

## EL DISEÑO ESTRUCTURAL EN LAS FORMAS COMPLEJAS DE LA ARQUITECTURA RECIENTE

### STRUCTURAL DESIGN IN COMPLEX SHAPES OF RECENT ARCHITECTURE

Juan J. Fontana Cabezas (P) (1)

(1) Dr. Arq., Prof. Agregado, Facultad de Arquitectura, UdelaR, Montevideo, Uruguay.  
Dirección para correspondencia: juanjosefontana@gmail.com; (P) presentador

#### Resumen

Esta investigación consiste en un análisis histórico sobre la evolución reciente del diseño estructural. Parte de la hipótesis de que la búsqueda de la *eficacia* y la *optimización* de las estructuras, emprendida 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 búsqueda de la eficacia y la optimización de las estructuras ha evolucionado recientemente bajo la influencia de nuevos conceptos surgidos en el ámbito de la Teoría General de Sistemas, tales como complejidad, azar, autoorganización, indeterminismo, emergencia, no-linealidad y fractalidad.

Se utilizó el método histórico.

En las investigaciones recientes sobre la *eficacia* de las estructuras arquitectónicas se observa una adopción recurrente de los conceptos de autoorganización y de fractalidad a través de ideas estructurales tales como métodos de *form finding*, *formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas* y modelos de *crecimiento fractal*.

En las búsquedas recientes sobre la *optimización* de las estructuras arquitectónicas, consideradas como uno de los componentes constructivos que necesitan ser coordinados en una obra, se observa una tendencia al *diseño integrado* de dispositivos capaces de responder a *múltiples funciones*, a la *coordinación jerárquica* de los programas con los huecos que la estructura genera y al *diseño algorítmico*.  
*Palabras-clave: estructuras arquitectónicas, Teoría General de Sistemas, naturaleza.*

#### Abstract

This work is a historical analysis of recent developments in structural design. It starts with the hypothesis that the search for *efficiency* and *optimization* of structures, undertaken 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 search for efficiency and optimization of structures has recently evolved under the influence of new concepts emerged in the field of General Systems Theory, such as complexity, random, self-organization, indeterminism, emergency, nonlinearity and fractality.

The historical method was used.

In recent research on the *efficiency* of architectural structures, a recurrent adoption of concepts such as self-organization and fractality is observed through the development of structural ideas such as *form finding* methods, *complex shapes adjusted to the physical stresses* and models of *fractal* growth.

In recent research on the *optimization* of architectural structures, considered as components that need to be coordinated on a building, it is possible to observe a trend towards the design of *integrated devices* capable of responding to *multiple functions*, to the *hierarchical spatial coordination* of architectural programs with hollows generated by the structure, and to *algorithmic design*.

*Keywords: architectural structures, General Systems Theory, nature.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El crítico de arquitectura Charles Jencks 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 1997). 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 los últimos años se han realizado numerosas investigaciones en el ámbito académico acerca del traslado a la arquitectura de conceptos tales como complejidad, caos, azar, indeterminismo, autoorganización, emergencia, no-linealidad o fractalidad, surgidos en el mundo científico en el marco de la Teoría General de Sistemas, pero prácticamente no se han desarrollado trabajos sobre la influencia que estas ideas han tenido en el ámbito específico del diseño de estructuras en la arquitectura.

Este artículo, basado en la tesis doctoral homónima presentada por el autor en la Universidad de Alicante, España, en julio de 2012, pretende realizar un análisis del *modo* en que la búsqueda de la *eficacia* y la *optimización* de las estructuras ha evolucionado a lo largo de la segunda mitad del siglo XX y principios del siglo XXI bajo la influencia de nuevos conceptos surgidos a partir del desarrollo 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 al ámbito del diseño estructural en la arquitectura reciente.

Las hipótesis en las que se basa son las siguientes: 1- 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. 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.

## 2. METODOLOGÍA

Se procedió, primeramente, a la confección de un soporte teórico basado en la bibliografía existente que permitiera explicitar las principales ideas y conceptos que han influido en la búsqueda de la eficacia y la optimización del diseño de estructuras en distintos momentos de la historia, fundamentalmente en el marco de la Era Moderna.

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 estudiaron 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 permitiera 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.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

A partir de ambos soportes teóricos se analizaron las principales *ideas* que sustentaron el diseño de algunos proyectos entre el S XVII y mediados del S XX, atendiendo a la relación entre los modelos de generación de forma, los métodos de diseño, los métodos de cálculo y los procedimientos de construcción empleados.

Se aplicó esta metodología, finalmente, a una selección de obras arquitectónicas recientes. Para ello se seleccionaron 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 arquitectónicas. Se trata de obras construidas a partir de concursos internacionales de arquitectura o de proyectos realizados por arquitectos renombrados, con una gran difusión bibliográfica, ya que es habitualmente en estos proyectos excepcionales en los que se justifica una reflexión innovadora sobre los modos de proyectar y construir las estructuras.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Contextualización

##### 3.1.1 Los inicios de la modernidad en el siglo XVII

Conocer era, para la ciencia aristotélica, 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 transformarán radicalmente este modo de pensar, abandonando la actitud contemplativa para emprender una búsqueda activa del conocimiento y verán a la naturaleza como una gran máquina que podrían ellos mismos aprender a diseñar.

En la *Jornada Segunda* de su libro, "*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*" de 1638, Galileo Galilei observa que muchos aparatos que funcionan sin problemas a una determinada escala, no logran hacerlo correctamente a una escala mayor (Galilei 1976). Comprende que las propiedades geométricas de un cuerpo no son las únicas que explican su comportamiento, es necesario también observar las propiedades materiales. La geometría y las proporciones no pueden controlar el comportamiento estructural, que está también ligado al material y al tamaño de la máquina. 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 Galileo, 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, salvo que el hueso grande estuviera compuesto por un material más fuerte que el del hueso pequeño. Ver figura 1. 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.

