

La eficacia y la optimización de las estructuras en la arquitectura reciente

Efficiency and Optimization of Structures in Recent Architecture

Juan José Fontana Cabezas¹

ENVIADO: 27/05/14, 30/07/14 | EVALUADO: 09/06/14, 05/08/14 | ACEPTADO: 04/11/14

Resumen

El presente artículo es un análisis histórico sobre la evolución morfológica reciente de las estructuras arquitectónicas. Parte de la hipótesis de que la búsqueda de la eficacia y la optimización de las estructuras, emprendida en el siglo XVII con el nacimiento de la Era Moderna, continúa hasta nuestros días y ha provocado en los últimos sesenta años el surgimiento de un nuevo nivel de complejidad en la geometría, el diseño, el cálculo y la fabricación de los proyectos arquitectónicos. Supone, además, que esta búsqueda tiene como principal objetivo la producción de estructuras bellas, racionales y económicas. Específicamente, analiza el modo en que la morfología de las estructuras arquitectónicas ha evolucionado recientemente bajo la influencia de nuevos conceptos surgidos a partir del desarrollo de las teorías científicas enmarcadas en la Teoría General de Sistemas, tales como complejidad, azar, autoorganización, indeterminismo, emergencia, no-linealidad y fractalidad.

PALABRAS CLAVE | diseño estructural, Teoría General de Sistemas, complejidad, naturaleza, morfología.

1 juanjosefontana@gmail.com

Facultad de Arquitectura, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Abstract

This work is a historical analysis on recent morphological evolution of architectural structures. It starts with the hypothesis that the search for efficiency and optimization of structures, undertaken in the seventeenth century with the birth of the Modern Era, continues to this day and has promoted, in the last sixty years, the emergence of a new level of complexity in geometry, design, calculation and construction of large-scale architectural projects. It also assumes that this search has as main objective the production of beautiful, rational and economic structures. Specifically, it analyzes how the morphology of architectural structures has recently evolved under the influence of new concepts emerged in the field of scientific theories related to General Systems Theory, such as complexity, random, self-organization, indeterminism, emergency, nonlinearity and fractality.

KEY WORDS | structural design, General Systems Theory, complexity, nature, morphology.

Introducción

El presente artículo se basa en la tesis doctoral «El diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente», presentada por el autor en la Universidad de Alicante, España. Se pretende realizar un análisis del modo en que la búsqueda de la *eficacia* y la *optimización* de las estructuras arquitectónicas ha evolucionado a lo largo de la segunda mitad del siglo XX y principios del siglo XXI bajo la influencia de conceptos surgidos a partir de las teorías científicas enmarcadas en la Teoría General de Sistemas, tales como las teorías del Caos, de las Catástrofes, de la Autoorganización y de los Fractales, es decir, el modo en que las bases conceptuales de estas teorías se trasladan a las investigaciones morfológicas de las estructuras en la arquitectura reciente.

Para ello se basa en las siguientes hipótesis:

1. La búsqueda de la eficacia y la optimización de las estructuras, emprendida en el siglo XVII con el nacimiento de la Era Moderna, continúan hasta nuestros días y ha provocado en los últimos sesenta años el surgimiento de un nuevo nivel de complejidad en la geometría, el diseño, el cálculo y la fabricación de los proyectos arquitectónicos.
2. Esta búsqueda tiene como principal objetivo la producción de estructuras bellas, racionales y económicas.
3. Diversos conceptos que caracterizan a la ciencia contemporánea, surgidos en el marco de la Teoría General de Sistemas, han sido adoptados en el ámbito del proyecto y cálculo de estructuras arquitectónicas y son claves en el diseño de numerosas obras paradigmáticas de la arquitectura contemporánea.

Antecedentes

Charles Jencks, crítico de la arquitectura, fue el primero en abordar la relación entre las Ciencias de la Complejidad y la arquitectura en su libro *The Architecture of the Jumping Universe*, de 1995 (Jencks, 1997b). Según

Jencks, la forma arquitectónica debe seguir la visión del mundo, y, en la actualidad, ésta se encuentra en plena transformación debido a los aportes recientes de la ciencia. En 1997 edita el número 9-10 de la revista *Architectural Design* titulado «Non linear Architecture. New Science=New Architecture?» (Jencks, 1997a) en el cual aborda, junto a varios colaboradores, algunos conceptos vinculados con las nuevas teorías científicas que cree están modificando el modo en que entendemos la arquitectura, y presenta una serie de proyectos contemporáneos que considera paradigmáticos de este cambio.

En dicha revista el ingeniero Cecil Balmond, de la firma Ove Arup, principal precursor de la aplicación en el mundo de las estructuras de conceptos tales como *ambigüedad*, *dinamismo* y *no-linealidad*, publicó el artículo «New Structure and the Informal», en el que analizó el papel que la estructura debería cumplir en la arquitectura, inspirada en la nueva ciencia.

En 2002, Jencks publicó el libro *The New paradigm in architecture. The language of Post Modernism*, en el que analizó el surgimiento de un nuevo movimiento en el ámbito de la arquitectura al que denomina *postmoderno*, que encuentra en los nuevos programas informáticos de diseño la herramienta adecuada para alcanzar sus objetivos: un nuevo nivel de heterogeneidad y de complejidad que reemplaza a los ideales de la modernidad. Arquitectos como Robert Venturi, Peter Eisenman, Frank Gehry, Rem Koolhaas o Daniel Libeskind son identificados como los principales promotores de esta nueva arquitectura.

En el mismo año, Balmond publicó su libro *Informal*, en el que describe algunas de las estructuras que ha diseñado en los últimos años en colaboración con algunos de los arquitectos contemporáneos más prestigiosos, y describe el concepto *informal* como aquellas características no-lineales del diseño. En su libro *Element*, de 2007, realizó una exploración sobre ciencia, arte y naturaleza y profundizó en el análisis de los procesos de diseño estructural apropiados para la nueva arquitectura.

Diversas investigaciones académicas y artículos en

prestigiosas revistas, basados en las ideas de Jencks y de Balmond, han analizado en los últimos veinte años los procesos de diseño arquitectónico bajo la luz de los nuevos modelos de la ciencia, la relación entre la arquitectura y la naturaleza, y las tipologías arquitectónicas que han surgido en la ciudad contemporánea. No existen, sin embargo, trabajos históricos acerca de la influencia que conceptos tales como complejidad, indeterminismo, autoorganización, emergencia, no-linealidad o fractalidad, surgidos en el mundo científico en el marco de la Teoría General de Sistemas, han tenido en el ámbito específico de la morfología de las estructuras arquitectónicas.

Materiales y métodos

En principio, se llevó a cabo un soporte teórico basado en la bibliografía existente que permitiera explicitar las principales ideas y conceptos que han intervenido en los estudios morfológicos de las estructuras arquitectónicas en distintos momentos de la historia, fundamentalmente en el marco de la Era Moderna.

En ese sentido, se estudió el concepto de *belleza* y la relación entre *forma* y *materia* en el pensamiento griego clásico, y el traslado de estas ideas a la época romana y renacentista a partir de los tratados de Vitruvio y de Alberti. Se analizó, a continuación, el cambio en la concepción de la relación entre forma y materia durante el siglo XVII, el surgimiento de la idea de *límite* con la obra de Galileo Galilei, el traslado a la construcción de los conceptos de *eficacia* y *optimización* surgidos en el ámbito del diseño de máquinas y la escisión, en el siglo XVIII, de los estudios de diseño y de mecánica en las escuelas europeas. Se observaron las bases conceptuales de las teorías evolucionistas en el siglo XIX, y las ideas acerca de la relación entre *forma*, *función* y *leyes físicas* que surgieron en el ámbito de las ciencias naturales a principios del siglo XX. Se abordaron, finalmente, los fundamentos teóricos de las principales teorías científicas enmarcadas en la Teoría General de Sistemas.

Se elaboró, igualmente, un soporte teórico que per-

mitiera visualizar las principales soluciones estructurales utilizadas a lo largo de la Era Moderna, estudiando procesos de concepción, diseño y materialización de una selección de obras arquitectónicas consideradas como paradigmáticas.

A partir de ambos soportes teóricos se analizó el *modo* en que, entre principios del siglo XVII y mediados del XX, ideas modernas tales como límite, eficacia, optimización, y relación entre forma, función y leyes físicas, se trasladan al ámbito de los estudios morfológicos de las estructuras. Se consideró especialmente la relación entre modelos de generación de forma, métodos de cálculo y de diseño estructural, y procedimientos de construcción empleados en este período.

