

EL RETO DE LA  
ESTRUCTURA

*Alejandro Bernabéu Larena*

*THE CHALLENGE OF  
THE STRUCTURE*

*alejandro.bernabeu@upm.es*  
*<https://orcid.org/0000-0001-7542-9571>*

*Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Asociado.*  
*Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.*  
*Universidad Politécnica de Madrid.*

El hormigón es sin lugar a dudas el material estructural que caracteriza el desarrollo de la ingeniería y la arquitectura del siglo XX. Junto al acero, que había revolucionado previamente la construcción del siglo XIX, siguen siendo hoy en día los materiales esenciales de toda construcción.

El artículo presenta una selección de imágenes a modo de referencia visual y reflexiva sobre el origen y desarrollo histórico, las características, cualidades, posibilidades y potencialidades del hormigón como material estructural. Estas referencias transcurren desde los inicios del hormigón armado y las primeras patentes, las láminas delgadas, el hormigón pretensado y las estructuras prefabricadas, hasta los desarrollos y exploraciones y aplicaciones actuales, estructurales, arquitectónicas y artísticas.

Palabras clave: Hormigón armado, estructura, desarrollo histórico.

#### ABSTRACT

Concrete is undoubtedly the structural material that characterizes the development of engineering and architecture in the 20th century. Together with steel, which had previously revolutionized construction in the 19th century, they continue to be the essential materials of any construction today.

The article presents a selection of images as a visual and reflective reference on the origin and historical development, the characteristics, qualities, possibilities, and potentialities of concrete as a structural material. These references go from the beginnings of reinforced concrete and the first patents, thin plates, prestressed concrete, and prefabricated structures, to current structural, architectural, and artistic developments and explorations and applications.

Keywords: Reinforced concrete, structure, historical development.

El hormigón en masa tiene antecedentes históricos muy antiguos, los romanos utilizaban ya morteros para asentar los grandes bloques de piedra con los que construían. Sin embargo, al igual que le ocurre a la piedra, el hormigón carece por sí mismo de capacidad para resistir esfuerzos de tracción. El desarrollo de sistemas que combinan la resistencia a compresión del hormigón con la capacidad del acero para resistir las tracciones, supone la aparición de un nuevo material, el hormigón armado, que revoluciona el mundo de la ingeniería y la construcción. Las primeras aplicaciones datan de mediados del siglo XIX (jardineras de Joseph Monier, 1848; barca de Joseph Louis Lambot, 1855), pero es a finales del XIX y principios del XX cuando se establecen las primeras patentes de sistemas constructivos de hormigón armado, como las de François Hennebique, Edmond Coignet o Robert Maillart. En la Exposición Universal de París en 1900 varios de los pabellones y puentes se construyeron en hormigón armado, mostrando por primera vez a un gran público sus posibilidades constructivas. El hormigón armado estaba llamado a transformar la construcción del siglo XX. (Fig. 1)

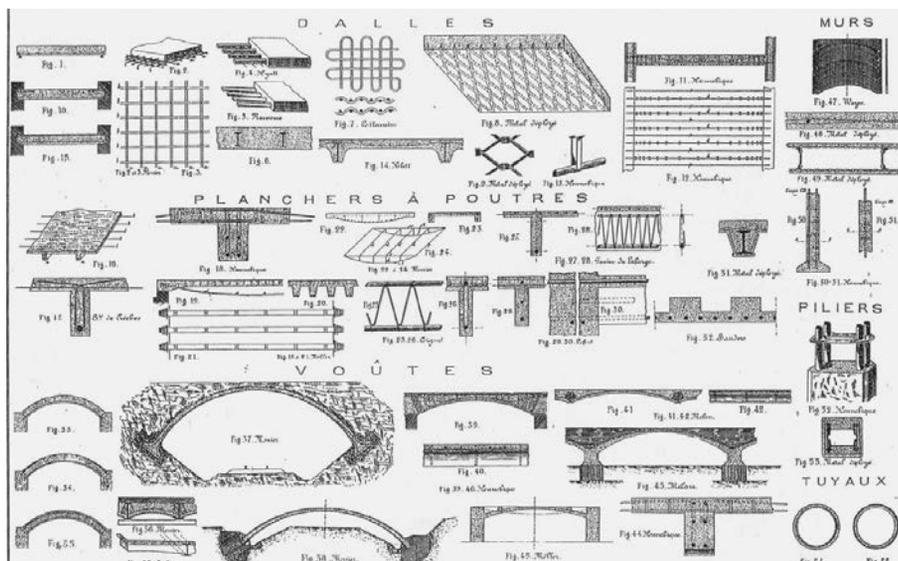


Fig. 1  
Antoine Picon, *L'art De l'ingénieur* (Paris: Centre Georges Pompidou, 1997).