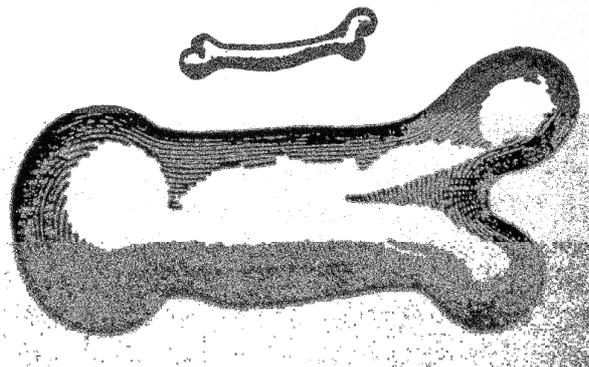


Figura 1. Dos huesos de distinto tamaño y similar resistencia (Galilei, 1976, p.237).

Con el propósito de alcanzar la eficacia en la construcción de máquinas, Galileo introduce la noción de *límite*. Tanto para las máquinas que crea el hombre como para los cuerpos en la naturaleza, decía, existen límites que no pueden sobrepasarse y que es necesario determinar a través de experimentos. La forma en arquitectura empezará a entenderse, entonces, 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, comienzan a aplicarse a la construcción (Fernandez-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*, sustituyen a las leyes clásicas. Surge así el concepto moderno de diseño. Los elementos estructurales dejarán 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.

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

En el siglo XIX Lamarck introdujo, en el ámbito de las ciencias biológicas, 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 las ideas de Lamarck, 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. Según D'Arcy Thompson la selección natural tiene una función limitada en la evolución de las especies, eliminando aquello que no se adapta a su medio, pero las nuevas estructuras, vivas o inertes, surgen a causa de las propiedades físicas y matemáticas de la materia (Thompson 1945).

## 3.2 El diseño estructural en la época reciente

A partir de mediados del siglo XX comienza a vislumbrarse un nuevo modo de aplicación de los conceptos de **eficacia** y de **optimización** en el ámbito de las estructuras arquitectónicas, con la sistemática adopción y reformulación de algunas ideas surgidas en el seno de la Teoría General de Sistemas. El vertiginoso desarrollo que experimentan en este período los programas informáticos de dibujo y de análisis estructural, favorece este proceso, ya que posibilita la manipulación y el intercambio de grandes volúmenes de información con una gran precisión.

### 3.2.1 Antecedentes

Algunas de estas ideas pueden encontrarse en obras construidas a lo largo de toda la Era Moderna, diseñadas 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 en la península itálica a finales del siglo XV en respuesta a los ataques del ejército francés, equipado 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, media lunas, revellines y glacis, para definir un perímetro estrellado con características *fractales*, análogo al copo de nieve de von Koch. Cada punta de las nuevas fortificaciones responde a la necesidad de defender, a una determinada distancia y con un

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

determinado ángulo, los paños adyacentes de muralla con un tiro de cañón. Este repentino cambio de forma en respuesta a un cambio en el entorno, puede ser interpretado como un hecho extraordinario o catástrofe, según la teoría de René Thom. Tal como ocurre en la evolución de algunas formas naturales, la búsqueda de la eficacia condujo a los perímetros amurallados europeos a adquirir, en los siglos XVI y XVII, características fractales.

A finales del siglo XIX Alexander Graham Bell inventó un método para la construcción de cometas de grandes dimensiones que pudieran ser utilizadas como máquinas voladoras, capaces de alojar tripulación. Bell se da cuenta que adicionando 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. Uniendo cuatro células tetraédricas se obtiene una cometa celular, con forma igualmente tetraédrica. Cuatro de estas cometas celulares pueden igualmente agruparse para formar una cometa tetraédrica de mayor tamaño y así sucesivamente. Iterando este procedimiento un número determinado de veces se obtiene finalmente una estructura de forma tetraédrica a partir de la adición de células tetraédricas menores, agrupadas jerárquicamente, tal como se observa en la figura 2. Este procedimiento, que permite la creación de grandes 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 habitualmente utilizados a principios del siglo XX: la alta repetición de elementos pequeños facilita tanto la prefabricación en taller (con la subsiguiente disminución de la probabilidad de error), como el transporte a obra o la sistematización de los procesos de montaje y desmontaje. Graham Bell, además de reconocer las características de liviandad y ligereza de este tipo de estructuras, intuyó estas ventajas y construyó con este principio, según declara en su artículo “The Tetrahedral Principle In Kite Structure” de 1903 (Bell 1903), además de cometas, varios barcos, una estructura cortavientos, una vivienda y una torre de observación de 72 pies de altura.

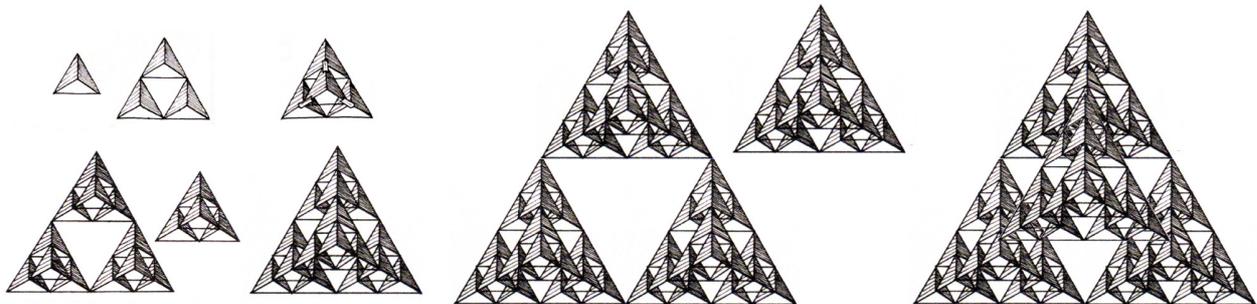


Figura 2. Modelo de crecimiento fractal según el principio tetraédrico inventado por Alexander Graham Bell (Bell, 1903).

