-SERRANO, Josep y otros: «A Mathematical framework to Gaudi's use of Geometry». *J. Int. Ass. Shell and Spatial Structures*, 38-1 (1997), pp. 35-51.
- GÓMEZ-SERRANO, Josep y otros: *La Sagrada Família: De Gaudí al CAD*. Barcelona: Edicions de la UPC, 1996 (Art, Disseny, Arquitectura i Urbanisme; 3).
- GÓMEZ-SERRANO, Josep: *L'obrador de Gaudí*. Barcelona: Edicions de la UPC, 1996.
- GONZÁLEZ, Antoni: «El Palau Güell de Barcelona. La construcción de una idea espacial». *Informes de la Construcción*, 408 (1990b).
- GONZÁLEZ, Antoni: «Gaudí ni mític ni místic: arquitecte». *Nexus*, 16 (julio 1995).
- GONZÁLEZ, Antoni: «Gaudí, constructor: la materialización de una arquitectura singular». *Informes de la Construcción*, 408 (1990a).
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: *El legado oculto de Vitruvio*. Madrid: Alianza Forma 116, 1993b.
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «La comprensión de las estructuras históricas. El caso del Palau Güell». *Actas del III Congreso de Historia de la Construcción*. Sevilla: Instituto Juan de Herrera; Universidad de Sevilla, 2000c.
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís; González, Antoni; Casals, Albert: «De cómo acabar la Iglesia de la Colonia Güell, obra de Antonio Gaudí». *Revista LOGGIA [Valencia]*, 9 (1999b).
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «Las bóvedas convexas de la Cripta de la Colonia Güell». *Apuntes del Curso sobre las Grandes Bóvedas Hispánas*. Madrid: Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid / Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, 1998a.
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «Configuración constructiva y comportamiento mecánico de las bóvedas tabicadas en la construcción catalana del xix». *Actas del III Congreso de Historia de la Construcción*. Sevilla: Instituto Juan de Herrera; Universidad de Sevilla, 2000a.
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís; CASALS, Albert: «Gaudí y el misterio de la encarnación (Las incógnitas de la Cripta de la Colonia Güell)». *Informes de la Construcción*, 408 (1990).
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís; CASALS, Albert: *Gaudí y la razón constructiva: un legado inagotable*. Madrid, 2002.
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís; CASALS, Albert; ROCA, Pedro: «La necesaria comprensión previa de la realidad constructiva del monumento: El caso singular de la Cripta de la Colonia Güell». *Informes de la Construcción*, vol. 45, núm. 427 (1993a).

- GONZÁLEZ, Josep-Lluís.; CASALS, Albert; ROCA, Pedro; MOLINS, Climent: «Los estudios previos de la Casa Botines de León». *Revista LOGGIA* [Valencia], 1 (1996).
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «Comparación entre dos estructuras del Palau Güell: la del proyecto original y la realizada». *Quaderns Científics i Tècnics de Restauració Monumental* [Barcelona], 12 (2001a).
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «La bóveda tabicada. Su historia. Su futuro». *Tratado de Rehabilitación. Vol. 1: Teoría e Historia de la Restauración*. Madrid: Munilla-Lería, 1999a.
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «La configuración constructiva de las bóvedas "convexas" de la Iglesia de la Colonia Güell, obra de Antoni Gaudí». *Actas del III Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Sevilla: Instituto Juan de Herrera, 2000b.
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «Los elementos estructurales de los edificios del Ensanche de Barcelona en el contexto tecnológico mediterráneo a finales del siglo XIX». En: Varios autores: *Il Vasto a Napoli. El Ensanche de Barcelona. Due realtà a confronto. El contraste entre dos realidades*. Nápoles: Università degli Studi di Napoli Federico II; Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2001b.
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «Previous studies of the "Casa de los Botines de León"». En: Roca, Pedro y otros (ed.): *Structural Analysis of Historical Constructions I*. Barcelona: CIMNE, 1995.
- GONZÁLEZ, Josep-Lluís: «Understanding historical structures: Gaudí and the Palau Güell». En: Roca, Pedro y otros (ed.): *Structural Analysis of Historical Constructions II*. Barcelona: CIMNE, 1998b.
- GUIX SUGRAÑES, Josep M.: *Defensa de Gaudí*. Reus: Monterols, 1960.
- GUIX SUGRAÑES, Josep M.: *Gaudí: L'arquitecte de l'empremta divina*. Reus: Monterols, 1952.
- HEIDE, Roel van der: «Casa Milà (1906-1910)». En: GAUDÍ-GROEP DELFT. *Gaudí: rationalist met perfecte materiaalbeheersing*. Delft: Delftse Universitaire Pers, 1979.
- LAHUARTA, Juan José: *Antoni Gaudí, 1852-1926: Arquitectura, ideología y política*. Madrid: Electa España, 1993.
- LE CORBUSIER: «Antoni Gaudí: estructura y forma». En: Tarragó, Salvador. *Antoni Gaudí*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 1991, pp. 109-130.