EDUARDO TORROJA.  
FRONTÓN DE RECOLETOS. MADRID, 1935.

Desde el origen del hormigón armado los ingenieros se interesan en estudiar las propiedades del nuevo material y en tratar de determinar los sistemas estructurales que mejor se adecuan a sus características, optimizando su utilización y definiendo nuevas estrategias formales. La labor desarrollada en este sentido por ingenieros como Robert Maillart, Eduardo Torroja, Eugène Freyssinet, Pier Luigi Nervi o Riccardo Morandi, resulta incontestable, y sus construcciones de puentes y edificios imprescindibles en el establecimiento de las formas arquitectónicas del siglo xx asociadas al hormigón. Estas construcciones de los ingenieros, como el Frontón de Recoletos de Eduardo Torroja, exploran las posibilidades formales del hormigón y buscan establecer las formas resistentes más apropiadas a sus características, con un criterio claro de rigor estructural, según el cual la forma viene determinada por los esfuerzos a los que se ve sometida la estructura y por la naturaleza de los materiales, basando la belleza de la construcción en el concepto de “verdad estructural”. (Fig. 2)



Fig. 2

Eduardo Torroja, *Razón y ser de los tipos estructurales*, 9ª ed. (Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”, 1998).

EERO SAARINEN. TERMINAL TWA.  
AEROPUERTO DE IDLEWILD. NUEVA  
YORK, 1956-62.

El conocimiento y control de las propiedades y cualidades del hormigón va derivando en una fase de “sobrecontrol” del material, en la que se aprovechan las posibilidades que ofrece, pero las formas que se plantean se alejan de las que derivan estrictamente de sus propiedades y características intrínsecas, en busca de una plasticidad personal que la forma resistente pura no aporta. Así, frente al rigor geométrico y estructural de las “formas ingenieriles” iniciales, proyectos como la terminal de la TWA en el aeropuerto de Nueva York plantean geometrías complejas, deudoras de los desarrollos formales de éstas, pero que adoptan una libertad y plasticidad nuevas. (Fig. 3)



Fig. 3

Peter Gössel and Gabriele Leuthäuser, *Arquitectura del siglo XX* (Köln: Taschen, 2005).

EUGÈNE FREYSSINET.  
PUENTE DE LUZANCY SOBRE EL MARNE,  
1946.

En 1928 el ingeniero francés Eugène Freyssinet registra la patente del hormigón pretensado, que supone una auténtica revolución en el mundo de la ingeniería y la construcción. El hormigón pretensado es un nuevo material, con características, propiedades y posibilidades distintas al hormigón armado. Consiste en la introducción en la estructura de unas fuerzas que producen tensiones de signo contrario a las producidas por las restantes acciones aplicadas, mejorando su capacidad resistente y su comportamiento. Permite así controlar las tracciones y superar la fisuración del hormigón, y consolida el empleo de materiales de alta resistencia (hormigón y acero), ampliando enormemente las posibilidades técnicas, constructivas y formales. Es fundamentalmente en el campo de los puentes donde se producen las principales aportaciones inicialmente, como el puente de Luzancy sobre el Marne, en 1946, del propio Freyssinet, o más adelante los grandes desarrollos de puentes pretensados y prefabricados en la segunda mitad del siglo xx, especialmente en Francia y Alemania. En el campo de la arquitectura es menos claro el potencial directo de estos nuevos sistemas o su influencia en el desarrollo de nuevas tipologías. No obstante despierta un rápido interés, y amplía también las posibilidades del hormigón prefabricado. (Fig 4.)



Fig. 4

Eugène Freyssinet and Javier Rui-Wamba, *Eugène Freyssinet, Un ingeniero revolucionario* (Madrid: Fundación Esteyco, 2003).

MIGUEL FISAC. CENTRO DE ESTUDIOS  
HIDROGRÁFICOS. MADRID, 1960-63.

