

Del 'empirismo' a la invención: cálculo y proyecto en la arquitectura moderna

Ausías González Lisorge

Ausías González Lisorge

Máster en Estructuras de la Edificación por la Universidad Politécnica de Madrid.

Centro de Investigación:

Universidad Politécnica de Madrid.

ausiasgl@gmail.com

RESUMEN

Una buena parte de la crítica arquitectónica mantiene que uno de los mayores condicionantes de la arquitectura moderna es la técnica y, más concretamente, la estructura resistente. Para llegar a dilucidar si eso es así o no, es necesario hacer una lectura transversal de dos fuentes historiográficas distintas: la de la arquitectura y la de la ingeniería. Así, el estudio, tanto de la evolución en el tiempo de ambas disciplinas —a partir de la aparición de la segunda, a mitad del siglo XVIII—, como de la manera en la que los críticos de la arquitectura han entendido la cuestión de la tecnología, sirve para crear una base teórica sobre la que poder comprender cómo se han retroalimentado la ciencia y el arte. Además, se puede llegar a clarificar cómo se ha desarrollado la manera en la que los proyectistas idean sus diseños a partir de la relación estructura-forma.

Palabras clave: Estructura resistente, cálculo de estructuras, 'empirismo' ciencia, invención, form-finding, cálculo gráfico, Crystal Palace, Galerie des Machines, Torre Eiffel, TWA, Pabellón Philips, Ópera de Sydney.

ABSTRACT

Much of the architectural critics maintain that one of the major constraints of modern architecture is the science, specifically, the resistant structure. In order to determine whether this is so or not, it is necessary to make a transversal reading of two different kind of historiography: that of the architecture and that of the engineering. Thus, the study of both the evolution in time of the two disciplines (from the springing of the second, on the mid of the eighteenth century), and the way in which architectural critics have understood the question of techniques, serve to create a theoretical basis on which to understand how science and art influence each other. Moreover, it can be clarified the way that designers have formulated the relation art-science.

Keywords: Resistant structure, structure design, empiricism, science, invention, form-finding, graphical analysis, Crystal Palace, Galerie des Machines, Tour Eiffel, TWA, Philips Pavilion, Sydney Opera House.

Desde el nacimiento de la ciencia de las estructuras, o más bien, desde la separación entre las disciplinas de arquitectura e ingeniería, las referencias formales de los proyectistas han ido variando y volviéndose más complejas, debido entre otros factores a la evolución de la ciencia y de sus herramientas [Fig. 01].

Así, la manera en la que los arquitectos e ingenieros han podido proyectar ha cambiado en paralelo al desarrollo de la tecnología. Se podría decir que la evolución de la arquitectura se corresponde con dos conceptos que se retroalimentan: la voluntad y la técnica. La primera hace surgir a la segunda y

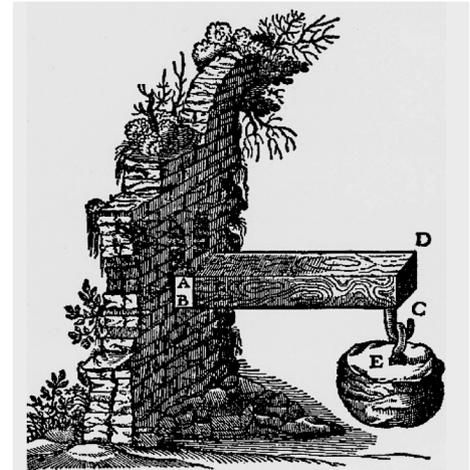
su desarrollo crea nuevas posibilidades. El objeto de este artículo es estudiar hasta qué punto la una es independiente de la otra.

Es necesario partir por tanto de la base de que la técnica es algo más que un medio. Como propuso Martin Heidegger (01), sabemos que *tekné* es un proceso para 'presentar-ahí-delante' la abstracción. Es decir, se erige como algo necesario para concretar una idea. Por lo que el estudio de la tecnología y, por tanto, de la ciencia es fundamental para comprender cómo se han gestado los proyectos de arquitectura. Este modo de explicar el hecho arquitectónico desde la relación entre arte y estructura resistente no es el más generalizado. Surge entonces la duda de cómo abordarlo. Es imprescindible por eso estudiar las grandes fuentes historiográficas de la ingeniería y la arquitectura. A través de las primeras, se puede llegar a entender la evolución de la estructura resistente (02) a lo largo del tiempo y señalar qué edificios son paradigmáticos a la hora de integrar esas posibilidades. Entre los autores que más luz arrojan a ese respecto están Karl-Eugen Kurrer, Bill Addis, Hans Straub, Santiago Huerta y Jacques Heyman (03).

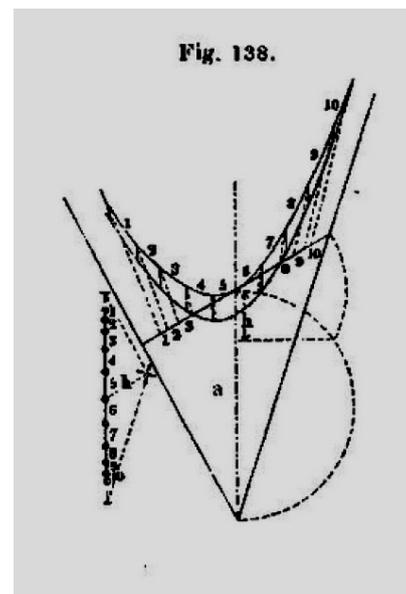
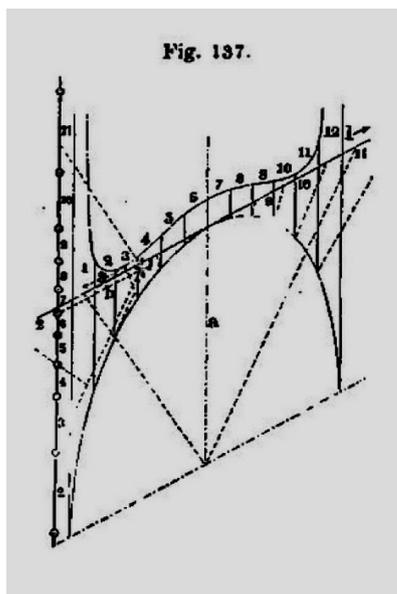
Los procedimientos

Los primeros métodos de cálculo —hasta la aparición de la ciencia de las estructuras en el siglo XVII— eran empíricos. Los arquitectos trabajaban con proporciones geométricas que aseguraban la estabilidad de las construcciones. No obstante, no eran capaces de predecir configuraciones formales que se desviaran radicalmente de aquello que conocían. Uno de los ejemplos más claros de estas limitaciones fue cuando en la catedral de Milán se llamó a Jean Mignot para estudiar si se podían continuar los trabajos para terminarla. Mignot pensó que no se debía hacerlo. No obstante, los maestros lombardos prosiguieron su construcción, lo que llevó al arquitecto a predecir: «*ars sine scientia nihil est*». Sin embargo, el edificio se acabó sin mayores problemas. Es decir, Mignot se equivocó en su estimación, dado que las relaciones geométricas y proporcionales del edificio eran distintas a las que él conocía. Por consiguiente, se puede afirmar que los proyectistas formados a través del 'empirismo' estaban obligados a operar por modificaciones de esquemas que ya conocían; algo que se entiende bien, por ejemplo, en la evolución entre la arquitectura románica y la gótica.

