



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

AUTOR: Federico Jesús Báez

TÍTULO: La relación entre forma y estructura en la arquitectura y en la ingeniería civil

TUTOR: Juan María Songel Gonzalez

ESCUELA: Escuela Técnica Superior de Arquitectura

CURSO: 2020-2021

TITULACIÓN: Grado en Fundamentos de la Arquitectura

RESUMEN

En las diferentes obras que se han llevado a cabo a lo largo de la historia, un aspecto, entre otros, siempre ha estado presente y se ha enfocado de múltiples maneras: la relación entre forma y estructura.

Antoni Gaudí es uno de los arquitectos que ha evolucionado a lo largo de su trayectoria profesional sobre este ámbito, culminando en su trabajo en la Basílica de la Sagrada Familia. Los arcos funiculares, así como el equilibrio de bloques, juegan un papel clave para verticalizar las cargas, pudiendo así superar la concepción estructural del gótico. En esta obra el arquitecto racionaliza las formas por medio de superficies regladas, estrechamente ligadas a su ejecución, estructura, plasticidad, transmisión para su futura construcción y, en definitiva, al disfrute espacial.

Este trabajo se interesa por la respuesta formal hacia la estructura, focalizada en el Templo construido por Gaudí.

In the different works that have been carried out throughout history, one aspect, among others, has always been present and has been approached in multiple ways: the relationship between form and structure.

Antoni Gaudí is one of the architects who has evolved throughout his professional career in this area, culminating in his work in the Basilica of the Sagrada Familia. The funicular arches, as well as the balance of blocks, play a key role in verticalizing the loads, thus being able to improve the structural conception of the Gothic. In this work the architect rationalizes the forms by means of ruled surfaces, closely linked to their execution, structure, plasticity, transmission for future construction and, ultimately, to spatial enjoyment.

This work is interested in the formal response to the structure, focused on the Temple built by Gaudí.

En les diferents obres que s'han dut a terme al llarg de la història, un aspecte, entre d'altres, sempre ha estat present i s'ha enfocat de múltiples maneres: la relació entre forma i estructura.

Antoni Gaudí és un dels arquitectes que ha evolucionat al llarg de la seva trajectòria professional sobre aquest àmbit, culminant en el seu treball a la Basílica de la Sagrada Família. Els arcs funiculars, així com l'equilibri de blocs, juguen un paper clau per verticalitzar les càrregues, podent així superar la concepció estructural de el gòtic. En aquesta obra l'arquitecte racionalitza les formes per mitjà de superfícies reglades, estretament lligades a la seva execució, estructura, plasticitat, transmissió per a la seva futura construcció i, en definitiva, a l'gaudi espacial.

Aquest treball s'interessa per la resposta formal cap a l'estructura, focalitzada en el Temple construït per Gaudí.

PALABRAS CLAVE: Gaudí, arcos funiculares, superficies regladas, equilibrio, cargas.

Gaudí, funicular arches, ruled surfaces, balance, loads.

Gaudí, arcs funiculars, superfícies reglades, equilibri, càrregues.

ÍNDICE

1_Introducción.	5
1.1_Antecedentes y estado de la cuestión.	5
1.2_Objetivos.	6
1.3_Metodología.	6
2_Desarrollo.	7
2.1_ Contexto histórico.	7
2.2_ Análisis de la forma y estructura. Basílica de la Sagrada Familia.	10
2.3_ Cripta de la Iglesia de la Colònia Güell.	11
2.4_ El equilibrio en la obra de Gaudí.	14
2.5_ Arcos catenarios.	15
2.6_ Aplicación de los arcos funiculares y equilibrio en la Sagrada Familia.	19
2.7_ Cúpula de las sacristías, campanarios y cimborrios.	26
2.8_ Columnas del templo.	29
2.9_ Bóvedas.	32
2.10_ Ventanales.	35
2.11_ El arquitecto.	37
3_Conclusiones.	40
4_Bibliografía y fuentes.	41

1_Introducción.

Tener en cuenta las cargas de una estructura, su recorrido y la forma que responde a ella es uno de los principales aspectos a abordar en un proyecto de arquitectura e ingeniería. Adoptar sistemas estructurales que realicen esta función aporta una variedad de ventajas e inconvenientes dependiendo de la solución llevada a cabo. Antoni Gaudí apostará en la Sagrada Familia por un sistema que no intenta ir en contra del recorrido de cargas, el cual acompaña esta transmisión entre los elementos. Comprender el funcionamiento de la estructura y la forma en el Templo nos aporta una visión sobre la arquitectura de Gaudí que va más allá del comportamiento de sus anteriores obras, un edificio en el que la estructura se sirve de la forma y viceversa. El resultado es la verticalidad del espacio litúrgico y la calidad de éste.

1.1_Antecedentes y estado de la cuestión.

Antoni Gaudí transmitió a sus discípulos sus pensamientos para que prosiguieran con su obra. La fuente de información principal es de la mano de los textos que recogen el trabajo de los que continúan con su legado¹, así como investigaciones sobre la misma estructura del Templo². También es de consulta obligatoria aquellos textos que basan su estudio en la geometría, la cual, gracias al trabajo con programas informáticos han contribuido tanto a la ejecución de la Sagrada Familia³. El contexto histórico, social y cultural influye de manera directa en la obra, afectando a la construcción y al mismo proceso de proyección del arquitecto⁴, además de a la evolución de la técnica constructiva⁵ ⁶. Es también imprescindible el trabajo específico sobre los sistemas estructurales⁷, sin dejar de lado el programa que es para lo que el Templo da respuesta⁸.

¹ Daniel Giralt-Miracle, *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]* (Barcelona: Lunwerg, 2002).

² Salvador Tarragó, *Miscel·lània* (Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, 2013).

³ Josep Gómez et al., *La Sagrada Familia : de Gaudí al CAD* (Barcelona: Edicions UPC, 1996).

⁴ Daniel Venteo, *Sagrada Família desconeguda* (El Papiol: Efadós, 2015).

⁵ Isidre Puig Boada, *El Temple de la Sagrada Família* (Barcelona: Nou Art Thor, 1986).

⁶ R Espel et al., "La Evolución de La Construcción Del Templo de La Sagrada Familia," article, *Informes de La Construcción* 61, no. 516 (2009): 5–20, <https://doi.org/10.3989/ic.08.057>.

⁷ Heino Engel, *Sistemas de Estructuras* (Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.L., 2006).

⁸ Juan Ángel Reig Martínez, "EL ESPACIO CELEBRATIVO COMO CONFIGURADOR DEL PROYECTO ARQUITECTONICO DE LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDÍ" (Universitat Politècnica de València, 2016).

A lo largo de la historia de la construcción de la Sagrada Familia, el continuo desarrollo de nuevos materiales y sistemas constructivos ha servido para poder llevar a cabo la obra tal y como Gaudí indicó, con sus preceptos estructurales y geométricos. Hoy en día se sigue avanzando en esta línea, ya que la propia obra a propuesto la problemática a resolver y sus soluciones, como la vuelta de la piedra como material principal de construcción, pero con la técnica del postesado que lo hace posible.

1.2_Objetivos.

La relación entre la forma y la estructura es la cuestión principal que estudiar, con el consecuente foco en una de las obras que conforman una relación más estrecha, la Basílica de la Sagrada Familia. El entendimiento de esta relación nos aporta más herramientas para entender la obra del arquitecto y su concepción. Para este fin las fuentes consultadas han sido la principal fuente de información.

1.3_Metodología.

Comprender la vida del arquitecto y su contexto histórico ha sido la primera tarea que realizar, así como el proceso constructivo y proyectual del Templo. La investigación de los diferentes sistemas estructurales y el funcionamiento sus mecanismos conllevan a entender la forma final adoptada por el arquitecto. Por último, se realiza un análisis de diferentes elementos que conforman la Basílica en base a su geometría y comportamiento estructural.

2_Desarrollo

2.1_Contexto histórico.

Entender la concepción estructural y formal de la Basílica de la Sagrada Familia, es comenzar en primer lugar a dar un breve repaso del proceso histórico de construcción del templo, ya que esta evolución está estrechamente ligada con la concepción de la obra, a nivel de proyecto y constructivamente.

Para Antoni Gaudí era tan importante la construcción del templo que estaba ejecutando, como la transmisión de los conocimientos necesarios para completarlo, como bien podemos deducir de todo el trabajo que hubo al margen de las partes que se llegaron a materializar. En los modelos, dibujos e indicaciones que el arquitecto realizó en vida, hallamos los preceptos con los que continuar la obra, en los cuales han jugado un papel importantísimo las superficies regladas. Éstas, como bien Gaudí sabía, eran capaces de dar respuesta estructural óptima, constatar su trabajo de manera precisa, dotar de la plasticidad característica de la obra del arquitecto y facilitar la construcción de dichas formas.



Figura 1: Cripta en construcción.

Francesc de Paula Villar fue el primer arquitecto de la basílica en 1883, aunque por discrepancias sobre la resistencia de la mampostería, rechazó seguir con la obra. Su proyecto constaba de un marcado estilo neogótico, con la intención de recuperar el estilo gótico del Reino de Aragón⁹. A partir de este momento, Gaudí se hace cargo de las

⁹ Gómez et al., *La Sagrada Familia : de Gaudí al CAD*, 14.

obras, centradas en construir la cripta. Estas primeras decisiones se centraron en continuar con el estilo neogótico de Villar, aunque con modificaciones como aumentar el techo de la cripta para dotarla de luz natural¹⁰. Una vez construida, la siguiente fase fue el ábside, también basado en el gótico influenciado por el primer proyecto.

En 1891 se iniciaron las obras de la fachada del Nacimiento. Se había percibido una importante donación aquel entonces con la que terminar la iglesia a estilo neogótico, aunque esto fue un punto de inflexión en la obra, ya que Gaudí decidió invertir los esfuerzos en una fachada que marcará las pautas a seguir para su continuación, sabiendo entonces que no podría ver acabada su obra. La realización de la fachada del Nacimiento sería su forma de enseñarle al mundo y a los barcelonenses el germen de un templo que debía de concluirse en un futuro.



Figura 2: Ábside completado y fachada del Nacimiento en construcción.

Los doce años siguientes se dedicaría expresamente a la basílica, concretamente en su interior. Cuatro años le llevó llegar a las columnas de doble giro y a la estructura arborescente, y otros seis la forma final de las bóvedas. También realizó maquetas de la sacristía y de la fachada principal.

La escasez de recursos económicos conlleva a este trabajo de proyección, siendo en este tiempo los únicos elementos proyectados y construidos los pináculos que colmatan

¹⁰ Venteo, *Sagrada Família desconeguda*, 20.

los campanarios de la fachada del Nacimiento, aunque el único terminado fue el correspondiente a la torre de San Bernabé, debido a su muerte por el atropello de un tranvía en el año 1925.

Tras su muerte, su discípulo Domènec Sugranyes asumió la dirección de las obras hasta su muerte en 1938, dos años después de haber terminado la fachada del Nacimiento, año en el que la cripta fue incendiada y la mayoría de las maquetas y dibujos de Antoni Gaudí. Francesc Quintana, como nuevo arquitecto director, Lluís Bonet Garí e Isidre Puig Boada reconstruyen la cripta y las maquetas, trabajo que, de no haberse realizado, junto con escritos que describían el templo, no habría sido posible la continuación de las obras¹¹.

Las obras son reanudadas en 1948, iniciando la fachada de la Pasión en 1954, la cual se acaba en 1976. A la muerte de Quintana en 1966, le sustituye Isidre Puig Boada, que se ocupa de dirigir las obras hasta 1974. Le sucede Lluís Bonet Garí, bajo cuya dirección se inicia la cimentación de ventanales y muros en 1978, situados al costado de la fachada del Nacimiento y los correspondientes a las naves laterales. Francesc Cardoner y después Jordi Bonet i Armengol fueron los continuadores de las obras, hasta hoy en día en que Jordi Faulí ejerce el cargo de arquitecto director.

PERIODO	AÑOS	ARQUITECTO DIRECTOR
1º	1882 - 1883	Francesc de Paula Villar (1829-1901)
	1883 - 1926	Antoni Gaudí i Cornet (1852-1926)
	1926 - 1936	Domènec Sugranyes i Gras (1879-1938)
2º	1939 - 1966	Francesc Quintana Vidal (1892-1966)
	1966 - 1974	Isidre Puig Boada (1891-1987)
	1971 - 1983	Lluís Bonet Garí (1893-1993)
3º	1983 - 1985	Francesc de P. Cardoner i Blanch (1929-1997)
	1985 -	Jordi Bonet i Armengol (1925-)

Figura 3: Tabla en la que figuran los arquitectos directores hasta Jordi Bonet.

¹¹ Puig Boada, *El Temple de la Sagrada Família*, 12.

2.2_Análisis de la forma y estructura. Basílica de la Sagrada Familia.

Es sabido que en la Basílica de la Sagrada Familia de Barcelona existe una relación muy estrecha entre la geometría y su aspecto estructural, ya que se ha buscado facilitar la transmisión de cargas desde las fases más tempranas del proyecto. Bien es cierto que, como anteriormente se ha mencionado, la construcción por partes de la obra ha suscitado el desarrollo hacia una depuración de formas, quitando peso a la faceta modernista. Esta transición es apreciable en las diferencias entre las fachadas del Nacimiento y de la Pasión. En la fachada del Nacimiento, la única prácticamente terminada en vida por Gaudí, se da una mayor importancia a la ornamentación, mientras que en la de la Pasión, la siguiente en llevarse a cabo y proyectada por el arquitecto en 1911¹², la estética del edificio avanza hacia el reconocimiento de la forma pura.

