

# VIGENCIA DE LAS FORMAS ANTIFUNICULARES MODERNISTAS EN LA ARQUITECTURA E INGENIERÍA CONTEMPORÁNEAS

VALIDITY OF MODERNIST ANTIFUNICULAR SHAPES IN CONTEMPORARY ARCHITECTURE AND ENGINEERING

Juan José Jorquera Lucerga, Juan Manuel García Guerrero, Emilio Segado García

Juan José Jorquera Lucerga, Profesor, ETSI Caminos, CC y PP y de Ing. de Minas (UPCT) juanjo.jorquera@upct.es

Juan Manuel García Guerrero, Becario FPI, ETSI Caminos, CC y PP y de Ing. de Minas (UPCT) jm.guerrero@upct.es

Emilio Segado García, Estudiante de Doctorado, ETSI Caminos, CC y PP y de Ing. de Minas (UPCT) emilio.segado@upct.es

## RESUMEN

*En esta comunicación se muestra cómo los conceptos estructurales desarrollados en el Modernismo resultan todavía vigentes para los arquitectos e ingenieros estructurales modernos. Esta comunicación se centra en los modelos antifuniculares tridimensionales de Gaudí, y muestra como pueden ser entendidos no sólo como una herramienta de form-finding sino como una herramienta interactiva de diseño.*

*Se describe cómo Gaudí es precursor de diseñadores que usaban modelos colgantes para su trabajo, antes de la llegada de la informática aplicada al diseño estructural, como Isler y Otto. Hoy en día, cuando los ordenadores son tan habituales como potentes, se puede sacar todo el partido de los conceptos de Gaudí integrando diseño y fabricación controlados digitalmente.*

*Palabras clave: Funicular, form-finding, estructura tridimensional, construcción digital.*

## ABSTRACT

*In this paper, it is shown how the structural concepts developed during the Modernism are still valid for modern architects and structural designers. This paper focuses on Gaudí's three-dimensional antifunicular models, and shows how these models can be understood not only as a form-finding method but also as an interactive design tool.*

*The paper describes how Gaudí is a precursor of designers that used hanging chain models for their work, such as Isler and Otto, before spreading of computer-aided structural design. Now as computers are very common and powerful, they can make the most of Gaudí's concepts by integrating digitally controlled design and fabrication.*

*Keywords: funicular, form-finding, three-dimensional structures, digital construction*

## 1. INTRODUCCIÓN

El objeto de esta comunicación es resaltar la figura de los arquitectos del Modernismo, y destacar la vigencia hasta nuestros días de conceptos estructurales desarrollados en esta época. La comunicación se centra en Antonio Gaudí, quien supone el máximo exponente del veloz proceso de exploración formal que se desarrolla en la arquitectura (y que es posibilitado por la ingeniería) a primeros del S. XX. Dentro de su obra, la comunicación se

centra en cómo su método de construcción de modelos tridimensionales proyecta una sombra que llega hasta nuestros días, revisitado por los apabullantes métodos informáticos modernos.

Los autores somos conscientes de que sobre Gaudí se han escrito miles de páginas que pretenden fines tan diversos como explicar, disecionar, entender, justificar o simplemente alabar su genial figura, cuando no apropiárselo indebidamente para darse lustre. No pretende-