Esta situación cambió gracias al desarrollo de la ciencia del cálculo de estructuras. Galileo Galilei está considerado el padre de teoría de la resistencia de los materiales. En 1633 la Inquisición de Roma le prohibió escribir y publicar sobre astronomía. Esto lo abocó a estudiar la resistencia de los materiales. Así, en 1637 publicó sus *Diálogos sobre dos nuevas ciencias*, donde diferenció la noción de fuerza y momento estático a través del estudio de vigas en ménsula. Galileo supuso que la tensión se distribuía uniformemente en la sección de las vigas; y llegó a la conclusión de que una sección rectangular aguantaba un momento $bh^2/2$. No obstante, deberían pasar varias décadas



[FIG. 01]. ILUSTRACIÓN DE DIÁLOGOS SOBRE DOS NUEVAS CIENCIAS, DE GALILEO GALILEI. FUENTE: HEYMAN JACQUES, THE SCIENCE OF STRUCTURAL ENGINEERING, LONDRES, IMPERIAL COLLEGE PRESS, 1999 (REIMPRESIÓN DE 2006), P. 53.



[FIG. 02]. EJEMPLO DE CÁLCULO GRÁFICO. FUENTE: CULMANN, KARL, DIE GRAPHISCHE STATIK, ZÜRICH, VERLAG VON MEYER, 1875, P. 301.

hasta que se empezase a emplear esta herramienta para proyectar, lo que acabaría por librar a los proyectistas de atenerse a geometrías predeterminadas.

Así, Daniel-Charles Trudaine creó el 'Bureau des Dessinateurs du Roi' en 1747, que más tarde se conocería como la 'École de Ponts et Chaussées'. Esto provocó la escisión entre arquitectura e ingeniería. La división se produjo porque algunos arquitectos pretendían incorporar a la edificación la ciencia del cálculo de estructuras y otros no. Aparecieron entonces dos tipos de proyectistas, los que partían de la ciencia y los que lo hacían desde consideraciones artísticas. Al carecer los unos de la formación de los otros, esas diferencias en la manera de diseñar se incrementaron.

Cuando el cálculo científico comenzó a dar sus frutos, las geometrías de las que se servían los proyectistas seguían siendo las que conocían de antemano, es decir, formas simples. A partir del desarrollo del hierro y, debido a su precio, el cálculo se volvió una herramienta imprescindible para optimizar la sección de los elementos estructurales. El hierro sustituía con ventaja a la madera en los incendios. En el Crystal Palace, por ejemplo, se utilizaron materiales como el hierro, la madera y el vidrio, que se dimensionaron mediante métodos científicos. En su cálculo, Joseph Paxton adoptó geometrías que ya conocía y que seguían siendo puras. Por tanto, hasta ese momento, sólo se había producido un cambio de material, no de forma.

El siguiente paso fue la incorporación del cálculo gráfico [Fig. 02] en los proyectos, a partir de la década de 1860. Este método sí causó un cambio en la geometría de los edificios, que llegó a su máxima expresión, tanto en la Galerie des Machines, como en la Torre Eiffel [Fig. 03]. Por otra parte, el hormigón armado comenzó a emplearse en construcción desde el último cuarto del siglo XIX. En un principio, los esquemas estructurales en los que se aplicaba no distaban mucho de la tipología de fábrica del XIX.

(01) Heidegger, Martin, Vorträge und Aufsätze, Pfullingen, Verlag Günther Neske, 1954. [Tr. española de Eustaquio Barjau, Conferencias y artículos, Barcelona, Ediciones del Serbal, 1994].

(02) El término 'estructura resistente' se ha adoptado a través de las lecturas de:

Manterola Armisén, Javier, «La estructura resistente en la arquitectura actual», Informes de la Construcción, Volumen 50, núms. 456-457, julio/agosto-septiembre/octubre, 1998.

Manterola Armisén, Javier, «La estructura resistente en la arquitectura actual (continuación)», Informes de la Construcción, Volumen 57, núms. 499-500, septiembre-octubre/ noviembre-diciembre, 2005.

Bastide, Roger et al., Sens et usages du terme structure dans les sciences humaines et sociales, al cuidado de Roger Bastide, La Haya, Mouton & Co., 1962, [Tr. española de Beatriz Dorriots, Sentido y usos del término estructura en las ciencias del hombre, Buenos Aires, Editorial Paidós, 1971].

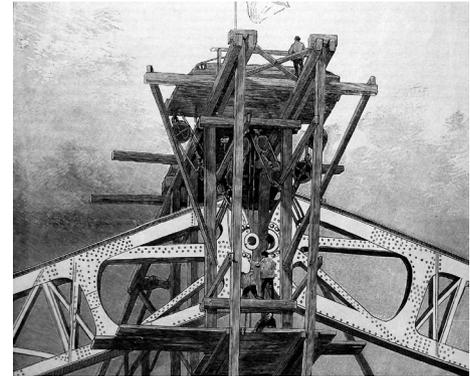
Con el tiempo, el desarrollo del cálculo de membranas, ya en la década de 1920, produjo la aparición de nuevas geometrías en los proyectos: los paraboloides hiperbólicos y sus derivados.

