

Aesthetics of Statics: from funicular technique to bone beams

Estética de la estática: de la técnica funicular a las vigas óseas

Concepción Rodríguez Moreno

investigación
pp. 58-67

Resumen

Aunque hoy las condicionantes técnicas y constructivas han dejado de ser factores determinantes para el desarrollo de casi cualquier planteamiento formal arquitectónico, durante los siglos XIX y XX la concepción de nuevas formas arquitectónicas estuvo íntimamente ligada a la aparición de nuevos materiales y sistemas estructurales. En este texto se repasan algunas de las innovaciones formales realizadas por técnicos españoles durante este periodo, surgidas de las posibilidades expresivas y estructurales del concreto armado.

Palabras clave: cálculo estructural, racionalismo constructivo, concreto armado

Abstract

Today, technical and constructive constraints are no longer important in developing of almost any architectural approach, but during the nineteenth and twentieth centuries the design of new architectural forms was closely linked to the appearance of new materials and new structural systems. In this paper we review some of the formal innovations made by Spanish technicians over this period, arising from expressive and structural possibilities of reinforced concrete.

Keywords: structural analysis, constructive rationalism, reinforced concrete

En 1914, Le Corbusier planteaba a través de su esquema Dom-ino una estructura que por una parte anticipaba la solución de un entramado ortogonal de concreto armado en la mayoría de los edificios del siglo XX y, por otra, recogía perfectamente sus célebres cinco puntos. En 1958, y en colaboración con el calculista Iannis Xenakis, terminaba el Pabellón Phillips de la Exposición de Bruselas con una compleja solución final a partir de paraboloides hiperbólicos de concreto. ¿Qué había sucedido con la cubierta plana? ¿Y la ventana longitudinal? ¿Y los pilotis? ¿En qué había quedado la conocida aspiración de independencia entre sistema resistente y sistema de cerramiento?

Las radicales diferencias existentes entre estas dos obras son ilustrativas del proceso del nacimiento de la arquitectura moderna en el que, aunque sin duda la aparición de nuevos materiales fue un factor decisivo en el avance hacia nuevas concepciones espaciales, también influyó en gran medida el racionalismo constructivo que profesaron los técnicos más lúcidos de los siglos XIX y XX. Gracias a ellos se estableció una estrecha relación entre estructura y forma que se fue asentando progresivamente a medida que las construcciones de concreto armado (pretensado y postensado) fueron avanzando, y las ex-

periencias y obras de muchos arquitectos e ingenieros fueron acumulándose.

Antonio Gaudí: el precursor

Mecánica y forma son los elementos paradigmáticos de toda la arquitectura de Gaudí. Para él, el cálculo de estructuras formaba parte del proceso del proyecto desde sus etapas iniciales y no se reducía a una mera comprobación de estabilidad. Fue capaz de crear formas inéditas utilizando los materiales y las técnicas tradicionales, y desarrollar una arquitectura basada en la economía de medios gracias al análisis profundo del comportamiento estructural. Por medio de modelos a escala estudiaba las estructuras y fue un pionero en la creación de formas laminares a partir de la aplicación en sus obras de los arcos parabólicos, así como superficies regladas y de revolución, anticipándose más de 40 años con los primeros y más de 20 con las segundas al nacimiento de toda una nueva sensibilidad constructiva y una nueva concepción espacial que, seguramente, no pudo llevar a más altas cotas por no haberse desarrollado completamente la tecnología constructiva del concreto armado.¹



Reconstrucción del modelo funicular de la iglesia de la colonia Güell (expuesto en el Museo de la Sagrada Familia) y dibujo del exterior de la misma realizado por Gaudí sobre una fotografía del modelo original entre 1908 y 1914



Paraboloides hiperbólicos de los pórticos de entrada a la cripta de la colonia Güell (1908-1914) e hiperboloides de revolución en los lucernarios de la basílica de la Sagrada Familia. Fuente: trabajo de la autora

Los modelos funiculares constituyeron una de sus principales herramientas de diseño. Desde el comienzo, Gaudí planteaba todo el proyecto buscando formas catenarias equilibradas.² Por ejemplo, en sus trabajos para el proyecto de la iglesia de la Colonia Güell realizó un modelo colgante espacial a escala 1:10 para determinar plásticamente los arcos catenarios que constituirían la estructura del conjunto que quería construir. De esta manera podía visualizar fácilmente la interacción entre la geometría y la mecánica, y con base en la “prueba-error” corregir la forma según las necesidades funcionales y expresivas, siempre en el marco de las leyes físicas. Para determinar el volumen final, Gaudí tomaba una fotografía

del modelo funicular, la giraba 180° y dibujaba sobre ella.³ El sistema proyectual escogido se explica por las características de los materiales empleados en su arquitectura, usualmente pétreos sin resistencia a la tracción, puesto que una estructura de arcos catenarios invertidos trabaja a compresión pura.