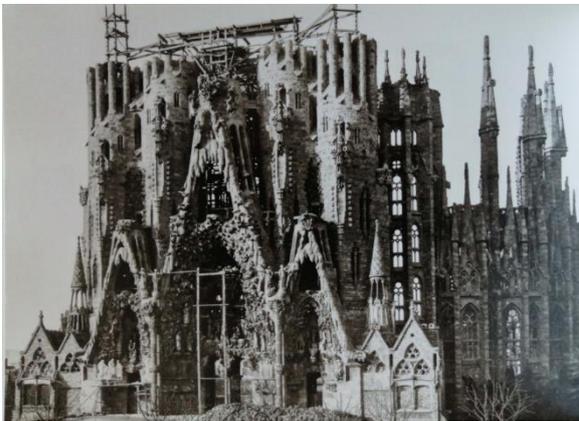


Figura 4: Fachada del Nacimiento en construcción.

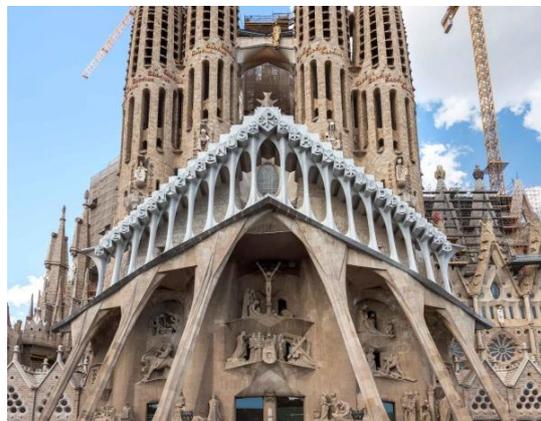


Figura 5: Fachada de la Pasión.

Esta puntualización es importante en la medida en que se confiere una gran trascendencia a la forma para poder transmitir a las generaciones futuras el proyecto de la Basílica. La depuración y reglamentación en la confección de la forma para este fin, unida a la intención de facilitar la obra proyectando elementos autoportantes para prescindir de cimbras, hace de la transmisión de cargas un aspecto fundamental para el proyecto.

Las superficies regladas son usadas por Gaudí a partir de la analogía con la naturaleza como huecos, troncos de árboles, etc. Además, confiaba en estas formas para crear espacios que reflejaban la experimentación de dichas geometrías. El paraboloide, hiperboloide, helicoide y formas derivadas de éstas son los elementos conjugados para crear formas que son eficientes constructiva y estructuralmente, que conforman como fin último los espacios que ellas encierran y tanto maravillan y asombran.

¹² Venteo, *Sagrada Família desconeguda*, 179.

2.3_Cripta de la Iglesia de la Colònia Güell.

Para poder explicar de una forma completa la relación entre la forma y estructura en la Basílica de la Sagrada Familia, se estima necesario conocer esta misma relación en el proyecto de la Iglesia de la Colònia Güell, y más concretamente en la cripta construida.

Gaudí recibe el encargo de esta iglesia en el año 1898, empezándose a construir en el 1908. Las obras se suspenden en 1914, con la cripta construida, pero a falta de la iglesia alta. Esto toma especial importancia al señalar que la segunda versión del proyecto de la Sagrada Familia, en la que se realiza el cambio radical del lenguaje neogótico de la primera versión, se presenta en 1917, con lo que se podría concluir que la Iglesia de la Colonia Güell es un ensayo preliminar de los principios arquitectónicos que se emplean en la Basílica.



Figura 6: Vista interior de la Cripta de la Colònia Güell. Se aprecian los arcos catenarios del techo.

La forma que adquiere la obra se obtiene a partir de una maqueta con hilos colgados por sus extremos. Los arcos que se obtienen de este proceso son arcos catenarios, los cuales funcionan solo a compresión axial. Éstos toman corporeidad siguiendo las líneas funiculares, las cuales son la trayectoria de los esfuerzos en el arco, y le permiten construir con arcos visualmente ligeros de fábrica monorresistente¹³. Es el primer edificio relevante que se construye siguiendo este principio. La maqueta de la Iglesia en

¹³ Giralt-Miracle, *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*, 67.

su conjunto nos permite apreciar la intención de Gaudí de implementar este principio estructural de una forma global.

También cabe destacar que la inclinación de los pilares de basalto se crea por los empujes de los arcos no equilibrados que descansan sobre estos pilares, y no por la carga que supuestamente transmitiría la iglesia que se iba a construir en su parte superior, con lo que no podemos saber en realidad el resultado material de una concepción del conjunto.



Figura 7: Maqueta invertida.

Esta forma de determinar la materialidad es para Gaudí algo indiscutible, una manera de establecer la forma a partir de un procedimiento práctico:

“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”¹⁴.

El empuje innovador era patente en el pensamiento del arquitecto, ayudado también por el espíritu del modernismo, con la intención de crear preceptos nuevos en la arquitectura, aunque en el caso de Gaudí nunca se desligó de la lógica constructiva tradicional basada en elementos en su mayoría a compresión, salvo en casos puntuales como en la Casa Milá, que utiliza hierro escondido para obtener formas que únicamente se obtendrían de su aplicación:

“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.”¹⁵

La genialidad de Gaudí consiste en obtener formas nuevas a partir del desarrollo y perfeccionamiento de las técnicas que ya existían. En la Basílica de la Sagrada Familia se constata este desarrollo, en el que el dominio de su incuestionable saber estructural y constructivo dan lugar a la magnífica obra que hoy se puede apreciar. En esta obra el estudio de sus formas significa también el estudio del trazado de las fuerzas que se transmite a través de ellas, tan estrechamente ligadas.

¹⁴ Giralt-Miracle, 32.

¹⁵ Giralt-Miracle, 28.

2.4_ El equilibrio en la obra de Gaudí.

Antoni Gaudí se ha servido en la Basílica de la Sagrada Familia de una concepción puramente estática, es decir, utilizando las ecuaciones de equilibrio estáticas, mediante modelos y con la ayuda de la estática gráfica¹⁶. Esto implica que las ecuaciones que contemplan el material y la deformación geométrica no figuran como patente en sus cálculos estructurales.

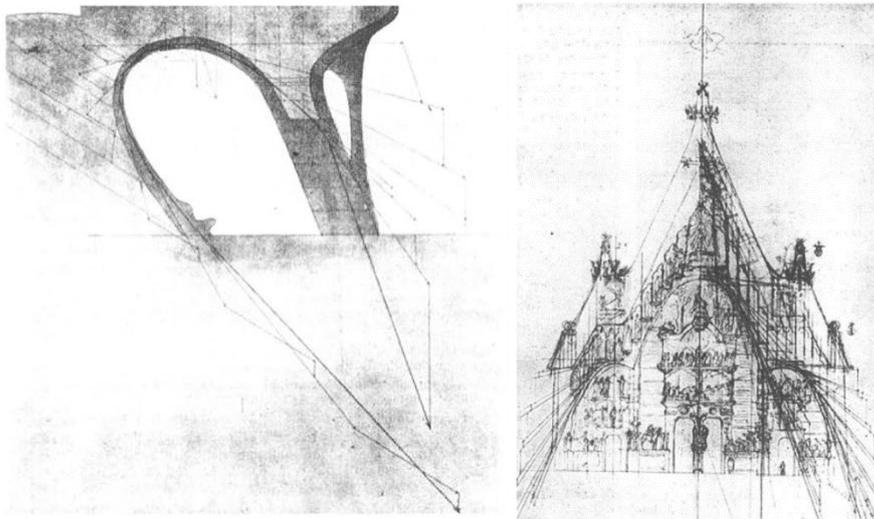


Figura 8: Cálculo gráfico del muro del Parque Güell y de una fachada del templo.

La seguridad estructural está presente por medio de la acción de engruesar los elementos que componen la materia sustentante. Del mismo modo que un arco contiene infinitos estados de equilibrio en función de las cargas exteriores actuantes y sus variaciones. Esto causaba en los ingenieros de finales del siglo XIX la necesidad de determinar el estado de equilibrio real de la estructura, huyendo de la indeterminación que causaba este sistema estructural. Las ecuaciones de compatibilidad y del material obtenían un resultado preciso, aunque ideal, y esto causaba agrietamientos de las obras construidas, lo que ponía de manifiesto que el cálculo no correspondía con el estado real de la estructura.

De este modo nace de la teoría plástica del desarrollo de la teoría elástica, que ayudó en solventar el problema del estado real estructural, con el desarrollo del Teorema de la Seguridad, con la cual se puede afirmar que una estructura en la que se pueda encontrar un estado interno de equilibrio con los esfuerzos exteriores que se encuentra dentro de los límites del material, la estructura no colapsará. Así, pasamos a no tener que plantear una situación de equilibrio real, sino posible. En el caso de las estructuras

¹⁶ Tarragó, *Miscel·lània*, 158.

de obra de fábrica, llega a ser un problema de geometría, para albergar una línea de empujes. En la Sagrada Familia el arquitecto aplica estos preceptos convenientemente al proyectar directamente formas equilibradas.

2.5_Arcos catenarios.

El arco catenario se forma con una cadena que sostiene su propio peso y se cuelga de dos puntos. Cuando la carga que soporta es horizontalmente uniforme, la curva que se crea es la de una parábola, mientras que con cargas puntuales traza un arco funicular.

Este arco presenta una verticalidad mayor que la parábola. La diferencia se puede explicar con las tangencias en los puntos cercanos a sus máximos y mínimos. En la parábola estas tangencias tienden a la horizontalidad, mientras que en la curva catenaria a la verticalidad.

Estos arcos que siempre se encuentran traccionados tienen la propiedad de encontrarse comprimidos al obtener el arco inverso. Soportan las mismas cargas que estando traccionado cuando tienen la misma longitud de cadena. Además de esto, estos arcos inversos de la misma longitud, cuanto más más alto es el arco menor es el empuje horizontal. De la misma forma, el empuje horizontal que tiene la misma longitud de cadena cuando es de menor altura es mayor. Este arco se adapta para obtener diferentes formas, dependiendo de las cargas que soporte y su distribución, pudiendo tomar forma de arco elíptico o arco apuntado en el centro.

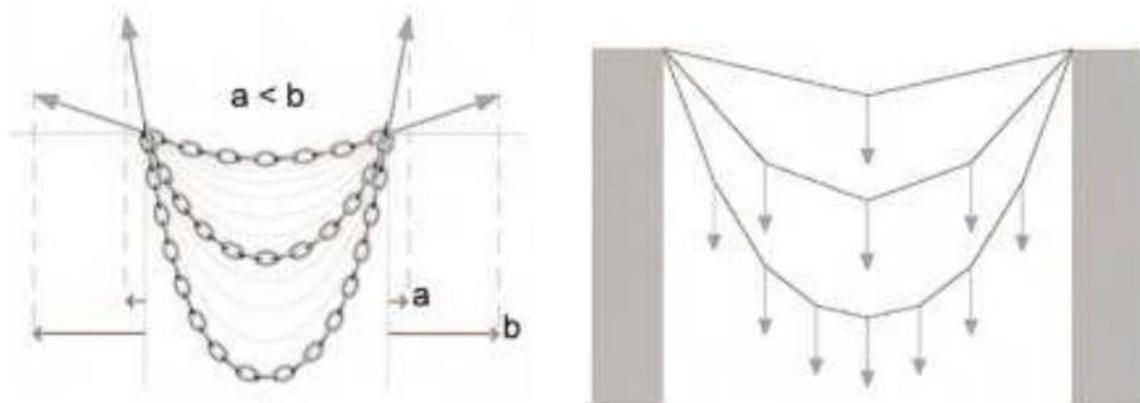


Figura 9: Arcos catenarios.

Este tipo de arco era conocido de sobra en la arquitectura, así como sus propiedades, pero no se utilizaba debido que se consideraba poco elegante. Gaudí estudió sus propiedades y las incorporó en sus obras desde una fase temprana, como en la Casa Vicens y la cooperativa obrera de Mataronense.

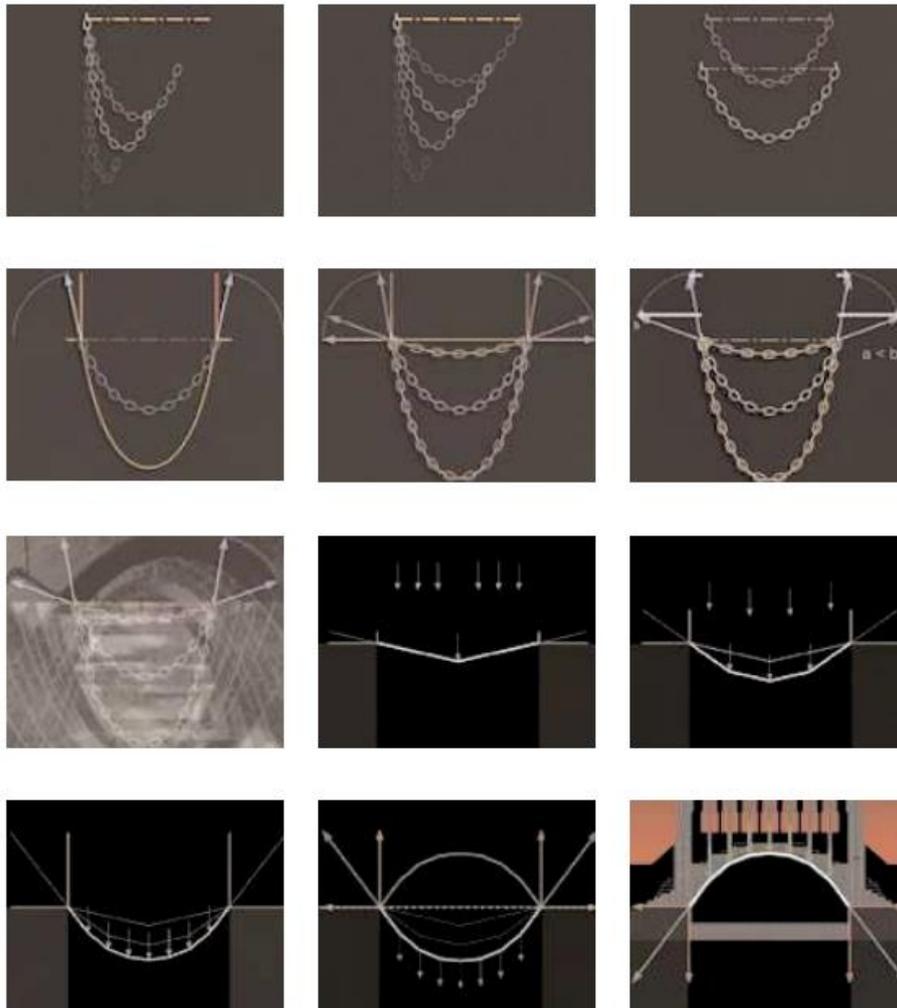


Figura 10: Arcos catenarios y su comportamiento.