Las estructuras prefabricadas, de hormigón armado o pretensado, tienen sus propias características, potencialidades y cualidades, y constituyen una entidad diferente de las estructuras de hormigón in situ. Así, la prefabricación, construcción en serie de numerosos elementos, permite que los condicionantes económicos (coste) y técnicos (dificultad de análisis) que limitan en ocasiones el desarrollo de formas singulares en hormigón in situ, tengan menor relevancia. Si una pieza singular se repite en una serie muy importante de elementos, el esfuerzo que puede suponer su análisis y fabricación queda diluido y resulta prácticamente insignificante. La importancia de la prefabricación en la construcción, la arquitectura y la obra civil abarca tanto los sistemas estandarizados, de gran economía y rapidez constructiva, como el desarrollo de sistemas y elementos singulares, como es el caso de los proyectos de Miguel Fisac o Pier Luigi Nervi. (Fig. 5)



Fig. 5

Luis Fernández Galiano (Ed.). *Miguel Fisac. Arquitectura Viva*, AV Monografías, 101 (2003).

ALVARO SIZA. FUNDACIÓN SERRALVES.  
OPORTO, 1994.

La obra de arquitectos como Louis Khan, Oscar Niemeyer, Tadao Ando, Alvaro Siza está íntimamente ligada al empleo del hormigón, explorando, desarrollando y ampliando sus posibilidades y cualidades de forma, color, tonalidad o textura. (Fig. 6)



Fig. 6

Fernando Guerra. *Archdaily*. [https://www.archdaily.com.br/br/874365/museu-de-serralves-de-alvaro-siza-pelas-lentes-de-fernando-guerra?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com.br/br/874365/museu-de-serralves-de-alvaro-siza-pelas-lentes-de-fernando-guerra?ad_medium=gallery).

TOYO ITO, MUTSURO SASAKI. PROYECTO I. FUKOAKA, 2004.

Proyectos como el Proyecto I, de Toyo Ito y el ingeniero Mutsuro Sasaki, continúan la tradición de láminas delgadas de hormigón, adoptando formas que optimizan el comportamiento estructural, basándose en el criterio general de que un sistema estructural que transmite las cargas a través de fuerzas axiales (con mínima flexión) tiene el grado más alto de eficiencia de transmisión de cargas. Se genera así una estructura tridimensional que cubre la máxima luz con el mínimo empleo de material. Estos planteamientos de definición de la forma en función de su comportamiento resistente se desarrollaron históricamente mediante sistemas geométricos o modelos físicos, y actualmente mediante modelos computarizados. (Fig. 7 y 8)

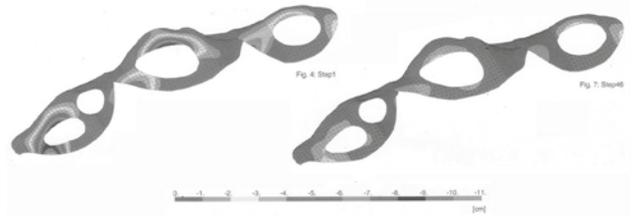


Fig. 7

Mutsuro Sasaki, *Morphogenesis of flux structure* (London: AA Publications, 2007).

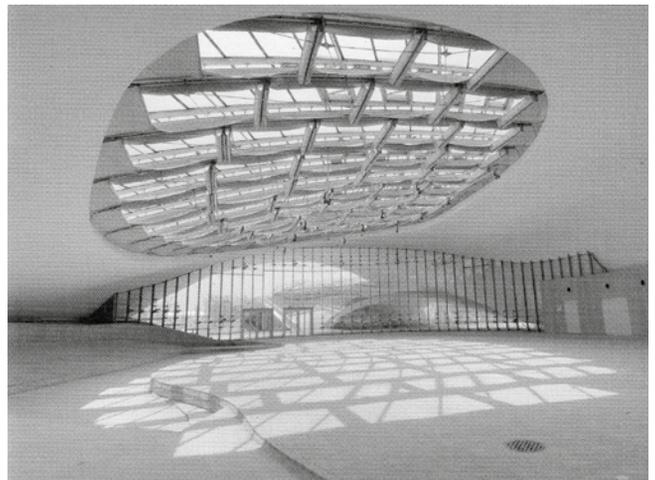


Fig. 8

Mutsuro Sasaki, *Morphogenesis of flux structure* (London: AA Publications, 2007).

SANCHO MADRIDEJOS.  
CAPILLA EN VALLEACERÓN. CIUDAD  
REAL, 2001.