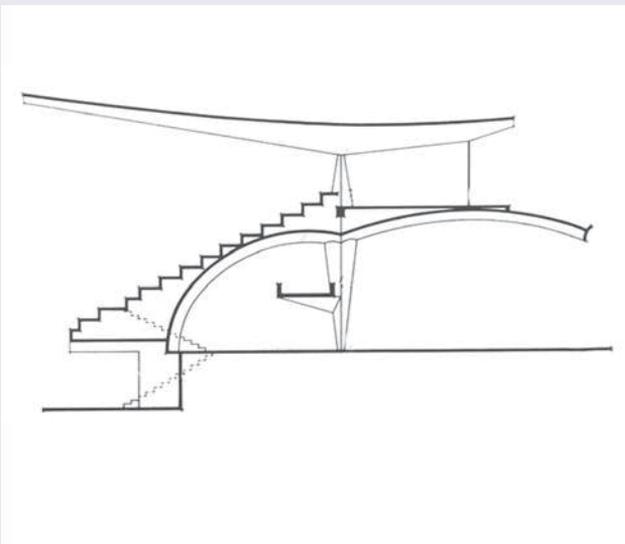
Sin embargo, el arquitecto catalán también experimentó con nuevas formas geométricas para las bóvedas que excedían las posibilidades del simple hilo de la funícula. En particular empleó superficies regladas⁴ (paraboloides hiperbólicos, hiperboloides de revolución, helicoides, conoides, etc.) trasladando las formas de los manuales de geometría descriptiva del siglo XIX a la construcción práctica,



Conoides en las cubiertas de las Escuelas de la Sagrada Família (1909) y helicoides en una de las chimeneas de la Casa Milà (1906-1910). Fuente: trabajo de la autora



Gradas del Hipódromo de la Zarzuela. Imagen del voladizo exterior y sección (1935). Fuente: Archivo Torroja



y demostrando una fantástica intuición en lo referente al comportamiento estructural.⁵

Pudiera ser que la introducción de esas formas en la arquitectura de Gaudí obedeciera primariamente a razones funcionales, estéticas, constructivas o de expresión simbólica, antes que a motivos estructurales. También es posible que la bien probada resistencia de la bóveda catalana⁶ infundiera en Gaudí tal grado de confianza que el problema estructural pasara a un segundo plano pero, según nuestra opinión, quizá la falta de práctica con un material como el concreto armado y el desconocimiento de sus capacidades mecánicas fue lo que impidió a este arquitecto realizar estudios estructurales similares a los practicados con los arcos catenarios utilizando las técnicas funiculares.

Será a partir de la segunda década del siglo xx cuando la construcción de láminas de concreto armado comenzó a desarrollarse gracias a un proceso continuo de estudio, experimentación y atrevimiento. Sin duda, las bóvedas tabicadas de Gaudí, caracterizadas por su cohesión, elasticidad y esbeltez, podrían considerarse sus precedentes formales.

Eduardo Torroja: el ingeniero constructor

En España, las bóvedas laminares de concreto armado encontraron un amplio desarrollo en las estructuras levantadas en los años 30 por Eduardo Torroja, un ingeniero que además de ser un extraordinario investigador y teórico de la ciencia de la construcción con concreto armado, llevó a cabo una importantísima labor divulgadora con la intención de promover la mejora de la calidad de la construcción. Torroja sentía predilección por el concreto armado, ya que consideraba que con él se podía alcanzar

la expresividad del fenómeno resistente y, en colaboración con diversos arquitectos, proyectó, antes del estallido de la Guerra Civil española, algunas obras mundialmente admiradas por la plasticidad de sus soluciones estructurales.

Por ejemplo, junto a Manuel Sánchez Arcas desarrolló en 1933 el proyecto del mercado de Algeciras, compuesto por una cúpula semiesférica rebajada de 48 m de diámetro y un espesor mínimo de 9 cm. El presupuesto era modesto, pese a lo que la magnitud de la estructura propuesta permitía suponer y, en lugar de optar por una solución convencional con base en pórticos y losas de concreto armado, se eligió una estructura cupular de curvatura doble positiva que, como señala la memoria de proyecto, “la ingeniería moderna presenta hoy como solución más apropiada para cubrir vanos de este tipo”,⁷ y que requería cantidades de concreto menores que una estructura porticada.

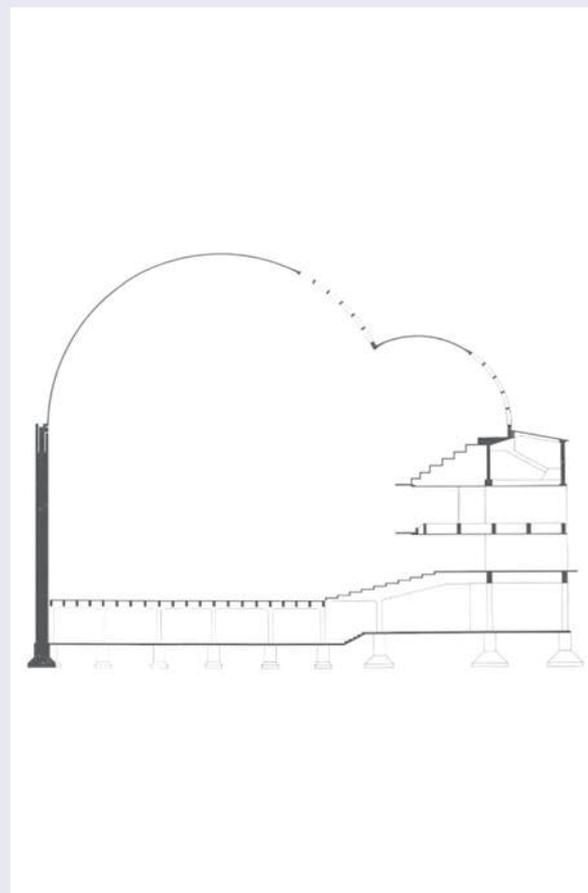
Un par de años después, junto a Arniches y Domínguez, proyectó la estructura del Hipódromo de la Zarzuela. La propuesta definitiva fue el fruto de un profundo análisis estructural inicial y de las mejoras aplicadas posteriormente, en busca de la solución formal más elegante.⁸ En el proyecto final, la lámina de concreto que constituye la cubierta está formada por sectores de hiperboloide, apoyados sobre una única hilera de pilares de sección variable. Además presenta un vuelo de 12.8 m hacia el exterior que se equilibra por el otro lado gracias a un tirante, con la lámina que conforma el forjado del primer piso, también en voladizo.