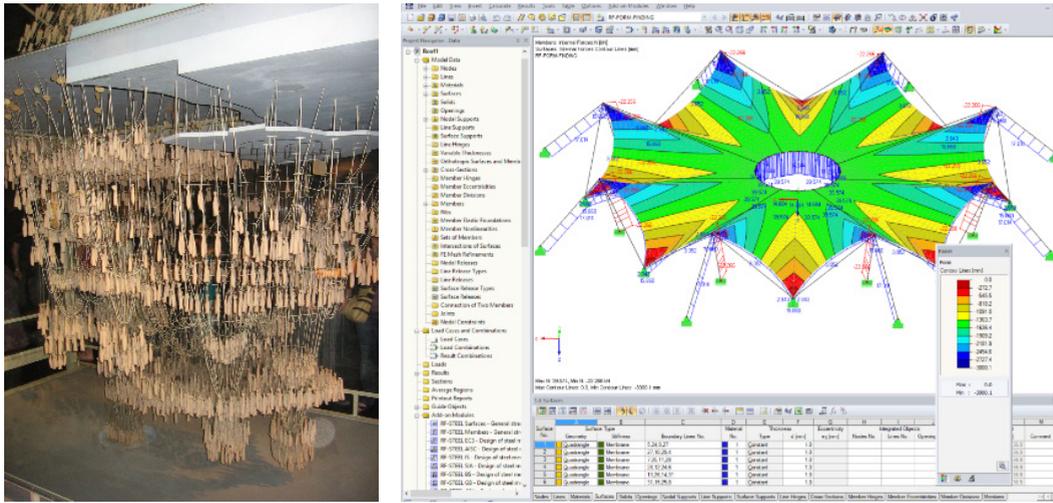


Figura 1. Modelo de alambres y saquitos de perdigones, que reproduce los mismos conceptos que el más moderno de los programas un siglo después.



Figura 2. Izquierda: Lo cotidiano del funicular: Ropa tendida en La Valeta (Malta) tomada de [www.planetadunia.com/](http://www.planetadunia.com/). Derecha: Ejemplo perfecto de catenaria ([www.parkingshop.es](http://www.parkingshop.es)).

mos un panegírico o una hagiografía. Tampoco somos los primeros en hablar de lo que hablamos aquí.

Esta ponencia es sólo parte del resultado de un proceso de búsqueda personal de los autores, de un acercamiento a Gaudí como Borges dijera de los clásicos, con previo fervor. Y el proceso nos ha fascinado: para entendernos, lo que hemos sentido al descubrir el rastro conceptual de Gaudí en los modernos métodos de form-finding nos ha generado una sensación parecida a la que intuimos que siente un cinéfilo cuando descubre cuánto deben las modernas bandas sonoras a Richard Wagner. En nuestra opinión, la diferencia que hay entre el modelo y la pantalla de ordenador de la Figura 1 es sólo tecnológica y no conceptual... casi nada.

En esta ponencia se habla primero del concepto de funicularidad y antifunicularidad, entendida la una como la imagen especular de la otra, y lo fructífero de este concepto en la historia de la construcción. Después se estudia cómo el proceso de construcción de modelos de Gaudí trasciende la comprensión de la estructura como un conjunto de planos prácticamente independientes, pues necesita por parte del proyectista de un acercamiento tridimensional al problema resistente. El modelo, como tal, es interactivo y debe ser entendido más como una herramienta de diseño que como una herramienta de búsqueda de forma.

El texto finaliza mencionando algunos de los sucesores que explotaron los conceptos implícitos en los métodos de Gaudí, tanto en forma de modelos físicos o experimentales como



Figura 3. Arco y su reflejo: Funicular y antifunicular (<http://marceloferreiro.com/>).

mediante simulaciones numéricas al hilo de la generalización de la informática.

## 2. CONCEPTO DE (ANTI) FUNICULARIDAD

La forma funicular es la forma que adopta un hilo infinitamente flexible (es decir, sin capacidad para resistir flexiones) cuando se sostiene entre dos puntos y está sometido a un estado de cargas. El concepto de funicular resulta muy intuitivo, pues se obtiene uno cada vez que se tiende la ropa (Figura 2, izquierda).

Un caso particular ocurre cuando la única carga que actúa sobre el hilo es su peso propio, constante por unidad de longitud de cable. La forma que adquiere entonces recibe el nombre de catenaria (del latín *catena*), como muestra la Figura 2 (derecha).