Se conoce que ya se planteó por parte de Hook hacia 1670 la forma ideal de un arco. Intuyó que la misma forma de un hilo flexible invertido sería la buscada, así como la afirmación de Gregory¹⁷ de que los arcos de otras formas se sostienen porque hay una catenaria en su interior, pero no sería hasta 1704 cuando Bernoulli resolviera ese problema.

Hacia 1840 se pueden dibujar y calcular las líneas de empuje sin usar modelos, con análisis matemático y métodos gráficos. Los polígonos de fuerzas se empezaron a utilizar ampliamente en la época. Gaudí sería el primero en usar este método desde fases

¹⁷ Tarragó, 136.

tempranas del proyecto, no como comprobación estructural, sino como una herramienta para hallar la forma adecuada de su arquitectura.

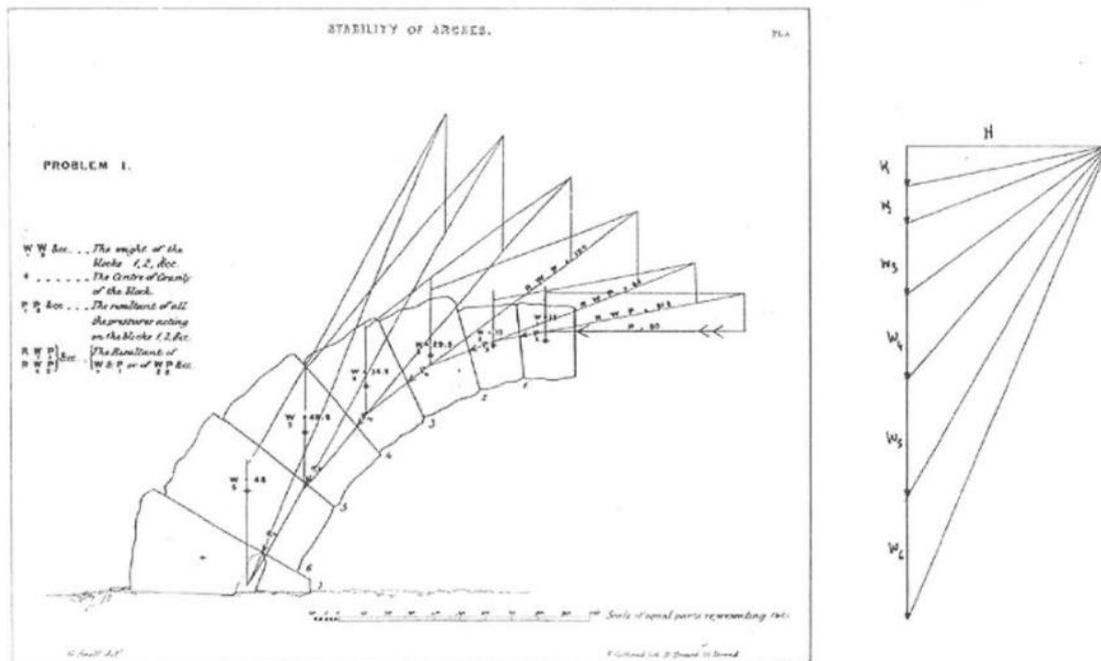


Figura 11: Composición de fuerzas y polígono de fuerzas.

Gaudí llegó a utilizar métodos interactivos para el cálculo de arcos antifuniculares. En los arcos de la casa Milà utilizaba hilos colgados, calculando el peso que soportaría sobre él midiendo las verticales. Acto seguido, se colgaban los pesos cambiando de forma el arco. Variando el peso propio y modificando así las cargas colgadas, se llegaba a una forma muy próxima al arco trazado matemáticamente.

También utilizaría estos métodos aplicados a formas espaciales: mientras que el análisis clásico consistía en suponer la bóveda como cortes para analizar su comportamiento como arcos, con sus dimensiones predimensionadas para luego comprobar su estabilidad por métodos gráficos, Gaudí buscaba obtener directamente la forma en equilibrio. El problema se complica aún más al tratar cargas asimétricas con apoyos también asimétricos.

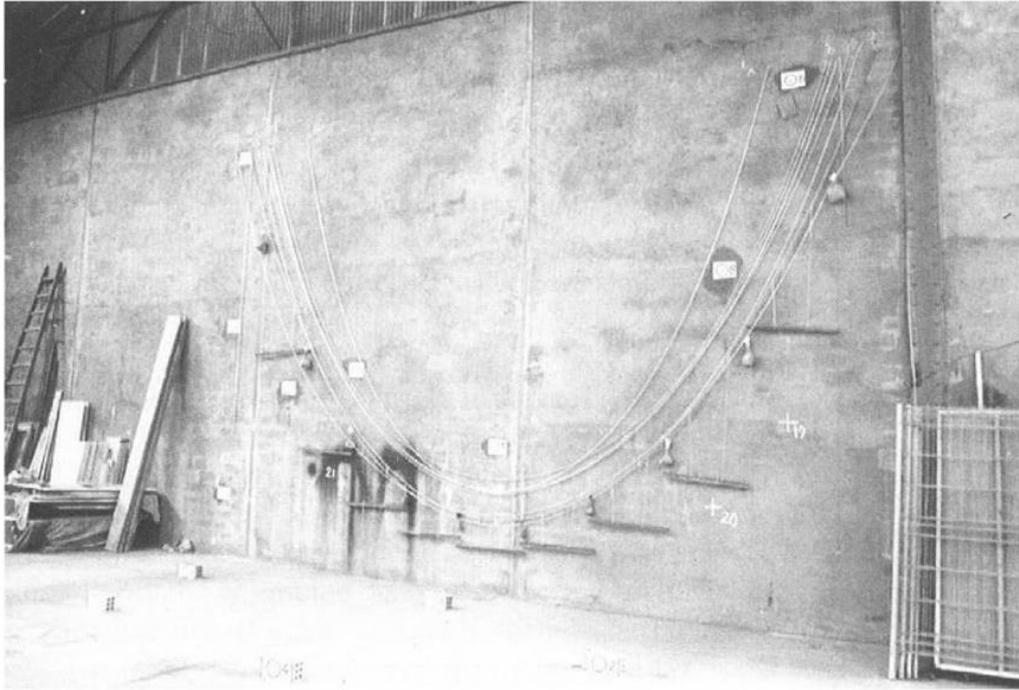


Figura 12: Arcos catenarios a escala real para la casa Milà.

Los modelos colgados que utilizó Gaudí se basan en interaccionar con los pesos colgados. Se necesita de un trabajo muy laborioso para realizar todo un modelo con estas características, ya que una vez se halla la forma deseada por medio del ajuste continuado de los sacos colgados, se colocaba un paño de seda obteniendo la volumetría resultante, o mediante una foto y realizando un dibujo encima con la técnica de gouache¹⁸.

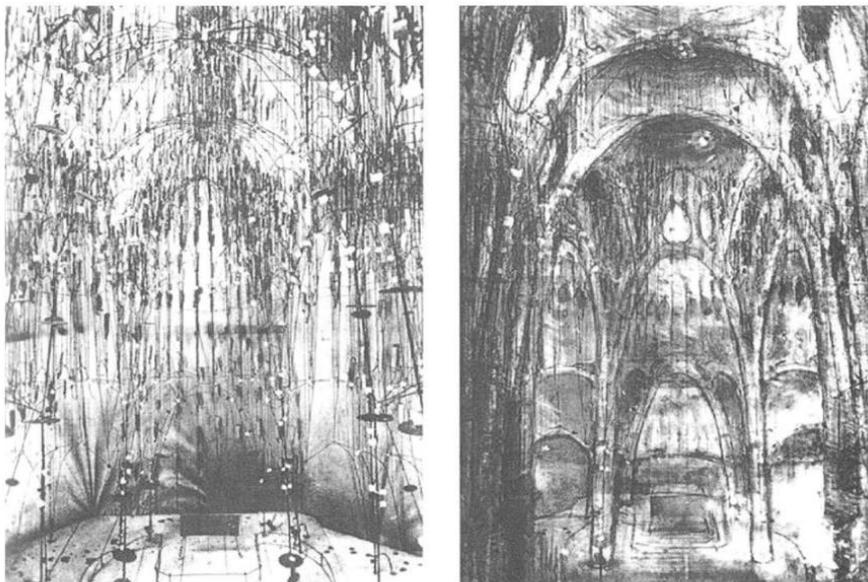


Figura 13: Foto del modelo colgado y dibujo a partir de éste.

¹⁸ Tarragó, 148.

2.6_Aplicación de los arcos funiculares y equilibrio en la Sagrada Familia.

“Los funículos de la Sagrada Familia los encontró gráficamente, y los de la Colònia Güell, experimentalmente, pero dice que ambos procedimientos son el mismo, el uno hijo del otro.”¹⁹

La Basílica de la Sagrada Familia se desarrolla a partir de los preceptos de la planta basilical clásica, posiblemente influenciado por el proyecto original de Francesc de Paula Villar. El desarrollo de la Iglesia de la Colonia Güell y la construcción de su cripta condujeron a la aplicación de las formas funiculares en la Basílica, aunque basadas en la intención clara de perfeccionar el estilo gótico.

El paso que había que dar para ir más allá del gótico era conseguir eliminar los contrafuertes y arbotantes que caracterizaban, entre otros, a dicho estilo. Las iglesias góticas buscaban a su vez dejar atrás las iglesias basadas en estilos clásicos, como el románico, construidas a base de arcos de medio punto y bóvedas de cañón que transmitían considerable esfuerzo lateral. Para contrarrestar este hecho, los contrafuertes debían adquirir grandes dimensiones, a su vez que su masa se integraba en el propio cuerpo de la iglesia. Las iglesias góticas buscaban mayor luz, claridad. Los edificios eclesiásticos pasaron a ser la representación del paraíso en la tierra, llenos de simbología. Las grandes catedrales que podían permitírselo pasaron a una mayor verticalidad y dejando pasar la luz a través de sus vidrieras de colores, maravillando a los feligreses, en una época en la que la transmisión de la palabra de Dios a través de esculturas, pinturas, simbolismo en general, era primordial.



Figura 14: Catedral de Sevilla.

¹⁹ Giralt-Miracle, *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*, 102.

El problema principal de la aplicación de estos preceptos era evidente: cuanto más vertical y menos masa para dejar pasar la luz, la necesidad de canalizar los esfuerzos horizontales tomaba un valor crucial. Los arcos apuntados incrementaban este factor. La solución empleada no era otra que la colocación de contrafuertes a los que se les debía transmitir las cargas, pero desligados de las fachadas para la colocación de las vidrieras.

Para Gaudí, como anteriormente se ha mencionado, estos elementos debían de ser prescindidos para dar lugar a una forma que fuera fruto directo de las propias cargas que debía sostener. La verticalidad y majestuosidad del templo no debían que tener muletas que lo sostuviera.

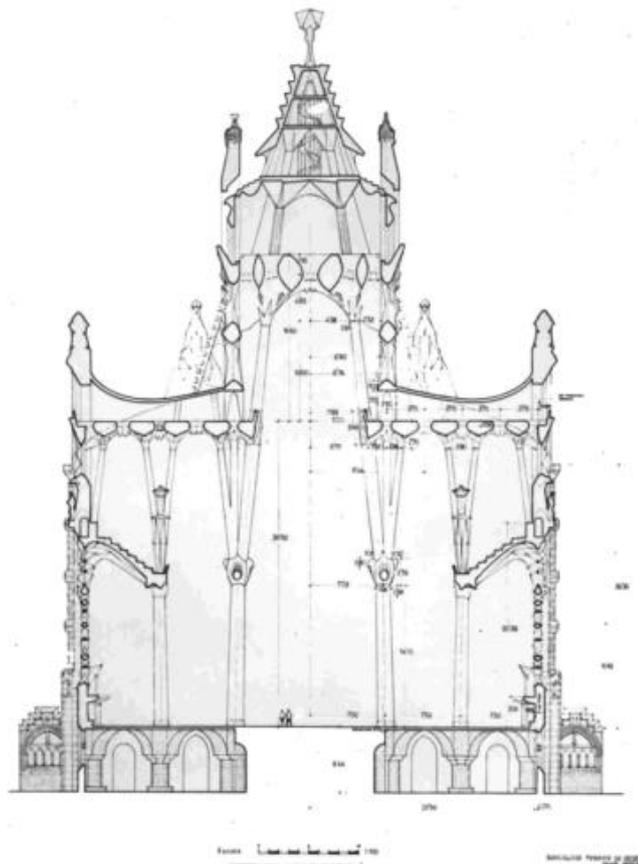


Figura 15: Sección de la Basílica.

Así, la estructura de la nave de la Sagrada Familia y por lo tanto su forma, funciona siguiendo los funículos catenarios desdoblados en dos planos al ser de simetría doble. Los pesos de la cubierta de la nave contribuyen a la verticalidad de los esfuerzos que recorren la estructura. Aquella funciona como los pesos que se colgaban del modelo hecho con cables antes descrito. La cubierta de la Basílica funciona con una doble piel: la parte superior que en las catedrales góticas correspondía al techado débil y necesariamente reparable cada cierto tiempo, ahora es un entramado resistente que recoge la mayoría del peso de la cubierta. La capa interior de la cubierta, la visible desde dentro de la nave, es más ligera y conformada por paraboloides hiperbólicos y de hiperboloides de revolución.

