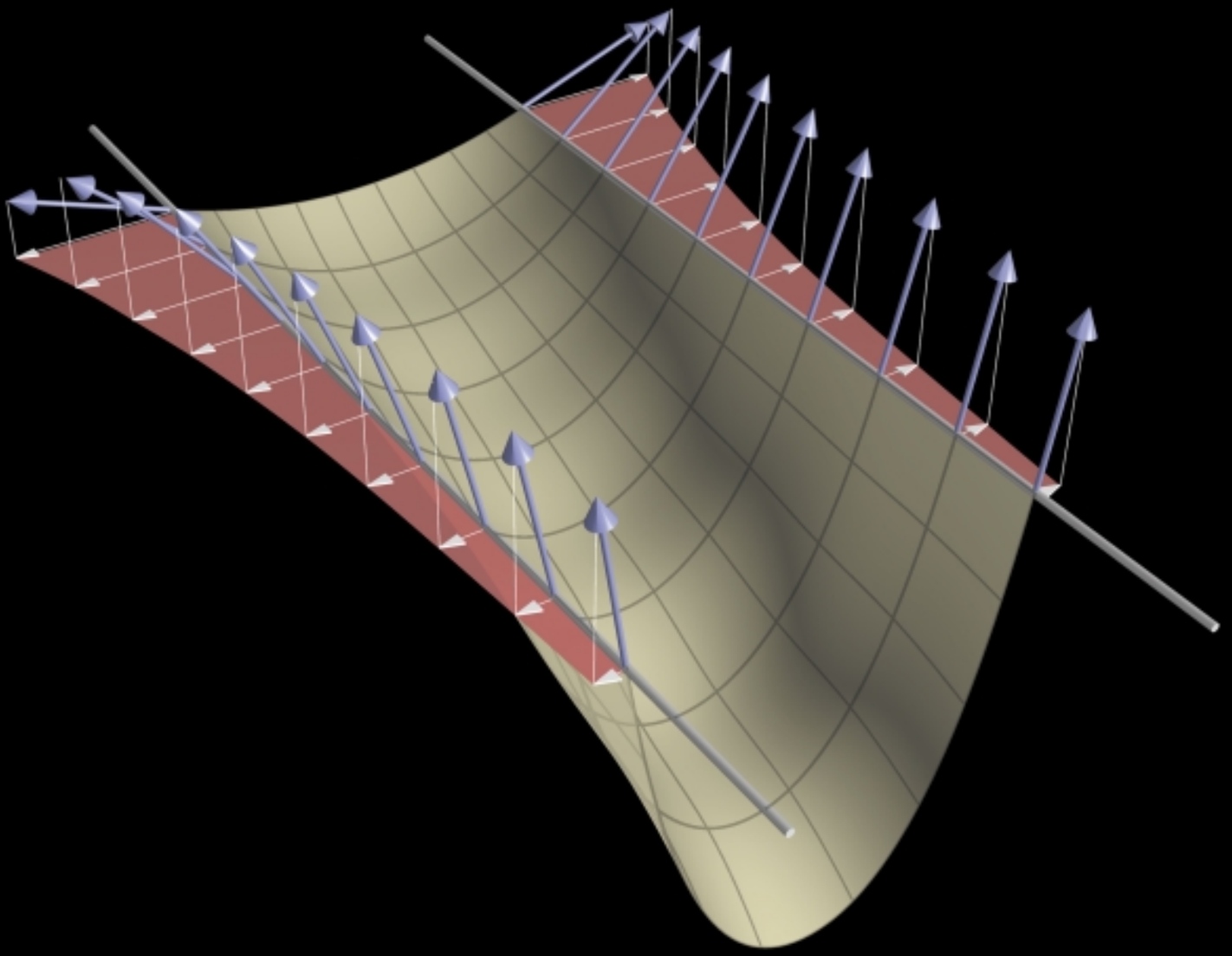
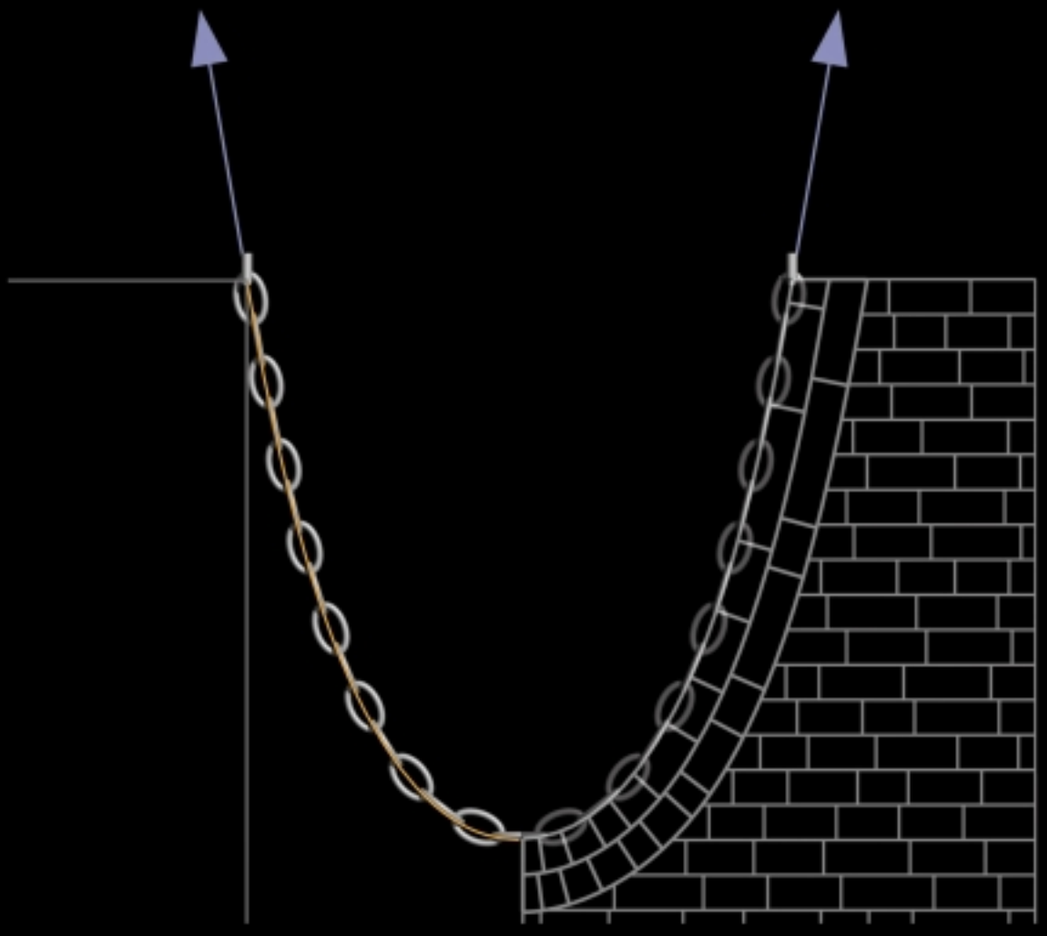
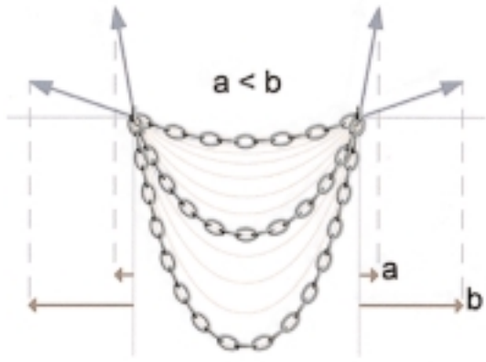
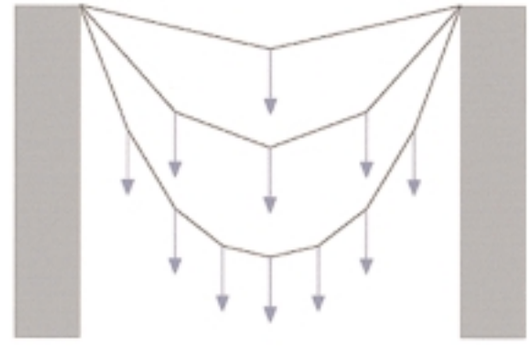