El concepto de *antifunicular*, como opuesto al funicular, se basa en una de las ideas más fructíferas de la historia de la construcción: la de que la forma correcta del arco (más propiamente, de su línea de presiones) es la forma invertida o espejular del cable. Al invertir el cable, lo que está traccionado queda comprimido y los tiros horizontales que en el cable tienden a acercar sus extremos se convierten en empujes horizontales que tienden a separar los arranques del arco. Probablemente esta idea se ha incorporado desde siempre y de modo inconsciente al oficio de los constructores al contemplar la forma de un puente su reflejo en aguas tranquilas (Figura 3).

Resulta difícil establecer lo antiguo de esta idea. Algunos hitos en el proceso de su comprensión son los trabajos pioneros de Simon Stevin, Galileo, Baldi, Huygens, Bernoulli, Gregory, La Hire y Coulomb, entre otros (Kurrer (2008) y Heyman (1998)). Parece que la primera formulación explícita de esta idea se debe a Hooke (1635-1703), que escribiría su famoso anagrama *Ut pendet continuum flexile sic stabit contiguum rigidum inversum* (que puede traducirse por “Así como pende el cable flexible se sostendrá el arco rígido”), idea que aplicó en el diseño de la cúpula intermedia que soporta la linterna de la Catedral de San Pablo de Londres (Figura 4).

Poleni usó este concepto, en 1748, como base teórica para analizar la estabilidad de la cúpula (mejor dicho, de uno de sus gajos) de San Pedro de Roma (Figura 5) ante la aparición de preocupantes fisuras, si bien sus aportaciones, muy avanzadas desde el punto de vista conceptual, pasaron desapercibidas para sus contemporáneos (Huerta, 2003).

## 3. FORM-FINDING EN EL MODERNISMO

Como no podía ser de otra manera, los arquitectos modernistas hacen uso, para sus diseños, de las herramientas técnicas y conocimientos teóricos disponibles en su época. En particular, a finales del S. XIX y principios del XX, medio siglo después de la aparición de la obra *Die graphische Statik* de Culmann, la herramienta más utilizada de “cálculo de estructuras” era la estática gráfica. La estática gráfica permite analizar estructuras bastante complejas (Figura 6), como puentes y celosías, y fue de común aplicación en la práctica de la ingeniería. Todavía hoy hay autores que vindican las posibilidades de la estática gráfica en la concepción de estructuras, como Allen y Zalewski (Allen y Zalewski, 2009) o Block y Oschendorf (Block et al, 2003).

Uno de los inconvenientes de la estática gráfica es que, si bien resulta de fácil aplicación para estructuras planas, no ocurre igual para estructuras tridimensionales. En este sentido, una de las aportaciones de Poleni es inferir que si la seguridad de un gajo, plano, de la cúpula de San Pedro es seguro, entonces la cúpula completa, espacial, lo será. De hecho, llama la atención