El cálculo de membranas es matemático, pero se refiere a superficies representables gráficamente. Dichas formas las desarrollaron los ingenieros hasta principios de la década de 1950, fecha en la que los arquitectos comenzaron a incorporarlas en sus proyectos; primero de manera directa y, más tarde, como inspiración formal, no como geometría ingenieril, entendida como estructuralmente optimizada. Es éste un proceso que aparece ya en edificios como el Pabellón Philips, de 1958, en el de la TWA y en la Ópera de Sydney. Asimismo, estos edificios se calcularon ayudados por modelos a escala, sobre los que se midieron sus deformaciones [Fig. 04]. Otro de los grandes hitos del siglo XX, fue el desarrollo de la 'Teoría Plástica', aunque no parece que haya supuesto un cambio de forma en los proyectos.

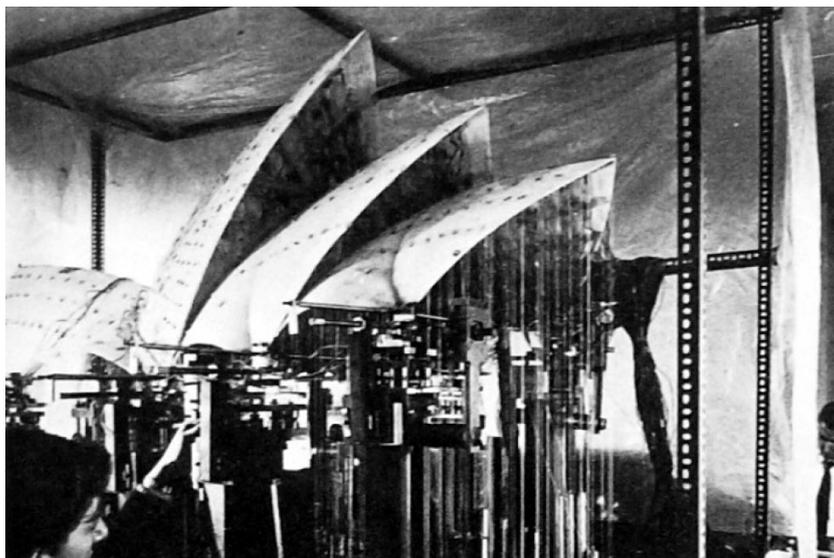
A partir de esas fechas, se perfeccionaron cada vez más los procedimientos informáticos, lo que permitió el uso del método de elementos finitos. Así, desde finales de la década de 1980, los arquitectos comenzaron a proponer una serie de propuestas formales cada vez más difíciles de calcular, basándose en las posibilidades del sistema de cálculo. El Guggenheim de Bilbao es uno de los ejemplos más claros de esta nueva herramienta. Pero este proceso no es tan lineal como parece y se podría hablar de una vía paralela; es decir, el uso de modelos colgantes para encontrar la forma definitiva de los edificios. Muchos años antes, Antonio Gaudí fue quien primero planteó esa manera de proyectar. Más tarde, Frei Otto desarrolló el form-finding; sirviéndose, tanto de modelos colgantes, como de 'pompas de jabón', etc. [Fig. 05].

A través de estas experiencias, se entiende que el cálculo de estructuras permitió llevar a cabo nuevas formas, así como variar la actitud de los proyectistas, por lo que se puede afirmar que la manera de proyectar evolucionó del 'empirismo' a la invención, aunque sin que ello haya necesariamente de suponer valores absolutos. Así, pues, los arquitectos renacentistas, por ejemplo, todavía no disponían del cálculo científico, por lo que sólo podían trabajar con proporciones conocidas, lo que no quería sin embargo decir que no tuvieran capacidad de invención. De hecho, la tenían; en caso contrario, no se hubiera producido la evolución entre el renacimiento y el barroco. Pero estaban obligados a partir siempre de esquemas estructurales conocidos.

Los edificios que se han nombrado pueden considerarse como paradigmáticos, en tanto que recogen las experiencias previas, las superan y las sintetizan. Se trata de un proceso acumulativo; es decir, las estrategias de cálculo y diseño del pasado pueden ser utilizadas hoy y, de hecho, se utilizan. Nuestros ejemplos anteriores han tratado de referirse a casos que, en su época, llevaron al límite la relación entre estructura aparente y estructura resistente.



[FIG. 03]. GALÉRIE DES MACHINES DE LA EXPOSITION UNIVERSALE DE 1889. MONTAJE DE LOS ARCOS TRIARTICULADOS—LA CLAVE ERA UNA RÓTULA. SE ELIGIÓ ESTA TIPOLOGÍA DE ARCOS, PRINCIPALMENTE PORQUE SE PODÍA CONOCER EL ESTADO DE TENSIONES DE LOS MISMOS. ESTO SUPUSO EL ESTABLECIMIENTO DE LA CIENCIA EN EL DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS. FUENTE: AA. VV., L'EXPOSITION DE PARIS 1889 : PUBLIEE AVEC LA COLLABORATION D'ECRIVAINS SPECIAUX, PARIS, LIBRAIRIE ILLUSTREE, 1889.



[FIG. 04]. MODELO A ESCALA DE LA ÓPERA DE SYDNEY. FUENTE: FROMONOT, FRANÇOISE, JØRN UTZON ET L'OPERA DE SYDNEY, PARIS, ÉDITIONS GALLIMARD, 1998, P. 82.

Los métodos de análisis

Por otra parte, hay un hecho que subyace en todo este desarrollo: arquitectos e ingenieros proyectan y operan a través de imágenes. Los primeros se inspiran en el arte o en ejemplos ya construidos, mientras que los ingenieros toman esas imágenes de los métodos de cálculo, ya sean gráficos, o bien se refieran a geometrías representables, o sean modelos form-finding. Es posible considerar por eso que los métodos matemáticos no han supuesto un cambio formal en el diseño; es decir, “son modelos ciegos”.

Asimismo, las imágenes —provenientes del cálculo— están muy relacionadas entre sí. El propio Gaudí afirmaba que el cálculo gráfico era hijo de los modelos de cuerdas. Además, se produce una cierta paradoja: gracias al desarrollo del hierro, el acero y el hormigón armado, se consiguió que grandes estructuras trabajasen a flexión por primera vez en la historia. No obstante, las estructuras en las que se optimiza su forma tienden a trabajar sólo a tracción o sólo a compresión; con lo que de alguna manera, ambos logros resultan casi antagónicos. Y lo cierto es que para poder entender la manera en la que la evolución del cálculo de estructuras ha influido en los proyectistas, es imprescindible estudiar cómo los historiadores de la arquitectura moderna han tenido en cuenta la cuestión de las estructuras en su crítica. Si en el presente artículo se ha reducido este estudio a la arquitectura moderna, es porque, como ya se ha visto, los arquitectos comenzaron a manejar las nuevas técnicas de la construcción a partir del siglo XX.