Finalmente, se aplicó esta metodología a una selección de obras recientes, analizando el *modo* en que algunas ideas surgidas en el ámbito de la Teoría General de Sistemas y sus teorías asociadas, tales como *complejidad*, *indeterminismo*, *autoorganización*, *emergencia*, *no-linealidad* o *fractalidad*, fueron trasladadas a los estudios morfológicos estructurales. Dicha selección se basó en proyectos desarrollados a partir de la segunda mitad del siglo XX que pudieran ser considerados como paradigmáticos y representativos de un cambio en la manera de concebir las estructuras. Se trata de obras construidas a partir de concursos internacionales o de proyectos realizados por arquitectos renombrados, con una gran difusión bibliográfica, ya que es habitualmente en estos edificios excepcionales en los que se justifica una reflexión innovadora sobre los modos de proyectar y construir.

Resultados

En las investigaciones morfológicas de las estructuras se vislumbra, a partir de mediados del siglo XX, el desarrollo de una serie de ideas arquitectónicas novedosas que aplican, sistemáticamente, conceptos surgidos en el seno de la Teoría General de Sistemas. Estas ideas han orientado las investigaciones recientes sobre la eficacia y la optimización de las estructuras arquitectónicas.

En los estudios recientes sobre la eficacia de las estructuras arquitectónicas se observa la aplicación de los conceptos de autoorganización y de fractalidad a través del desarrollo de ideas tales como *métodos de form finding*, diseño con *formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas y modelos de crecimiento fractal*.

En las búsquedas recientes sobre la optimización de las estructuras, consideradas como uno de los tantos componentes constructivos que necesitan ser coordinados en una obra arquitectónica, se observa la aplicación de los conceptos de complejidad, emergencia, fractalidad y no-linealidad, a través de ideas tales como el *diseño integrado* de dispositivos capaces de responder a *múltiples funciones*, la *coordinación espacial jerárquica* de los programas arquitectónicos con los huecos que la estructura genera, y el desarrollo de procesos de *diseño algorítmico*.

Discusión: el diseño estructural en la arquitectura reciente

Contextualización

Los inicios de la modernidad en el siglo XVII

Para la ciencia aristotélica, conocer era reflejar las estructuras esenciales de la naturaleza. Ésta se concebía dominada por leyes racionales, como las leyes de la armonía y la proporción, y regulada por ritmos matemáticos que los artistas debían descubrir y analizar. Los científicos del siglo XVII transformaron radicalmente este modo de pensar, abandonando la actitud contemplativa para emprender una búsqueda activa del conocimiento y vieron a la naturaleza como una gran máquina que ellos mismos podían aprender a diseñar (Fernandez-Galiano, 1984).

Galileo Galilei observó, en el siglo XVII, que muchos aparatos que funcionan sin problemas a una determinada escala no logran hacerlo correctamente a una escala mayor; las propiedades geométricas de un cuerpo no son las únicas que explican su comportamiento, es necesario también observar las propiedades materiales.

Si dibujáramos dos huesos que cumplieran la misma función en dos seres de distinto tamaño de modo que la longitud del más grande fuera el triple que la del más pequeño –analiza–, el grosor del hueso más grande debería ser mucho más de tres veces el grosor del hueso pequeño si pretendemos obtener una resistencia equivalente en ambos esqueletos (Galilei, 1976) (figura 1).

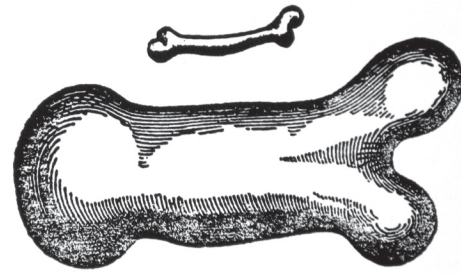


FIGURA 1. Dos huesos de distinto tamaño y resistencia equivalente, según Galileo Galilei Fuente: Galilei 1976, p.237.

Por lo tanto, la resistencia de los elementos estructurales depende directamente del tamaño y a medida que éste aumenta, las proporciones de sus dimensiones deberían cambiar si pretendemos mantener constante la capacidad resistente. La teoría de la invariabilidad de las proporciones en las formas naturales sobre la que se sustenta el método clásico de diseño arquitectónico, a través de los órdenes, es entonces falsa.

Galileo observa los cuerpos y esqueletos de varios animales, analizando la dependencia existente entre la forma, el tamaño y el material. Estudia tanto el mundo de las máquinas como el de la naturaleza, dando origen a la teoría del funcionamiento mecánico de los seres vivos que se mantendría vigente hasta principios del siglo XIX, cuando Lamarck establece la ciencia de la biología como el estudio de los seres vivos, dando origen a las teorías organicistas. Con el propósito de alcanzar la eficacia en la construcción de máquinas, introduce la noción de *límite*. Tanto para las máquinas que crea el hombre como para los cuerpos en la naturaleza, existen límites que no pueden sobrepasarse y que es necesario determinar a través de experimentos.

La forma en arquitectura empezará a entenderse, en-

tonces, no tanto como idea abstracta determinada por la armonía y las proporciones sino como resultado del comportamiento de la materia, vinculado al material que la compone y a sus dimensiones.

A mediados del siglo XVII, los conceptos de *eficacia* y *optimización* que confluyeron por primera vez en el diseño de máquinas militares, comenzaron a aplicarse a la construcción (Fernández-Galiano, 1984). La eficacia, entendida como la búsqueda del *máximo beneficio al mínimo coste* y la *optimización*, como la *satisfacción de dos o más exigencias en conflicto*, sustituyeron a las leyes clásicas. Surgió así el concepto moderno de diseño. Los elementos estructurales dejaron de ser considerados como elementos estándar de los órdenes clásicos, con proporciones constantes, para ser diseñados en función de su material y de las cargas que deben soportar.

Forma y leyes físicas en las Ciencias Naturales en la primera mitad del siglo XX

En el siglo XIX Lamarck introdujo la idea de que la forma en la naturaleza es producto de la función que cumple y de que existe una evolución de la materia viva en la que se percibe una tendencia hacia la complejidad y la perfección. Uno de los principales aportes de D'Arcy Thompson, siguiendo esta idea, fue el demostrar que las fuerzas mecánicas actúan tanto sobre las estructuras vivas como sobre las inertes, modificándolas y haciéndolas más eficientes. Las formas en la naturaleza pueden siempre explicarse por la acción de fuerzas y cuando la búsqueda de la eficacia es lo primordial, tanto las estructuras naturales como las diseñadas por el hombre pueden seguir los mismos principios morfológicos (Thompson, 1945).

Bases conceptuales de la Teoría General de Sistemas en la segunda mitad del siglo XX

La Teoría General de Sistemas surge en la década de 1950 como un esfuerzo de estudio interdisciplinario dedicado a encontrar propiedades comunes a las entidades o sistemas, presentes en todos los niveles de la

realidad, pero que tradicionalmente han sido objeto de estudio de disciplinas académicas diferentes. Ludwig von Bertalanffy critica la visión del mundo fraccionada en diferentes áreas como física, química, biología o sociología. Él creía que estas divisiones son arbitrarias, que presentan fronteras sólidamente definidas así como espacios vacíos entre ellas, e introduce el concepto de una Teoría General de Sistemas (Bertalanffy, 1989).

Esta teoría afirma que las propiedades de los sistemas no pueden describirse significativamente a partir de sus elementos separados, la comprensión de los sistemas sólo ocurre cuando se estudian globalmente, involucrando todas las interdependencias de sus partes. Por otra parte, los sistemas siempre existen dentro de otros más grandes, de modo que se asume la necesidad del análisis de los problemas a distintas escalas.

Si bien en sus inicios se encontró reducida al campo de las ciencias naturales, pronto se vio su capacidad de inspirar desarrollos en otras disciplinas, surgiendo un cuerpo teórico aún en pleno desarrollo que englobó un conjunto de teorías interrelacionadas como la del caos, la de las catástrofes, las teorías de la autoorganización o la de los fractales. Dichas teorías tienen como rasgos distintivos la vocación interdisciplinaria, en contraposición a la diferenciación de disciplinas científicas, y el holismo como visión de la globalidad, frente a la especialización del reduccionismo surgido con Descartes.

Antecedentes

Algunas de las ideas que el diseño estructural ha adoptado recientemente, tales como complejidad, autoorganización, fractalidad y emergencia, pueden encontrarse en obras proyectadas y construidas a lo largo de toda la Era Moderna, a partir de la búsqueda de la eficacia y la optimización formal de algunas tipologías constructivas.