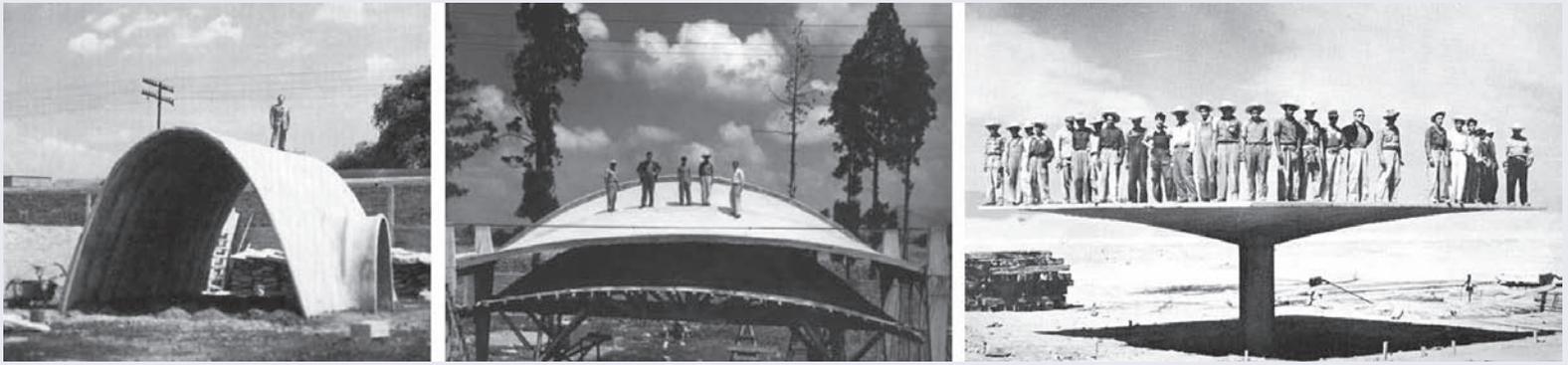
En mayo de 1936 concluye la construcción de la que fue considerada su más atrevida obra arquitectónica: la cubierta del Frontón de Recoletos de Madrid, ejecutada junto al arquitecto Secundino Zuazo. Esta consistía en dos láminas cilíndricas de concreto de 8 cm de espesor, formadas por dos arcos de círculo desiguales que cubrían una planta rectangular de 55 m x 32.5 m. En la intersección de las láminas se generaba un pliegue con rigidez suficiente como para posibilitar la apertura de unos grandes huecos en las mismas, y para que el espacio interior quedara cubierto sin más apoyo que el de dos hastiales.⁹

Sin duda, las realizaciones de Eduardo Torroja sirvieron de inspiración a multitud de obras arquitectónicas emblemáticas posteriores, en las que se confió a la forma estructural la mayor parte de su capacidad expresiva. Un ejemplo de ello son aquellas hechas por uno de los arquitectos más reconocidos por sus construcciones laminares: Félix Candela.



Gradas del Hipódromo de la Zarzuela. Imagen del voladizo exterior y sección (1935). Fuente: Archivo Torroja





Modelos experimentales a escala natural de Félix Candela. Bóveda Ctesiphon (izquierda), Conoide (centro) y paraboloides hiperbólicos en uno de sus prototipos de "paraguas" (derecha). Fuente: exposición "Félix Candela. La conquista de la Esbeltez"