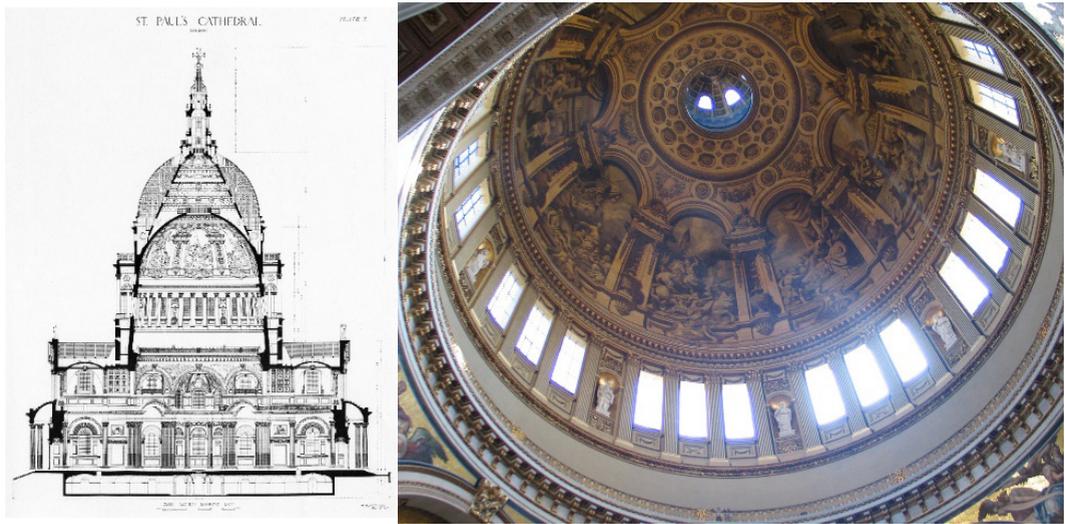


Figura 4. Izquierda: Sección transversal según A. Poley (1927) de la Catedral de San Pablo ([www.stpauls.co.uk](http://www.stpauls.co.uk)), donde se aprecia la cúpula intermedia que sostiene la linterna. Derecha: Interior de la cúpula.

que en obras de referencia sobre el tema como el libro de Wolfe de 1921 (Wolfe, 1921), en el que se detalla minuciosamente cómo se obtienen gráficamente desde momentos de inercia a momentos flectores, las cúpulas se analicen por gajos asimilados a secciones planas, aunque considerando, con una cierta complejidad, el efecto del resto de la estructura sobre ellas.

Aunque el Modernismo lleva aparejado un proceso de exploración formal merecedor de su propio estudio, en esta comunicación nos centraremos en Antonio Gaudí, que representa sin duda la cima del proceso de exploración de la forma resistente en el Modernismo, si bien las aportaciones de su genio a la Historia de la construcción sobrepasan con mucho los límites de este movimiento arquitectónico. Por supuesto, Gaudí y sus colaboradores hacían uso de los métodos de estática gráfica (Rubió, 1952). Sin embargo, para desarrollar completamente sus ideas arquitectónicas, Gaudí necesitaba una herramienta que fuera más allá.

La principal aportación de Gaudí, en lo que se refiere a la búsqueda de la antifunicularidad, es superar las limitaciones que los métodos de obtención de forma de su época presentaban. El método desarrollado por Gaudí, como describe muy bien Huerta (Huerta, 2002), se basa en la construcción (Figura 8) de modelos funiculares tridimensionales de hilos y pesos (Tomlow, 1989). El proceso, igual que los modelos físicos

planos o los diagramas de estática gráfica a los que supera, es forzosamente iterativo, pues la magnitud de las cargas depende de la forma de la estructura y viceversa.

Es de destacar que este método no puede aplicarse sin un cambio muy profundo del enfoque estructural: en los métodos de disección de las estructuras espaciales en estructuras planas, las estructuras se descomponen en un conjunto de curvas situadas en planos verticales independientes y vinculadas entre sí por elementos secundarios. Una de las consecuencias, no menores, de este enfoque es que estos elementos secundarios además deben carecer de misión estructural principal a riesgo de comprometer la validez del análisis. Por el contrario, el acercamiento tridimensional de Gaudí a la comprensión del fenómeno resistente es de carácter holístico, en el que desaparece la frontera entre elemento principal y accesorio, y en el que condiciones funcionales, o resistentes como la contención de los empujes horizontales, llevan a formas pioneras.