Se podría considerar que esta manera de actuar es heredera del modo de operar de Panayotis Tournikiotis en su libro *La historiografía de la arquitectura moderna* [Fig. 06]. Por así decirlo, es una especialización de su estudio, centrado en la ‘firmitas’ vitruviana en la estructura resistente. Así lo cree Emilia Hernández Pezzi (04):

(03) Straub, Hans, *Die Gesichte der Bauingenieurkunst*, Basel, Verlag Birkhäuser, 1949. [Tr. inglesa de E. Rockwell, *A History of Civil Engineering, An Outline from Ancient to Modern Times*, London, Leonard Hill Limited, 1952].

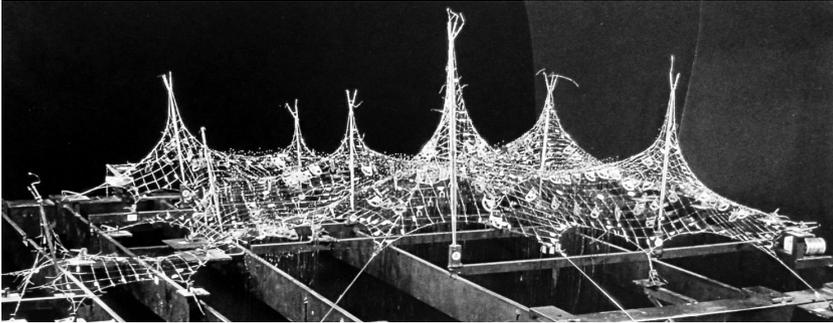
Addis, Bill, *Building: 3000 Years of Design, Engineering and Construction*, Londres, Phaidon Press, 2007.

Kurrer, Karl-Eugen, *The History of the Theory of Structures, From Arch Analysis to Computational Mechanics*, Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2008.

Huerta, Santiago, *Arcos, Bóvedas y cúpulas, geometría y equilibrio en el cálculo de estructuras de fábrica*, Madrid, Instituto Juan de Herrera, 2004.

Heyman, Jacques, *Structural Analysis: a Historical Approach*, Cambridge, Cambridge University Press, 1998. [Tr. española de Santiago Huerta, *Análisis de Estructuras: un estudio histórico*, Madrid, Instituto Juan de Herrera, 2004].

(04) Tournikiotis, Panayotis, *The Historiography of Modern Architecture*, Cambridge, Mass., Massachusetts Institute of Technology, 1999. [Tr. española de Jorge Sainz, *La historiografía de la arquitectura moderna*, Madrid, Librería Mairea y Celeste Ediciones S. A., 2001], p. 7.



[FIG. 05]. MODELO DEL PABELLON DE ALEMANIA EN LA EXPO DE MONTREAL. FUENTE: NERDINGER, WINFRIED (ED.), FREI OTTO COMPLETE WORKS: LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION NATURAL DESIGN, BASILEA-BOSTON-BERLIN, BIRKHÄUSER, 2005, P. 232.

La historia escrita del Movimiento Moderno constituye una excepción en su género porque no se escribió con el distanciamiento que el historiador parece necesitar para interpretar o narrar hechos desde fuera; por el contrario, se hizo directamente desde dentro. Los historiadores participaron activamente en la construcción del entramado teórico de esta nueva arquitectura e impulsaron sus análisis de los acontecimientos históricos desde unas claves contemporáneas que contribuyeron a su equipamiento programático e ideológico...

Es posible así establecer un punto de vista más global que atiende no a una obra en concreto de un arquitecto, o a una trayectoria, sino a aquellos escritos que han influido en el resto de arquitectos. Por supuesto, esta metodología no es perfecta, ni abarca todos los textos que han influido en la historia de la arquitectura moderna, ni a todos los autores. No se pretende aquí incurrir en el error de pensar que los escritos analizados son la única base de la formación de un arquitecto.

Partiendo del texto de Tournikiotis, cabe pues analizar textos de Henry-Russell Hitchcock, Nikolaus Pevsner, Sigfried Giedion, Reyner Banham, Leonardo Benevolo, Bruno Zevi, Peter Collins, Manfredo Tafuri a los que cabe añadir autores como Kenneth Frampton y Charles Jencks. Los términos con los que dichos historiadores se suelen referir a estas cuestiones son: técnica, tecnología, construcción, ingeniería y máquina. Por lo general, esos sustantivos son sinónimos en los diferentes discursos y expresan una disposición de materiales que permite soportar cargas. Sin embargo, hay algunas diferencias. La técnica y la tecnología, en ocasiones, trascienden lo meramente instrumental y se refieren a un proceso en el que la abstracción se hace concreta, real. Es decir, los críticos apelan a esas palabras en el sentido en el que Martin Heidegger explica el *tekné*. Como se verá a continuación, 'máquina' también adquiere varios significados. Además, muchos autores apelan a la estructura resistente refiriéndose directamente a los materiales que suelen ser: hormigón armado y acero. Si se considera la estructura resistente como un holónimo, los materiales serían merónimos. Por lo tanto, al apelar a la primera a través de los materiales, se está produciendo una metonimia, en la que la parte sustituye al todo.

(05) Hitchcock Jr., Henry-Russell, *Modern Architecture: Romanticism and Reintegration*, New York, Payson & Clarke, 1929. [New York, Da Capo Press, 1993].

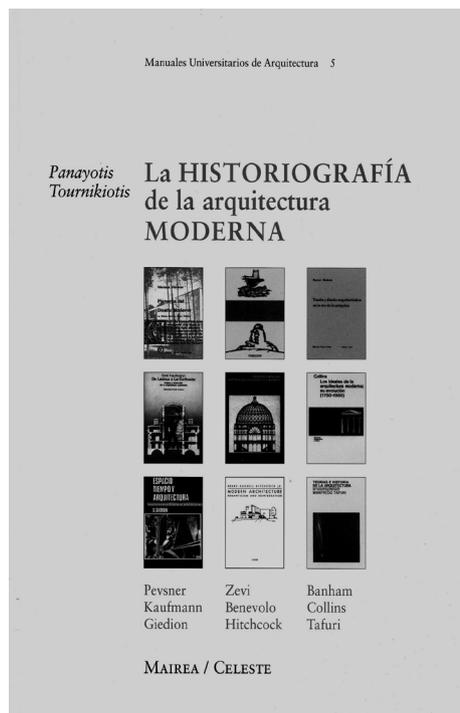
Pevsner, Nikolaus, *Pioneers of the Modern Movement from William Morris to Walter Gropius*, Londres, Faber & Faber, 1936, [Tr. española de Odilia Suárez y Emma Grefores, *Pioneros del diseño moderno: de William Morris a Walter Gropius*, 1ª ed., Buenos Aires, Infinito, 1958, 5ª ed., 2011].