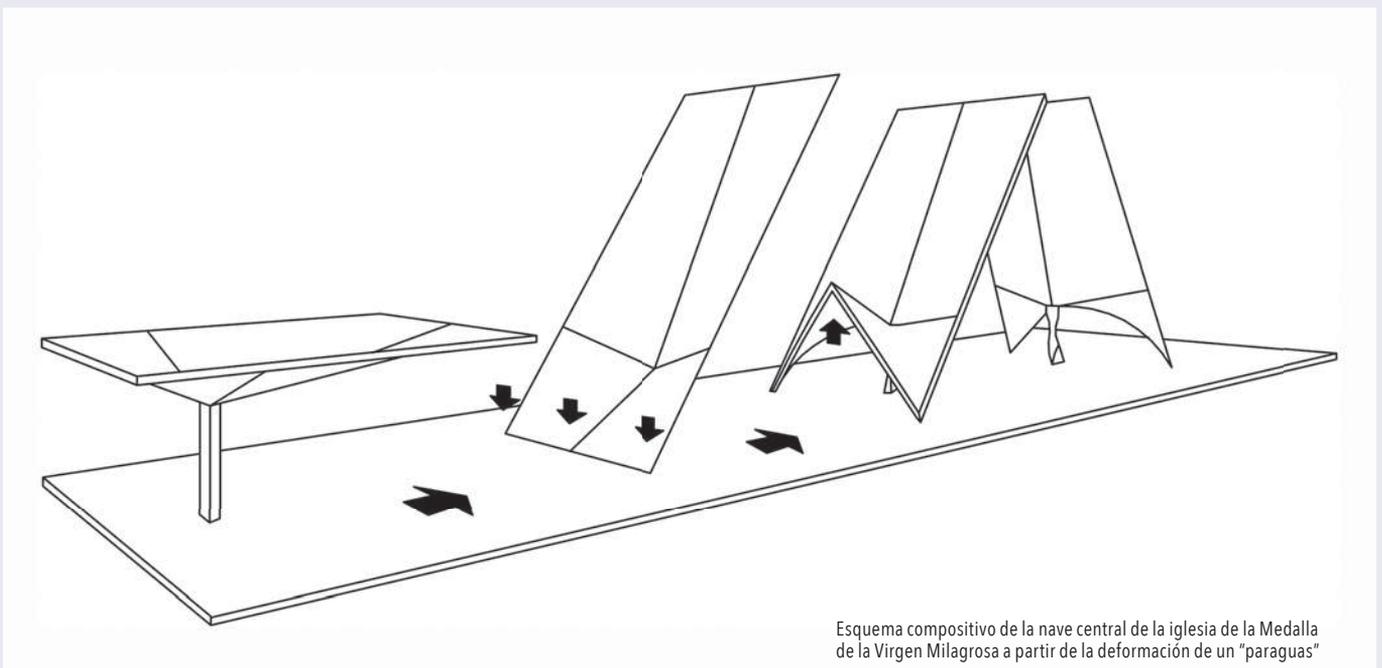
Félix Candela: el arte estructural¹⁰

En los años 50 y 60 el arquitecto español Félix Candela adquirió fama mundial con la construcción de cascarones de concreto armado, en los que no sólo optimizó la construcción y el coste a través del diseño de una esbelta forma resistente, sino en los que también exhibió su especial intuición y sensibilidad creadora dotándolos de una impresionante y escultórica belleza.

Es, además, el arquitecto que materializó en concreto armado las formas imaginadas por Gaudí gracias al adecuado desarrollo de esta tecnología constructiva. Al igual que hizo el arquitecto catalán unas décadas antes, Candela acabó convenciéndose de que la capacitación en el diseño y construcción de cascarones de concreto armado podía lograrse gracias a la experimentación directa mediante la construcción de modelos a escala natural, al utilizar tan sólo las inmutables leyes de la naturaleza: estática, mecánica y resistencia de materiales.¹¹

En 1949 construyó su primer cascarón experimental, al que llamó "Bóveda Ctesiphon" en la fábrica Fernández en San Bartolo, Naucalpan, con una geometría que respondía a la de un cañón funicular con directriz catenaria; le siguió, un año después, la lámina experimental con geometría de conoide en el mismo lugar; y en 1952, su primer prototipo de "paraguas" en Tecamachalco,¹² con planta cuadrada de 10 m x 10 m, flecha de 1 m y espesor de 5 cm.

Uno de sus primeros y más representativos proyectos, la iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa,¹³ fue el laboratorio de exploración de las posibilidades espaciales de los modelos estructurales ensayados. Sobre una planta tradicional de tres naves con capillas laterales, el volumen y la estructura de la iglesia se resolvieron con base en una sucesión de "paraguas" a los que se ha manipulado su forma: rompiendo su simetría, exagerando las alturas o las flechas de sus cuatro segmentos, e incli-



Esquema compositivo de la nave central de la iglesia de la Medalla de la Virgen Milagrosa a partir de la deformación de un "paraguas"



Interior de la sala de modelos del Centro de Estudios Hidrográficos. Fuente: Fundación Miguel Fisac

nando y doblando sus bordes horizontales. Como ya ocurría en las obras de Gaudí, las columnas adoptaron formas alabeadas, diseñadas instintivamente según las cargas que debían soportar y, en ellas, los capiteles dejaron de ser necesarios, de tal manera que apoyo y cubierta se convirtieron en un mismo elemento.

Por razones como la optimización del cálculo, su eficacia estructural y la sencillez de ejecución de sus encofrados, Félix Candela recurrió al paraboloides hiperbólico (“hypar”) en la gran mayoría de sus obras,¹⁴ llevándolos a su máxima expresión plástica y adentrándose, en su afán de optimizar cada una de sus nuevas formas geométricas, en el análisis de cómo liberar de vigas y nervaduras de rigidez de borde a las bóvedas así diseñadas. El objetivo era conseguir que el espesor se mantuviese constante y que sus láminas de concreto exhibiesen la máxima esbeltez formal posible.¹⁵