#### 4. EL MODELO: FUNICULARIDAD E INTERACTIVIDAD

El método de Gaudí, basado en la construcción de modelos tridimensionales, proyecta una sombra muy alargada sobre la arquitectura del S. XX. Es de destacar que, a juicio de los autores, este método no es sólo de form-finding en la

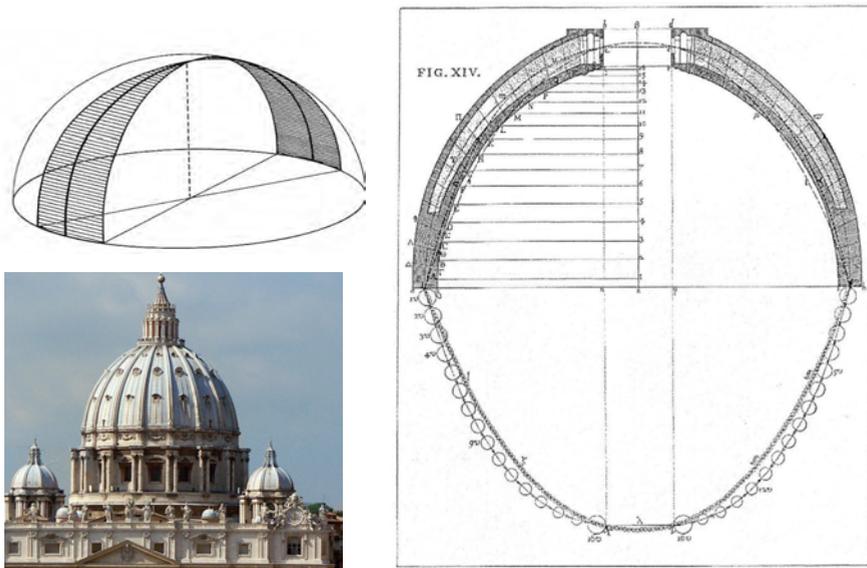


Figura 5. Análisis de la estabilidad de la cúpula de San Pedro (Poleni, 1748).

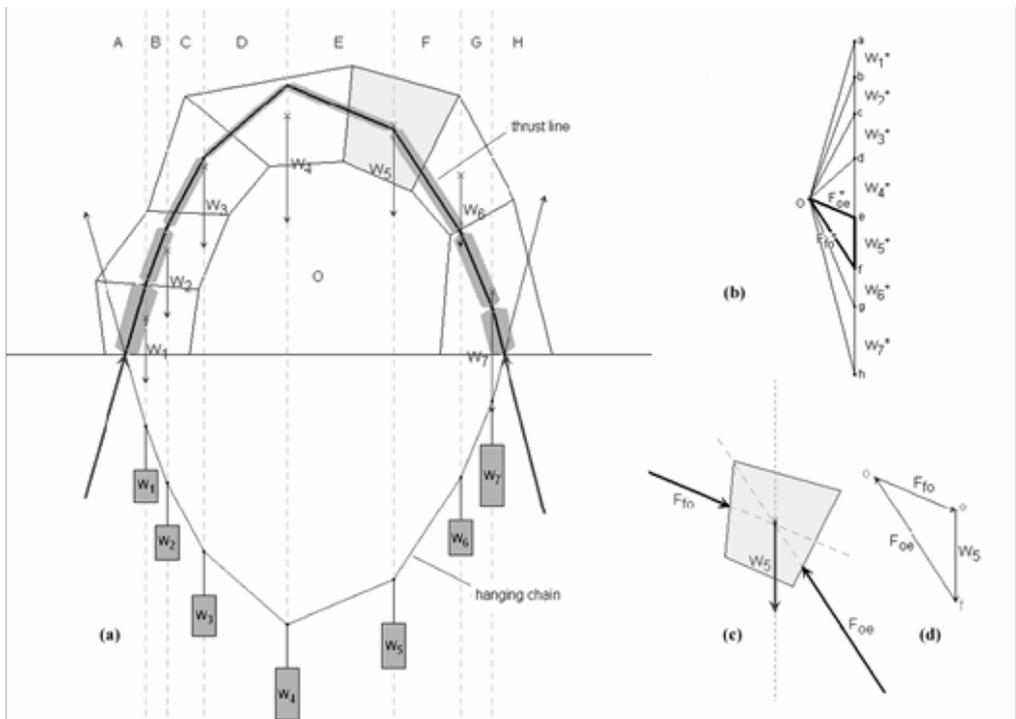


Figura 6. Estudio de la forma de arco de fábrica mediante la construcción del polígono funicular, y como imagen especular del cable traccionado (Block et al, 2003).

acepción de este término en el que la forma se obtiene de modo automático ante la actuación de un conjunto de cargas, con muy poco control sobre la forma final.