El filósofo y matemático Alfred Whitehead decía que el proceso, más que la sustancia, es el constituyente fundamental de la naturaleza (Whitehead 2007). Los métodos *form finding* comenzaron a utilizarse como instrumentos de diseño arquitectónico a finales del siglo XIX, basados en procedimientos empíricos que 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.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

Las cubiertas suspendidas con forma de paraboloides hiperbólicos y las torres con forma de hiperboloides de revolución que Vladimir Shukhov construyó en Rusia, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, recurren a la *autoorganización* de la materia para la definición de su geometría y presentan notorias similitudes geométricas con la estructura cuaternaria de algunas proteínas. A partir de la puesta en obra de elementos lineales simples y estandarizados, como son los perfiles normalizados de acero, Shukhov construyó superficies complejas de doble curvatura con extraordinarias cualidades resistentes. La sencillez del procedimiento de montaje de estas superficies y el empleo de elementos estandarizados permitían un importante ahorro económico. En los puentes diseñados por Robert Maillart, a principios del siglo XX, aparece por primera vez el concepto de *formas complejas adaptadas a las sollicitaciones físicas*. Las características del hormigón armado indujeron a Maillart a imaginar y diseñar estructuras cuyos componentes 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 se deducen de las sollicitaciones físicas. 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.

Jean Prouvé abordó, en la primera mitad del siglo XX, el problema de la *optimización* de las formas arquitectónicas atendiendo a los procesos de prefabricación, transporte y montaje en obra. La maquinaria disponible para el cortado y doblado de materiales, los sistemas de empaquetamiento, las dimensiones de los vehículos de transporte, procedimientos de montaje y desmontaje de las piezas y consideraciones estáticas, eran los factores que determinaban la forma de sus construcciones. En el aspecto de un objeto, decía, debe reflejarse su proceso de creación.

El libro *"On growth and form"* de 1917, de D'Arcy Thompson, 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). Si bien Thompson no utilizó el concepto de *fractalidad*, 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 es 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 prácticas que estos conocimientos puedan tener en el ámbito estructural. Observando los esqueletos de algunas especies de radiolarios define el concepto de *automorfismo* como, entre otros significados, la repetición a distintas escalas de una misma forma. Diseña entonces la viga Polyten como una cercha Queen Post con repeticiones automórficas en su interior. Ver figura 3. De este modo, inspirado en la observación de una forma viviente, utiliza el concepto de fractalidad para optimizar el comportamiento de una estructura de barras, varios años antes de que dicho concepto fuera definido y desarrollado por Benoît Mandelbrot.

A partir del estudio de la materia ósea descubre 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

"Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social"

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. Su célebre frase "el arte de la estructura consiste en cómo y dónde colocar los huecos", podría reformularse como "el arte del diseño arquitectónico a gran escala consiste en cómo y dónde disponer una organización jerárquica de huecos con características fractales".

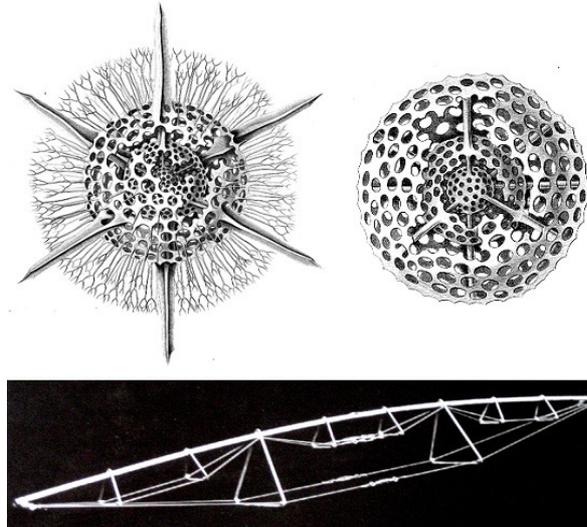


Figura 3. Esqueletos de radiolarios automórficos y viga Polyten (Haeckel, 1862, lámina 24) y (Mc Cleary et al., 1997, p.115).

### 3.2.2 La eficacia en las estructuras recientes

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

#### 3.2.2.1 Los métodos de *form finding*

Los conocimientos acerca de los procesos de autoorganización de la materia son fundamentales para el diseño de tensoestructuras. 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 este tipo (Otto et al. 2006). Se 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 algunos años antes para el diseño del pabellón alemán de la Exposición Internacional de Montreal en 1967, que consistía en un estudio preliminar de la forma

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

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 de las pruebas de carga previstas pudieran extrapolarse directamente a la obra. Pero debido a las importantes dimensiones de la estructura, la precisión geométrica que podía alcanzarse en un modelo reducido, con la tecnología y el tiempo disponibles, 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 solo 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.

Lars Spuybroek, director del grupo Nox, desarrolló una serie de procesos de *form finding* para diseñar algunos de sus proyectos, reproduciendo mecanismos naturales de autoorganización que conducen a formas eficaces para determinadas funciones (Spuybroek 2004). Pero además de los clásicos experimentos que encuentran una forma sometiendo un conjunto de materiales a la deformación que produce un sistema de cargas, diseñó algunos procesos en los que las deformaciones de los materiales 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 abrupta 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. Ver figura 4. 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.