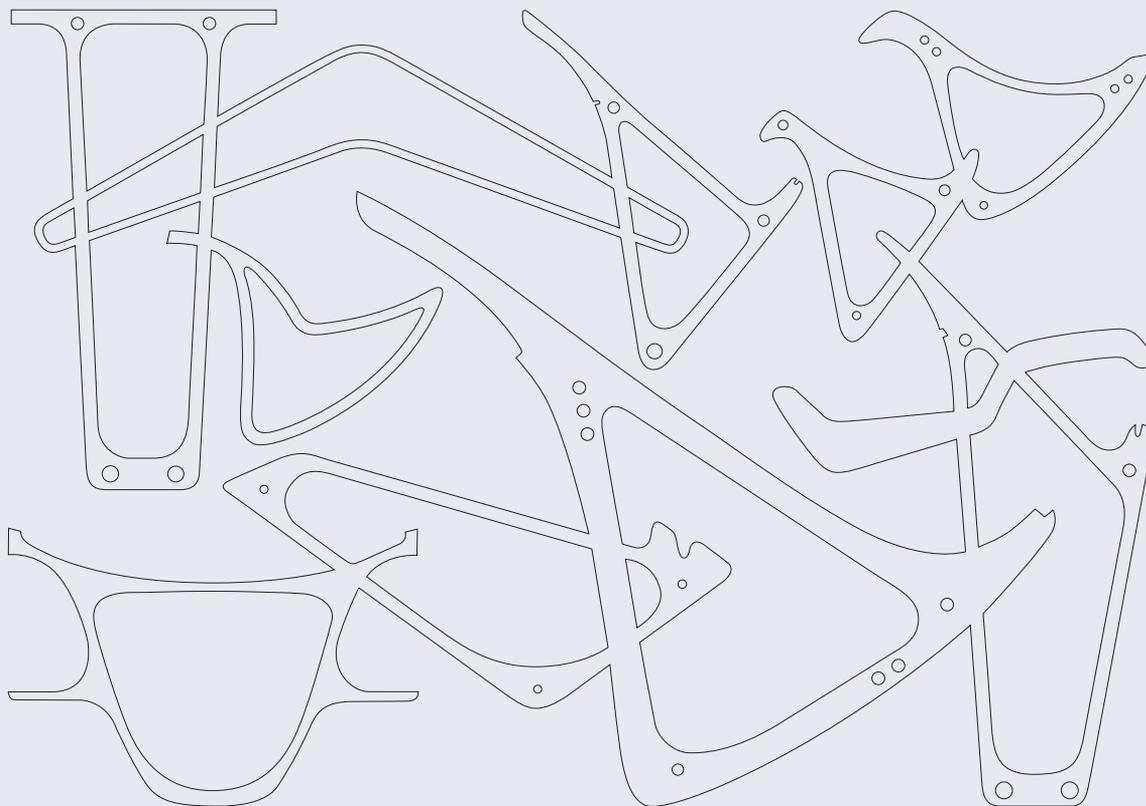
Quizás hubiera sido difícil construir estos edificios en otro país distinto a México. Las delgadas láminas de concreto que conformaban los cascarones no cumplían las características mínimas de seguridad de las normativas técnicas de naciones económicamente más desarrolla-

das y, además, la construcción de las cimbras requería de muchísimos operarios.

Sin embargo, en los años sesenta, las condiciones laborales mexicanas cambiaron y se encareció la mano de obra. La aparición de nuevas reglamentaciones edificatorias limitó la libertad proyectual y empezaron a surgir materiales y patentes mucho más competitivos.¹⁶ Las piezas prefabricadas de concreto aparecieron en el mercado internacional y la construcción de cascarones cayó en desuso. La figura del arquitecto Miguel Fisac es representativa de este cambio de ciclo.

Miguel Fisac: las estructuras óseas

Según opinaba Fisac, el concreto presentaba una complejidad técnica enorme pero también un extenso campo de posibilidades arquitectónicas y expresivas que no se habían explorado en cincuenta años de uso intensivo de este material. A principios de la década de los cincuenta inició el estudio de las estructuras de este material, y durante los años sesenta Fisac se afianzó en el uso del mismo, adaptando su capacidad expresiva a requerimientos tan distintos como viviendas unifamiliares, edificios de



Perfiles de los "huesos" diseñados por Fisac entre 1960 y 1970.
Fuente: exposición "Miguel Fisac. Huesos Varios". Ilustración de Mauro Doncel

oficinas o iglesias, y también patentando diversas piezas prefabricadas de cubrimiento, pretensadas y postensadas, a las que él mismo denominó "vigas-hueso", y que le permitieron crear un nuevo lenguaje arquitectónico.¹⁷

Las primeras de estas piezas fueron diseñadas en 1960 para el Centro de Estudios Hidrográficos. Para superar el desafío de cubrir el espacio rectangular de 80 m x 22 m de la nave dedicada al laboratorio de hidráulica con una iluminación totalmente uniforme, inventó una solución completamente nueva en donde la forma surgía de resolver los problemas constructivos, estructurales, funcionales y lumínicos en un único objeto arquitectónico.¹⁸ Diseñó unas vigas compuestas por el ensamblaje de dovelas triangulares asimétricas huecas de 1 m de longitud y 6 cm de espesor, con gran canto pero a la vez ligeras y exentas de problemas de estabilidad lateral y que, por su especial configuración, permitían el aprovechamiento homogéneo de la luz cenital, un aceptable aislamiento térmico y acústico y una gran facilidad para la recogida de aguas gracias a la propia impermeabilización del concreto pretensado, con lo que el material podía quedar visto.