Con el peso de las cubiertas, la fachada de la parte superior y de los pináculos, Gaudí obtuvo las cargas verticales de cada parte de los elementos a sustentar, teniendo ahora que obtener la manera de recoger las cargas por medio de las ramas de las columnas. Aquí podemos ver otro ingenio del arquitecto: al poder determinar la forma de la cubierta y tejado, pudo obtener el centro de gravedad de cada elemento por medio de la estática gráfica y colocar los puntos de enlace con las columnas de la misma manera que un cable que sostiene un objeto, prolongado, pasaría por su centro de gravedad. Sería el punto donde deberíamos colocar un palo para sostener un objeto. Con todo esto, ya pudo obtener la inclinación adecuada de los pilares, llegando a un resultado a partir de los arcos funiculares y de un equilibrio global que no necesita de contrafuertes para soportar las cargas horizontales de la estructura, creadas por los arcos y bóvedas. Se formarían unos bloques, cada uno sustentado a sí mismo, que no necesita de interactuar con otros bloques para su estabilidad²⁰. Esto es lo que estructuralmente diferencia la Sagrada Familia de la Iglesia de la Colònia Güell, en la que el sistema se basa principalmente en los arcos funiculares. En la Basílica se combinan estos arcos con el equilibrio de bloques.



Figura 16: Sección de la Basílica.

²⁰ Tarragó, *Miscel·lània*, 154.

El colaborador de Gaudí, Domènec Sugranyes i Gras, publica en 1923 un artículo en el *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*. Aquí habla de estos bloques y de su capacidad de equilibrio autónomo, con esfuerzos laterales mínimos gracias a un material concrecionado y armado de barras de acero. Las bóvedas y demás elementos están conformadas por superficies regladas, con lo que el armado de estas formas siempre podría hacerse con barras rectas. En el caso de las bóvedas, el mismo armado sirve de cimbra, con lo que se prescinde de las cimbras convencionales.

Dado que los elementos proyectados no buscan transmitir esfuerzos de flexión, las inclinaciones provocan esfuerzos horizontales, aunque minimizados. Estos esfuerzos de las naves principal y laterales determinan la inclinación final de los pilares.

Para que la cubierta actuara a modo de cáscara y no transmitiera flexiones hacen falta unas condiciones de borde para que esto dé lugar. Estos esfuerzos se pueden compensar con la armadura del forjado horizontal, pero los esfuerzos horizontales totales no se compensan solo con estas armaduras, con lo que cada bloque no funciona de manera independiente en su totalidad. Gaudí era consciente de este hecho, con lo que proyecta unos arcos arbotantes para verticalizar las cargas todo lo posible. Al fin y al cabo, este elemento típicamente gótico le fue útil al arquitecto a pesar de su afán por eliminar estas “muletas”²¹. Además de esto, elimina los contrafuertes, pero también se sirve del peso del frontón y ventanales para ayudar a verticalizar las cargas.

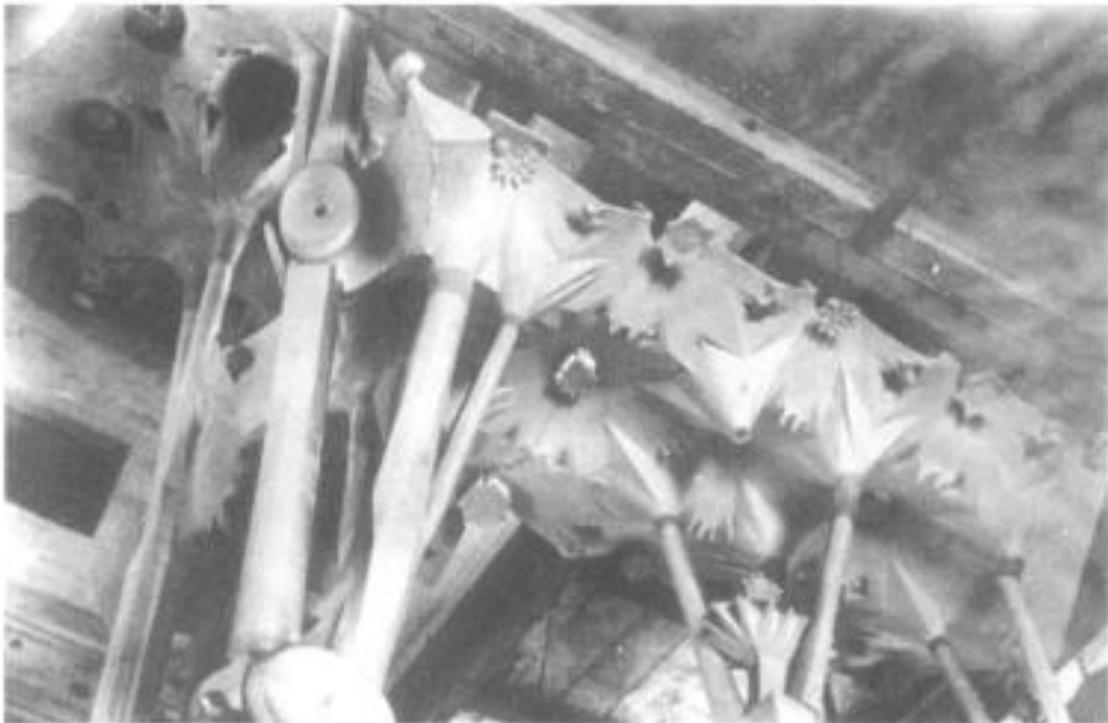


Figura 17: Modelo de las bóvedas laterales.

²¹ Giralt-Miracle, *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*, 67.

Bien es cierto que la seguridad estructural frente a acciones horizontales que hoy en día se aplica y se considera primordial en los edificios públicos, no podría ser un aspecto del todo satisfactorio en esta obra de Gaudí, aunque se puede decir que con los materiales con los que contaba no permitían un gran margen de seguridad, aunque sí el suficiente. Esto se ha corregido con el empleo del hormigón armado en algunos puntos de la estructura actual.

Con esto Gaudí podemos decir que llega a una inversión del gótico: las partes delgadas y esbeltas de las zonas superiores se van ensanchando hacia los contrafuertes, mientras que él establece unas formas arbóreas que van extendiéndose y ramificándose hacia el cielo.

De acuerdo con Heino Engel²², en lo referente a la sistematización de estructuras de edificación, para transmitir cargas a través de elementos materiales obtenemos 4 mecanismos típicos, con un mecanismo atípico de orden superior: adaptación a las fuerzas, subdivisión de las fuerzas, confinamiento de las fuerzas, dispersión de las fuerzas y la de recoger y transmitir las cargas al suelo.

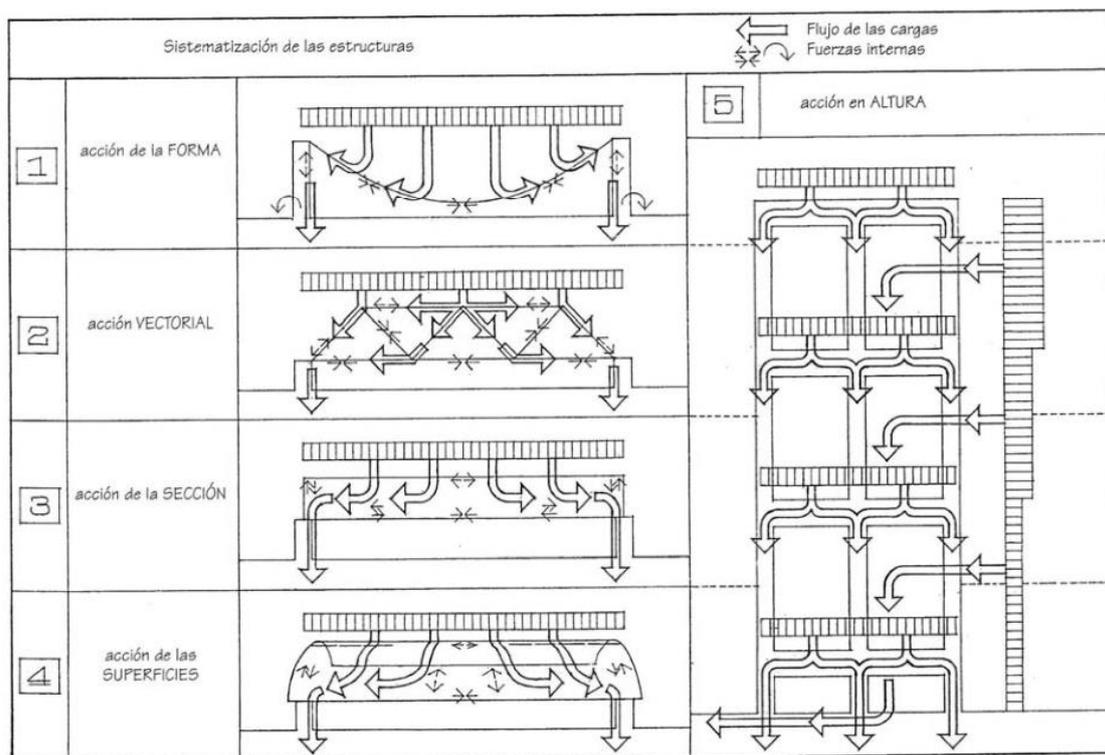


Figura 18: Sistematización de las estructuras.

De este despliegue de sistemas estructurales nos interesa analizar el primero de ellos, el cual Heino Engel denomina de forma activa. La definición que plantea es la siguiente: "Un material no rígido y flexible, con una forma determinada y fijado por sus extremos,

²² Engel, *Sistemas de Estructuras*, 39.

puede sostenerse a sí mismo y cubrir un espacio [...]”²³. En esta clasificación se agrupan las estructuras atirantadas y las conformadas por arcos funiculares. El cable suspendido en vertical sosteniendo un peso y un pilar vertical aguantando esfuerzos de compresión en la misma dirección del eje del pilar, serían las figuras básicas de este grupo estructural.

El cable adopta una forma correspondiente al estado de cargas al que esté sometido. De la misma forma, un arco funicular también cambia a una forma efectiva variando las cargas que actúan sobre éste. Los dos tipos de estructura de forma activa desvían los esfuerzos a través de fuerzas normales, y generan en sus apoyos cargas horizontales, las cuales son el principal problema con el que lidiar a la hora de proyectar este tipo de estructuras. Este tipo de estructuras necesita de una forma adecuada para transmitir las cargas a las que se ven sometidas, siendo dificultosa su absorción una vez dada la forma y su estado de cargas exterior variante.

Las estructuras de forma activa son el resultado ideal del recorrido natural de fuerzas en una estructura, correspondiéndose a las fuerzas exteriores actuantes sobre ésta y a la distancia de los puntos de apoyo. Por consiguiente, obtenemos un sistema capaz de cubrir grandes luces con el mínimo material indispensable. Otra característica indispensable es que deben estar sometidas a un estado de cargas sencillo.

El funcionamiento de las estructuras de forma activa son clave para entender los demás sistemas estructurales, pudiéndose aplicar en todos ellos.

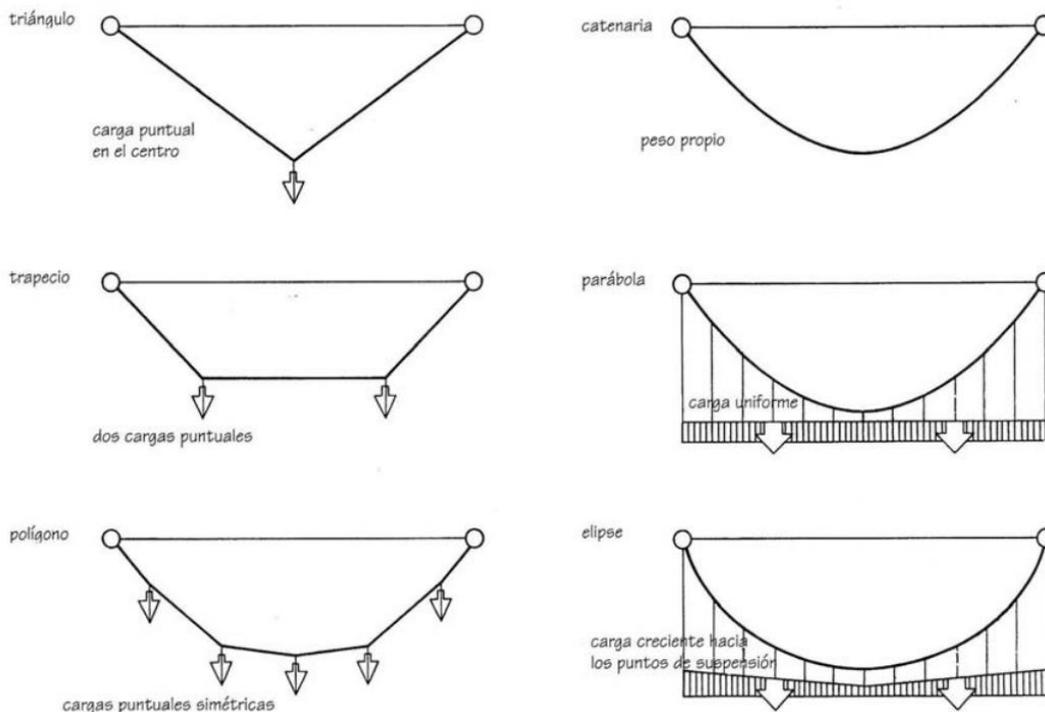
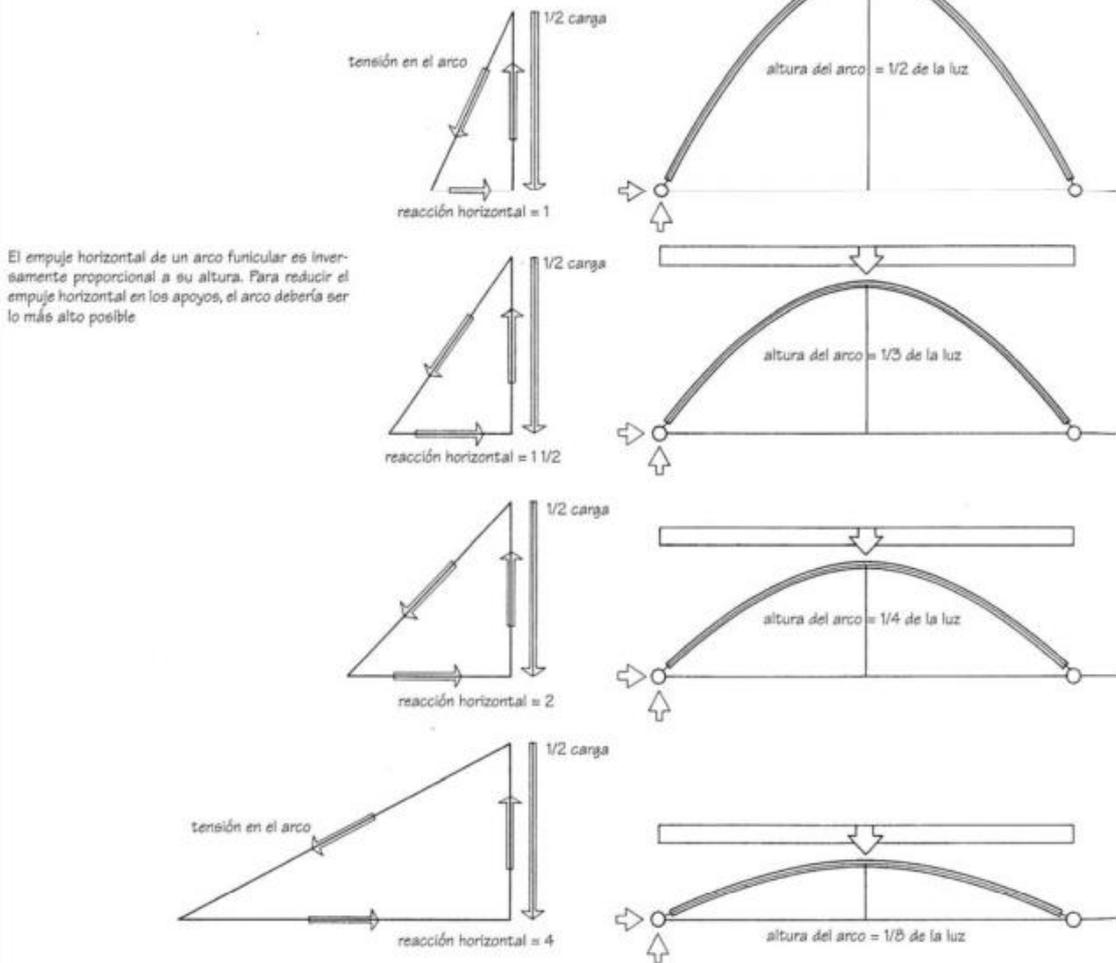