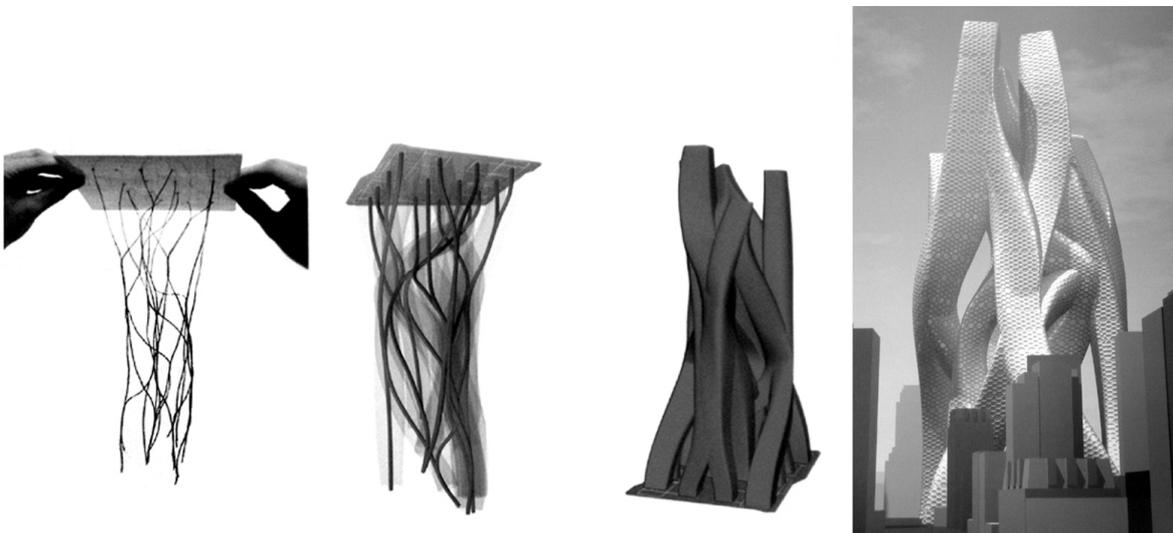


Figura 4. Proceso de generación de forma del "*obliqueWTC*" (Spuybroek, 2004, pp. 260-262).

El avance de los programas informáticos basados en el Método de los Elementos Finitos permite, hoy en día, el diseño de estructuras traccionadas exclusivamente por ordenador, sin necesidad de recurrir a la realización de modelos reales o de experimentos materiales de autoorganización de la materia. Las leyes naturales que actúan en la definición de una superficie de área mínima, sometida a esfuerzos exclusivos de tracción, son bien conocidas y sencillas de programar. Esto permite un importante ahorro de insumos y de tiempo, pero tal como Frei Otto advierte, utilizando este tipo de herramientas solo es posible encontrar lo ya encontrado o descubrir lo ya descubierto.

Las mallas con geometrías triangulares, hexagonales e icosaédricas desarrolladas por Robert Le Ricolais y por 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 de Nicholas Grimshaw, la piel estructural del proyecto "*obliqueWTC*" de Nox o la malla del Centro Nacional de Natación de Pekín (CNNP) de PTW Architects.

La espuma de Weaire-Phelan es al día de hoy la forma conocida más eficiente de subdividir el espacio, motivo por el cual fue elegida como base para el diseño de la malla estructural del CNNP. En el siglo XIX Lord Kelvin había planteado el problema de subdividir en compartimentos de igual volumen el espacio tridimensional con una superficie de área mínima y propuso el tetrakaidecaedro como solución. Configuraciones rombododecaédricas y tetrakaidecaédricas se encuentran habitualmente en la naturaleza, las primeras como resultado de la compresión de esferas sólidas empaquetadas y las segundas, cuando un sistema de esferas puede resbalar para empaquetarse de forma aún más compacta. A lo largo de los siglos XIX y XX se llevaron a cabo numerosos experimentos de autoorganización de la materia con esferas enjabonadas para determinar formas eficientes de empaquetar el espacio, hasta que el uso de herramientas informáticas permitió, a finales del siglo XX, llegar a la solución de la espuma de Weaire-Phelan. La gran inercia de la malla estructural del CNNP, basada en la geometría de esta espuma, le permite alcanzar la rigidez suficiente como para resistir las cargas sísmicas y los tifones que se presentan en Pekín.

### 3.2.2.2 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.

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

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

modelo geométrico debe surgir a partir de una determinada acción mecánica, se ven claramente reflejadas en sus construcciones.

### 3.2.2.3 Modelos de crecimiento fractal

Podríamos denominar como modelo de crecimiento *lineal* al modelo de crecimiento de artefactos voladores descrito por Simon Newcomb en su artículo "*Is the Airship coming?*" de 1901 (Newcomb 1901). Este modelo es el mismo 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 ambos plantean el cambio de escala de un objeto, suponen que permanecen intactas las proporciones de sus dimensiones exteriores y también su estructura interna. Por este motivo, el peso propio crece siempre más rápido que la sección resistente de los huesos o que la superficie de vela de las cometas, a medida que las dimensiones aumentan. Es necesario entonces, según Galileo Galilei, ensanchar los huesos para mantener intacta la capacidad resistente del esqueleto del gigante y hay que evitar, según Newcomb, aumentar en exceso el tamaño de las cometas si se pretende que éstas sean capaces de volar.

Analizando algunos esqueletos de animales puede observarse 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 Galilei afirmaba. Pero teniendo en cuenta las esbelteces geométricas de los huesos de las extremidades de algunos animales, 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 determinados mecanismos formales que atenúan la variación de la relación entre el peso propio y el área de las secciones resistentes. Cuanto mayor sea el tamaño del hueso o cuanto mayor carga deba éste soportar, parecería ser mayor el volumen óseo ocupado por la cavidad medular y por el hueso esponjoso. Los huesos de todos los mamíferos se forman a partir de los mismos componentes, fundamentalmente el colágeno tipo I, de modo que la naturaleza debe ingeniar para diseñar estructuras de distintos tamaños con el mismo material. Cuando un animal alcanza grandes tamaños, 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 de los animales grandes es necesario realizar un mayor número de iteraciones para definir la forma, es decir, que el grado de fractalidad es mayor. Una estructura jerárquica más compleja y un engrosamiento diferenciado de las paredes de hueso compacto, son algunos de los mecanismos geométricos que la naturaleza parece utilizar para aumentar la escala de sus estructuras óseas, atenuando el impacto del aumento del peso propio. A este proceso de crecimiento podríamos denominarlo como crecimiento *fractal*.

A mediados del siglo XX surgieron una serie de proyectos en los que los huecos de la estructura determinan 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.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

El modelo de crecimiento implícito en los sistemas constructivos proyectados por Rinaldo Semino en los años 1960, que permite la creación de grandes estructuras a partir del acoplamiento de unidades sencillas, podría también describirse como un modelo de crecimiento fractal. Ver figura 5. Semino define 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 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.