ARCOS CATENARIOS



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 soportan 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 clave 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 carpanel o elíptico; cuando la carga es uniforme horizontalmente, la forma es la de una parábola.

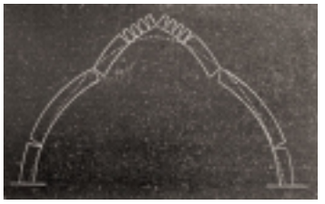
A pesar de la óptima calidad del arco funicular o catenario en cuanto a resistencia, durante mucho tiempo se consideró que tenía una forma poco elegante y de difícil carga en los pilares, y no se utilizó en la arquitectura tradicional, para la cual se consideraban mejores las formas de arcos circulares,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

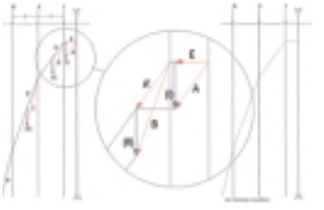


Representación funicular de Sterin (siglo XVII)

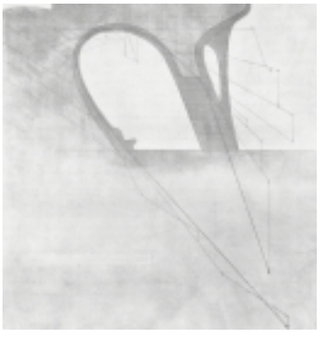




Rotura de arcos y funiculares según el texto de Scheffler, estudiado por Gaudí



Modelo de cálculo gráfico utilizado por Gaudí, según Cèsar Martinell

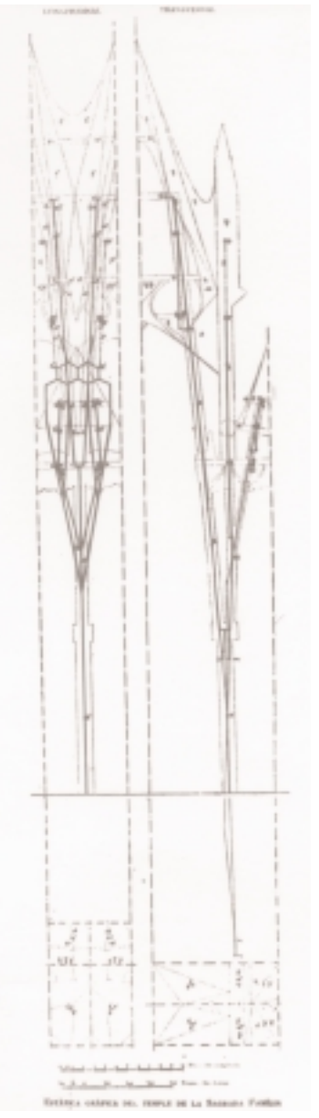


Cálculo gráfico del Parc Güell realizado por Rubió i Bellver, siguiendo el método de Gaudí