- LE CORBUSIER: *Gaudí*. Barcelona: Editorial RM, 1958.
- LEROUY, C. F. A.: *Traité de Géométrie Descriptive*. París: Mallet-Bachelier, 1855. [Primera parte del curso de geometría descriptiva de la Universidad de Barcelona del profesor José Castelaro, Barcelona, 1875.]
- LOOISE, Wijnand: «Schooltje bij de Sagrada Familia (1909-1910)». En: GAUDÍ-GROEP
- DELFT. *Gaudí: rationalist met perfecte materiaalbeheersing*. Delft: Delftse Universitaire Pers, 1979.
- MAÑÁ, F.: «Gaudí i el Park». *L'Informatiu*, 168 (julio 2000).
- MARTÍ MALLUEU, J.: «Impresiones acerca del Templo de la Sagrada Família». *Diari de Barcelona* (6.3.14, 10.3.14, 19.3.14, 27.3.14, 4.4.14, 5.5.14, 15.5.14).
- MARTINELL, Cèsar: *Conversaciones con Gaudí*. Barcelona: Punto Fijo, 1969.
- MARTINELL, Cèsar: *Gaudí i la Sagrada Família, comentada per ell mateix*. Barcelona: Aymà, 1951.
- MARTINELL, Cèsar: *Gaudí: su vida, su teoría, su obra*. Barcelona: Comisión de Cultura del Colegio de Arquitectos de Cataluña y Baleares, 1967. (Biografías; 1).
- MARTINELL, Cèsar: *Gaudinismo*. Barcelona: Amigos de Gaudí, 1954.
- MARTINELL, Cèsar: *La Sagrada Família*. Barcelona: Aymà, 1952.
- MARTINELL, Cèsar: *Gaudí i la Sagrada Família, comentada per ell mateix*. 2.ª ed. Valls: Cossetània, 1999.
- MATAMALA, Joan: *Antonio Gaudí. Mi itinerario con el arquitecto*. Barcelona: Claret, 1999. [Manuscrito depositado en la Cátedra Gaudí. Barcelona, 1960, p. 438].
- MOLEMA, Jan: *Antoni Gaudí: Een weg tot oorspronkelijkheid*. Delft: Technische Universiteit, 1987.
- MOLEMA, Jan: *Antonio Gaudí: un camino hacia la originalidad*. Santander: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Cantabria, 1992.
- NOCITO, G. J.: *Los cuerpos geométricos en la arquitectura de Gaudí. Las chimeneas del Palau Güell. Construcción y geometría práctica en un ejemplo*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 1997. [Tesis doctoral no publicada.]
- NUERE, E.: *Los artesonados del Palau Güell*. 1.ª y 2.ª partes. Barcelona: Diputación de Barcelona, 1995 y 1997. [Estudios inéditos.]
- PANE, Robert. «Nova contribució a l'estudi de Gaudí, entre crítica d'art i psicologia». A: Varios autores. *Antoni Gaudí. 1952-1926*. Barcelona: Fundació Caixa de Pensions, 1984, p. 33.
- PARICIO, Ignacio: «El Park Güell de Barcelona. Una lección de construcción». *Revista CAU* [Barcelona] (1981), p. 46.
- PENNICK, Nigel: *Sacred Geometry*. Wellingborough: Turnstone, 1980.
- PERUCHO, J.: *Gaudí, una arquitectura de anticipación*. Barcelona: Polígrafa, 1967 (Biblioteca de Arte Hispánico).
- PEVSNER, Nikolaus. *Los orígenes de la arquitectura y el diseño modernos*. Barcelona: Ediciones Destino, 1992, pp. 111-112.
- PLA, Josep: *Homenots*. Vol. I. Barcelona: Destino, 1969.

- POBLET, Josep M.: *Gaudí: L'home i el geni.* Barcelona: Bruguera, 1973 (Quaderns de cultura; 71).
- PRÉVOST, Clovis; DESCHARNES, Robert: *La visió artística i religiosa de Gaudí.* Barcelona: Aymà, 1969.
- PUIG BOADA, Isidre: *El Templo de la Sagrada Familia. Síntesis del arte de Gaudí.* Barcelona: Omega, 1952.
- PUIG BOADA, Isidre: *L'Església de la Colònia de Güell.* Lumen: Barcelona, 1976.
- PUIG BOADA, Isidre: *El pensament de Gaudí.* Barcelona: Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña-La Gaya Ciència, 1981.
- PUIG BOADA, Isidre: *El Temple de la Sagrada Família.* Barcelona: Barcino, 1969.
- PUIG BOADA, Isidre: *El Templo de la Sagrada Familia.* Barcelona: Nuevo Arte Thor, 1982.
- PUJOLS, Francesc: *La visió artística i religiosa d'en Gaudí.* Barcelona: Llibreria Catalonia, 1927.
- QUINTANA, F.: «Les formes guerxes del Temple de la Sagrada Família». *La Ciutat i la Casa*, 6 (1927), pp. 16-29.