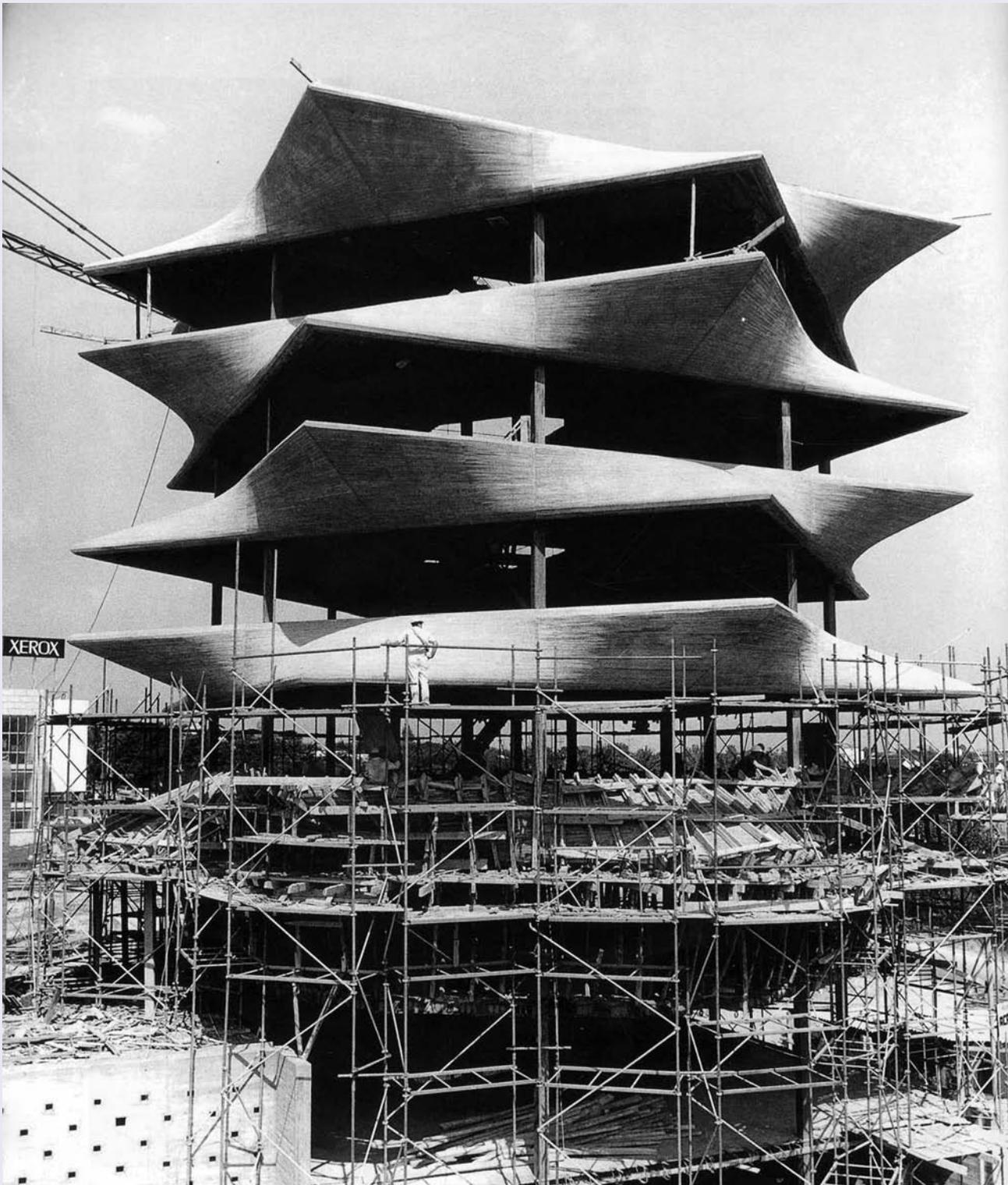
Aunque estas primeras piezas surgieron como respuesta a una necesidad concreta de programa, Fisac vio la oportunidad de universalizar las soluciones y vincularlas a la prefabricación. Nuevas y mejoradas piezas (la "Sigma" para cubiertas con luz cenital, la "Trapezio" para forjados y cubiertas, la "Pato" para marquesinas, etcétera)¹⁹ dieron

lugar a todo un elenco de obras de arquitectura como la iglesia de Santa Ana en Moratalaz, los laboratorios JORBA y su famosa "pagoda", el Instituto Núñez de Arce en Valladolid, las bodegas Garvey en Jerez, y la sede de IBM en Madrid, entre otras.

Fisac consiguió hacer planas las soluciones cilíndricas y alabeadas en concreto armado de sus predecesores, compensando las tracciones con el tensado de las armaduras y no con las formas dadas al concreto. Destacó por su empeño investigador en una España poco industrializada, en la que ninguna empresa podía proporcionarle lo que buscaba, así que dedicó tiempo y esfuerzo a inventarlo y lo que era más difícil: lograr que lo fabricaran. Desafortunadamente, pocos arquitectos quisieron utilizar productos de construcción con una estética tan claramente vinculada a la obra de un compañero, y la prefabricación industrializada de estas piezas acabó por abandonarse.²⁰

Conclusión

El material y la técnica constructiva restringieron durante muchos años la forma de los edificios, pero hoy la profusión de formas cada vez más complejas y de obras cada vez más monumentales suscita ciertas dudas en torno al formalismo exhibido por muchos arquitectos que, lejos de dominar la técnica constructiva, se han dejado arrastrar por ella sin producir reflexiones arquitectónicas válidas.