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

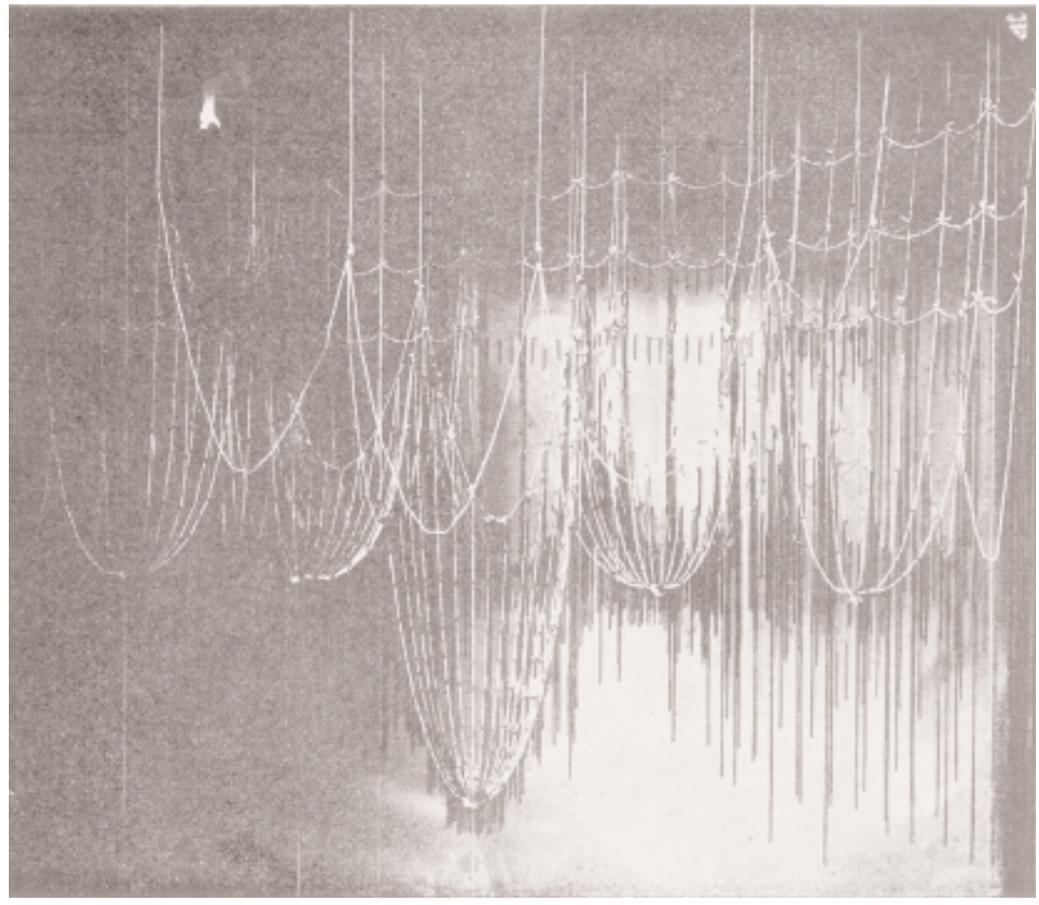




Cálculo funicular de la nave del templo de la Sagrada Família, publicado en 1923 en el *Anuario de Arquitectos*, y maqueta de la cubierta correspondiente a la parte superior del esquema de cálculo gráfico