La traza italiana es un estilo de *fortificación* que surgió a finales del siglo XV en respuesta al ataque de ejércitos equipados con cañones, capaces de destruir fácilmente las fortificaciones medievales. La búsqueda de optimización de la relación entre la superficie de muralla a

construir y la seguridad frente a un ataque con esta nueva arma, llevó a la invención de bastiones, medias lunas, revellines y glacis, que definen un perímetro estrellado con características *fractales*, análogo a la curva o al copo de nieve de von Koch. Este repentino cambio de forma en respuesta a un cambio en el entorno, puede ser interpretado como un hecho extraordinario o catástrofe (véase la figura 2).



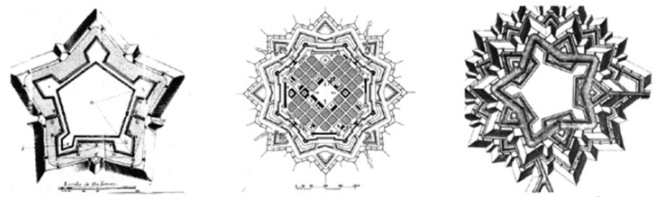
FIGURA 2. Algunos perímetros europeos amurallados ordenados cronológicamente. De izquierda a derecha: A. Planta de una ciudad (Vitruvio, 1992, lámina I); B. Planta de Aggersborg, siglo X (Goodchild et al., 2011, FIGURA 10); C. Línea magistral del recinto de una

A finales del siglo XIX Alexander Graham Bell inventó un método para la construcción de cometas que pudieran ser utilizadas como máquinas voladoras, capaces de alojar tripulación (Bell, 1903). Bell se dio cuenta de que añadiendo celdas tetraédricas según un modelo de crecimiento que resulta fractal, podía crear cometas de gran tamaño en las que la relación entre el peso y la superficie de vela expuesta al viento se mantenía constante. Al unir cuatro células tetraédricas se obtiene una cometa celular, con forma igualmente tetraédrica. Cuatro de estas cometas celulares pueden agruparse para formar una cometa tetraédrica de mayor tamaño y así sucesivamente. Iterando este procedimiento un número determinado de veces, se obtiene una estructura de forma tetraédrica a partir de la adición de células tetraédricas, agrupadas jerárquicamente (véase la figura 3).

Este procedimiento, que permite la creación de estructuras con una alta complejidad formal a partir de una única célula básica de escasa complejidad, es muy utilizado en la naturaleza. Un proceso de fabricación de estructuras edilicias con estas características presenta grandes ventajas con respecto a los procedimientos que

habitualmente se utilizaban a principios del siglo XX: la alta repetición de elementos pequeños facilitó la prefabricación en taller con la subsiguiente disminución de la probabilidad de error, el transporte a obra, y la sistematización de los procesos de montaje y desmontaje.

Los métodos *form finding* comenzaron a utilizarse como instrumentos de diseño arquitectónico a finales del siglo XIX, basados en procedimientos empíricos que



plaza, sistema de Vauban (García Melero, 1990, p. 207); D. Plano de una plaza fortificada (García Melero, 1990, p. 208); E: Plano de Neuf-Brisach, Vauban, 1699-1702 (Vasconi, 2003, p. 31); F. Ciudadela de Lille, Plano de Müller de 1746 (Griffith et al., 2006, p. 40).

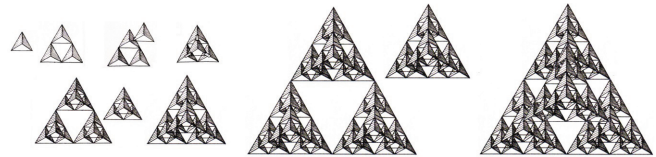


FIGURA 3. Principio tetraédrico inventado por Alexander Graham Bell para la construcción de cometas Fuente: Bell, 1903.

utilizaban la autoorganización que algunos sistemas materiales desarrollan bajo la influencia de ciertas fuerzas externas. Reproducían mecanismos naturales de autoorganización intentando descubrir formas eficaces para una determinada función. El arquitecto Antoni Gaudí fue el primero en diseñar sus construcciones basado en este tipo de experimentos, desarrollando procedimientos que le permitían encontrar formas óptimas para resistir las fuerzas gravitatorias.

En los puentes diseñados por Robert Maillart a principios del siglo XX, apareció por primera vez el concepto de formas complejas adaptadas a las solicitaciones físicas. Las características del hormigón armado indujeron a Maillart a imaginar y diseñar obras cuyos componen-

tes pueden considerarse como un todo continuo, cuyas formas se acercan o coinciden con la línea de presiones del sistema de cargas actuantes, y cuyas secciones variables se deducen de las sollicitaciones físicas, es decir, del comportamiento mecánico de la estructura. En la medida en que el comportamiento de la materia es quien fundamentalmente determina la forma de la estructura y la geometría de sus secciones, podría considerarse que la metodología de diseño empleada por Maillart, si bien es analítica, recurre al concepto de autoorganización de la materia para reducir la cantidad de material estructural.

El libro *On growth and form* de D'Arcy Thompson, de 1917, tuvo una gran influencia en la arquitectura de principios del siglo xx y en él es posible descubrir que las fuerzas mecánicas actúan sobre las estructuras naturales volviéndolas más eficientes, y que las estructuras diseñadas por el hombre pueden seguir estos mismos principios (Thompson, 1945). En varios de sus análisis y dibujos sobre organismos y procesos naturales aparecen formas con características fractales, como en los análisis de la formación de esqueletos de radiolarios, o en los esquemas de los tentáculos de las medusas, de las nervaduras de las alas de las libélulas o de las líneas de sutura de algunos caparzones de moluscos.

Robert Le Ricolais fue un pionero en el traslado al mundo de las estructuras de conceptos surgidos en el ámbito de las ciencias naturales y en la observación de la naturaleza como fuente de inspiración para el diseño (Le Ricolais, 1973). Conceptos como geodesia, empaquetamiento de espacios, inercia, isotropismo o descomposición de la estructura en zonas sometidas a esfuerzos simples, surgen del análisis de organizaciones naturales y de un profundo conocimiento del trabajo de Poincaré, Lord Kelvin, Ernst Haeckel y D'Arcy Thompson.

Uno de los principales objetivos de las investigaciones de Le Ricolais fue el análisis de distintos modelos de organización de la materia como resultado de las acciones físicas y mecánicas, y el estudio de las posibles aplicaciones que estos conocimientos podían tener en el ámbito estructural. Observando los esqueletos de

algunas especies de radiolarios definió el concepto de *automorfismo* como la repetición a distintas escalas de una forma. Diseñó entonces la viga Polyten como una cercha Queen Post con repeticiones automórficas en su interior. Inspirado en la observación de una forma viviente, utilizó el concepto de *fractalidad* para optimizar el comportamiento de una estructura de barras, varios años antes de que dicho concepto fuera desarrollado por Mandelbrot. (figura 4).

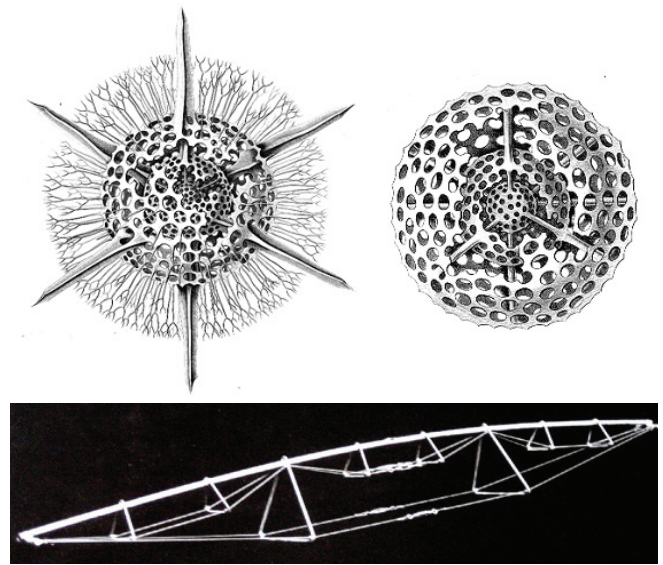


FIGURA 4. Esqueletos de radiolarios automórficos y viga Polyten. Fuente: Haeckel, 1862, lámina 24 y Mc Cleary et al., 1997, p. 115.