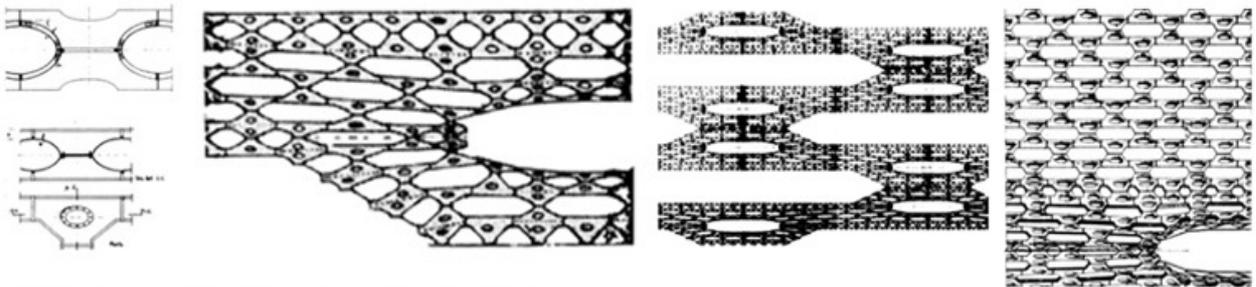


Figura 5. Puente sobre el estrecho de Messina: elementos base y su acoplamiento, Rinaldo Semino (Semino, 1973, pp.156-159).

La organización espacial de 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 S.O.M. durante la década de 1960, podría considerarse igualmente como fractal. 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".

Se propuso en la tesis doctoral homónima a este trabajo, por otra parte, una serie de polígonos fractales que podrían utilizarse como base para el diseño de plantas de rascacielos con el sistema de "tubos perforados". Ver figura 6.

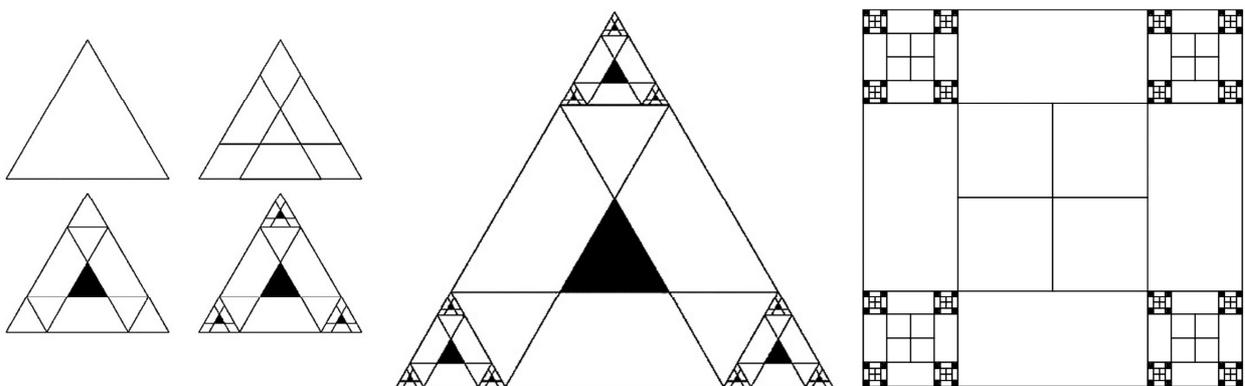


Figura 6: Polígonos fractales creados por el autor.

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

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

repetición de modelos geométricos probados a escala pequeña, con piezas más grandes y menos esbeltas. Algunas de las megaestructuras que surgen en la década de 1960 abandonan este modelo de crecimiento lineal y comienzan a investigar un modelo alternativo. El gigante que Galileo afirmaba se derrumbaría por su propio peso, podría comenzar a levantarse de adquirir mayor ligereza con un incremento 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.

### 3.2.3 La optimización de las estructuras recientes

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 una adopción recurrente de los conceptos de complejidad, emergencia, fractalidad y no-linealidad, a través del *diseño integrado* de dispositivos capaces de responder a múltiples funciones, de la *coordinación espacial jerárquica* de los programas arquitectónicos con los huecos que la estructura genera, y del desarrollo de procesos de *diseño algorítmico*.

#### 3.2.3.1 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, lleva inevitablemente 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, de 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.

En el diseño del Commerzbank de Frankfurt existe una voluntad explícita de integrar aspectos múltiples como la estructura, los acondicionamientos naturales, los cerramientos y la distribución espacial. Todas las grandes decisiones que definieron el partido arquitectónico de la torre tuvieron como objetivo la optimización del edificio desde el punto de vista del uso, del resistente y del energético. Sus distintos componentes están estrechamente vinculados a múltiples sistemas y su diseño está pautado por la optimización de sus múltiples 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 triangular 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 8 niveles de altura de modo de conformar, en conjunto, un gran tubo perforado y hueco en su interior. La disposición en espiral de las vigas Vierendeel y de las regiones en que se divide el edificio a lo largo de los tres lados de la planta, 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 permiten tanto la ventilación natural cruzada como la iluminación y las vistas desde múltiples direcciones. La ventilación e iluminación natural de todas las oficinas es posible, de este modo, gracias a la configuración estructural y espacial del edificio como un tubo perforado y hueco. Tanto la distribución interior de espacios como la estructura y el sistema de ventilación natural, por otra parte, siguen patrones con características fractales.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

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 formada por una malla de perfiles tubulares en tres direcciones que, además de soportar la fachada vidriada norte de la Cámara de la Asamblea, 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 estructural, 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. Ver figura 7.

Los pilares de la Mediateca de Sendai, además de garantizar la estabilidad del edificio, cumplen la función de patios verticales que permiten la entrada de luz natural a los distintos niveles y alojan en su interior la circulación vertical de personas y conductos de las distintas instalaciones.