Construcción del laboratorio de productos farmacéuticos Jorba. Fuente: Fundación Miguel Fisac

Desde nuestro punto de vista, la trascendencia del acto creativo arquitectónico sólo puede esperarse si en la mente del proyectista confluyen conocimientos técnicos e inspiración artística capaces de alcanzar una visión sintetizadora y jerarquizada de los aspectos funcionales, estéticos, estructurales y constructivos de la forma buscada.

En la España del siglo xx se produjo una época heroica en este sentido, caracterizada por la escasez de medios, pero también por la audacia e intuición de grandes técnicos, pioneros en la utilización del concreto armado, y por la consideración de una filosofía estructural creadora de formas.

La arquitectura desarrollada por Antonio Gaudí, Eduardo Torroja, Félix Candela o Miguel Fisac es el mejor ejemplo de la fusión entre técnica y arte, entre ingenio y estudio, entre imaginación y sensibilidad. Consiguieron enfrentarse al problema de lo resistente desde un planteamiento no estricto, en donde la estructura no es algo que se dimensiona, calcula y encaja dentro de planteamientos formales que no le son propios, sino algo que, bien planteado, puede proporcionar formas agradables y emocionantes.

Concepción Rodríguez Moreno

Doctora en arquitectura

Escuela Técnica Superior de Arquitectura,

Universidad de Granada, España

✉ concepción.r.m@hotmail.com

Notas

1. La vida profesional de Gaudí coincide con las primeras décadas de expansión y consolidación de esta tecnología. De la mano de su mecenas, el conde Güell, impulsor de la primera cementera catalana de la empresa Asland, entró en contacto con el concreto armado utilizando el nuevo material en algunas de sus obras. Rosa Grima, Josep Gómez Serrano y Antonio Aguado, "Los primeros ejemplos de Gaudí con hormigón armado" (*Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Santiago de Compostela, 26 al 29 de octubre de 2011, 643-654).
2. En un arco catenarior, las tensiones horizontales se compensan, por lo que en cada punto del arco existe tan sólo una componente vertical y una componente tangente que se transmite por el propio arco hacia los cimientos. Esta propiedad, distintiva y única de este tipo de arcos, hace que no necesiten apoyos a los lados para sustentarse.
3. Antonio Gaudí i Cornet, *Manuscritos, artículos, conversaciones y dibujos* (Murcia: Comisión de Cultura del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1982).
4. Gaudí manifestó en varias ocasiones su fascinación por estas formas dada su sencillez geométrica y su relevancia estructural. Sus especiales características las hacen ideales para la construcción de cubiertas arquitectónicas puesto que, en primer lugar, son superficies mínimas con peso igualmente mínimo y, en segundo lugar, en ellas la estructura está completamente equilibrada (de forma similar a lo que ocurre con la tensión superficial en las burbujas de jabón), confiriendo a estas construcciones gran estabilidad.
5. Santiago Huerta Fernández, "El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí", *Ingeniería Civil* 130 (2003): 128.
6. Joan Bassegoda i Nonell, "La construcción tradicional en la arquitectura de Gaudí", *Informes de la Construcción* 408 (1990): 9-16.
7. Joaquín Antuña Bernardo, "Gran Mercado de Algeciras", *Manuel Sánchez Arcas, arquitecto* (Madrid: Fundación Caja de Arquitectos, 2003), 214.
8. José Antonio Fernández Ordóñez, y José Ramón Navarro Vera, *Eduardo Torroja Miret, Ingeniero* (Madrid: Pronaos, 1999), 116.
9. Eduardo Torroja Miret, *La cubierta laminar del frontón Recoletos. Eduardo Torroja Oficina Técnica* (Madrid: manuscrito original perteneciente al Archivo Torroja, depositado en СЕНОРУ, 1936).
10. David P. Billington ha definido a Candela como "un artista estructural, es decir, un ingeniero que cuenta con todas las cualidades de un maestro constructor y que posee una motivación estética". Véase David P. Billington, Maria E. Moreyra Garlock, *Felix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist* (Princeton: Yale University Press, 2008).
11. Pepa Casinello, Mike Schlaich y José Antonio Torroja, "Félix Candela. In memoriam (1910-1997). From this concrete shells to the 21st century's lightweight structures", *Informes de la construcción*, vol. 62 núm. 519 (2010): 21
12. El "paraguas", constituido por la macla espacial de cuatro paraboloides hiperbólicos sostenidos por un solo pilar central, se convirtió en una de las estructuras más utilizadas por Candela. Combinando varios de ellos, cambiando sus tamaños, inclinaciones y alturas, o perforándolos para permitir la entrada de luz cenital, diseñó soluciones para numerosos proyectos.