Benevolo, Leonardo, *Storia dell'architettura moderna*, Roma y Bari, Casa Editrice Gius. Laterza & Figli, 1960 (última edición 2003). [Tr. española de Mariuccia Galfetti, Juan Díaz de Atauri, Anna María Pujol i Puighvehí, Joan Giner y Carmen Artal, *Historia de la arquitectura moderna*, 8ª ed., (tercera tirada), Barcelona, Editorial Gustavo Gili S. A., 2005].

Giedion, Sigfried, *Space, Time and Architecture, The Growth of a New Tradition*, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1941 (5ª ed. de 1967). [Tr. española de Jorge Sainz, *Espacio, tiempo y arquitectura: origen y desarrollo de una nueva tradición*, Barcelona, Editorial Reverté, 2009].

(06) Banham, Reyner, *Theory and Design in the First Machine Age*, Londres, The Architectural Press, 1960. [Tr. española de Luis Fabricant, *Teoría y diseño arquitectónico en la era de la máquina*, Buenos Aires, Ediciones Nueva Visión, 1977].

(07) Jencks, Charles, *The Story of Post-Modernism: Five Decades of the Ironic, Iconic and Critical in Architecture*, Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 2011.



[FIG. 06]. PORTADA DEL LIBRO: TOURNIKIOTIS, PANAYOTIS, THE HISTORIOGRAPHY OF MODERN ARCHITECTURE, CAMBRIDGE, MASS., MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1999, [TR. ESPAÑOLA DE JORGE SAINZ, LA HISTORIOGRAFÍA DE LA ARQUITECTURA MODERNA, MADRID, LIBRERÍA MAIREA Y CELESTE EDICIONES S. A. 2001].

(08) Frampton, Kenneth, *Modern Architecture: A Critical History*, Londres, Thames and Hudson, 1980 (edición de 1992). [Tr. española de Jorge Sainz, *Historia crítica de la arquitectura moderna*, Barcelona, Gustavo Gili, 1993, 10ª ed. 2000].

Frampton, Kenneth, *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century in Architecture*, Chicago, Cambridge, Londres, Graham Foundation for Advanced Studies in Fine Arts, The MIT Press, 1995, (segunda reimpresión, 1996).

(09) Zevi, Bruno, *Storia dell'architettura moderna*, 1ª ed., Torino, Einaudi, 1950. [Tr. española de la quinta edición italiana de Roser Berdagué, *Historia de la arquitectura moderna*, Barcelona, Poseidón, 1980].

Zevi, Bruno, *Profilo della critica architettonica*, Roma, Newton & Compton Editori, 2001.

La manera en la que la crítica se refiere a la estructura resistente presenta cuatro vertientes generales: la mecanicista, la estructuralista, la organicista y la metacrítica. La crítica mecanicista defiende una actitud positivista, según la cual, la arquitectura da una respuesta científica a los problemas que se le plantean, por lo que la evolución de la técnica (en la que se incluye el cálculo de estructuras, los nuevos materiales, etc.) fue un factor importante, si no trascendental, en el nacimiento y el desarrollo de la arquitectura moderna. Así, la máquina se erigió como representación de la Revolución Industrial. Henry-Russell Hitchcock, Nikolaus Pevsner, y —en un principio— Leonardo Benevolo y Sigfried Giedion (05), defendieron esa manera de afrontar el asunto.

A través del sistema 'DomIno' de Le Corbusier, se estableció en el imaginario arquitectónico un paralelismo entre la machine à habiter y la estructura resistente. Precisamente, los mecanicistas intentaron reducir las necesidades humanas a una serie de factores determinados y finitos, a los que se podía dar una respuesta certera con el lenguaje propio de la industria. Sin embargo, Reyner Banham (06), afirmaba que, en realidad, la idea de la máquina fue un intento de dar una explicación positivista a la elección de una determinada estética, que era lo que realmente importaba a los arquitectos. Era el momento en que industria y cubismo operaban con geometrías puras. Pero, si se apela a la máquina como símbolo de la Revolución Industrial, sí cabría decir que ésta influyó en los arquitectos modernos más allá de la coincidencia entre ciencia y arte abstracto. La elección de la estética quedaría abierta entonces, sería —por tanto— apriorística y no se podría justificar una predilección por el cubismo o por el expresionismo.

Por otra parte, la crítica estructuralista plantea la arquitectura como un lenguaje compuesto por distintos signos que pueden dar lugar a un código coherente; la estructura resistente se convierte así en uno de los signos a integrar. Leonardo Benevolo y Sigfried Giedion defendieron este punto de vista; a través de las distintas revisiones de sus textos, fueron cambiando el mecanicismo por el estructuralismo, pese a que Benevolo siguió dando una gran importancia al papel de la técnica en la génesis de la tercera generación. Charles Jencks (07) también admite esa interpretación estructuralista; de hecho, reconoce la influencia de Michel Foucault. En sus escritos, entiende y revela que la arquitectura es un código que debe dar respuesta a las necesidades simbólicas de una sociedad plural, en la que las minorías tienen una gran importancia. Por su parte, en un intento de conciliar ambas posturas, la mecanicista y la estructuralista, Kenneth Frampton (08) adopta el concepto de 'tectónica', que dota de un doble sentido —constructivo y simbólico— a la técnica y al detalle.

Otra de las perspectivas es la organicista. Para Bruno Zevi (09), la arquitectura es un organismo complejo que evoluciona en función de sus necesidades internas y sus condiciones de contorno. Pero Zevi no propu-

so una definición concreta del término; el historiador mantuvo una crítica abierta al cambio, con la que pudo llevar a cabo un discurso coherente y bastante unitario al analizar todos los períodos y experiencias arquitectónicas; es decir, fue evolucionando de manera continua y coherente. En ese sentido, además de ser organicista —en tanto que defendía el organicismo— la estructura era orgánica. El papel que la estructura resistente tenía en su crítica se expuso con mayor claridad a través de los siete invariantes de la arquitectura: el elenco de contenidos y funciones, la disonancia, la tridimensionalidad antiperspectiva, la descomposición cuatridimensional, la implicación estructural, el espacio temporalizado y el continuum ambiental. De este modo, la estructura resistente estaba al mismo nivel significativo que el resto de sus invariantes. El historiador entendía así que el desarrollo de la ingeniería tuvo un papel limitado en el nacimiento de la arquitectura moderna, y defendía que sólo a través de ciertos debates, (especialmente en torno a la Torre Eiffel) los arquitectos comenzaron a fijarse en ella.