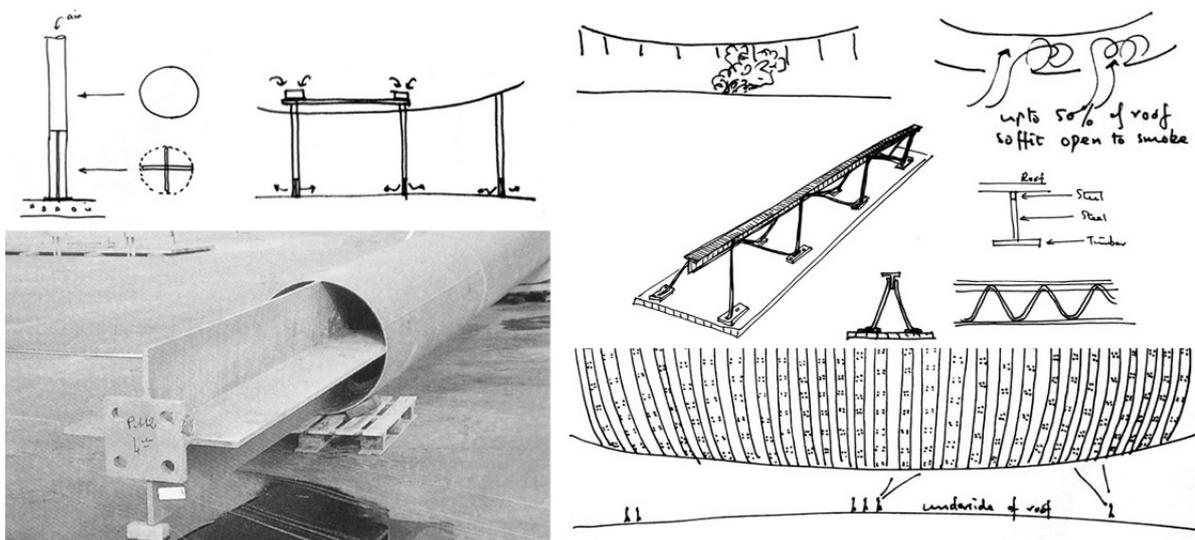


Figura 7. Vigas compuestas y pilares del edificio Expo, en el Congrexpo de Lille (Balmond et al., 2002, pp. 255, 284-286, 294).

### 3.2.3.2 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 observaciones de Le Ricolais de las formas naturales y de sus investigaciones 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. Las distintas funciones programáticas en la mayoría de las obras de Kahn, tales como los espacios principales y aquellos de servicio, se organizan según un determinado orden jerárquico. En el "Salk Institute" de La Jolla, el orden y la flexibilidad de los espacios, 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

## "Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social"

funciones de servicio. Esta solución de vigas apuntaladas sin presencia de diagonales, con la altura de un nivel completo, permite que en el interior de sus huecos, 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. Esta tipología estructural resultó muy exitosa y fue retomada en varios edificios recientes, como por ejemplo en el Museo Kunsthal I de Rotterdam o en el proyecto para el Zentrum für Kunst und Medien-technologie (ZKM) de Karlsruhe, diseñados por Rem Koolhaas y Cecil Balmond.

En el primer anteproyecto del Centro Pompidou, desarrollado luego de finalizado el concurso, Piano, Rogers y el equipo Estructuras 3 de Arup evaluaron la posibilidad de diseñar la estructura primaria como una serie de vigas Vierendeel apoyadas en pilares, de modo de obtener espacios condicionados por la estructura alternados con espacios libres de estructura. Pero este esquema fue abandonado y se utilizaron finalmente vigas reticuladas de menor altura. Balmond analizó que el espacio que ocupan estas vigas reticuladas es del orden del 43% de la sección del edificio. Si bien por el interior de sus huecos circulan conductos de las distintas instalaciones mecánicas, estos espacios podrían haberse convertido en zonas habitables si se hubieran eliminado todas o casi todas las diagonales, tal como planteaba el primer anteproyecto.

Balmond plantea un catálogo formal de vigas Vierendeel en el libro "*S, M, L, XL*" de 1997 (Koolhaas et al. 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 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, un gran contenedor flexible y libre de obstáculos, capaz de salvar grandes luces y soportar grandes cargas, exigió la búsqueda de una solución estructural innovadora que culminó en la elección de un sistema estructural propio de la construcción de puentes en el siglo XIX: el sistema de vigas Gerber. El uso de este sistema permite simplificar el proceso de producción y montaje de la estructura, tal como ocurre en una sucesión de tramos discontinuos simplemente apoyados en pilares y también un importante ahorro de material y una disminución en las deformaciones, tal como ocurre en las vigas de tramos continuos. A efectos de crear el gran espacio interior libre de obstáculos, la estructura define dos grandes zonas residuales entre los planos de las fachadas (donde se ubican los pilares) y los planos de los tirantes pretensados. Estos espacios secundarios se aprovechan para alojar las funciones de servicio, liberando el gran espacio central. 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 entre las décadas de 1960 y 1980, son edificios en los que todas las actividades se desarrollan bajo una misma cubierta, con una multitud de servicios disponibles en cualquier parte. En estos proyectos se definen dos tipos de espacio: el espacio servido donde cualquier actividad podría en principio desarrollarse y el espacio sirviente, en general en el interior de la cubierta, condicionado por la presencia

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

estructural. El Sainsbury Centre para las Artes Visuales en Norwich, de 1974, es un gran contenedor que reúne dentro de la misma envolvente 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.

### 3.2.3.3 Diseño algorítmico

El ingeniero Cecil Balmond se ha planteado la posibilidad de diseñar estructuras utilizando procedimientos *algorítmicos* no-lineales, que emulan la complejidad de los procesos de generación de formas naturales.

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. Balmond trata de emular estos procesos algorítmicos no-lineales; partiendo de patrones eficaces para una determinada función y definiendo un recorrido, pretende diseñar formas complejas y optimizadas.

El diseño de cubierta presentado al 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 a través de 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 sobre reglas matemáticas que pudieran generar una red de arcos similar a la propuesta y propuso la alternativa de un disco con dos puntos marcados en su superficie que se desplaza entre dos bordes fijos, los bordes exterior e interior de la cubierta, expandiéndose y contrayéndose a medida que gira. Ver figura 8. Los puntos marcados en el disco generan, a lo largo de este proceso, una malla de arcos aparentemente aleatoria. Una vez definida esta malla es posible determinar las deformaciones y las tensiones actuantes en sus barras para ajustar los bordes o los puntos en la superficie del disco y definir otra malla más eficiente, con el mismo patrón. Los parámetros iniciales pueden manipularse para optimizar el resultado final. 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.