Los sistemas de planos plegados o poliedros parten de una superficie plana y mediante el plegado de la misma se modifique radicalmente su comportamiento estructural, apareciendo quiebros y planos en distintas direcciones que rigidizan el sistema y permiten la transferencia de esfuerzos controlando y reduciendo nuevamente la aparición de esfuerzos de flexión. Es el caso de la Capilla en Valleacerón, de Sancho Madridejos, que ofrece una interesante investigación y aplicación de estos sistemas que permite valorar sus posibilidades espaciales y su relación con el comportamiento resistente (Fig. 9)

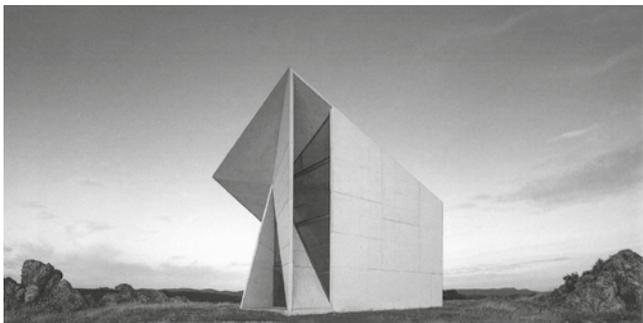


Fig. 9  
Sancho Madridejos. *Suite en tres movimientos* (Madrid: Ediciones Rueda, 2001).

ACEBO X ALONSO. MUSEO NACIONAL DE  
CIENCIA Y TECNOLOGÍA. A CORUÑA, 2012.

Desde su origen se ha continuado desarrollando y mejorando las características y propiedades del hormigón, permitiendo alcanzar resistencias muy elevadas y aumentando sus posibilidades de aplicación y de puesta en obra. Es el caso de los hormigones de alta resistencia, hormigones ligeros, hormigones autocompactantes, hormigones expansivos y de retracción controlada, hormigones armados con fibras, hormigones celulares... En el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología en A Coruña, de los arquitectos Acebo x Alonso se utilizó hormigón autocompactante para los grandes volúmenes prismáticos de hormigón armado que organizan el programa y configuran el espacio interior. (Fig. 10)



Fig. 10  
Alejandro Bernabéu. *La estructura alterada* (Madrid: Tectónica nº 40, 2013).

ANTÓN GARCÍA ABRIL. TIPPET RISE ART CENTER. MONTANA, 2015.

Las intervenciones de Antón García Abril en el Tippet Rise Art Center son construcciones muy singulares, realizadas en hormigón armado y que utiliza como encofrado el propio terreno, que posteriormente se excava descubriendo la construcción. (Fig. 11)



Fig. 11

Ensamble Studio. <https://www.ensemble.info/tippet-rise-art-center>.

EDUARDO CHILLIDA, JOSÉ ANTONIO FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ. LUGAR DE ENCUENTROS III (SIRENA VARADA): MADRID, 1972.

Una parte importante de la obra escultórica de grandes dimensiones de Eduardo Chillida está ligada a la utilización del hormigón como material escultórico y estructural, que le sugirió e introdujo el ingeniero José Antonio Fernández Ordóñez. La escultura Lugar de Encuentros III, situada en el museo de esculturas bajo el Puente de Juan Bravo en Madrid, de José Antonio Fernández Ordoñez y Julio Martínez Calzón, plantea unos de los primeras aplicaciones del hormigón como materia escultórica, y se dispone colgada del puente, sin apoyar sobre el suelo, como desafío a la gravedad. (Fig. 12)



Fig. 12

Jorge Bernabéu. *Estructuras en esculturas, los sueños de la materia* (Cuadernos de diseño en la obra pública, nº 9. Diciembre 2017).

Bibliografía

Bernabéu, Alejandro. *“La estructura alterada”*. Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción 40 (2013).

Bernabéu, Jorge. *“Estructuras en esculturas, los sueños de la materia”*. Cuadernos de diseño en la obra pública 9 (2017).

Fernández Galiano, Luis (Ed.). *“Miguel Fisac”*. Arquitectura Viva, AV Monografías, 101 (2003).

Freyssinet, Eugène, y Rui-Wamba, Javier. *Eugène Freyssinet, Un Ingeniero Revolucionario*. Madrid: Fundación Esteyco, 2003.  
Gössel, Peter, y Leuthäuser, Gabriele. *Arquitectura del siglo XX*. Koln: Taschen, 2005.

Picon, Antoine. *L'art De L'ingénieur*. Paris: Centre Georges Pompidou, 1997.

Sancho Madrudejos. *Suite en tres movimientos*. Madrid: Ediciones Rueda, 2001.

Sasaki, Mutsuro. *Morphogenesis Of Flux Structure*. London: AA Publications, 2007.

Torroja, Eduardo. *Razón Y Ser De Los Tipos Estructurales*. 9a ed. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”, 1998.