Más bien habría que entenderlo como un método de *elección de forma*, pues el hecho de construir un modelo implica necesariamente que la superficie (o mejor dicho, la red de cables) modelizada representa una forma tridimensio-



Figura 7. Modelo funicular de Gaudí, bocetos sobre la fotografía y bocetos invertidos.

nal antifunicular, a la que se le puede suponer de antemano una eficacia estructural muy alta en estructuras en las que las cargas principales sean permanentes.

Otro factor importante del método de Gaudí es el hecho de que *el modelo es interactivo*: el proyectista elige parámetros de diseño como la posición de los apoyos o las longitudes de los cables con las que construye el modelo. Y es esta interactividad de este tipo de análisis la que convierte este método en una herramienta de diseño, además de en un método de comprobación.

Es cierto que la interactividad práctica de los modelos de Gaudí es mínima, por lo laborioso de los cambios, pero no existe diferencia conceptual alguna entre un modelo de miles de hilos y saquitos de perdigones y un moderno software que vincule por un lado un programa de generación de complejas geometrías paramétricas y por otro un código de elementos finitos o de form-finding. La diferencia es sólo tecnológica, y esto, casi un siglo después, nos da una idea de la grandeza de Gaudí.

## 5. SUCESORES

El método usado por Gaudí ha tenido continuación, principalmente en lo que Ramm denomina *inverted hanging models* o modelos de cadena invertida (Ramm, 2004).

Para ayudarse en su diseño, los proyectistas han utilizado estos modelos con dos enfoques, dependiendo de si se realizan antes o después de la generalización de la informática.

Para el primer enfoque, o de *simulación ex-*

*perimental*, podemos citar a Heinz Isler y a Frei Otto. Del primero destacaremos su bien conocido método de construcción de modelos usando tela impregnada de escayola, a la que dejaba secar colgada. Una vez endurecida la escayola, el modelo era invertido y sus dimensiones y formas eran medidas con precisión (suiza) para definir las medidas de la obra real

En el segundo, o de *simulación numérica*, podemos mencionar los diferentes métodos de obtención de forma como el método de la densidad de fuerza o *force density method* (Schek, 1974), relajación dinámica o *dynamic relaxation* (Lewis, 2003) o el *thrust network analysis* (Block y Ochsendorf, 2007).

Evidentemente, los métodos de simulación numérica son mucho más versátiles, y mucho más económicos, que los experimentales, puesto que no es necesario construir un modelo físico. La facilidad para generar modelos y analizarlos es cada vez mayor a medida que crece la capacidad de los ordenadores y la complejidad y potencia de los programas dedicados a este tipo de estructuras, que permiten abordar todas las fases del diseño.

Sin embargo, los modelos experimentales aportan una intuición física del comportamiento resistente de la estructura, y poder ver físicamente el modelo permite percibir sus cualidades estéticas mejor que cualquier simulación por ordenador.

Conscientes de que quizá la mejor aproximación al diseño sea la combinación de modelos por ordenador y modelos físicos, cada vez