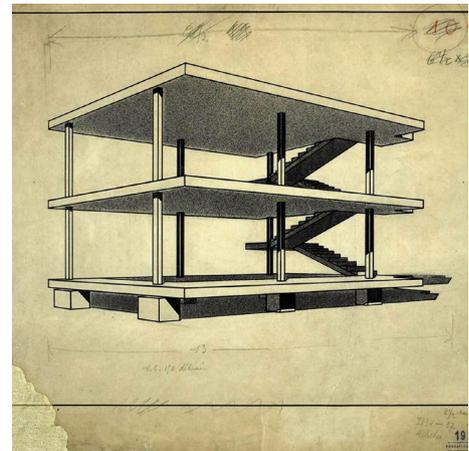
Curiosamente, todas estas líneas críticas tienen un paralelismo con la obra de los maestros de la arquitectura moderna. En efecto, Le Corbusier evolucionó desde el mecanicismo del sistema 'DomIno' a la simbología de Chandigarh. En un sentido semejante, la obra de Mies van der Rohe habría inspirado a Frampton. Y, por fin, Frank Lloyd Wright sería el responsable de la crítica organicista. Caso aparte resulta ser Alvar Aalto, a medio camino entre el organicismo y las vanguardias.

Como colofón de lo dicho, cabe considerar que la metacrítica se ocupa de una crítica de la crítica. Reyner Banham, Peter Collins, Manfredo Tafuri (10) y Panayotis Tournikiotis lo confirman en sus textos, pese a que los dos primeros no sólo estudiaron las distintas críticas de la arquitectura, sino también, sus ejemplos. Además, —como ya se ha indicado— Banham analizó la importancia de la máquina y Collins los motivos que llevaron a la escisión entre arquitectura e ingeniería.

En algunos de los libros de la historiografía de la arquitectura moderna se recorre la arquitectura del hierro y los puentes, y se habla de ciertos desarrollos técnicos desde un punto de vista histórico, como ocurre con las aportaciones de John Augustus Röbling sobre el puente de Brooklyn. Por su lado, Eugène Freyssinet y Robert Maillart, se refieren en sus textos al desarrollo del hormigón. Cabe deducir de todo ello una falta de reflexión de conjunto, no es crítica esa manera de presentar la técnica no es crítica, se trata casi de una enumeración de hechos.

Relaciones entre criterios

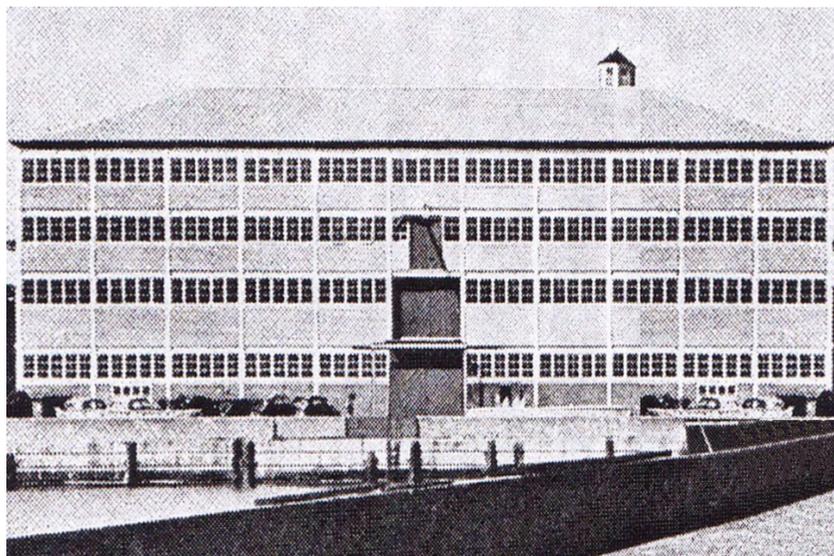
Si se hace una lectura transversal de los dos grupos de textos de historiografía, los de arquitectura y los de ingeniería, se puede llegar a obtener una serie de conclusiones sobre los temas principales que fueron abordados por



[FIG. 07]. SISTEMA 'DOMINO'. LE CORBUSIER ADOPTÓ EL SISTEMA 'HENNEBIQUE' A TRAVÉS DE AUGUSTE PERRET. FUENTE: [HTTP://WWW.FONDATIONLECORBUSIER.FR/](http://www.fondationlecorbusier.fr/) (28/05/2015).

(10) Collins, Peter, *Changing Ideals in Modern Architecture (1750-1950)*, Londres, Faber & Faber, 1965. [Tr. española de Ignasi de Solà-Morales, *Los ideales de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*, Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 1970, 5ª ed., 1998].

Tafuri, Manfredo, *Teoria e Storia dell'architettura*, 1ª ed., Roma-Bari, Gius. Laterza & Figli Spa, 1968 (4ª ed., 1976). [Tr. Española de Martí Capdevilla, *Teorías e Historia de la Arquitectura*, Madrid, Celeste Ediciones, 1997].

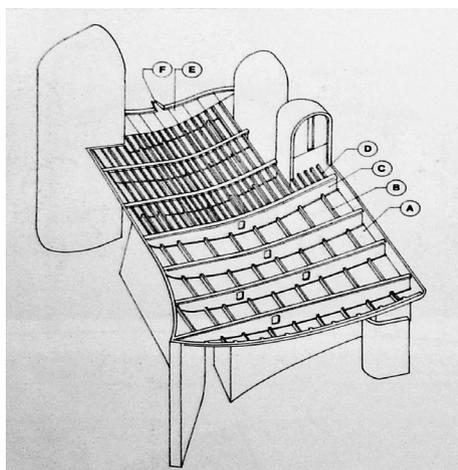


[FIG. 08]. ALMACÉN DE EMBARCACIONES EN EL NAVAL DOCKYARD EN SHEERNES. FUENTE: PEVSNER, NIKOLAUS, PIONEERS OF THE MODERN MOVEMENT FROM WILLIAM MORRIS TO WALTER GROPIUS, 1ª ED., LONDRES, FABER & FABER, 1936, [TR. ESPAÑOLA DE ODILIA SUÁREZ Y EMMA GREFORES, PIONEROS DEL DISEÑO MODERNO: DE WILLIAM MORRIS A WALTER GROPIUS, 1ª ED., BUENOS AIRES, INFINITO, 1958, 5ª EDICIÓN, 2011], P. 115.