La malla estructural del edificio para la "China Central Television" en Pekín, fue diseñada a través de un proceso iterativo por ordenador 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. Ver figura 9.

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

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

estos diseños surgen de procesos que emulan la generación de formas naturales y que nuestros ojos están habituados a dichas formas, es posible percibir un cierto sentido de orden en la aparente aleatoriedad resultante.

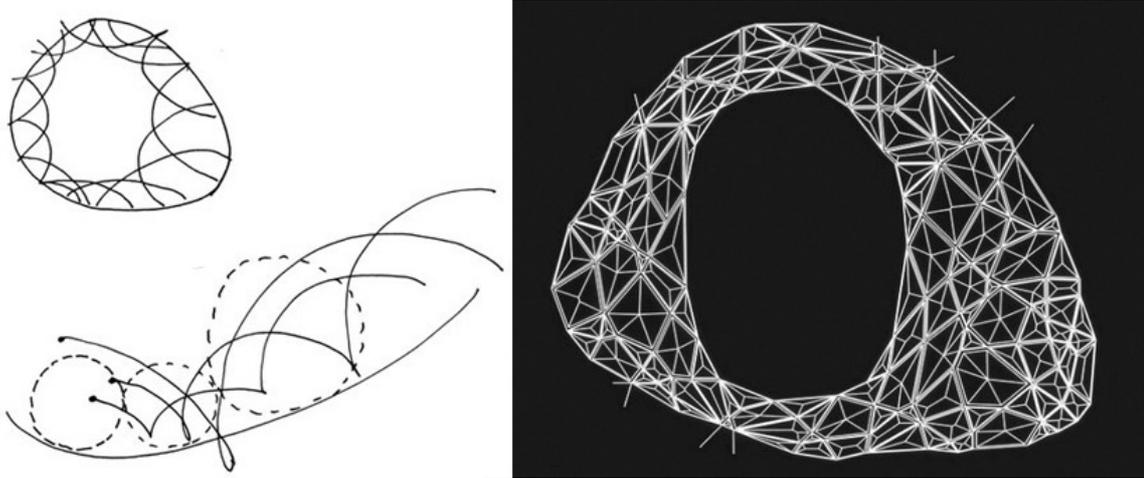


Figura 8. Diseño de la cubierta del estadio de Chemnitz (Balmond et al., 2002, pp. 159, 168-169).

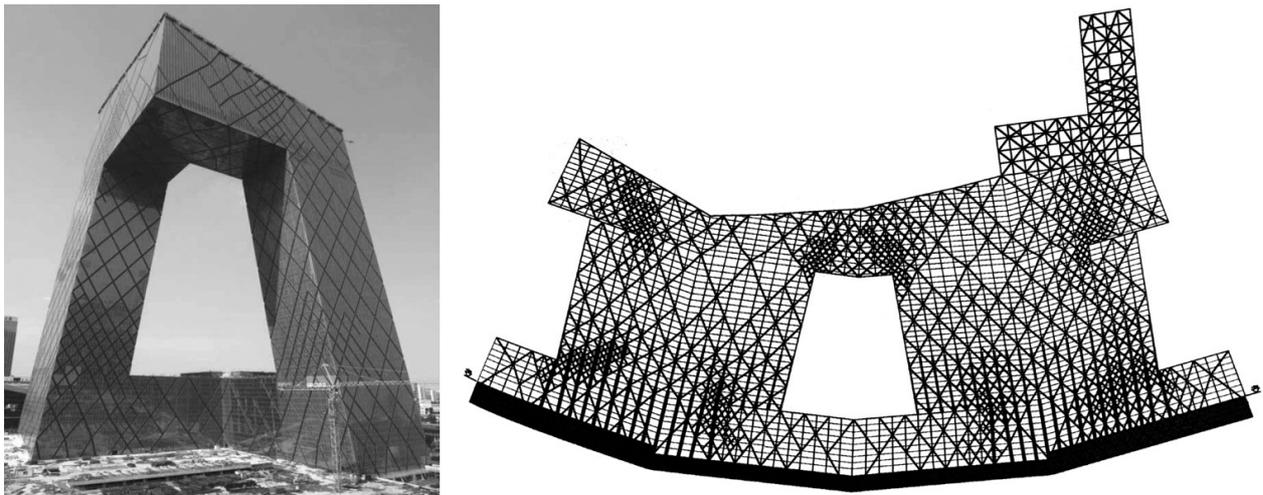


Figura 9. Edificio CCTV en Pekín: vista exterior y malla estructural desplegada (Carroll et al., 2008, p.51) y (Balmond, 2006, p.275).

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de mediados del siglo XX ocurre la confluencia de una serie de fenómenos: la acumulación de experiencia en el traslado a la arquitectura de conceptos surgidos de la observación de la naturaleza, el desarrollo de la Teoría General de Sistemas como marco teórico interdisciplinario, la vigencia de la idea clásica de que la belleza en el arte se desprende de la mimesis de la naturaleza, valores propios de la cultura actual como la sostenibilidad y la eficiencia energética, el inicio de un desarrollo explosivo de la informática que facilita el manejo de grandes volúmenes de información, y el surgimiento de las oficinas de diseño multidisciplinarias, en las que un conjunto de profesionales de diversas áreas del conocimiento trabajan en colaboración. Esta confluencia posibilita el desarrollo sistemático de ideas arquitectónicas tales como métodos de *form finding*, *formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas*, modelos de *crecimiento fractal*, diseño de *dispositivos optimizados para*

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

*cumplir múltiples funciones, organización espacial jerárquica y diseño algorítmico*, que han orientado la búsqueda de la eficacia y la optimización de las estructuras en la arquitectura reciente.