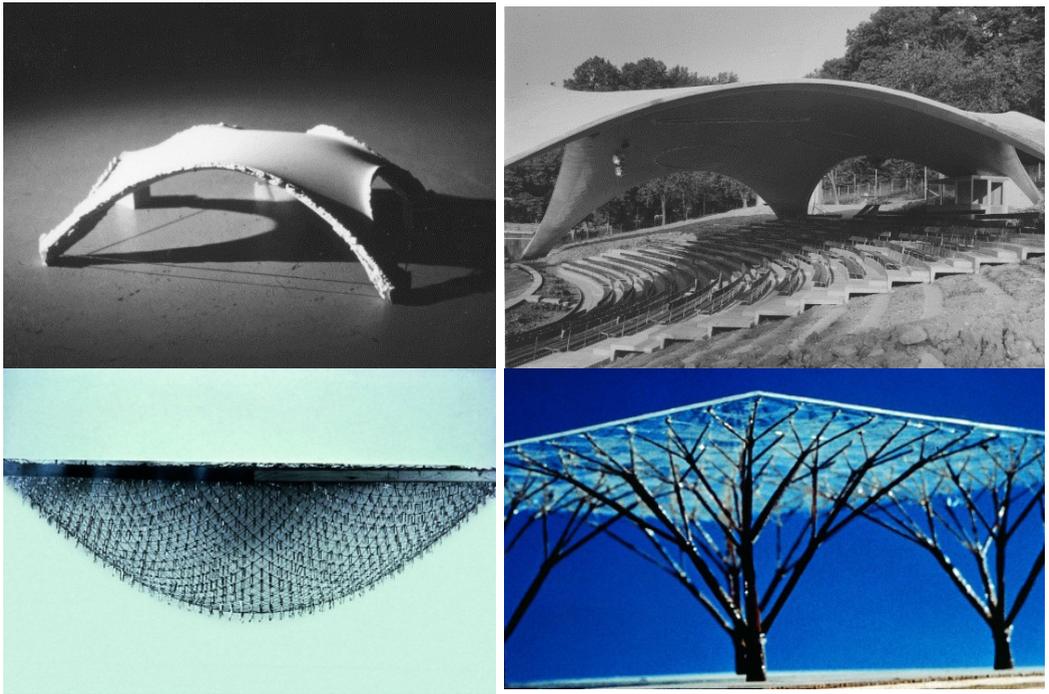


Figura 8. Arriba: Modelo para el teatro de Grotzingen y estructura construida (Heinz Isler, 1954). Abajo izquierda: Modelo suspendido de hilos, cargado con clavos en U, para la gridshell del DEBAU, Essen (Frei Otto, 1962). Abajo derecha: Estructura arborescente utilizada en seminario impartido en Yale en 1960 ([www.freiotto.com](http://www.freiotto.com)).

cobran más interés las posibilidades de combinar máquinas con control numérico por computadora o CNC, o de impresión en 3D, con los programas de diseño.

Como ejemplo de las posibilidades de esta técnica que combina form-finding, análisis y construcción digital baste mencionar, a modo de ejemplo, cómo el ETH de Zurich y el MIT han construido para la Bienale de Venecia de 2016, una lámina de 16 m de luz y 5 cm de canto, conocida como *Armadillo* (Figura 10), mediante la colocación de 339 losas de piedra, sin utilizar mortero ni armadura. Esto ha sido posible por la precisión de fabricación de la tecnología digital empleada en ello.

## 6. CONCLUSIONES

Durante la época del modernismo, arquitectos como Gaudí ampliaron los límites de las estructuras que se podían construir, al expandir las posibilidades de los métodos de análisis de estructuras tridimensionales.

El método desarrollado de construcción de modelos tridimensionales es, además de un método de form-finding, un método de selec-

ción de forma, pues, al generar de modo automático una geometría antifunicular, cualquier forma que se modelice resulta segura, siempre y cuando se sea prudente con las dimensiones y esbelteces de las estructuras proyectadas. Presentan una interactividad, pero muy limitada.

Los métodos de Gaudí, basados en modelos físicos, alcanzaron su desarrollo máximo a mediados del S. XX con los trabajos, entre otros, de Heinz Isler y Frei Otto.

El advenimiento de los ordenadores permitió la simulación, cada vez más perfecta, de los métodos de obtención de forma por ordenador, lo que abarató y generalizó el proyecto de geometrías funiculares, si bien desvinculó al usuario que usa exclusivamente el ordenador de la relación física con la estructura que proyecta.