Figura 19: Formas de tirante según fuerzas exteriores.

²³ Engel, 57.

El empuje horizontal en los apoyos es inversamente proporcional a la altura del arco. El arco necesita la mayor altura posible para reducir estos esfuerzos, y eso es precisamente lo que Gaudí utiliza en los campanarios y nave de la Sagrada Familia.

Influencia de la altura del arco en las reacciones en los puntos de apoyo



Comparación entre el mecanismo de una viga y de un arco



Figura 20: Reacciones horizontales en función de la altura.

2.7_Cúpula de las sacristías, campanarios y cimborrios.

Un aspecto estructural de la Basílica de la Sagrada Familia que debe tenerse en cuenta son las construcciones en altura, ya que deben de responder a las acciones horizontales de una forma determinada. Las acciones horizontales son contempladas como seísmos y acción del viento, y las doce torres campanario y los seis cimborrios han tenido que responder a este aspecto.

A medida que han pasado los años, la normativa respecto a las acciones horizontales ha sido cada vez más exigente, aunque también ha ido de la mano con los avances tecnológicos en materia de edificación. Nuevas técnicas constructivas y el desarrollo de materiales cada vez más resistentes y duraderos han permitido llevar a cabo la obra que un día Gaudí soñó con hacer realidad.

Debemos así empezar por los doce campanarios correspondientes a las tres portadas de la Basílica. Gaudí, en su descripción del templo a edades tempranas ya dejó constancia que deberían ser doce campanarios, correspondientes a los apóstoles. La forma de estos tuvo sus ensayos en el proyecto para las Misiones Franciscanas de Tánger o en la Catedral de Mallorca²⁴. La verticalidad de estos elementos es algo que el arquitecto estima oportuno en las celebraciones litúrgicas, algo que también es patente en las catedrales de estilo gótico. Aunque con una diferencia importante: estas iglesias sitúan uno o dos campanarios en la portada principal, mientras que la Sagrada Familia ostenta doce. A parte de la razón simbólica representativa, se debe también a una justificación estructural ya que unos campanarios tan esbeltos funcionarían mejor anclados por dos pares.

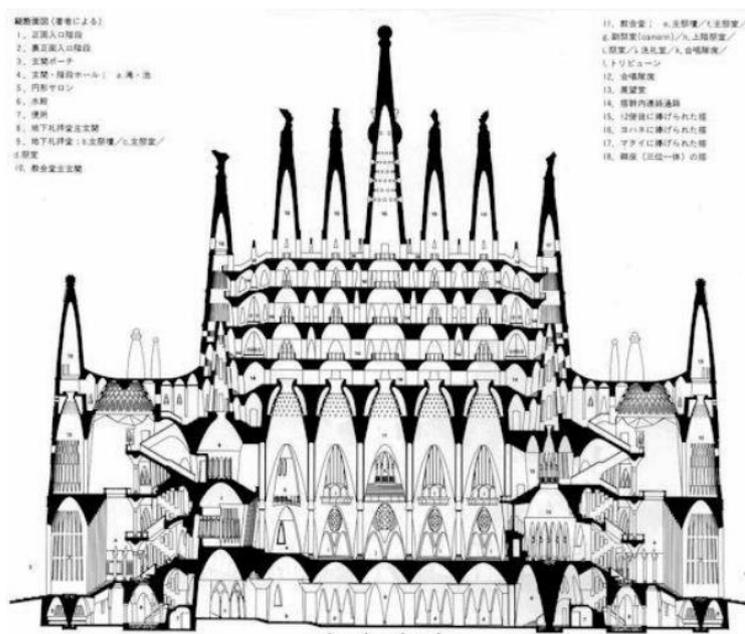


Figura 21: Proyecto para las Misiones Franciscanas de Tánger.

²⁴ Reig Martínez, "EL ESPACIO CELEBRATIVO COMO CONFIGURADOR DEL PROYECTO ARQUITECTONICO DE LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDÍ," 471.

Los campanarios siguen la forma de un arco funicular muy verticalizado, algo que ya se ha explicado con anterioridad en estas páginas. La principal diferencia con los cimborrios se puede observar a simple vista: se aprecian unos nervios verticales que componen las torres, con unas formas inclinadas hacia abajo. Estas formas son tornavoces para dirigir el sonido de las campanas que albergan en su interior hacia los feligreses situados en la planta baja del templo.

La cúpula de la sacristía es importante destacarla ya que para Gaudí fue de vital importancia determinar su forma para servir de modelo de los cimborrios. Para ello se sirvió de maquetas de yeso que en el futuro se han podido reinterpretar.

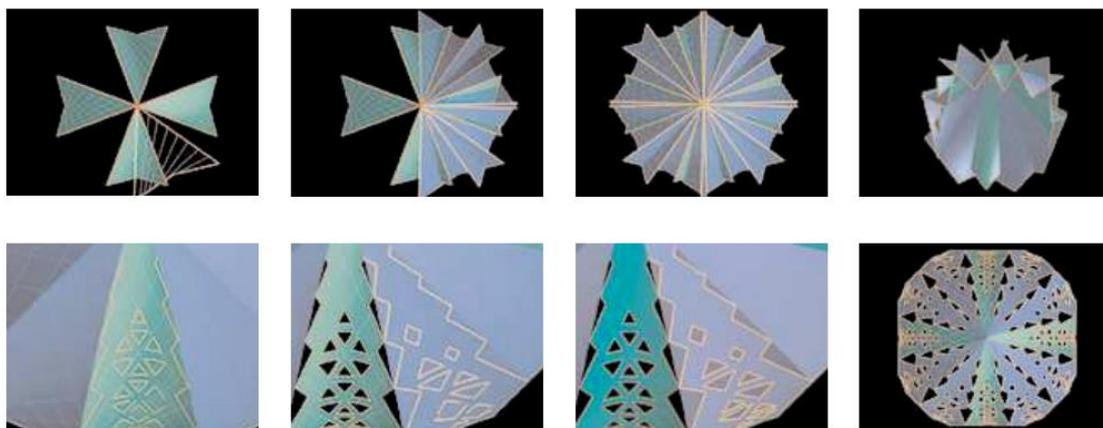


Figura 22: Intersección de paraboloides hiperbólicos de la Sacristía.

La geometría de esta estructura es el resultado de la intersección de paraboloides hiperbólicos, en concreto de doce, con un resultado de estructura resistente óptima²⁵. Los paraboloides hiperbólicos que la forman cuentan con una serie de huecos triangulares. Estos vacíos se crean del resultado de macizar las generatrices de la superficie cuádrica. Como vemos estas formas proporcionan al arquitecto la suntuosidad y estética que deseaba, pero siempre teniendo en cuenta la naturaleza estructural de la masa construida.

Por su parte, los seis cimborrios, más altos que los campanarios de las portadas, se construyen con un sistema más avanzado que el que se utilizó anteriormente. Las torres más altas del templo recuperan la piedra natural propia de la Fachada del Nacimiento que pudo construir Gaudí en vida²⁶. Pero para poder responder de una manera más contundente a las acciones horizontales, se implementa la técnica del postesado de la piedra. Se prefabrican los paneles formados por varias piezas de piedra natural, con cavidades interiores listas para albergar las barras de acero que se tensarán para unir las piezas. Los paneles se arriostran horizontalmente con piezas que forman anillos cada

²⁵ Giralt-Miracle, *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*, 86.

²⁶ Espel et al., "La Evolución de La Construcción Del Templo de La Sagrada Familia."

cierto nivel, dependiendo del tamaño de las piezas que varían con las alturas de las torres.

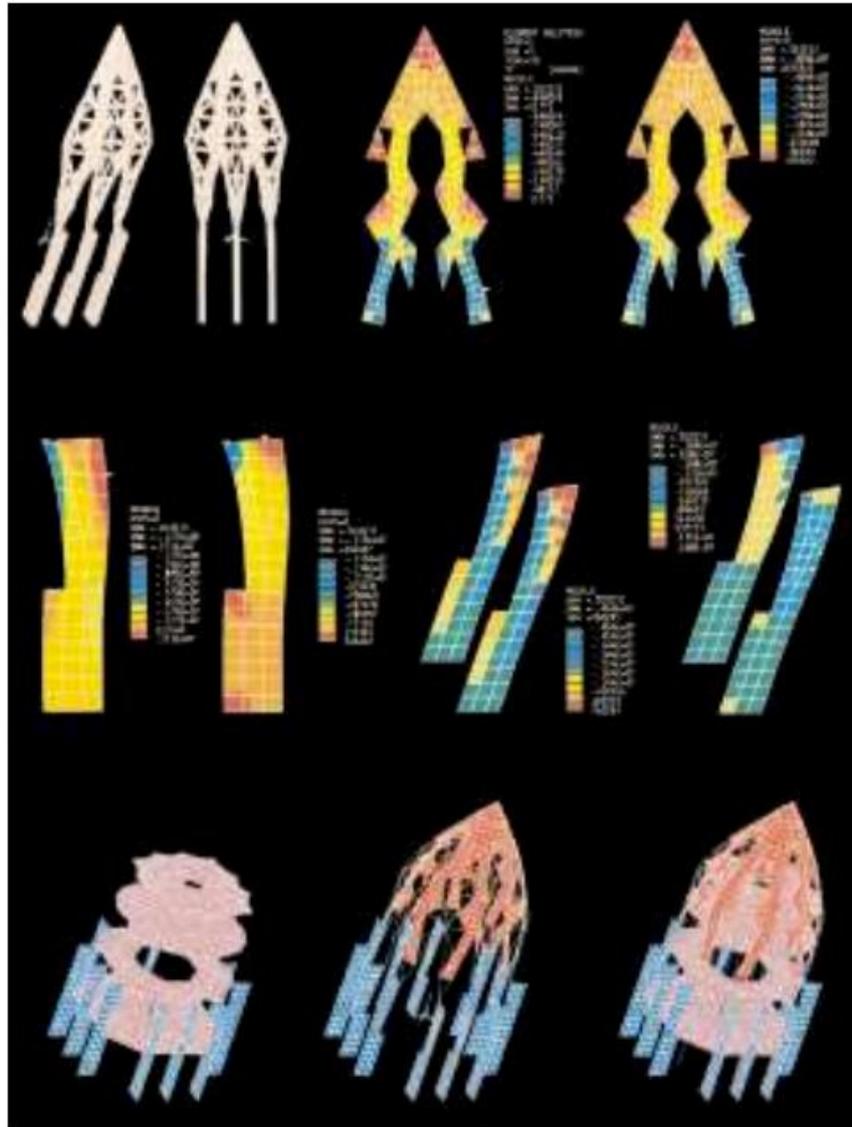


Figura 23: Cálculo de una de las torres de la sacristía.



Figura 24: Paneles prefabricados de piedra postesada.

2.8_Columnas del templo.

Las columnas de la Basílica de la Sagrada Familia son elementos estructurales cuya forma se debe a determinaciones sustentantes, pero también con recursos que le aportan dinamismo, con clara alusión a formas arbóreas. La forma final es producto del pensamiento de conjunto del arquitecto.