Modelo funicular de la iglesia de la Colònia Güell



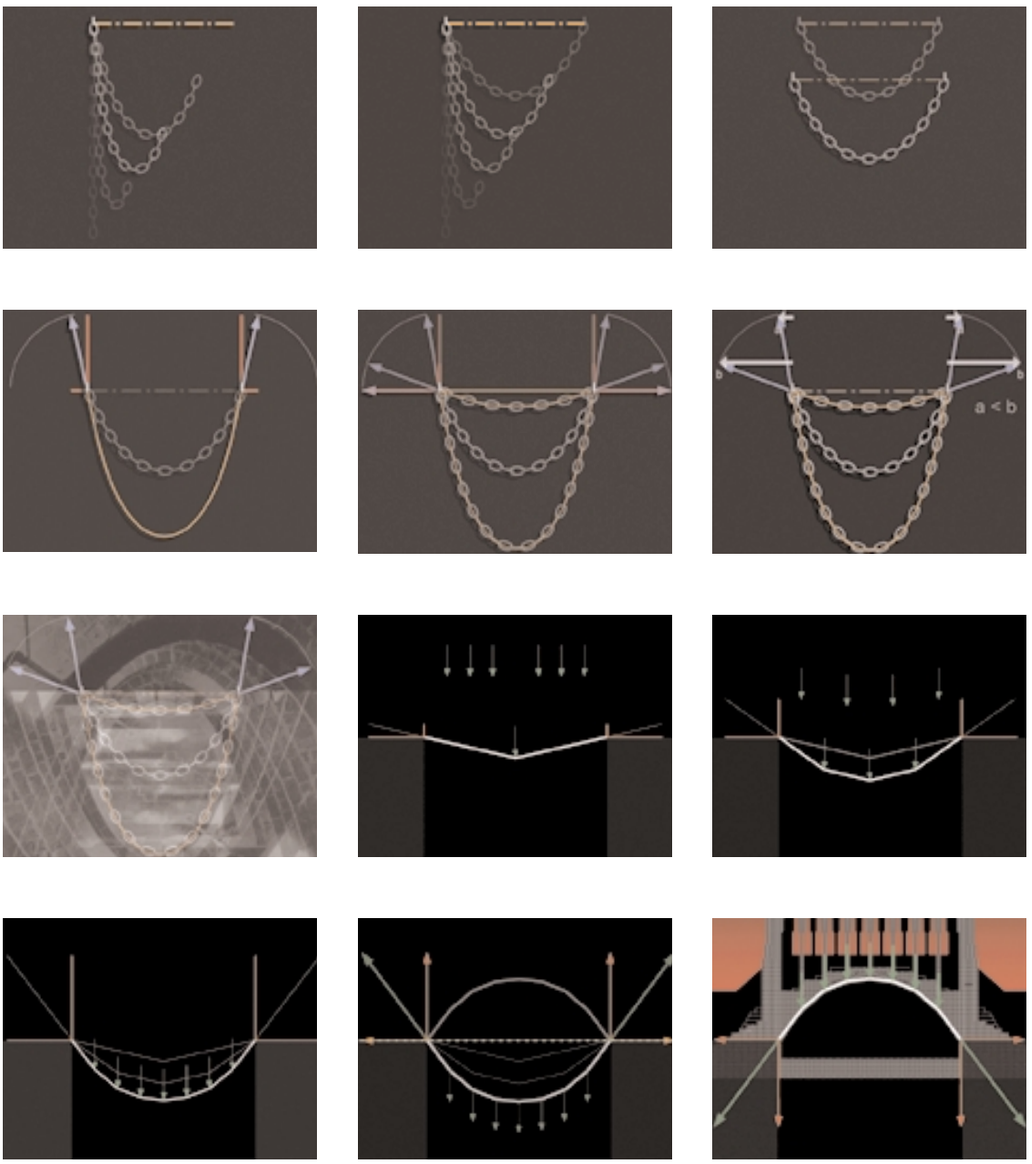
Primer estereofunicular utilizado por Gaudí y publicado en 1928 por Ràfols



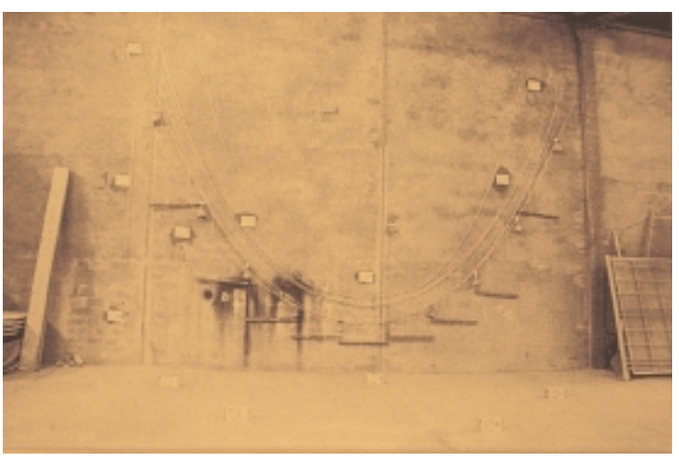
Modelo funicular de cálculo de la catedral de Palma de Mallorca, realizado por Rubió i Bellver siguiendo el método de Gaudí

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 movible 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,