Es a partir del estudio de la materia ósea que descubrió la importancia de los huecos. Cuanto más se expande un elemento estructural en el espacio, mayor inercia y rigidez adquiere; una buena forma de diseñar estructuras es, por lo tanto, partir de elementos huecos, livianos y con una gran rigidez. Los huecos en el interior de las unidades estructurales, por otra parte, pueden utilizarse para alojar funciones de servicio. La geometría de la estructura puede definir, entonces, un sistema de vacíos a distintas escalas que determine la organización espacial del edificio. Esta idea trasciende el ámbito del diseño estructural para convertirse en una fructífera línea de investigación sobre diseños arquitectónicos a gran escala, durante la segunda mitad del siglo xx.

La eficacia en las estructuras recientes

Se discute, a continuación, el desarrollo de ideas arquitectónicas tales como métodos de *form finding*, diseño con *formas complejas ajustadas a las sollicitaciones físicas* y modelos de crecimiento *fractal*, que han guiado la búsqueda de la eficacia en las estructuras de la arquitectura reciente.

Los métodos de form finding

Frei Otto retomó, a partir de mediados del siglo XX, los experimentos de *form finding* que Gaudí había inventado para el diseño de estructuras comprimidas. Entre 1964 y 1991, como director del Institut für Leichte Flächentragwerke (il) de Stuttgart, desarrolló y dirigió una enorme variedad de experimentos de ese tipo (Otto et al., 2006). Destacan los experimentos con películas de jabón para producir modelos de tensoestructuras de membranas y de redes de cables pretensados, los experimentos con membranas traccionadas por aire o agua hechas con materiales capaces de endurecer luego de inflados, los experimentos con cadenas para hallar formas de construcciones colgantes estabilizadas por su propio peso, los experimentos con hilos para investigar estructuras ramificadas, y los experimentos con discos giratorios para investigar la estabilidad de las construcciones de mampostería frente a las cargas horizontales.

Para el diseño de las cubiertas del recinto olímpico de Munich, Otto previó utilizar la misma metodología que había desarrollado para el diseño del pabellón alemán de la Exposición Internacional de Montreal, que consistía en un estudio preliminar con modelos fabricados con películas de jabón, luego con telas y finalmente con cables de acero. Estos últimos se construirían respetando los materiales, los vínculos y las cargas de la estructura real, de modo que su geometría y los resultados que se obtuvieran en pruebas de carga pudieran extrapolarse a la obra.

Pero debido a las dimensiones de la estructura, la precisión que podía alcanzarse en un modelo reducido no era suficiente para arrojar resultados extrapolables

directamente a la escala real. El modelo de cables de acero se convirtió, entonces, en otro paso previo hacia la obtención de la geometría ajustada de la cubierta, que sólo podía determinarse con la exactitud requerida a través de modelizaciones y cálculos realizados por ordenador.

A partir de la década de 1960 se produjeron extraordinarios avances en los programas informáticos para el análisis de tensoestructuras, impulsados por el éxito mundial de esta tipología y por la necesidad de diseñar, en plazos limitados, estructuras cada vez más grandes y más complejas. Este desarrollo permitió, en una primera instancia, el cálculo preciso de estructuras diseñadas manualmente o con modelos y la eliminación de la probabilidad de error humano, y más tarde, el diseño de formas estructurales de mayor complejidad que requieren del empleo de una herramienta de alta precisión. Las leyes naturales que actúan en la definición de una superficie de área mínima sometida a esfuerzos de tracción, son bien conocidas y sencillas de programar, pero tal como Frei Otto advierte, utilizando este tipo de herramientas sólo es posible encontrar lo ya encontrado.

Lars Spuybroek, director del grupo Nox, desarrolló una serie de procesos de *form finding* reproduciendo mecanismos de autoorganización que conducen a formas eficaces para determinadas funciones (Spuybroek, 2004). Pero además de los clásicos experimentos que someten un conjunto de materiales a un sistema de cargas, diseñó procesos en los que las deformaciones pasan por un instante crítico en el que sufren un cambio cualitativo trascendente.

En los experimentos llevados a cabo para el diseño de proyectos como el «obliqueWTC» o el «Soft Office», existe un instante en el cual el sistema sufre una discontinuidad en su proceso de autoorganización, que puede ser entendido como una catástrofe según la teoría de René Thom. La forma del sistema se reorganiza abruptamente y emerge una nueva geometría con un nuevo nivel de complejidad, *optimizada* para satisfacer al menos dos requisitos distintos.

En el diseño del obliqueWTC, una propuesta de rascacielos para la reconstrucción del World Trade Center

de Nueva York, en el año 2001, se utilizó una variación de una técnica desarrollada por Frei Otto empleando hilos de lana. En un principio se colgaron, de una base horizontal, una serie de hilos que representaban los ejes de los núcleos del rascacielos. Sometidos a la fuerza de la gravedad, los hilos tomaron la forma vertical. Pero luego se sumergieron en agua y se retiraron, de modo que los hilos se reorganizaron en una malla de mayor complejidad, sometidos a las fuerzas laterales de cohesión del agua que se añadieron a la fuerza de gravedad (Spuybroek, 2004). En el instante en que se agrega la fuerza de cohesión del agua al sistema, éste se reorganiza abruptamente y emerge una nueva geometría con un nuevo nivel de complejidad, optimizada para resistir tanto fuerzas verticales gravitatorias como horizontales de viento.

A continuación se digitalizó el esquema y se aumentó el espesor de los hilos, transformándolos en tubos. Se invirtió el modelo y surgió, de esta manera, la morfología de una torre constituida por la yuxtaposición de múltiples torres más delgadas, como se muestra en la figura 5.

Estos procesos de *form finding* podrían considerarse como no-lineales dado que pequeñas modificaciones en las condiciones iniciales pueden conducir a importantes variaciones en los resultados finales. La forma final del modelo, por lo tanto, no es única. Podrían obtenerse tantas variaciones geométricas como veces se repitiera el experimento.

Las mallas desarrolladas por Le Ricolais y Buckminster Fuller para resolver la estructura de cúpulas y domos geodésicos, están inspiradas en la observación de esqueletos de radiolarios. Estas figuras geométricas se forman, en dichos esqueletos, por sedimentación de sílice en las paredes y aristas de vesículas que se empaquetan en estado líquido tal como ocurre en una espuma, es decir, autoorganizándose según leyes naturales como la del área mínima. El concepto de autoorganización se encuentra presente, por lo tanto, en el diseño de proyectos recientes que continuaron este tipo de investigaciones, tales como la cubierta sobre el Patio del Museo Británico de Norman Foster, el Proyecto Edén

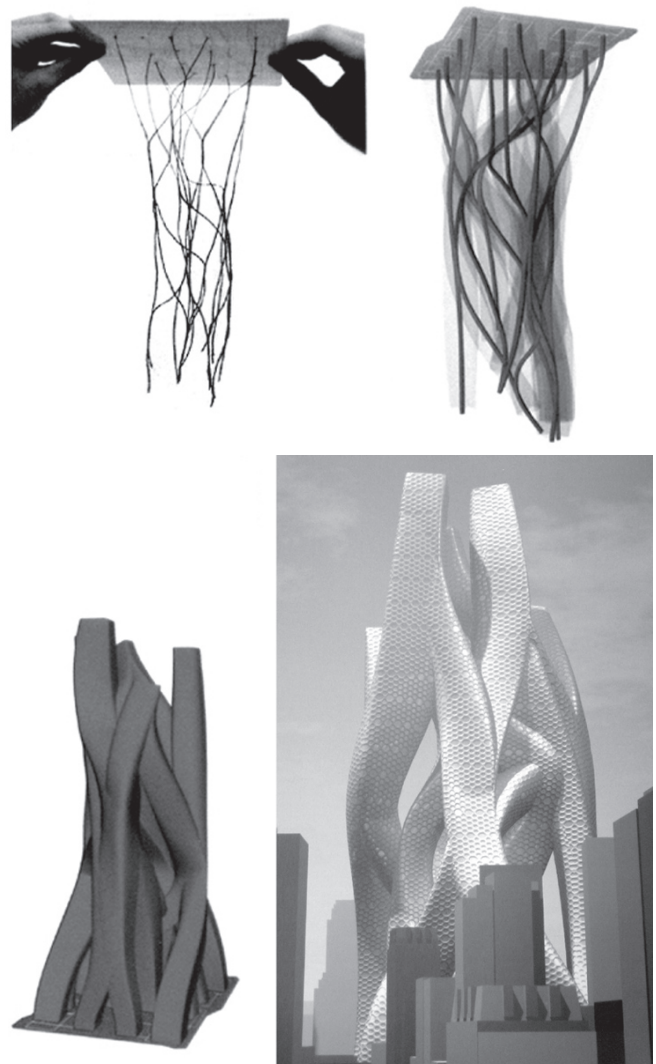


FIGURA 5. Generación de la forma del obliqueWTC Fuente: Spuybroek, 2004, pp. 260-262.

de Nicholas Grimshaw, la piel estructural del proyecto obliquewtc de Nox o la malla del Centro Nacional de Natación de Pekín de PTW Architects.

Formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas

El concepto de *formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas*, que tiene su primer antecedente en los puentes de hormigón armado de Robert Maillart, puede reconocerse en los arcos de hormigón prefabricado de la Opera de Sydney, en las vigas Gerber de acero

fundido del Centro Pompidou, en las bóvedas gausas de Eladio Dieste, y en los pórticos y muebles de chapa de acero plegada de Jean Prouvé. El modelado de los elementos estructurales en estas obras, tomando como dato de partida las sollicitaciones físicas, tiene como objetivo lograr la eficacia y la economía en el uso de los materiales.

Materiales, métodos de cálculo, procedimientos constructivos y diseño de equipos, se relacionan íntimamente en la obra de Eladio Dieste. Una reflexión conjunta sobre todos estos temas ha determinado el éxito de su obra y por ello sus proyectos, además de innovadores desde un punto de vista técnico y formal, resultaron muy económicos.

Las bóvedas gausas que construyó, entre las décadas de 1960 y 1990, están excepcionalmente ajustadas a las leyes de la estática; el empleo de la catenaria y de la doble curvatura implican un diseño acorde a las leyes de autoorganización de la materia y podrían considerarse como el máximo nivel de optimización alcanzado en la evolución de las superficies rígidas resistentes. La idea de D'Arcy Thompson de que las formas son moldeadas por las fuerzas físicas y la de Robert Le Ricolais, de que un modelo geométrico debe surgir a partir de una determinada acción mecánica, se ven claramente reflejadas en sus construcciones.

Modelos de crecimiento fractal

Podríamos denominar como modelo de crecimiento lineal al modelo en el que se basó Galileo Galilei al aumentar el espesor de un hueso de gigante para que su resistencia fuera similar a la del mismo hueso en un hombre de tamaño normal. Cuando plantea el cambio de escala, Galileo supone que permanecen intactas las proporciones de las dimensiones exteriores del hueso y también su estructura interna. Por este motivo, el peso propio crece más rápido que la sección resistente a medida que las dimensiones aumentan, o sea que si un gigante aumentara lo suficiente de tamaño, terminaría inevitablemente derrumbándose bajo su propio peso.

Analizando esqueletos de animales puede observar-

se que cuanto mayor sea el tamaño y mayores sean, por lo tanto, las dimensiones de un determinado hueso, menor parece ser su esbeltez, es decir que su sección resistente crece más rápidamente que su longitud, tal como Galileo afirmaba. Pero esta variación no parecería responder linealmente al aumento de peso. Si observamos la estructura interna de huesos análogos en distintos animales, podemos descubrir que cuando cambian las dimensiones, la naturaleza recurre a mecanismos formales que atenúan la variación de la relación entre el peso propio y el área de las secciones resistentes. A mayor tamaño, parecería ser mayor el volumen óseo ocupado por la cavidad medular y por el hueso esponjoso. Cuando un animal alcanza grandes dimensiones, aparecen huecos en el interior de sus huesos que son proporcionalmente mayores a los de los animales pequeños, es decir, su estructura interna es más compleja.

Si pensamos las sucesivas escalas de huecos en el hueso como generadas mediante un proceso iterativo, desde los espacios intersticiales en las cadenas polipeptídicas hasta la propia cavidad medular, podríamos decir que en los huesos grandes es necesario realizar un mayor número de iteraciones para definir la forma, es decir, que el grado de fractalidad es mayor. A este proceso de crecimiento podríamos denominarlo como fractal.

A mediados del siglo xx surgieron una serie de proyectos en los que los huecos de la estructura determinaban la jerarquía espacial del edificio, como la Philadelphia City Tower de Kahn y Tyng, la Ciudad Tetraédrica de Buckminster Fuller, el Pabellón francés para la Expo de Bruselas de René Sarger o el Pabellón de Guy Desbarats para la Exposición de Montreal. Estos espacios a distintas escalas pueden entenderse como generados a partir de iteraciones hacia el interior del edificio de un módulo principal, según un principio geométrico de crecimiento fractal análogo al que puede observarse en algunas formas naturales y al inventado por Graham Bell para la construcción de cometas tetraédricas. El arte del diseño arquitectónico a gran escala, siguiendo las ideas de Le Ricolais, se convierte en el proceso de aprender a construir con una malla fractal de huecos en el espacio.

El modelo de crecimiento implícito en los sistemas constructivos proyectados por Rinaldo Semino en la década de 1960, que permitió la creación de grandes estructuras a partir del acoplamiento de unidades sencillas, podría también describirse como un modelo de crecimiento fractal. Semino definió macroestructuras a partir de un elemento base y un principio de organización jerárquico, emulando principios de generación de formas naturales. Estos elementos, prefabricados y livianos, adquieren significado una vez que se define como interactúan entre sí para crear una entidad de mayor tamaño y complejidad. Los espacios habitables y utilizables, por otra parte, surgen de los vacíos de distintas escalas que se generan dentro de las unidades estructurales.

En el marco de un concurso de ideas organizado en 1969 para la construcción de un puente que uniría la isla de Sicilia con el continente europeo, Semino concibió una viga flotante sobre el estrecho de Messina, apoyada rígidamente en sus extremos. El puente se formaba a partir de la yuxtaposición de elementos modulares de acero y de hormigón armado, siguiendo ciertos patrones

de organización a distintas escalas. La estructura inferior estaba compuesta por elementos de hormigón armado que cumplían la función de asegurar la flotabilidad del conjunto y la resistencia transversal de la gran viga frente a las cargas horizontales. Sobre este basamento, se apoyaba solidariamente una estructura simétrica de elementos de acero, de modo que el conjunto funcionaba como una única gran viga (figura 6).

Los elementos base de ambos materiales de 2.5 metros de longitud, con huecos en su interior de aproximadamente 0.7 metros de diámetro, tenían forma tetraédrica y se encastran generando vacíos en la estructura según un diseño de malla triangular y hexagonal que permitía una notable simplificación constructiva, una gran liviandad y flexibilidad. Los elementos de hormigón armado se montaban dejando un vacío en las uniones que se llenarían *in situ*, generando una estructura de doble curvatura, mientras que los de acero se obtenían ensamblando por soldadura elementos de 1.38 metros de longitud y 15 mm de espesor. Algunos centenares de estos elementos se vinculaban entre sí logrando una unidad en forma de Y con huecos de unos dos metros de