La propia inclinación de estos soportes responde a las razones estructurales antes explicadas, siguiendo el trazado del arco funicular y equilibrio de los bloques que configuran las naves, recogiendo las cargas que se le transmiten desde las cubiertas y bóvedas superiores por medio de las ramificaciones de su parte superior y luego concentrándolas en un elipsoide a modo de nudo.

Aun así, Gaudí tenía la intención de crear unas columnas que ostentaran movimiento²⁷, algo que se buscaba ya con las columnas salomónicas de otras épocas. Tuvo diferentes ensayos en las columnas del Parc Güell o en los pétreos ondulantes de la Casa Milà, pero es en su gran obra, la Basílica, donde culmina esta búsqueda.

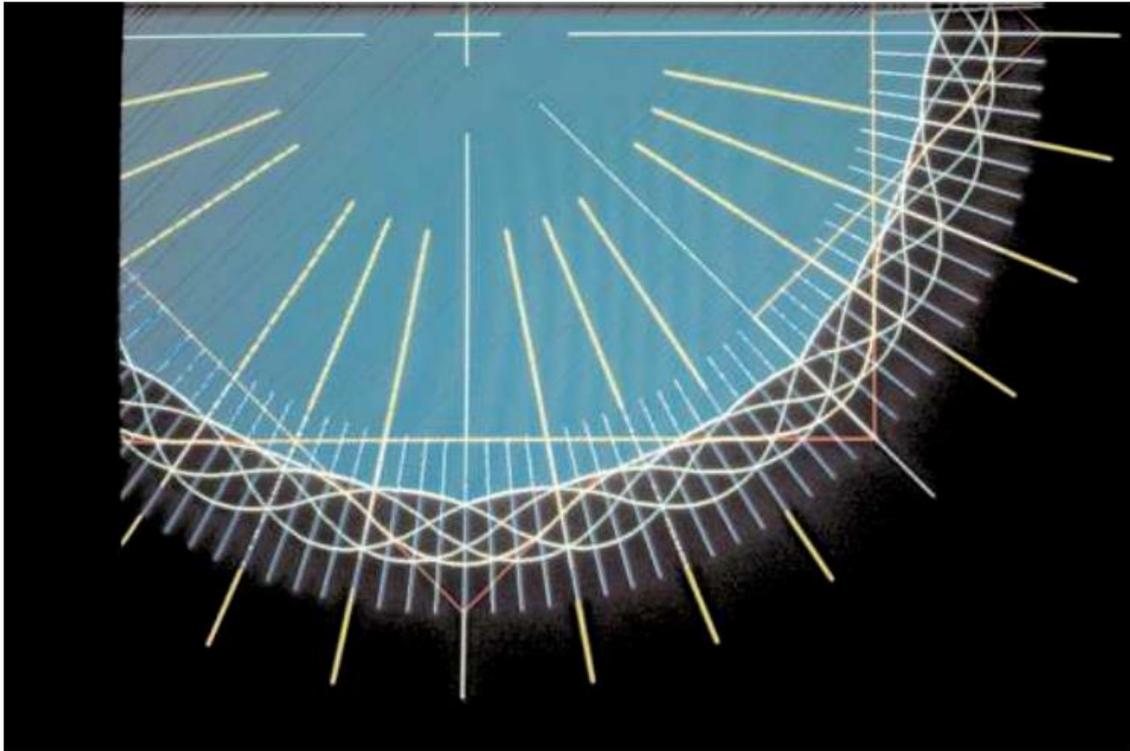


Figura 25: Sección superior de una columna de 8.

Del polígono estrellado de la base de la columna nacen dos helicoides que giran en sentidos opuestos, intersecándose a diferentes alturas, multiplicándose el número de aristas conforme se gana en altura hasta generar un cilindro. A partir de la columna que se levantó en la exposición conmemorativa de 1956, de piedra granítica, y de los moldes originales hechos por Gaudí y las plantillas de zinc, Jordi Bonet i Armengol pudo configurar un procedimiento unitario que permitía construir las columnas de diferentes alturas y de bases de polígonos variantes.

La secuencia de maclas de doble giro que causan la transición del polígono al círculo está presente en las ramificaciones a partir del capitel elipsoidal, así como en demás figuras poligonales que se intersecan en función de la necesidad estructural que se estimara. Para sostener, por ejemplo, la gradería de los cantores se pasa de un rectángulo que recoge las cargas de las bóvedas a un cuadrado con el primer giro, que pasa a ser un octógono con un segundo giro y así sucesivamente.

²⁷ Giralt-Miracle, *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*, 105.

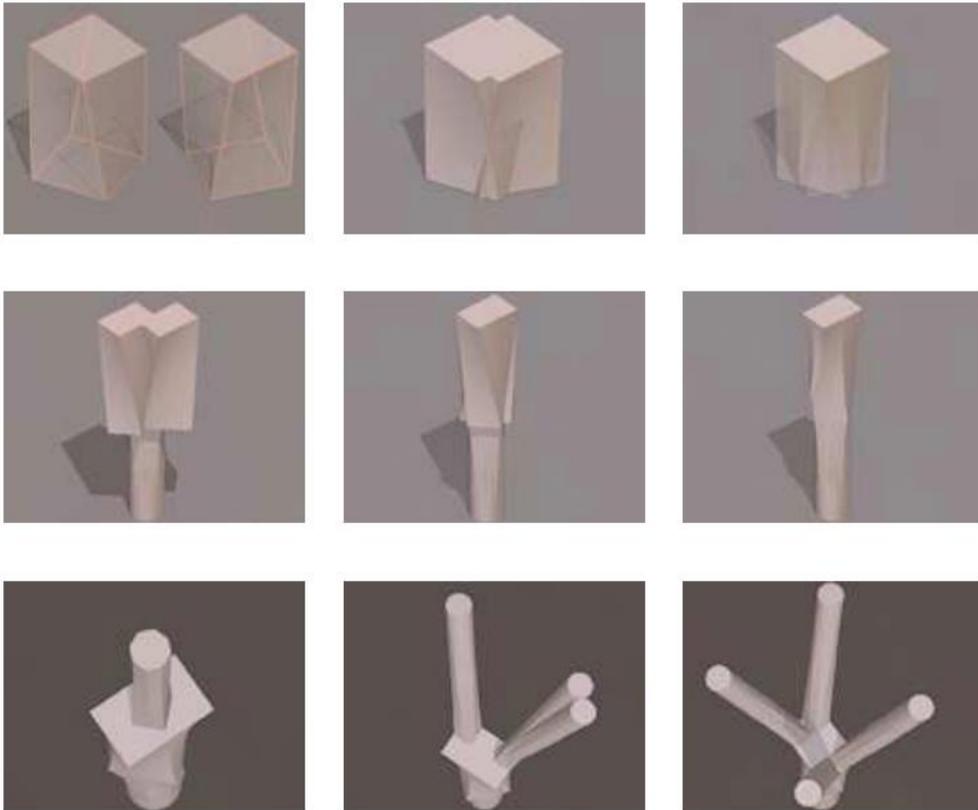


Figura 26: Columna rectangular de doble giro y arborescencia.

Inicialmente las columnas y muros se componían de un exterior de piedra rellenos de mampostería. Conforme han avanzado los años, se ha dado paso a los encamisados de piedra, pero en las zonas bajas de estos elementos, ya que las ramificaciones se construyen de hormigón visto²⁸. Para respetar las leyes generadoras de las columnas y las formas iniciales descritas por Gaudí, los soportes del transepto que deben resistir el peso de las torres de los evangelistas y de la de Jesús, han tenido que ser resueltas con hormigones de alta resistencia. Esto es un ejemplo más de la constatación de la intención de Gaudí de que el templo reflejara los avances de las generaciones futuras, aportando su tecnología y conocimiento.

²⁸ Espel et al., “La Evolución de La Construcción Del Templo de La Sagrada Familia,” 17.

2.9_Bóvedas.

Las bóvedas de la Sagrada Familia son una parte imprescindible de la confección del templo. A través de éstas la luz es dirigida y desparramada hacia los visitantes, ya sea mediante difusión de la luz natural o artificial. Contribuyen a crear la atmósfera envolvente del interior, reflejando su luz en las ramas de las columnas, naves y espacios de culto. Gaudí puso mucho esfuerzo en la definición de estas bóvedas, con el fin de transmitir a sus continuadores sus intenciones. Se sirvió de modelos de yeso, un recurso más tangible y visual que el papel. Para hallar las intersecciones entre las superficies, se servía de haces de luz provocados por una rendija, la cual dibujaba las generatrices en las formas. Todas estas superficies, gracias a su naturaleza geométrica, pueden ser macladas y repetidas de forma seriada para contribuir a crear el espacio interior.



Figura 27: Bóveda de las naves laterales.

El hiperboloide de una hoja de revolución y el paraboloides hiperbólico son las superficies regladas que se utilizaron para dar forma a la bóveda de las naves a modo de claraboya. Gracias a este tipo de curvas se resuelve la transición entre elementos y a transmitir las cargas entre ellos hacia las ramificaciones de las columnas, aunque no es la Basílica la primera obra del arquitecto donde se utilizaron, ya que encontramos el empleo de hiperboloides de revolución en la cúpula de las caballerizas de la Finca Güell²⁹.

²⁹ Giralt-Miracle, *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*, 113.

Veamos cómo las diferentes superficies se intersecan y marcan la continuidad de las formas, también relativas a su lógica estructural.

La forma básica de las bóvedas es el hiperboloide de una hoja vacío. La generatriz de esta superficie gira alrededor de una recta que no corta, la directriz. Cuando sustraemos de un prisma macizo cuatro hiperboloides de revolución también macizos, obtenemos la pieza que es sustentada por la rama de la columna, la cual se une con aquélla mediante un hiperboloide a modo de capitel. Para que estructuralmente se alargue el efecto del capitel disminuyendo el voladizo, se proyecta unos biseles que aportan rigidez.

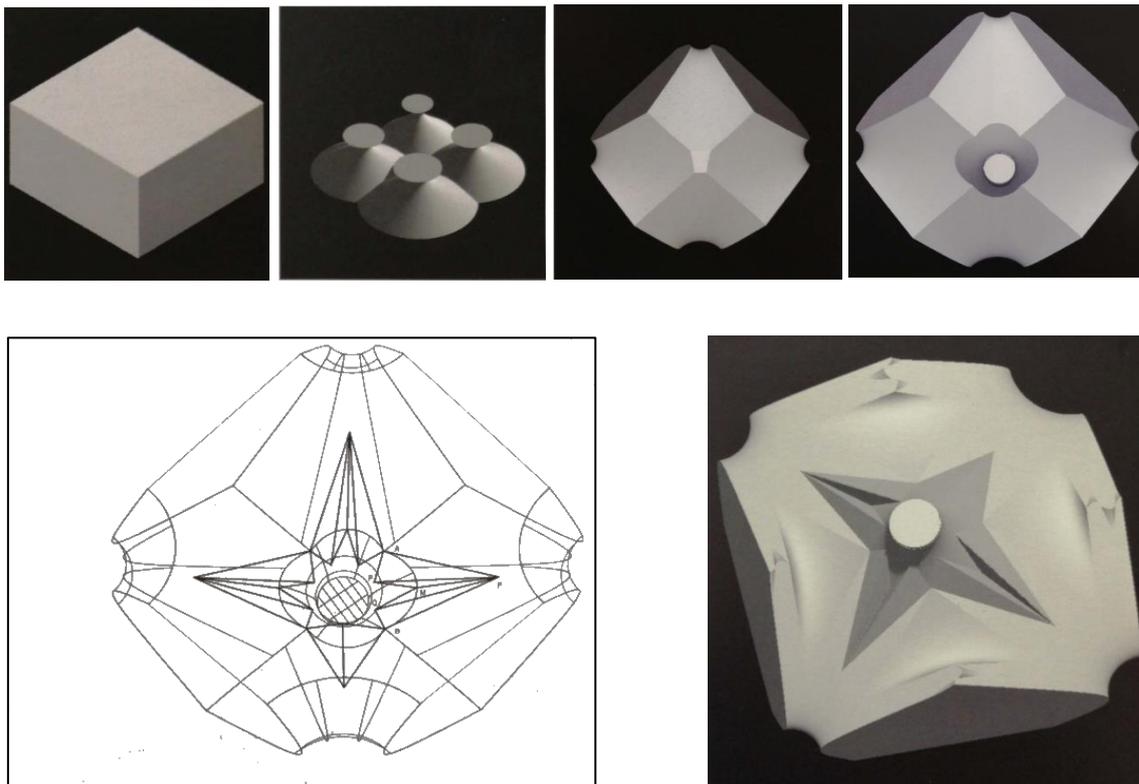


Figura 28: Secuencia de formación de la unidad de la bóveda.

Las intersecciones entre hiperboloides se suavizan con paraboloides hiperbólicos, que nacen de generatrices y directrices comunes. Encontramos también paraboloides en las decoraciones en las aristas que se intersecan, aunque siendo un elemento exclusivamente ornamental, también nace de generatrices y directrices de los hiperboloides. El uso de estas superficies con la ayuda asistida con ordenador permite la elaboración precisa de este conjunto.

Estas bóvedas abandonan el concepto de arco isostático del gótico. En su lugar, se busca una bóveda hiperestática para conseguir que las cargas sean lo más vertical posible y así obtener un conjunto rígido. Gaudí ya apuntó que debían estar construidas con un material que fuera capaz de dar rigidez, con un sistema que fuera armado

siguiendo las generatrices y directrices propias de las formas³⁰. Aunque a raíz de estas determinaciones puede interpretarse claras alusiones al hormigón armado, el hormigón de la época no reunía las condiciones necesarias.

A finales del siglo XX se construyeron con hormigón proyectado, seguido de hormigón vertido siguiendo las directrices de los hiperboloides. No era posible verter directamente el hormigón ya que el encofrado, al ser tan inclinado, provocaría el deslizamiento hacia el fondo. Para los hiperboloides correspondientes a la nave central se utilizó la técnica de la Volta Catalana, con barras de acero y tela metálica, colocando ladrillo visto. El resultado es de una textura singular con respecto a la de las naves laterales.