los arquitectos modernos. El Estilo Internacional se acogió, por lo general, al uso del sistema 'Hennebique', o el sistema 'Domino' [Fig. 07]. Ello permitió a los arquitectos desarrollar una serie de geometrías inspiradas por el cubismo, el purismo, etc. en una estructura predeterminada. La planta libre fue un axioma de la arquitectura moderna y parece haberse basado en la separación entre estructura y cerramientos. Sin embargo, en EE.UU. la consecución de formas provenientes de las mismas referencias artísticas se hizo en muchos casos a través de sistemas constructivos de una naturaleza absolutamente diversa. Dichos sistemas eran evoluciones del 'balloon system' que podían construirse en acero o en madera.

Así, pues, dado que sistemas estructurales tan diversos como el 'Domino' y el 'balloon system' permitían resultados formalmente similares, se podría decir que la estructura resistente fue una mera herramienta a través de la que los arquitectos del Estilo Internacional pudieron llevar a cabo sus planteamientos artísticos. Además, no parece que el cálculo de estructuras tuviera la menor influencia en ellos. No se debe olvidar que los planteamientos estructurales de esos edificios ya se encontraban en las fábricas de los principios del siglo XIX. Puede que esta referencia no se acepte, a la vista del carácter generalmente portante de las fachadas. Sin embargo, el almacén de embarcaciones del Coronel G.T. Greene [Fig. 08], a finales de la década de 1850, sí presentaba una configuración formal y constructiva de la que no puede negarse su parecido con el Estilo Internacional. Se puede afirmar entonces que los avances en el cálculo, posteriores a esa fecha, no influyeron en el modo de proyectar de los arquitectos.

Tampoco los expresionistas estaban influidos por planteamientos estructurales. De hecho, la Torre Einstein se proyectó en hormigón armado y se acabó construyendo, principalmente, en fábrica. Puede demostrarse así que, para Erich Mendelsohn, la forma era más importante que la construc-



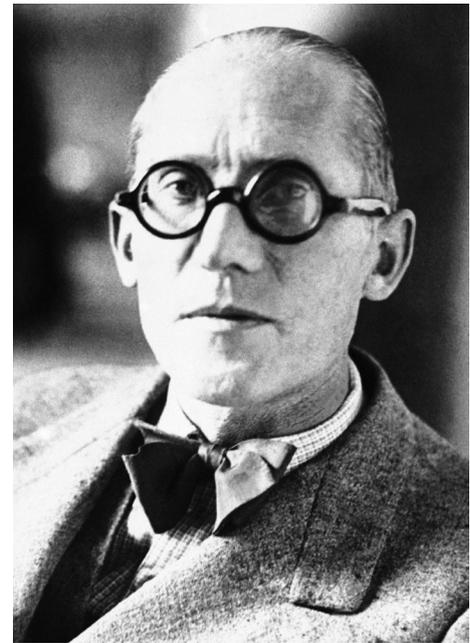
[FIG. 09]. ESQUEMA ESTRUCTURAL DE RONCHAMP. FUENTE: FORD, EDWARD R., THE DETAILS OF MODERN ARCHITECTURE, VOLUME 2, 1928 TO 1988, CAMBRIDGE (MASS.) Y LONDRES, THE MIT PRESS, 1996, P. 192.

ción. Por otra parte, algunos representantes del organicismo se sirvieron de la estructura resistente como un medio, según cabe comprobar observar en obras tales como la casa Robie. No obstante, Frank Lloyd Wright empleó bloques de hormigón armado, tanto portante como compositivo, como argumento principal, en algunas de sus casas. Al mismo tiempo, Alvar Aalto otorgó una cierta expresión a los elementos estructurales a través de referencias a la naturaleza en la Villa Mairea (11). Por el contrario, el constructivismo ruso sí que estuvo influido por la arquitectura del hierro; pero no desde el punto de vista del cálculo, sino como inspiración artística. Fue ése el motivo del diseño de estructuras en desequilibrio y edificios con ecos suprematistas, apenas construibles en esa época.

Algunos de los maestros de la arquitectura moderna se replantearon la relación entre estructura y estructura resistente a medida que evolucionaron. Así, Frank Lloyd Wright se sirvió de los pilares fungiformes como principal elemento compositivo en la fábrica Johnson. Por el contrario, tanto en la casa Fallingwater, como en el Guggenheim de Nueva York, subordinó la estructura resistente a la forma. En cuanto a Le Corbusier, la expresión de los materiales cobró fuerza a partir de los años treinta. Además, exploró un gran elenco de posibilidades en sus diseños, como por ejemplo en Ronchamp, cuando escondió los grandes machones y adaptó la estructura resistente a la geometría [Fig. 09], mientras que el elemento principal de la casa de la cultura de Firminy fue su cubierta colgante. Por su lado, Mies van der Rohe concedió gran preeminencia a la racionalidad constructiva, aunque el desarrollo de sus grandes cubiertas, como la Galería Nacional, estuvo marcado por una configuración formal previa que repercutió de manera muy acusada en la solución estructural.

Después de la II Guerra Mundial, los arquitectos exploraron nuevas soluciones. Dentro del nuevo brutalismo hubo propuestas que partían de un orden estructural, como ocurre en los laboratorios Richards de James Stirling, o en otros edificios, como la Escuela de Ingeniería de Leicester, donde la estructura resistente no llegaba a organizar el juego de volúmenes. En torno a esos años, la crisis del papel del arquitecto llevó a autores como Paolo Soleri, Archigram, Kenzo Tange, etc. a plantear megaestructuras a modo de hábitats artificiales. Fue así como la estructura resistente se convirtió en un contenedor gigantesco.

Algunas propuestas de 'The Five' propusieron una revisión de ciertos aspectos de la modernidad, mediante sistemas constructivos basados en el 'platform system', mientras que otros arquitectos llevaron la expresión de la técnica a un nivel similar al de la arquitectura del hierro. Sin embargo, esos proyectistas —clasificados como 'High-Tech', cuyo ejemplo más característico puede ser Norman Foster— han construido, en muchas ocasiones, estructuras de una cierta complicación, donde la optimización de las mismas no parece ser su leitmotiv —a diferencia de lo propuesto por sus antecesores del siglo XIX.