Hoy en día, las posibilidades de los ordenadores modernos para gestionar todo el proceso, desde el diseño conceptual de la estructuras hasta el control digital de las máquinas de construcción, abren para el ingeniero y arquitecto moderno, un paradigma

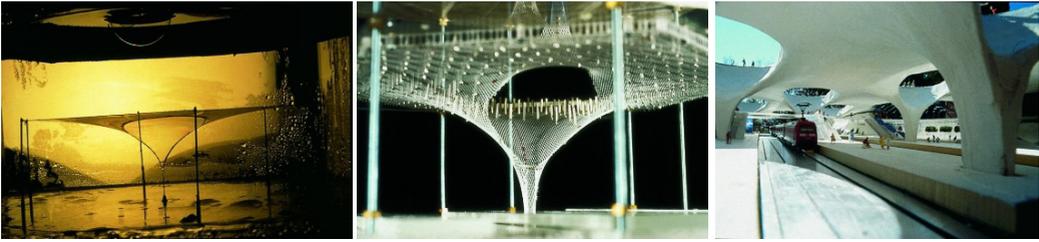


Figura 9. Estudios de forma para la Estación de Stuttgart. Frei Otto (www.freiotto.com).



Figura 10. Bóveda "Armadillo". Bienale de Venecia 2016. ETH y MIT.

de diseño en el que se combinan las posibilidades de diseño por ordenador y construcción digital.

Este futuro, en el que conceptos introducidos hace más de un siglo adquieren nuevos bríos y posibilidades gracias a la moderna tecnología, es el resultado más reciente de los trabajos pioneros de Antonio Gaudí.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Allen E., Zalewski W. (2009). *Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures*. Wiley.
- Block P., DeJong M., Ochsendorf J. (2006). "As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches" *Nexus Network Journal*, Vol. 8, nº. 2, pp. 13-24.
- Block P., Ochsendorf J. (2007). "Thrust network analysis: a new methodology for three-dimensional equilibrium." *Journal of the IASS*, Vol. 48, nº. 3, n. 155, pp. 1-7.
- Chilton J. (2000). Heinz Isler, Thomas Telford.
- Heyman J. (1998). *Structural analysis: a historical approach*. Cambridge University Press.
- Huerta S. (2003). "El cálculo estructural en la obra de Gaudí". *Ingeniería Civil*, nº 129, pp. 121-133.
- Isler, H. (1961). "New Shapes for Shells", *Bulletin of the IASS*, nº 8, Paper C3.
- Kurrer K. (2008). *The history of the theory of structures. From arch analysis to computational mechanics*. Ernst & Sohn.
- Lewis. (2003). *Tension structures: form and behavior*, Telford.
- Ramm. (2004). "Shape finding of concrete shell roofs." *Journal of the IASS*, Vol.45, nº 144, pp. 29-39.
- Rubió, S. (1952). *Cálculo funicular del hormigón armado*. Ediciones Gustavo Gili.
- Schek. (1974). "The force density method for form finding and computation of general networks". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Volume 3, Issue 1, pp. 115-134.
- Schank Smith K. (2005). *Architects' drawings*. Elsevier. Architectural Press, pp. 120.
- Tomlow, J. (1989). *El modelo. El modelo colgante de Gaudí y su reconstrucción. Nuevos conocimientos para el diseño de la Iglesia de la Colonia Güell*. *Informes de la Construcción*, vol , 41, nº 404, pp. 57-72.
- Wolfe. (1921). *Graphical Analysis. A textbook on graphic statics*. McGraw-Hill, pp. 250-253.
- [http://block.arch.ethz.ch/brg/project/venice-biennale-2016\\_beyond-bending](http://block.arch.ethz.ch/brg/project/venice-biennale-2016_beyond-bending) . (Accedido en agosto de 2016).