Las bóvedas constituyen son un conjunto hiperestático que maciza las zonas en las que se deben unir con las columnas, y provocando vacíos gracias a la naturaleza propia de las formas, que responden a la intención del arquitecto de la creación de la atmósfera interior del templo.



2.10_Ventanales.

Figura 29: Composición de diferentes unidades de bóveda con las columnas.

³⁰ Espel et al., "La Evolución de La Construcción Del Templo de La Sagrada Familia," 14.

Describir los ventanales de la Basílica es hacer un recorrido por una evolución formal y estructural de la arquitectura gaudiniana. Algunos de estos ventanales fueron construidos en vida por el arquitecto, otros los dejó proyectados, a manera de modelos de yeso que, aunque destruidos en la guerra civil, pudieron ser reconstruidos³¹ y redibujados a ordenador para una lectura más precisa. Estos ventanales y muros soportan su propio peso, ya que las bóvedas se sostienen por el entramado de columnas y sus ramificaciones, a excepción de los de la nave central.

Los ventanales, desde los construidos en la cripta bajo el ábside hasta los que se sitúan en la parte superior de la nave central, son todo un proceso de depuración y trabajo por parte de Gaudí. Los ventanales de la cripta y del ábside son de un marcado estilo neogótico, con mucha influencia del proyecto original de Francesc de Paula Villar, al que sucedió Antoni Gaudí. Ahora, es muy interesante fijarnos en los cambios que se realizan en los ventanales de la parte inferior de las naves laterales. Sigue siendo de raíces góticas, aunque se aprecia la intención de pulir las superficies, en un intento de dotar a la arquitectura tradicional de una mirada postindustrial³². De estos ventanales se conservó un dibujo de Rubió del 1906, que muestra sus tracerías y rosetones en la parte superior.

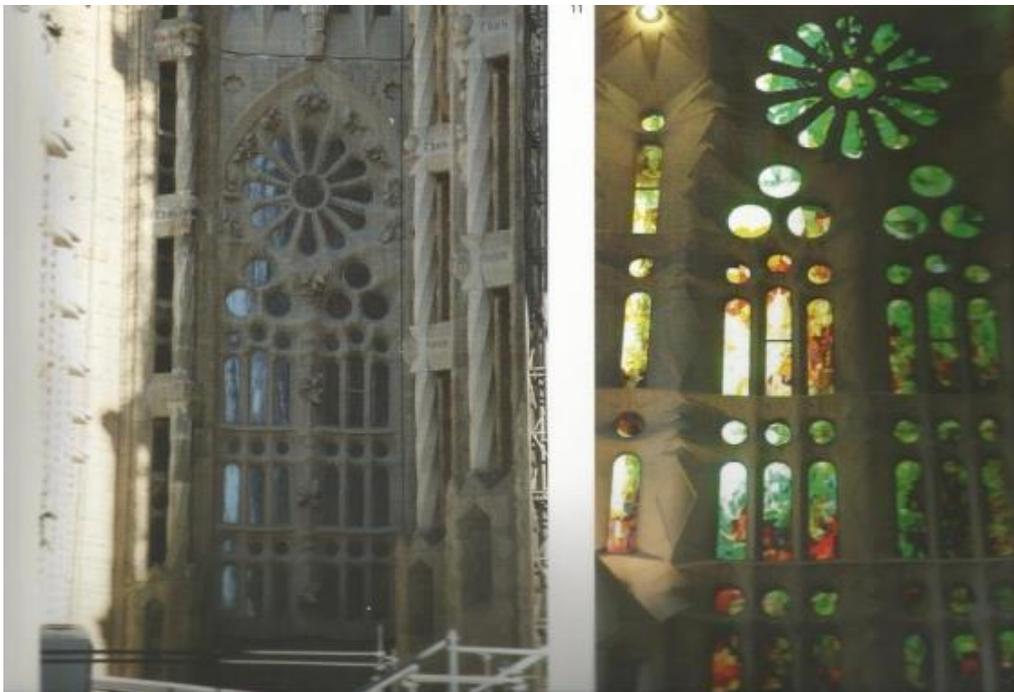


Figura 30: Exterior e interior de los ventanales inferiores de la nave lateral.

³¹ Gómez et al., *La Sagrada Familia : de Gaudí al CAD*, 83.

³² Gómez et al., 82.

A partir de aquí, vemos ya una geometría que, aunque inspirada en el neogótico, surge de superficies regladas en las tracerías y molduras, creando vacíos y llenos con estos elementos, de un trabajo más abstracto. Las proporciones que se usan para su construcción no nacen de las que puedan haberse usado en anteriores catedrales góticas, además del empleo del ventanal elíptico. El ventanal de la nave central, de la parte superior de la Basílica, ya se puede decir que presenta un estilo propiamente gaudiniano.

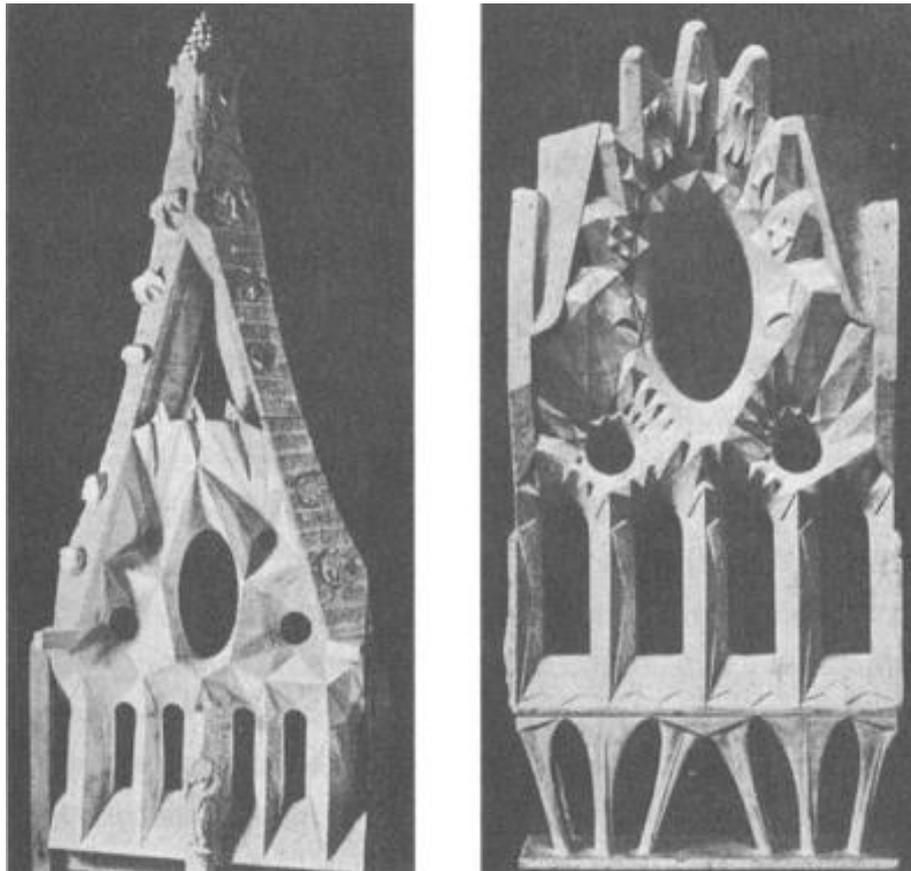


Figura 31: Ventanales de la parte superior de la nave lateral y de la nave central.

2.11_ El arquitecto.

Obra

Antoni Gaudí i Cornet ha sido un arquitecto singular. Su obra construida es el legado que nos ha llegado hasta nuestros días, correspondiente a sus diferentes etapas arquitectónicas, de las cuales la más famosa y con más repercusión internacional es la intermedia, la correspondiente a la modernista³³.

Estas etapas se diferencian en los materiales con los que llevaba a cabo sus obras. A la primera pertenece por ejemplo el colegio de las Teresianas, con un nivel alto de austeridad de materiales. En su segunda época, de arquitectura más complicada, la ejecución de sus proyectos conlleva una importante inversión económica. La Casa Milá fue construida en este periodo, destacando por formas libres, que llegaron a realizarse gracias a una estructura de acero que soportan la piedra curva exterior, con la complicación estructural que esto conlleva. En los últimos años de la ejecución, el interés por el modernismo había decaído, con el inconveniente especulativo que ello conlleva. La cripta de la Colonia Güell, que se proyecta entre 1898 y 1908, muestra cierta racionalidad en su concepción estructural, así como la fachada del Nacimiento de la Sagrada Familia, que pertenece también a esta etapa.



Figura 32: Parte del taller de Gaudí en la Sagrada Familia.

³³ Gómez et al., 60.

La última época pertenece prácticamente al trabajo de proyección de la Basílica, en sus maquetas y la geometría de los pináculos. Las partes construidas reflejan el recorrido mencionado. La cripta, el ábside y cimientos se ligan a los primeros años, mientras que la fachada del Nacimiento a la siguiente, con un trabajo muy estrecho con los artesanos. A partir de este momento, las superficies regladas y su correspondiente relación con la estructura son clave en la construcción posterior.

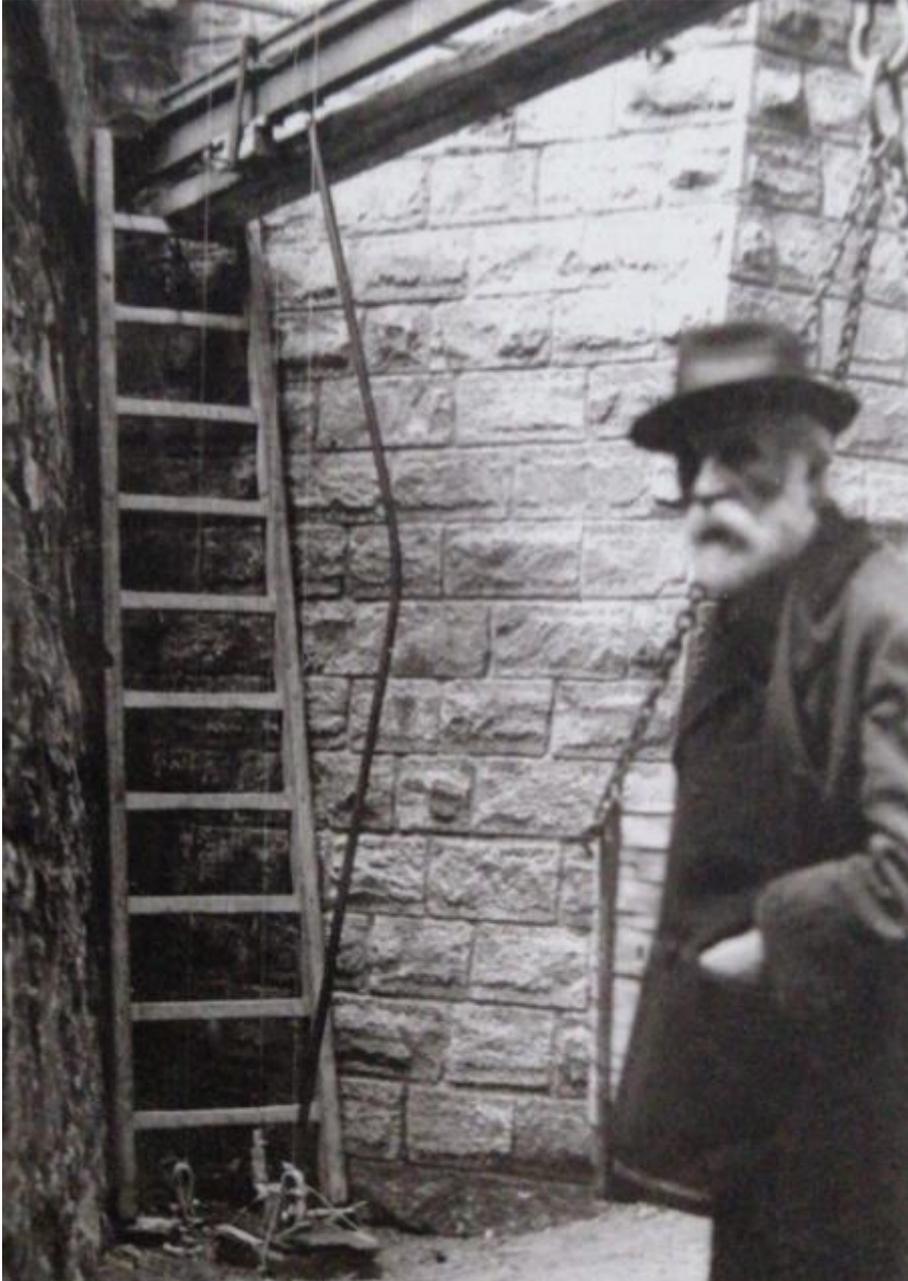


Figura 33: Antoni Gaudí i Cornet en las obras de la Basílica de la Sagrada Familia.

Biografía

Nace el 25 de junio de 1852 en Reus. Su padre calderero le enseña el oficio, cultivando su percepción espacial. A edad temprana, por dolores articulares, invierte muchas horas en el campo, donde observa la naturaleza y le inspira en el futuro. Estudia en Reus, en el colegio Berenguer, para luego cursar bachillerato en el instituto Escolapios también de Reus.

En 1873 comienza sus estudios de arquitectura en Barcelona, donde se traslada con su familia, la cual vendió sus propiedades para poder costear los estudios de su hermano y él. Consigue en estos años trabajar de delineante de maquinaria para percibir ingresos en Pedrós y Borràs³⁴, etapa en la que también colabora con Francesc de Paula Villar, en la que elabora diversos proyectos. Su hermano y su madre mueren en un corto espacio de tiempo, afectando emocionalmente a Gaudí.