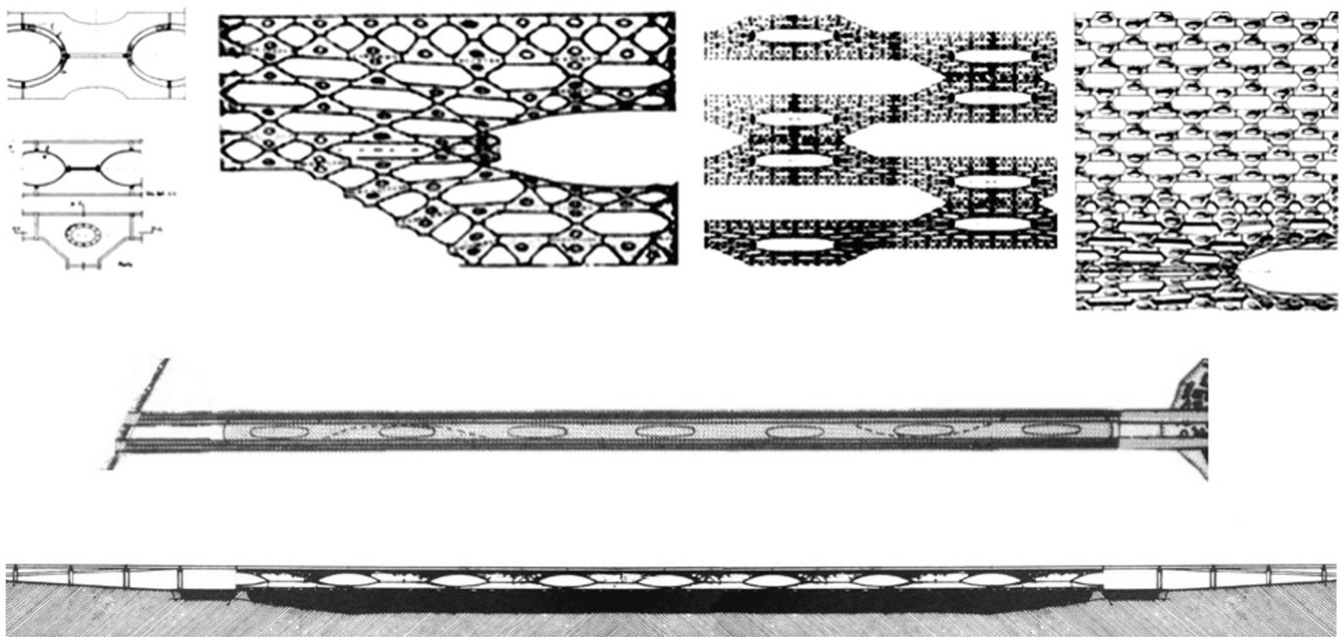


FIGURA 6. Puente sobre el estrecho de Messina: elementos base y su acoplamiento a distintas escalas, planta y alzado lateral de Rinaldo Semino. Fuente: Semino, 1973, pp. 156-159.

diámetro en su interior. Miles de estas unidades en forma de Y se unían generando entre ellas huecos elípticos de una nueva escala: unos 10 metros de diámetro menor y unos 20 metros de diámetro mayor, para formar una pieza principal de 450 metros de longitud.

El puente, de 3150 metros de longitud total, resultaba finalmente de la unión de siete de estas piezas principales, que generaban entre ellas huecos elípticos de diámetros mayores de 200 metros y diámetros menores de 25 metros.

Las tipologías estructurales de rascacielos conocidas como «tubo dentro de tubo», «haz de tubos» y «tubos perforados», desarrolladas a partir de las investigaciones de Goldsmith, Graham y Kahn en SOM durante la década de 1960, podrían igualmente considerarse como fractales. Dichas investigaciones tenían como objetivo la búsqueda de la eficacia estructural de los edificios en altura. La figura fractal conocida como Alfombra de Sierpinski presenta, en su segunda y tercera iteración, notorias semejanzas con la geometría en planta de rascacielos diseñados con los sistemas de «tubo dentro de tubo» y «haz de tubos».

En la tesis doctoral homónima a este trabajo, se propuso una serie de polígonos fractales que podrían utilizarse como base para el diseño de plantas de rascacielos con el sistema de «tubos perforados». En la figura 7, a la izquierda, se observan cinco pasos para el desarrollo de un triángulo fractal, y a la derecha, un cuadrado fractal en su quinta iteración.

Las grandes estructuras proyectadas y construidas por el hombre hasta mediados del siglo XX han sido concebidas, prácticamente sin excepción, con los mismos sistemas estructurales y las mismas características geométricas que las edificaciones pequeñas. La gran escala implicaba la repetición de modelos geométricos probados a escala pequeña, con piezas más grandes y menos esbeltas. Algunas de las megaestructuras que surgieron en la década de 1960 abandonaron el modelo de crecimiento lineal y comenzaron a investigar un modelo alternativo. El gigante que Galileo afirmaba que se derrumbaría por su propio peso, podría comenzar a levantarse de adquirir mayor ligereza con un incremento

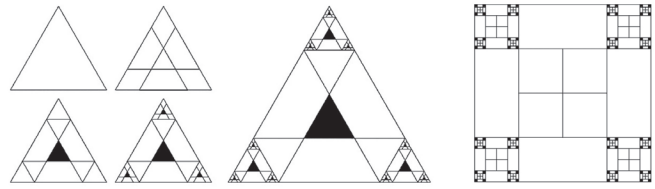


FIGURA 7. Triángulo y cuadrado fractales que podrían utilizarse como base para el diseño de sistemas estructurales de haces de tubos, con huecos a distintas escalas. Fuente: elaboración propia.

en la complejidad geométrica de la estructura interna de sus huesos, a partir de una adecuada distribución jerárquica de los huecos de su masa ósea.

La optimización de las estructuras recientes

Se discute, a continuación, el desarrollo de ideas arquitectónicas tales como *diseño integrado* de dispositivos capaces de responder a múltiples funciones, *coordinación espacial jerárquica* de los programas arquitectónicos con los huecos que la estructura genera, y desarrollo de procesos de *diseño algorítmico*, que han guiado la búsqueda de la optimización de las estructuras en la arquitectura reciente.

Diseño integrado de dispositivos capaces de responder a múltiples funciones

El *diseño integrado* de elementos constructivos, que permite la creación de dispositivos capaces de responder a múltiples funciones simultáneamente, conduce a la emergencia de formas complejas. Cuando el objetivo de una unidad estructural va más allá de garantizar la estabilidad de un edificio, su diseño requiere de la intervención de técnicos especialistas en múltiples disciplinas y el resultado final es, en general, más valioso que la suma de las distintas funciones que es capaz de cumplir.

Para la cubierta sobre el patio del Museo Británico en Londres, un equipo formado por integrantes de Foster & Partners y de Buro Happold trabajaron en el diseño de un sistema constructivo que integrara los elementos

estructurales con los soportes y las fijaciones de los paneles de vidrio. Estructura, cerramiento vidriado y protección solar se resuelven con un único sistema, a modo de optimizar el peso de la cubierta y de resaltar las características de transparencia y simplicidad geométrica de la intervención. Todo esto implica un importante ahorro de materiales, energía y tiempo de obra, además de un diseño final más refinado.

Todas las grandes decisiones que definieron el partido arquitectónico del Commerzbank de Frankfurt tuvieron como objetivo la optimización del edificio desde el punto de vista del uso, de lo resistente y lo energético. Sus distintos componentes están estrechamente vinculados a múltiples sistemas y su diseño está pautado por la optimización de sus funciones. Las áreas de servicios y circulaciones, en donde es posible ubicar grandes pantallas y núcleos sin interferir con las áreas servidas de oficinas, se trasladan a los vértices de la planta de modo que la superestructura adquiera la mayor inercia posible frente a las deformaciones por carga horizontal. Estos núcleos se unen con vigas Vierendeel de ocho niveles de altura para conformar, en conjunto, un gran tubo perforado y hueco. La disposición en espiral de las vigas Vierendeel y de las regiones en que se divide el edificio, permite la apertura del tubo perimetral sin disminuir excesivamente la rigidez global de la estructura y posibilita la conformación de patios de tres niveles de altura, que dejan entrar tanto la ventilación natural cruzada como la iluminación y puede haber vistas desde múltiples direcciones.

En el nuevo Ayuntamiento de Londres, el trabajo en conjunto de técnicos de Foster & Partners y de Arup hizo posible el diseño de una estructura Diagrid que, además de soportar la fachada vidriada norte, juega un papel de primer orden en el sistema de acondicionamiento de aire del edificio, ya que el interior hueco de algunos de sus tubos es aprovechado para la circulación de agua caliente del sistema central de calefacción.

Las vigas compuestas en la cubierta del edificio Expo, en el Congrexpo de Lille, diseñadas por Rem Koolhaas en colaboración con Cecil Balmond y otros técnicos de Arup, cumplen simultáneamente una función estruc-

tural, de cielorraso y de depósito estanco de humos en caso de incendios, y los pilares tubulares de acero funcionan a la vez como soportes y como conductos de circulación del sistema de acondicionamiento de aire (véase la figura 8).