- RÀFOLS, Josep Francesc: *Antoni Gaudí.* Barcelona: Canosa, 1929.
- RÀFOLS, Josep Francesc; FOLGUERA, Francesc: *Gaudí.* Barcelona: Canosa, 1928.
- RÀFOLS, Josep Francesc: *Gaudí: 1852-1926.* Barcelona: Aedos, 1952 (Biblioteca biogràfica catalana; 3).
- ROVIRA, J.: «Aspectos constructivos puestos de manifiesto en la restauración del Park Güell de Barcelona». *Informes de la Construcción*, 408 (1990).
- RUBIÓ, Joan. «Dificultats per arribar a la síntesi arquitectònica». *Anuari de l'Associació d'Arquitectes de Catalunya* [Barcelona] (1993), pp. 63-79.
- SOLÀ-MORALES, Ignasi de: *Gaudí.* Barcelona: Polígrafa, 1983.
- SUGRAÑES, Domènec: «Disposició estàtica del Temple de la Sagrada Família». *Anuari de l'Associació d'Arquitectes de Catalunya* [Barcelona] (1923), pp. 17-36.
- SUGRAÑES, Domènec: «Explicación del grabado de la sección longitudinal del Templo». *El Propagador*, 9, año LI (1.5.1917), pp. 148-153.
- SUGRAÑES, Domènec: «Informe de las obras». *El Propagador*, 14, año LIV (5.7.1920), pp. 215-258.
- SUGRAÑES, Domènec: «Se va a terminar un campanario». *El Propagador*, 1, año LIX (1.1.1925), p. 22.
- SUGRANES, Domènec: «Disposició estàtica del Temple de la Sagrada Família». *Anuari de l'Associació d'Arquitectes de Catalunya* [Barcelona] (1923).
- «Suplement homenatge a Antoni Gaudí». *El Matí* [Barcelona] (21-6-36).
- SWEENEY, James Johnson; SERT, Josep Lluís: *Antoni Gaudí.* Buenos Aires: Infinito, 1960.
- TARRAGÓ, Salvador: «Entre la estructura y la forma». *Revista CAU* [Barcelona], 69 (febrero 1981).
- TARRAGÓ, Salvador: *Gaudí.* Barcelona: Escudo de Oro, 1974.
- TARRAGONA, Josep M.: *Gaudí. Biografia de l'artista.* Barcelona: Proa, 2000.
- TORII, Tokutoshi: *El mundo enigmático de Gaudí: cómo creó su arquitectura.* 2 vols. Madrid: Instituto de España, 1983.
- TOMLOW, Jos: «Colegio Teresiano (1888-1890)». En: GAUDÍ-GROEP DELFT. *Gaudí: rationalist met perfecte materiaalbeheersing.* Delft: Delftse Universitaire Pers, 1979b.
- TOMLOW, Jos: «Crypte van de Colonia Güell (1898, 1908-1914)». En: GAUDÍ-GROEP DELFT. *Gaudí: rationalist met perfecte materiaalbeheersing.* Delft: Delftse Universitaire Pers, 1979a.
- TOMLOW, Jos; GRAEFE, Rainer; OTTO, Frei; SZEEMANN, Harald: *Das Modell... = The Model... = El Modelo: el modelo colgante de Antoni Gaudí y su reconstrucción, nuevos conocimientos para el diseño de la iglesia de la colonia Güell.* Stuttgart: Institut für Leichte Flächentragwerke, 1989.
- TROUERBACH, Anna; MOLEMA, Jan: «Bellesguard (1900-1902)». En: GAUDÍ-GROEP DELFT. *Gaudí: rationalist met perfecte materiaalbeheersing.* Delft: Delftse Universitaire Pers, 1979.
- VARIOS AUTORES: *Gaudí.* París: Musée des Arts Décoratifs, 1971 (Pionniers du XXe Siècle; 2). [Catálogo de exposición.]
- VARIOS AUTORES: *Laboratori de Leonardo.* IBM Espanya, 1984.
- VARIOS AUTORES: *Gaudí diseñador: Gaudí designer.* Barcelona: Blume, 1978, p. 9 (Función y forma = Function and form series)
- VARIOS AUTORES: *La Pedrera, arquitectura e historia.* Barcelona: Caixa Catalunya, 1999.
- VARIOS AUTORES: *La Pedrera: Gaudí i la seva obra.* Barcelona: Fundació Caixa Catalunya, 1998.
- VENDRELL, M.: *Estudis sobre els materials de l'Església de la Colònia Güell.* Barcelona: Diputació de Barcelona, 1997-2001. [Patrimonio de la Universidad de Barcelona.]
- VILA, Rafael: «El uso del hierro en la Casa Milà de Barcelona». *Informes de la Construcción*, 408 (1990).
- VINCA MASINI, Lara: *Antoni Gaudí.* Barcelona: Nauta, 1970 (Grandes Maestros del Siglo xx).
- VIOLLET-LE-DUC, Eugène: *Entretiens sur l'architecture.* París, 1863-1872.