Después de titularse, en 1878 realiza proyectos pequeños, gracias a los cuales conoce a Eusebi Güell, el que sería prácticamente su mecenas. En estos años también comienza a trabajar en la casa Manuel Vicens. En 1882 es ayudante en el estudio de Joan Martorell, realizando diversos proyectos, los cuales la mayoría no se construyen. En 1888 termina las obras de la Casa Vicens y se hace cargo de la Sagrada Familia, a la vez que también construye el Palau Güell. Un año después finalizaría el Colegio de las Teresianas de San Gervasi.

Desde 1893 a 1898 trabaja en el proyecto de las misiones católicas de los franciscanos de África, que no se lleva a cabo. En 1900 le entregan el premio del Ayuntamiento de Barcelona por la Casa Calvet. Hacia 1902 viaja a Palma para restaurar su catedral. Termina la reforma de la Casa Batlló en 1906, año en que muere su padre, en 1909 las Escuelas Provisionales de la Sagrada Familia y en 1910 la Casa Milá, habiendo empezado a construirse la cripta de la Colonia Güell en 1908. Sigue viajando a Palma para continuar con la reforma, hasta que en 1914 muere Francesc Berenguer y se centra en el proyecto de la Sagrada Familia. En 1925 pasa a vivir en el templo, muriendo el 10 de junio del año siguiente.

³⁴ Giralt-Miracle, *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*, 160.

3_Conclusiones.

La visión que Gaudí nos aporta sobre la relación entre estructura y forma varía a lo largo de su trayectoria profesional, con la culminación de este desarrollo en la Basílica de la Sagrada Familia. Por ello, la madurez del arquitecto, su afán por transmitir su trabajo a generaciones posteriores y sus pensamientos, culminan en una obra que ejemplifica el tema del presente trabajo.

La investigación inicial centrada en la evolución histórica de la Basílica y en el contexto histórico que rodea al arquitecto es importante en la medida de la concepción misma de la forma. Sabiendo Gaudí que no podría ver su obra terminada, decidió construir la obra por fases, dedicando muchos años de su vida a proyectar cómo debían ser las restantes partes. Las superficies regladas serían la geometría adecuada.

El interés en el funcionamiento estructural del Templo deriva en un estudio del funcionamiento sustentante de la Cripta de la Colonia Güell. Esta obra nos enseña la manera de proyectar del arquitecto, de un sentido interactivo, en la cual la forma y el funcionamiento de la transmisión de las cargas a través de ella surgen conjuntamente. En la Basílica, este precepto también se aplica. La geometría final es resultado de la

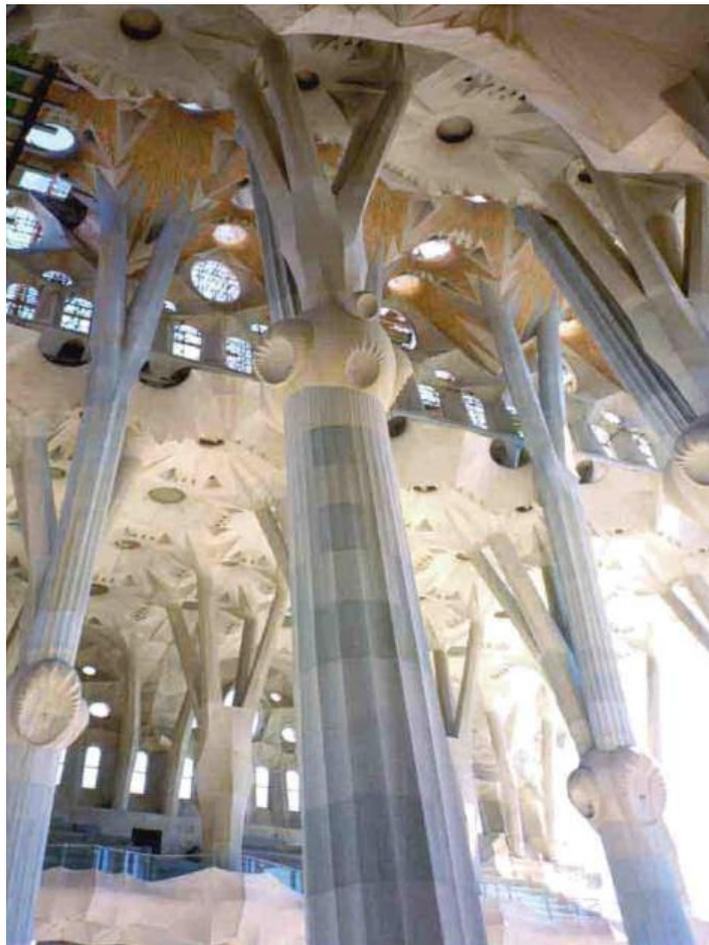


Figura 34: Interior del Templo.

verticalización de las cargas, de la intención de recoger los esfuerzos, que se suponen verticales gracias a su naturaleza constructiva y geométrica, y dotar de equilibrio a las partes que la componen.

También ha sido objeto de estudio la geometría de los elementos. Las superficies regladas son una herramienta formal muy ligada a la transmisión de esfuerzos y a su construcción, así como la plasticidad y continuidad visual que aportan. Los elementos contruidos con estas superficies tienen la razón sustentante que se ha podido apreciar en la elaboración de este trabajo, donde se explica pormenorizadamente las geometrías de aquéllos. Los avances materiales y de técnicas constructivas también se han adecuado a las formas pudiendo realizarlas conforme a lo estipulado por Gaudí, el cual ya tuvo en cuenta este desarrollo futuro, como bien hemos podido estudiar.

En definitiva, este estudio basado en el vínculo estructural y formal en la arquitectura se ha nutrido de la última obra de Gaudí, la cual nos enseña que la mecánica y la geometría se unen para dar lugar a un edificio cuanto menos icónico.

4_Bibliografía y fuentes.

Fuentes de figuras

Figura 1: Venteo, Daniel. *Sagrada Família desconeguda*. El Papiol: Efadós, 2015.

Figura 2: Venteo, Daniel. *Sagrada Família desconeguda*. El Papiol: Efadós, 2015.

Figura 3: Puig Boada, Isidre. *El Temple de la Sagrada Família*. Barcelona: Nou Art Thor, 1986.

Figura 4: Venteo, Daniel. *Sagrada Família desconeguda*. El Papiol: Efadós, 2015.

Figura 5: Brandolini, Ana María. *Gaudí... y su Sagrada Família*.

<<https://anamariabrandolini.wordpress.com/2020/01/01/gaudi-y-su-sagrada-familia/>> [Consulta: 23 de junio de 2021]

Figura 6: Barcelona Turisme. *Cripta Gaudí - Colonia Güell*.

<<https://www.barcelonaturisme.com/wv3/es/page/2897/colonia-guell.html>> [Consulta: 26 de junio de 2021]

Figura 7: Javiermes. *Maqueta funicular de la iglesia de la colonia Güell usada por Gaudí*.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Maqueta_funicular_de_la_iglesia_de_la_colonia_Güell_usada_por_Gaudí.jpg> [Consulta: 26 de junio de 2021], CC BY-SA 4.0.

Figura 8: Tarragó, Salvador. *Miscel·lània*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2013.

- Figura 9: Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunwerg, 2002.
- Figura 10: Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunwerg, 2002.
- Figura 11: Tarragó, Salvador. *Miscel·lània*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica, 2013.
- Figura 12: Tarragó, Salvador. *Miscel·lània*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica, 2013.
- Figura 13: Tarragó, Salvador. *Miscel·lània*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica, 2013.
- Figura 14: García, José. *7 documentales sobre catedrales que no te puedes perder*. <<https://www.seccion.es/construccion/7-documentales-sobre-catedrales-que-no-te-puedes-perder/>> [Consulta: 27 de junio de 2021].
- Figura 15: Puig Boada, Isidre. *El Temple de la Sagrada Família*. Barcelona: Nou Art Thor, 1986.
- Figura 16: Puig Boada, Isidre. *El Temple de la Sagrada Família*. Barcelona: Nou Art Thor, 1986.
- Figura 17: Tarragó, Salvador. *Miscel·lània*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica, 2013.
- Figura 18: Engel, Heino. *Sistemas de Estructuras*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.L., 2006.
- Figura 19: Engel, Heino. *Sistemas de Estructuras*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.L., 2006.
- Figura 20: Engel, Heino. *Sistemas de Estructuras*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.L., 2006.
- Figura 21: Reig Martínez, Juan Ángel. "EL ESPACIO CELEBRATIVO COMO CONFIGURADOR DEL PROYECTO ARQUITECTÓNICO DE LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDÍ." Universitat Politècnica de València, 2016.
- Figura 22: Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunwerg, 2002.
- Figura 23: Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunwerg, 2002.
- Figura 24: Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família. *¿De qué hablamos cuando hablamos de piedra tesada?*. <<https://blog.sagradafamilia.org/es/divulgacion/piedra-tesada/>> [Consulta: 20 de junio de 2021]

Figura 25: Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunwerg, 2002.

Figura 26: Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunwerg, 2002.

Figura 27: Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunwerg, 2002.

Figura 28: Gómez, Josep, Jordi Coll, Juan C. Melero, and Mark C. Burry. *La Sagrada Familia : de Gaudí al CAD*. Barcelona: Edicions UPC, 1996.

Figura 29: Gómez, Josep, Jordi Coll, Juan C. Melero, and Mark C. Burry. *La Sagrada Familia : de Gaudí al CAD*. Barcelona: Edicions UPC, 1996.

Figura 30: Reig Martínez, Juan Ángel. "EL ESPACIO CELEBRATIVO COMO CONFIGURADOR DEL PROYECTO ARQUITECTONICO DE LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDÍ." Universitat Politècnica de València, 2016.

Figura 31: Tarragó, Salvador. *Miscel·lània*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, 2013.

Figura 32: Venteo, Daniel. *Sagrada Família desconeguda*. El Papiol: Efadós, 2015.

Figura 33: Venteo, Daniel. *Sagrada Família desconeguda*. El Papiol: Efadós, 2015.

Figura 34: Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunwerg, 2002.

Referencias

Engel, Heino. *Sistemas de Estructuras*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.L., 2006.

Espel, R, J Gómez, R Grima, and A Aguado. "La Evolución de La Construcción Del Templo de La Sagrada Familia." Article. *Informes de La Construcción* 61, no. 516 (2009): 5–20. <https://doi.org/10.3989/ic.08.057>.

Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunwerg, 2002.

Gómez, Josep, Jordi Coll, Juan C. Melero, and Mark C. Burry. *La Sagrada Familia : de Gaudí al CAD*. Barcelona: Edicions UPC, 1996.

Puig Boada, Isidre. *El Temple de la Sagrada Família*. Barcelona: Nou Art Thor, 1986.

Reig Martínez, Juan Ángel. "EL ESPACIO CELEBRATIVO COMO CONFIGURADOR DEL PROYECTO ARQUITECTONICO DE LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDÍ." Universitat Politècnica de València, 2016.

Tarragó, Salvador. *Miscel·lània*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, 2013.

Venteo, Daniel. *Sagrada Família desconeguda*. El Papiol: Efadós, 2015.

Bibliografía completa

- Cortés, A, A Samper, and B Herrera. "Geometric Determination of the Hyperbolic Paraboloids of the Vaults in the Entrance Porch to the Crypt of Colònia Güell by Antoni Gaudí." Article. *Informes de La Construcción* 71, no. 554 (2019). <https://doi.org/10.3989/ic.63691>.
- Engel, Heino. *Sistemas de Estructuras*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.L., 2006.
- Escales, Carme. *Tras los andamios de la Sagrada Familia*. Barcelona: UOC, 2014.
- Espel, R, J Gómez, R Grima, and A Aguado. "La Evolución de La Construcción Del Templo de La Sagrada Familia." Article. *Informes de La Construcción* 61, no. 516 (2009): 5–20. <https://doi.org/10.3989/ic.08.057>.
- Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família. *¿De qué hablamos cuando hablamos de piedra tesada?*. <<https://blog.sagradafamilia.org/es/divulgacion/piedra-tesada/>> [Consulta: 20 de junio de 2021]
- Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família. *¿Qué singularidades presentan los paneles de la torre de Jesucristo?*. <<https://blog.sagradafamilia.org/es/divulgacion/paneles-torre-de-jesucristo/>> [Consulta: 20 de junio de 2021]
- Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família. *La construcción de las torres del templo: así ha ido evolucionando*. <<https://blog.sagradafamilia.org/es/divulgacion/construccion-torres/>> [Consulta: 20 de junio de 2021]
- Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família. *Los paneles de piedra tesada: estructura y componentes*. <<https://blog.sagradafamilia.org/es/especialistas/los-paneles-de-piedra-tesada/>> [Consulta: 20 de junio de 2021]
- Fuster, Albert. "Gaudi, myth or reality?" Article. *Perspective (Paris. 2006)*, no. 2 (2009): 301. <https://doi.org/10.4000/perspective.1388>.
- Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí. La búsqueda de la forma : espacio, geometría, estructura y construcción. [Exposición]*. Barcelona: Lunweg, 2002.
- Gómez, Josep, Jordi Coll, Juan C. Melero, and Mark C. Burry. *La Sagrada Familia : de Gaudí al CAD*. Barcelona: Edicions UPC, 1996.
- Labarga García, Fermín. "La Sagrada Familia según Gaudí." Article. *Anuario de historia de la Iglesia*, no. 21 (2012): 623–24.
- Puig Boada, Isidre. *El Temple de la Sagrada Família*. Barcelona: Nou Art Thor, 1986.
- Romea, Carles. *Una visión estructural de la Sagrada Familia (II)*. < <https://www.e-zigurat.com/blog/es/vision-estructural-sagrada-familia/>> [Consulta: 3 de julio de 2021]

La relación entre forma y estructura en la arquitectura y en la ingeniería civil

Reig Martínez, Juan Ángel. "EL ESPACIO CELEBRATIVO COMO CONFIGURADOR DEL PROYECTO ARQUITECTONICO DE LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDÍ." Universitat Politècnica de València, 2016.

Tarragó, Salvador. *Miscel·lània*. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, 2013.

Venteo, Daniel. *Sagrada Família desconeguda*. El Papiol: Efadós, 2015.