

El diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente

Dr. Arq. Juan J. FONTANA CABEZAS

*Instituto de la Construcción, Fac. de Arquitectura, UdelaR, Montevideo, Uruguay
Bv. Gral. Artigas 1031
juanjosefontana@gmail.com

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.

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, design, General Systems Theory, complexity, nature, morphology.

1. Introducción

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. Contextualización

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 transformarían 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.

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. 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.

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, 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 [2]). 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.

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 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 [5]).

3. 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.

3.1. Antecedentes

Algunas de estas ideas pueden encontrarse en obras anteriores a este período y 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 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, media lunas, revellines y glacis, que definen un perímetro estrellado con características *fractales*, análogo 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.

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. A partir de la adición de pequeñas células tetraédricas, Graham Bell fue capaz de generar grandes estructuras siguiendo un procedimiento que presentaba características *fractales*.

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 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 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 crecimiento fractal.

Graham Bell se da cuenta que adicionando celdas tetraédricas 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 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. 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 habitualmente utilizados a principios del siglo XX: la alta repetición de elementos pequeños facilita 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 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, 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.

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 [5]). 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. 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 que estos conocimientos puedan tener en el ámbito estructural. Observando los esqueletos de algunas especies de radiolarios define el concepto de *automorfismo* como la repetición a distintas escalas de una forma. Diseña entonces la viga Polyten como una cercha Queen Post con repeticiones automórficas en su interior. 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 desarrollado por 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 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.

3.2. 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 de ideas arquitectónicas tales como métodos de *form finding*, diseño con *formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas* y modelos de crecimiento *fractal*.

3.2.1. 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 este tipo (Otto et al. [4]). 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 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 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 posibilitó, 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 solo 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. 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. 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 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.

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

3.2.3. *Modelos de 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 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 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. 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.

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".

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 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.

3.3. 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, 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*.

3.3.1. 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.

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, 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 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. 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 permiten tanto la ventilación natural cruzada como la iluminación y las 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 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.

3.3.2. 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 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 aperturadas 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. 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 (Koolhaas et al. [3]), 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 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, en 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 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.

3.3.3. 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 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. [1]). 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. 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.

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

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 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.

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. 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, 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.

Agradecimientos

A la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República, Uruguay, por el apoyo para la presentación de la tesis doctoral, y al Dr. Arq. Joan Calduch Cervera, por su apoyo como tutor.

Referencias

- [1] Balmond, Cecil y Januzzi, Smith (2002). *Informal*, Editorial Prestel, Munich.
- [2] 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.
- [3] Koolhaas, Rem y Mau, Bruce (1997). *S, M, L, XL*, Benedict Taschen Verlag GmbH, Colonia, Alemania. Primera publicación: The Monacelli Press, Nueva York, 1995.
- [4] 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.
- [5] Thompson, D'Arcy (1945). *On growth and form*, Cambridge University Press, Cambridge. Versión original de 1917.