Según teorías recientes, los organismos naturales son sistemas complejos cuyos componentes están siempre íntimamente relacionados con la totalidad, dado que se encuentran asombrosamente coordinados a todos los niveles, desde el molecular hasta el macroscópico. De este modo, la totalidad es siempre más que la suma de sus partes y no puede explicarse únicamente a partir de ellas. Sus formas son complejas en múltiples escalas y cada uno de sus componentes cumple con más de una función. Los sistemas naturales y sus partes están optimizados para satisfacer varias necesidades a la vez, aunque no necesariamente nos resulten éstas evidentes. Es decir, que los organismos naturales se desarrollan con coherencia funcional, estructural y formal. Todos los procesos biológicos, además, están optimizados energéticamente ya que la energía disponible en el medio ambiente es limitada.

Al menos tres de las propiedades que actualmente se considera que caracterizan a los seres vivos (Hickman et al. 2001): singularidad química, organización compleja y jerárquica, e interacción con el medio ambiente, son actualmente investigadas por el diseño estructural arquitectónico. Nuevos materiales, nuevas organizaciones espaciales y una cierta capacidad de interacción con el entorno inmediato, son temas de los que hoy día se ocupan numerosos diseñadores e investigadores. Personalidades como Robert Le Ricolais, Frei Otto o Cecil Balmond, se han dedicado a descubrir configuraciones geométricas en la naturaleza que puedan tener aplicaciones novedosas en el ámbito de las estructuras arquitectónicas; pero la complejidad de las formas naturales es todavía asombrosa para nuestras mentes. 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*. La materia viva emplea muy pocos materiales para resistir esfuerzos, y todos ellos están formados por fibras con densidades muy inferiores a las de los materiales utilizados en la industria de la construcción. Las fuerzas físicas fundamentales que los organismos experimentan a lo largo de sus vidas, en las distintas escalas, provocan un depósito selectivo de material allí donde es necesario, y es a través de este proceso de autoorganización de la materia que emergen formas optimizadas.

Algunas modelizaciones en las que se basa la Teoría de la Elasticidad, tales como la homogeneidad y el isotropismo de los materiales, resultan burdas si pensamos en la complejidad geométrica de la materia. Es necesario investigar el comportamiento de los materiales a distintas escalas. Éstos pueden ser diseñados tanto a escala microscópica como macroscópica. El hombre ya ha emprendido el estudio de los nanomateriales, si bien aún no han sido aplicados, prácticamente, en el ámbito de la arquitectura.

Es necesario abordar con rigor, en el siglo XXI, 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. Debemos considerar las sollicitaciones provocadas por las fuerzas fundamentales en la materia, establecer una íntima relación entre sus huecos y el uso del espacio, y abordar el diseño de dispositivos con múltiples funciones, a distintas escalas. Una agenda de trabajo como ésta, implicaría 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.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

## AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República, Uruguay, por el apoyo económico brindado para la presentación de la tesis doctoral.

Al Dr. Arq. Joan Calduch Cervera, por su apoyo como tutor de la tesis.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alberts, Bruce; Bray, Dennis; Lewis, Julian; Raff, Martin; Roberts, Keith y Wstson, James (1992). *Biología molecular de la célula*, Ediciones Omega, Barcelona. Segunda Edición.
- Balmond, Cecil y Januzzi, Smith (2002). *Informal*, Editorial Prestel, Munich.
- Balmond, Cecil (2006). "CCTV New Headquarters, Beijing, China, 2003-2008", en revista A+U N° 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.274-279, A+U Publishing, Tokyo, nov 2006.
- Bell, Alexander Graham (1903). The Tetrahedral Principle In Kite Structure, National Geographic Magazine, vol.14, parte 6, pp.219-251, Washington.
- Carroll, Chris; Gibbons, Craig; Ho, Goman; Kwok, Michael; Lawson, Richard; Lee, Alexis; Li, Ronald; Luong, Andrew; Mc Gowan, Rory y Pope, Chas (2008). "CCTV headquarters, Beijing, China: building the structure; Architects: OMA", en revista The Arup Journal Vol. 43, N° 2, pp. 40-51, Corporate Communications Group, Londres.
- Fernández-Galiano, Luis (ed.) (1984). *Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad*, Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.
- Galilei, Galileo (1976). *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Editora Nacional, Madrid. Traducción: Javier Sábada Garay. Versión original: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638.
- Haeckel, Ernst (1862). *Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*, Druck und Verlag von Georg Reimer, Berlín.
- Hickman, Cleveland; Roberts, Larry y Larson, Allan (2001). *Integrated Principles of Zoology*, Mc Graw Hill, Boston. Decimoprimer edición.
- Jencks, Charles (1997). *The Architecture of the Jumping Universe. A polemic: how complexity science is changing architecture and culture*, Academy Editions, Londres. Edición revisada. Versión original: Academy Editions, Londres, 1995.
- Koolhaas, Rem y Mau, Bruce (1997). *S, M, L, XL*, Benedict Taschen Verlag GmbH, Colonia, Alemania. Primera publicación: The Monacelli Press, Nueva York, 1995.
- Le Ricolais, Robert (1973). *Survey of works; Structural Research 1935-1971*, Zodiac N°22, pp.1-56, Edizioni di Comunità, Milán.
- Mc Cleary, Peter; Iglesias, Helena; Del Rey, Luis y Humanes, Alberto (1997). *Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*, Fundación Cultural COAM, Madrid.
- Newcomb, Simon (1901). *Is the airship coming?*, McClure's Magazine, N°17, septiembre 1901, pp. 432-435.
- Otto, Frei y Rasch, Bodo (2006). *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*, Axel Menges, Munich. Quinta edición. Versión original de Axel Menges, 1995.
- Semino, Rinaldo (1973). "Survey of Works", en revista Zodiac N°22, pp.148-161, Edizioni di Comunità, Milán.
- Spuybroek, Lars (2004). *NOX: machining architecture*, Thames & Hudson, Londres.
- Thompson, D'Arcy (1945). *On growth and form*, Cambridge University Press, Cambridge. Versión original de 1917.
- Whitehead, Alfred North (2007). *The concept of Nature*, Cosimo Classics, Nueva York. Versión original de 1920.