EL ARQUITECTO SUIZO CHARLES-ÉDUARD JEANNERET, LE CORBUSIER.

(11) Información sobre la construcción de buena parte de los edificios más importantes de la arquitectura moderna en:

Ford, Edward R., *The Details of Modern Architecture*, Cambridge (Mass.) y Londres, The MIT Press, 1990.

Ford, Edward R., *The Details of Modern Architecture*, Volume 2, 1928 to 1988, Cambridge (Mass.) y Londres, The MIT Press, 1996.

[FIG. 11]. SEDE DE LA CCTV EN BEIJING. FUENTE: CARROL, CHRIS, ET AL., «CASE STUDY: CCTV BUILDING-HEADQUARTERS & CULTURAL CENTER», CTBUH JOURNAL, ISSUE III, 2008, P. 18.

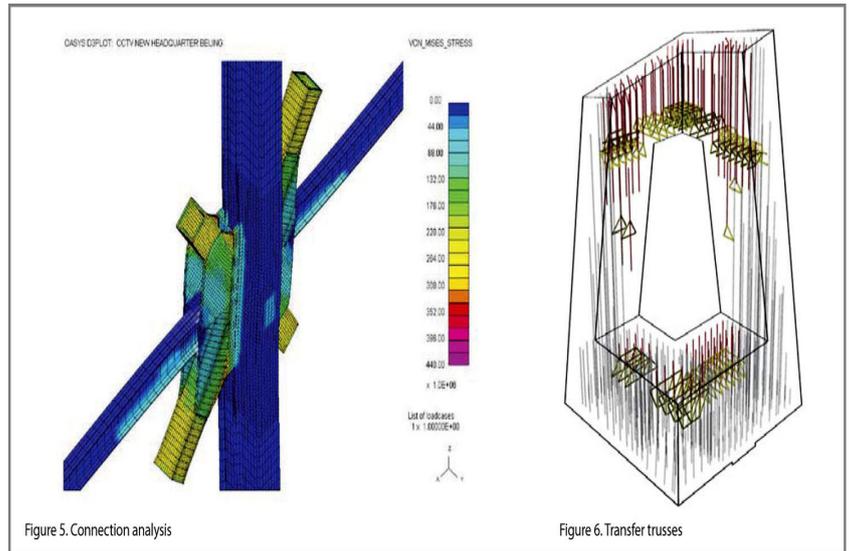


Figure 5. Connection analysis

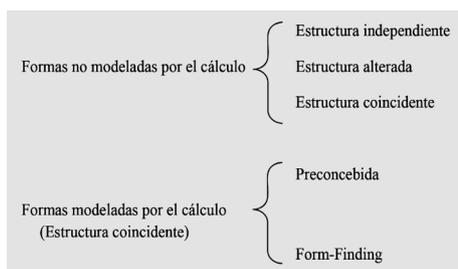
Figure 6. Transfer trusses

Conclusiones

Tras el recorrido descrito, se plantea un esquema donde se pretende clarificar —más que clasificar— la relación entre estructura resistente y estructura [Fig. 10]. Se ha estudiado un proceso que partió del 'empirismo' y que, a través de la ciencia, ha llegado a la invención. En cada una de esas etapas, las posibilidades constructivas y proyectuales dependen del desarrollo técnico, en el que el cálculo de estructuras tiene un papel importante. Así, mientras que antes de la ciencia del cálculo de las estructuras se buscaban proporciones y relaciones geométricas para poder construir, después se empezaron a desarrollar tipologías y elementos preestablecidos para facilitar el cálculo. Los ingenieros tuvieron un papel fundamental en esto. Además, fueron ellos quienes construyeron las propuestas formales que más llevaron al límite los conocimientos técnicos, hasta casi la mitad del siglo XX.

Sin embargo, el 'form-finding' rompió con la necesidad de construir a través de componentes tipo, hasta el punto de que después de este y del desarrollo de membranas, no ha habido métodos de cálculo que propongan nuevas geometrías, lo que hace que el repertorio formal de los ingenieros esté casi agotado. Así, pues, a partir de ejemplos como la Ópera de Sydney, el edificio de la TWA y el Pabellón Philips, los arquitectos empezaron a ser quienes transgredieron los límites entre estructura resistente y forma. De hecho, la colaboración entre Jørn Utzon y Peter Rice parece haber comenzado una época en la que los arquitectos proponen y los ingenieros quedan relegados a un segundo plano.

En el momento actual, el desarrollo del cálculo por ordenador ha despojado al proyectista de la necesidad sine qua non de llevar a cabo estrategias predeterminadas o formas dictadas por el cálculo (12). Hoy, cualquier planteamiento es susceptible de ser calculado y construido, hasta el punto de que los conceptos de: cercha, pilar, losa, etc. son prescindibles. Ello unido



[FIG. 10]. ESQUEMA DE LA RELACIÓN ENTRE ESTRUCTURA RESISTENTE Y FORMA.

(12) Más información sobre la influencia del ordenador en arquitectura en: Picon, Antoine, Digital Culture in Architecture, Basel, Birkhäuser, 2010.



a que el ordenador no tiene una imagen propia y es el proyectista quien ha de introducirla, sitúa a los arquitectos —inspirados en cuestiones que apenas tienen en cuenta la ciencia— en un primer plano en cuanto al diseño de propuestas que exploran los límites del cálculo, como se demostró en los edificios de la CCTV de Rem Koolhaas [Fig. 11] y el Estadio Olímpico de Beijing de Herzog & de Meuron [Fig. 12]. Hasta ese momento, los técnicos procuraban la optimización de las grandes luces y alturas a través de formas basadas en el cálculo; después, lo que prevalece es la expresión.

Es ahora, cuando los ingenieros pueden disponer de nuevas imágenes derivadas de métodos científicos, el momento en que vuelven a liderar el diseño. De esta manera, la invención —entendida como un planteamiento formal libre, no sometido a un cálculo previo, ni a la necesidad de proponer tipologías, ni de someterse a ciertas formas derivadas del cálculo— es, en estos momentos, la estrategia proyectual más avanzada en la relación entre la estructura resistente y la estructura. ■

[FIG. 12]. ESTADIO OLÍMPICO DE BEIJING DE HERZOG & DE MEURON. FUENTE: DUAN, XIAONIAN; HO, GOMAN «SEISMIC DESIGN OF THE ROOF», THE ARUP JOURNAL, NÚM. 1, 2009, P. 24.