13. Félix Candela Outeriño, "La Iglesia de la Virgen Milagrosa", *En defensa del formalismo y otros escritos* (Bilbao: Xarait, 1985), 51-56.
Aunque Candela nombró en su artículo a la iglesia como "de la Virgen Milagrosa", el nombre correcto es "Virgen de la Medalla Milagrosa". *N. del E.*
14. Félix Candela Outeriño, "Understanding the hyperbolic paraboloid", *Architectural Record* (Nueva York: McGraw-Hill, 1958), 191-195.
15. En este sentido, debemos destacar los tres "cascarones" más famosos de Félix Candela, que son también los tres de mayor tamaño: el restaurante Los Manantiales, en Xochimilco; la embotelladora Bacardí, en Tultitlán; y la capilla abierta, en las Lomas de Cuernavaca. En los tres casos la máxima luz de vano es de aproximadamente 30 m. y el espesor laminar de tan sólo 4 cm. El primero de ellos está cubierto por una bóveda de arista octogonal formada por la intersección de cuatro paraboloides hiperbólicos iguales, en la que las curvas de sus bordes son hipérbolas por haber cortado la superficie mediante planos inclinados hacia el exterior. En la embotelladora de Bacardí, la cubierta se conformó mediante seis grandes "hypars" de planta cuadrada colocados por pares, delimitados por cuatro arcos parabólicos de borde que se anclan al suelo de forma diagonal. Por último, en la capilla de Lomas de Cuernavaca se quiso construir la estructura en forma de paraboloides hiperbólico y borde libre de mayor dimensión ejecutada hasta la fecha. El objetivo se consiguió en la boca delantera: una enorme hipérbola de 30 m de luz y casi 22 m de alto, pero debió incluirse un nervio de rigidez en el borde opuesto debido a los problemas de estabilidad surgidos durante la construcción del edificio.
16. Tras la Segunda Guerra Mundial se produce una segunda eclosión de la ingeniería de estructuras gracias a la consolidación de la prefabricación y al uso del concreto pretensado y postensado como nuevos procedimientos. El uso de estas soluciones posibilitaba cubrir grandes vanos rectos con cantos mucho más reducidos y sin andamios, evitar la aparición habitual de fisuras del concreto armado y regularizar la producción y la calidad de la ejecución. Véase Javier Manterola Armisén, "Filosofía y técnica estructural", *Revista de Obras Públicas* 3388 (1999): 172-175.
17. Francisco Arqués Soler, "Miguel Fisac (1913-2006). Un propósito experimental", *Informes de la Construcción*, vol. 58 núm. 503 (2006): 8.
18. Miguel Fisac Serna, "Centro de Estudios Hidrográficos, en Madrid", *Informes de la Construcción*, vol. 16 núm. 157 (1964): 21-30.
19. Miguel Fisac Serna, "Algunas soluciones de estructuras de hormigón armado formadas por piezas premoldeadas", *Informes de la Construcción*, vol. 15 núm. 149 (1963): 43-54.
20. Fermín González Blanco, "HUECO SA o el caso catalán", *Miguel Fisac. Huesos varios* (Madrid: Fundación del Colegio de Arquitectos de Madrid, 2007), 137.

Referencias

- Antuña Bernardo, Joaquín. "Gran Mercado de Algeciras", *Manuel Sánchez Arcas, arquitecto*. Madrid: Fundación Caja de Arquitectos, 2003.
- Arqués Soler, Francisco. "Miguel Fisac (1913-2006). Un propósito experimental", *Informes de la Construcción* 503 (2006): 5-9.
- Bassegoda i Nonell, Joan. "La construcción tradicional en la arquitectura de Gaudí", *Informes de la Construcción* 408 (1990): 9-16.
- Billington, David P., y Garlock Maria E. Moreyra. *Felix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist*. Princeton: Yale University Press, 2008.
- Candela Outeriño, Félix. "La Iglesia de la Virgen Milagrosa", *En defensa del formalismo y otros escritos*. Bilbao: Xarait, 1985.
- . "Understanding the hyperbolic paraboloid", *Architectural Record* (julio 1958): 191-195.
- Casinello, Pepa, Mike Schlaich, y José Antonio Torroja. "Félix Candela. In memoriam (1910-1997). From this concrete shells to the 21st century's lightweight structures", *Informes de la construcción* 519 (2010): 5-26.
- Fernández Ordóñez, José Antonio, y José Ramón Navarro Vera. *Eduardo Torroja Miret, Ingeniero*. Madrid: Pronaos, 1999.
- Fisac Serna, Miguel. "Algunas soluciones de estructuras de hormigón armado formadas por piezas premoldeadas", *Informes de la Construcción* 149 (1963): 43-54.
- . "Centro de Estudios Hidrográficos, en Madrid", *Informes de la Construcción* 157 (1964): 21-30.
- Gaudí i Cornet, Antonio. *Manuscritos, artículos, conversaciones y dibujos*. Murcia: Comisión de Cultura del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1982.
- González Blanco, Fermín. "HUECO SA o el caso catalán", *Miguel Fisac. Huesos varios*. Madrid: Fundación del Colegio de Arquitectos de Madrid, 2007.
- Grima, Rosa, Josep Gómez Serrano, y Antonio Aguado. "Los primeros ejemplos de Gaudí con hormigón armado" (*Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Santiago de Compostela, 26 - 29 octubre 2011), 643-654.
- Huerta Fernández, Santiago. "El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí", *Ingeniería Civil* 130. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- Manterola Armisén, Javier. "Filosofía y técnica estructural", *Revista de Obras Públicas* 3388. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1999.
- Torroja Miret, Eduardo. *La cubierta laminar del frontón Recoletos. Eduardo Torroja Oficina Técnica*. Madrid: Manuscrito original perteneciente al Archivo Torroja, depositado en CEHOPE, 1936.