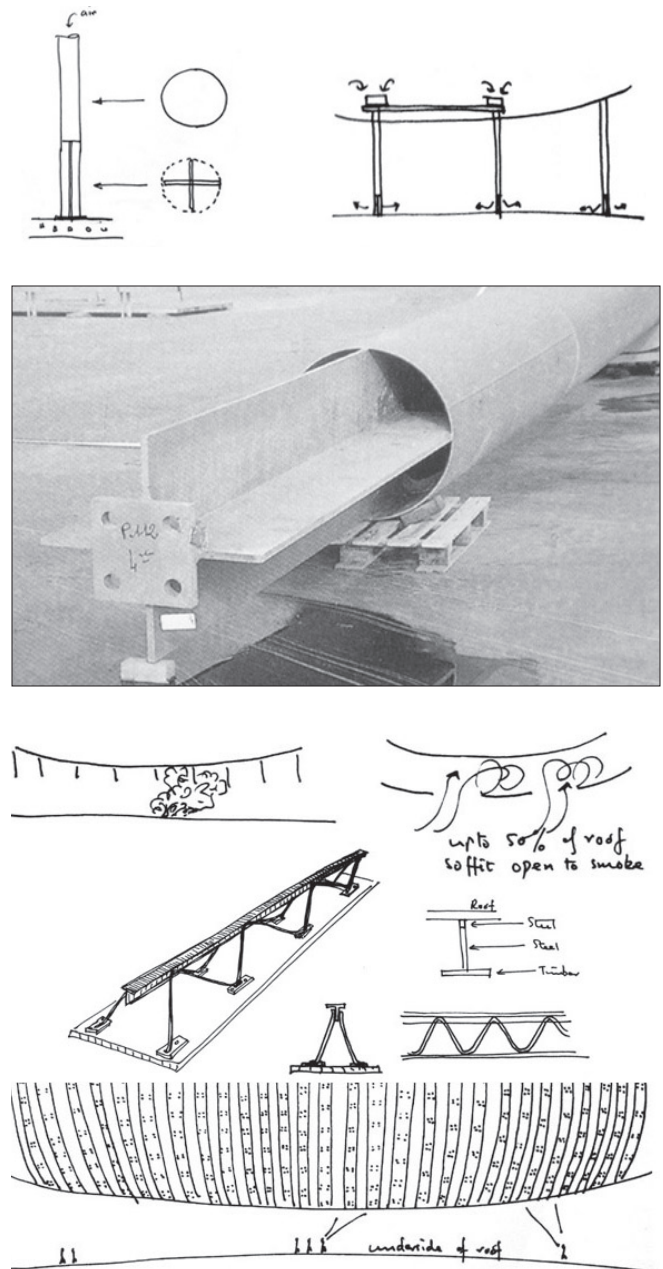


FIGURA 8. Vigas compuestas y pilares del edificio Expo, en el Congrexpo de Lille. Fuente: Balmond et al., 2002, pp. 255, 284-286 y 294.

Coordinación espacial jerárquica

La *coordinación espacial jerárquica* de los programas arquitectónicos con los huecos que la estructura genera, es una idea que surge a partir de las investigaciones de Le Ricolais acerca de la isotropía y la inercia de las estructuras. Cuanto más se expanda una estructura en el espacio, más eficaz será desde un punto de vista resistente y los huecos de distintas escalas en su interior podrán utilizarse como espacios con usos diferenciados.

Las distintas funciones programáticas de un edificio pueden organizarse, entonces, según una determinada jerarquía espacial definida a partir del análisis del comportamiento de la estructura.

Louis Kahn retoma esta idea y la convierte en su principio de separación entre espacios servidos y espacios sirvientes. En el Salk Institute de La Jolla, la distribución espacial, la solución estructural y la organización de las instalaciones, se resuelven en conjunto. Kahn y el ingeniero Komendant diseñaron una estructura en la que una serie de vigas Vierendeel dejan entre sus huecos el espacio necesario para albergar a las funciones de servicio. Estas vigas aportricadas con la altura de un nivel completo, permiten que en su interior, además de poder discurrir conductos, puedan también circular personas. De esta manera el esquema estructural define alternadamente, en la sección del edificio, espacios sirvientes condicionados por la presencia estructural de las vigas Vierendeel: los pisos mecánicos y espacios servidos libres de cualquier interferencia estructural: los laboratorios, con grandes luces libres. (figura 9).

Esta tipología estructural resultó muy exitosa y fue retomada en varios edificios recientes. Balmond plantea un catálogo formal de vigas Vierendeel en el libro *S, M, L, XL* de 1997, atendiendo a los diferentes usos programáticos de un edificio y a la consecuente optimización del comportamiento estructural, y lo utiliza para diseñar el proyecto ZKM de Karlsruhe. En dos de sus fachadas se proyectan muros de hormigón armado sobre los que descargan siete vigas Vierendeel de 6 metros de altura con distintas configuraciones geométricas, que se adaptan a los distintos usos del edificio y en pisos alternados

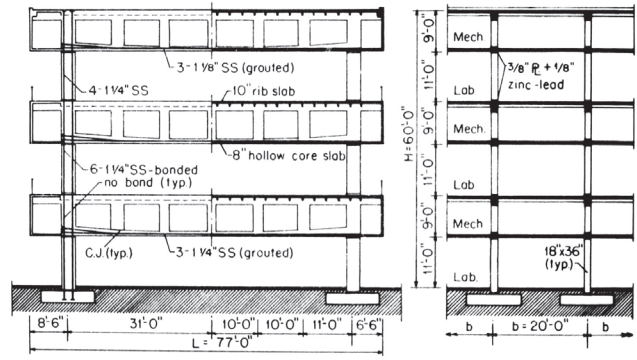


FIGURA 9. Secciones estructurales del Salk Institute de Louis Kahn. Fuente: Komendant, 1975, p. 52.

permiten mantener la planta completa sin interferencia estructural. Es decir, que la presencia o ausencia de barras verticales o inclinadas determina el tipo de aprovechamiento que puede hacerse del espacio, marcando la diferencia entre los espacios sirvientes y los servidos.

El diseño del Centro Pompidou exigió la búsqueda de una solución innovadora que culminó en la elección del sistema de vigas Gerber. A efectos de crear un gran espacio interior libre de obstáculos, la estructura define dos grandes zonas residuales entre los planos de las fachadas y los planos de los tirantes. Estos espacios secundarios se aprovechan para alojar las funciones de servicio. Sobre las vigas Gerber, al exterior de la fachada principal se ubican las zonas de circulación, y al exterior de la fachada posterior se ubica toda la red de instalaciones: sistemas de climatización del aire, instalaciones eléctricas, sanitarias, montacargas, etc. El sistema estructural determina, de esta manera, una clara división entre espacios servidos y espacios sirvientes con la particularidad de que estos últimos son trasladados a las fachadas y definen la imagen del proyecto. Esta particularidad es enfatizada a través de la exacerbación del uso de colores y de las características mecánicas de los servicios.

Los Umbrella Buildings diseñados por Norman Foster definen dos tipos de espacio: el espacio servido donde cualquier actividad podría, en principio, desarrollarse, y el espacio sirviente, por lo general en el interior de la cubierta, condicionado por la presencia

estructural. El Sainsbury Centre para las Artes Visuales en Norwich, de 1974, es un gran contenedor que reúne salas de exposición, de enseñanza y espacios públicos. Una serie de pórticos tridimensionales reticulados dispuestos en forma paralela generan en su interior el gran espacio servido, mientras que el propio espesor de la estructura permite alojar los espacios sirvientes: baños, cocinas, depósitos, laboratorios, instalaciones, conductos y pasarelas técnicas.

En la planta de un rascacielos con estructura de «tubo dentro de tubo» se define claramente la separación entre espacios servidos y espacios sirvientes. Dentro del núcleo interior se disponen áreas sirvientes tales como circulaciones verticales, servicios higiénicos y depósitos. En el gran espacio libre de interferencias que resta entre ambos tubos pueden disponerse las áreas servidas de oficinas. La retícula homogénea de pilares, que caracterizaba la planta de los edificios en altura del Movimiento Moderno, se sustituye en la segunda mitad del siglo XX por una disposición fractal de tubos que optimiza el comportamiento estático a la vez que libera los espacios servidos de interferencias estructurales.

Diseño algorítmico

En la materia orgánica existen procesos codificados que determinan, fruto de la interacción de dicha materia con el medioambiente y con las fuerzas físicas, la emergencia de formas. Estos procesos de autoorganización son no-lineales, por lo que rara vez es posible observar en la naturaleza dos formas completamente idénticas. Cecil Balmond se ha planteado recientemente la posibilidad de diseñar estructuras utilizando procedimientos *algorítmicos* que emulan la complejidad de estos procesos naturales; partiendo de patrones eficaces para una determinada función y definiendo un recorrido, pretende diseñar formas complejas y optimizadas.

El diseño de cubierta ganador del concurso para el nuevo Estadio de Chemnitz, consistente en una malla de arcos que recuerda una nube ondulante sobre el terreno, fue realizado por Kulka y Königs mediante una maqueta de papel.