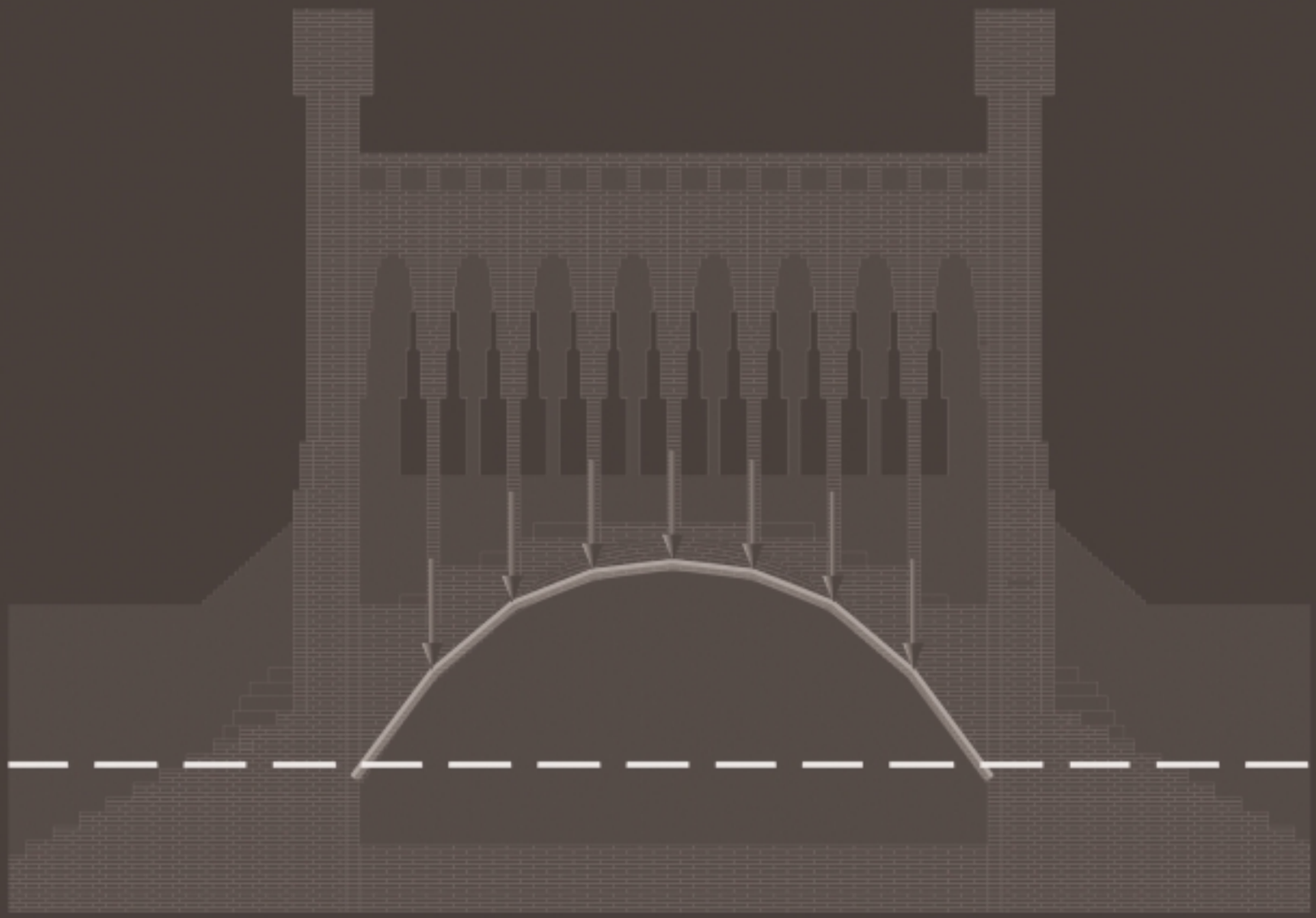


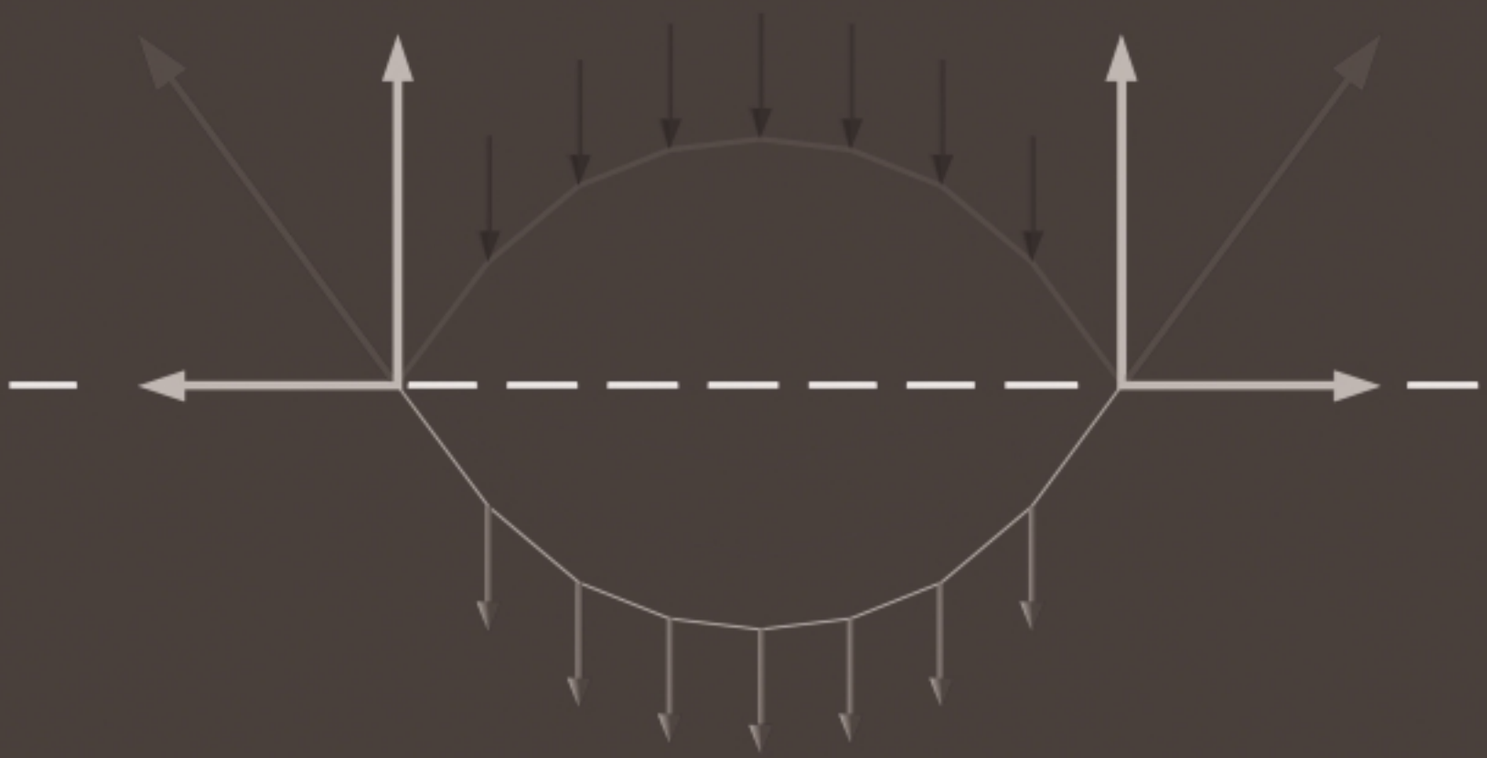
Secuencia geométrica de imágenes de arcos catenarios y funiculares y su comportamiento



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 Colònia Güell en 1914 suspendió el trabajo en la maqueta, con el deseo, sin embargo, de continuarlo.

«La estructura definitiva de la Sagrada Família la probó primero en la Colònia 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 Colònia Güell, según Gaudí, condicionó su último gran proyecto estructural: la nave y las torres del templo de la Sagrada Família. 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 desdobla 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 Colònia Güell. Determinó formalmente la cubierta y el tejado de la nave de la Sagrada Família 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 Família 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 Família los encontró gráficamente, y los de la Colònia Güell, experimentalmente, pero dice que ambos procedimientos son el mismo, el uno hijo del otro.» (Martinell, 1969)

J. G.-S.