La transformación de este modelo en una estructura real, según Balmond, no podía ser una copia literal que recreara cada pliegue sino que implicaba el desarrollo de una estrategia geométrica para generar una forma con una complejidad semejante (Balmond, et al., 2002). Investigó entonces sobre reglas matemáticas que pudieran generar una red de arcos similar y propuso la alternativa de un disco con dos puntos marcados en su superficie que se desplaza entre dos bordes fijos, expandiéndose y contrayéndose a medida que gira. Los puntos generan, durante este proceso, una malla de arcos aparentemente aleatoria. Una vez definida ésta, es posible determinar sus deformaciones y solicitaciones para ajustar los bordes o los puntos y definir otra más eficiente, con el mismo patrón (véase la figura 10). Al igual que en la naturaleza, una forma es sólo una de las tantas representaciones posibles de un determinado patrón; existen, por lo tanto, infinitas soluciones posibles.

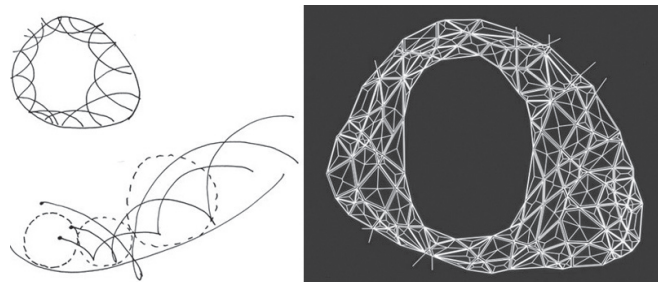


FIGURA 10. Diseño de la cubierta del estadio de Chemnitz. Fuente: Balmond et al., 2002, pp. 159, 168-169.

La malla estructural del edificio para la China Central Television (CCTV) en Pekín, fue diseñada por medio de un proceso iterativo de cómputo consistente en la remoción de barras allí donde los esfuerzos estáticos eran menores y en la adición de barras en las zonas más comprometidas, análogo al proceso de adición y remoción de trabéculas que ocurre en el interior de la masa ósea. Como resultado se obtuvo un tubo con una imagen compleja, cuya malla de barras diagonales se adapta a las solicitaciones físicas derivadas de su geometría irregular (figura 11),

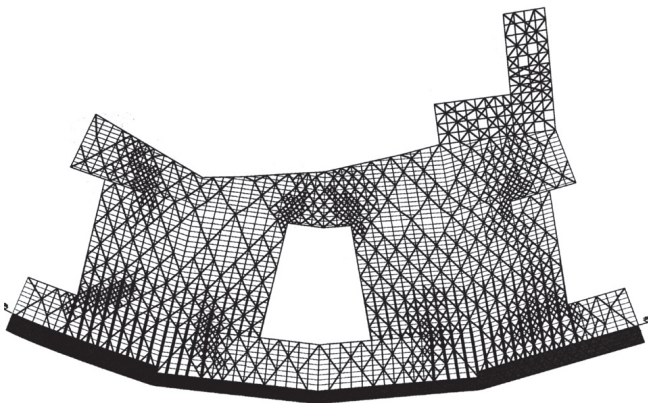


FIGURA 11. Edificio CCTV en Pekín: vista exterior y malla estructural desplegada, Fuente: Carroll et al., 2005, p. 51 y Balmond, 2006, p. 275.

Pequeñas variaciones en las condiciones iniciales de este tipo de procedimientos pueden conducir a resultados muy distintos, de modo que tienen características no-lineales y es el diseñador quien decide cuáles son los resultados que mejor satisfacen las necesidades del proyecto. Dado que estos diseños surgen de procesos que emulan la generación de formas naturales y que nuestros ojos están habituados a dichas formas, es po-

sible percibir un cierto sentido de orden en la aparente aleatoriedad resultante.

Conclusiones

Es necesario abordar con rigor, en el futuro, el diseño estructural a distintas escalas; la morfología parece ser la disciplina capaz de brindar la información necesaria para alcanzar un nuevo nivel de eficacia y de optimización en las construcciones. Si la diferencia entre dos átomos cualesquiera es el número y la disposición de sus partículas, y la diferencia fundamental entre nuestros propios cuerpos y un puñado de barro es el número y la organización geométrica de esos átomos, es evidente lo ínfimos que aún son nuestros conocimientos acerca de la *forma*.

El hombre ya ha emprendido el estudio de los nanomateriales, si bien aún no han sido aplicados, prácticamente, en el ámbito de la arquitectura. Debemos considerar las solicitaciones provocadas por las fuerzas fundamentales en la materia, diseñar procedimientos de *form finding* para encontrar formas eficaces y optimizadas en los distintos niveles de organización, establecer una íntima relación entre los huecos de la materia y el uso del espacio, y abordar el diseño de dispositivos con múltiples funciones en las distintas escalas. Una agenda de trabajo como ésta implica la colaboración entre técnicos de diversas disciplinas, tales como matemáticas, física, química, informática, ingeniería y arquitectura. El objetivo final, que no debiera olvidarse a lo largo de este camino, es el uso responsable de los recursos que la naturaleza nos brinda, y, por consiguiente, como decía Eladio Dieste, la plenitud del hombre.

Bibliografía

- Balmond, C. y Januzzi, S. (2002). *Informal*. Munich: Editorial Prestel.
- Balmond, C. (2006). CCTV New Headquarter, Beijing, China, 2003-2008, *a+u* 06 (11) 274-279.

- Balmond, C. (2007). *Element*. Berlín: Editorial Prestel.
- Bell, A. G. (1903). The Tetrahedral Principle In Kite Structure. *National Geographic Magazine*, 14 (6), 219-251.
- Bertalanffy, L. (1989). *Teoría General de los Sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*, México: Fondo de Cultura Económica.
- Carroll, C.; Cross, P.; Duan, X.; Gibbons, C.; Ho, G.; Kwok, M.; Lawson, R.; Lee, A.; Luong, A.; McGowan, R. y Pope, C. (2005). CCTV Headquarters, Beijing, China; Architects: Office for Metropolitan Architecture, *The Arup Journal* 40 (2) 3-9.
- Fernández-Galiano, L. (Ed.) (1984). *Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad*. Madrid: Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- Galilei, G. (1976). *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*. Madrid: Editora Nacional.
- García Melero, J. (1990). Los tratados de arquitectura militar publicados en España durante el reinado de Carlos III, *Espacio, Tiempo y Forma* 181-223.
- Goodchild, H.; Brown, H. y Sindbaek, S. (2011). *Geophysical survey at Aggersborg, North Jutland*, Dept. of Archaeology, University of York, York.
- Griffith, P. y Dennis, P. (il.) (2006). *The Vauban fortifications of France*, Osprey Publishing, Nueva York.
- Haeckel, E. (1862). *Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*, Druck und Verlag von Georg Reimer, Berlín.
- Jencks, C. (1997a). Nonlinear Architecture. New science=New architecture?. *Architectural Design*, 67 (9/10), 7.
- Jencks, C. (1997b). *The Architecture of the Jumping Universe. A polemic: how complexity science is changing architecture and culture*. Londres: Academy Editions.
- Jencks, C. (2002). *The New Paradigm in Architecture: The language of Post-Modernism*. Londres: Yale University Press.
- Komendant, A. (1975). *18 years with Architect Louis I. Kahn*, Aloray Publisher, Englewood, Nueva Jersey.
- Koolhaas, R. y Mau, B. (1997). *S, M, L, XL*. Colonia: Benedict Taschen Verlag GmbH.
- Le Ricolais, R. (1973). Survey of works; Structural Research 1935-1971. *Zodiac*, 22, 1-56.
- Mc Cleary, P.; Iglesias, H.; Del Rey, L. y Humanes, A. (1997). *Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*, Madrid: Fundación Cultural COAM.
- Otto, F. y Rasch, B. (2006). *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*. Munich: Axel Menges.
- Semino, R. (1973). Survey of Works, *Zodiac* 22, 148-161.
- Spuybroek, L. (2004). *NOX: machining architecture*. Londres: Thames & Hudson.
- Thompson, D. (1945). *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vasconi, C. (2003). Vauban le magnifique, *Revue Technique Luxembourgeoise* 1, 20-31.
- Vitruvio, M. (1992). *Los diez libros de arquitectura*, Ediciones Akal, S.A., Madrid.

JUAN JOSÉ FONTANA CABEZAS | arquitecto por la Universidad de la República (Uruguay) y doctor por la Universidad de Alicante (España) con perfil en Diseño Estructural. Profesor Agregado G^o4 de Estabilidad de las Construcciones IV, Profesor Adjunto G^o3 de Estabilidad de las Construcciones I y Asesor de Estructuras G^o2 en los talleres Danza y Ridaó, en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de la República. Está actualmente categorizado como Investigador Activo Nivel Candidato, Área Humanidades, en el Sistema Nacional de Investigadores de la ANII.