

EL DISEÑO ESTRUCTURAL en las FORMAS COMPLEJAS de la ARQUITECTURA RECIENTE

TESIS DOCTORAL

UNIVERSITAT d'ALACANT
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía

FECHA DE LECTURA: 23 de julio de 2012

AUTOR: Juan José Fontana Cabezas

DIRECTOR: Dr. D. Joan Calduch Cervera

TRIBUNAL: Dra. Dña. Carmen Jordá Such

Dr. D. José Luis Oliver Ramírez

Dra. Dña. María Teresa Palomares Figueres

Dra. Dña. María Elia Gutiérrez Mozo

Dr. D. Juan María Songel González

A: Índice de la tesis

TOMO I: TESIS DOCTORAL

	página
1 Índice	5
2 Introducción	9
3 Contextualización	20
3.1 La Teoría Clásica	21
3.1.1 Relación entre forma y materia	22
3.1.1.1 Forma y belleza: la idea de <i>kalos</i> en el pensamiento griego	22
3.1.1.2 Forma y naturaleza: el concepto de la <i>mimesis</i>	24
3.1.2 La interpretación en los tratados	25
3.1.2.1 El tratado de Vitruvio: la venustas	25
3.1.2.2 El tratado de Alberti: concinnitas y lineamenta	28
3.1.2.3 Forma, materia y arquitectura en la Teoría Clásica	30
3.2 La forma en la naturaleza	32
3.2.1 Las teorías evolucionistas en el siglo XIX	33
3.2.2 La relación entre forma, función y leyes físicas en la primera mitad del siglo XX	36
3.2.2.1 Las proteínas	39
3.2.2.2 Los huesos	43
3.2.2.3 Las medusas	47
3.2.2.4 Los sistemas de empaquetamiento de espacios y el panal de abejas	50
3.2.2.5 Los radiolarios	53
3.2.2.6 Forma y leyes físicas en las Ciencias Naturales en la primera mitad del siglo XX	55
3.2.3 Bases conceptuales de la Teoría General de Sistemas en la segunda mitad del siglo XX	57
3.2.3.1 La Teoría del Caos y la No-linealidad	59
3.2.3.2 La Teoría de las Catástrofes	62
3.2.3.3 La Teoría de la Autoorganización	64
3.2.3.4 La Teoría de los Fractales	66
3.3 Los inicios de la modernidad en el siglo XVII	71
3.3.1 La relación entre forma y materia: el aporte de Galileo Galilei	72

3.3.1.1	Las máquinas	73
3.3.1.2	La idea de límite	76
3.3.2	Los conceptos de eficacia y optimización	79
3.3.3	El reflejo en la arquitectura: la construcción eficaz y optimizada	80
3.3.3.1	La máquina militar: la fortificación abaluartada	80
3.3.3.2	Evolución de los perímetros amurallados europeos en los inicios de la modernidad	86
3.3.3.3	Cálculo y experimentación	89
3.3.3.4	La escisión de los estudios de diseño y mecánica	94
4	Las formas estructurales en la arquitectura reciente	95
4.1	El análisis estructural a principios del siglo XX	96
4.2	Las estructuras de barras	100
4.2.1	Surgimiento de las estructuras trianguladas	101
4.2.1.1	El desarrollo de las cometas celulares	101
4.2.1.2	Modelos de crecimiento: lineal, fractal y celular fractal	106
4.2.2	El traslado a la arquitectura a mediados del siglo XX	114
4.2.2.1	Robert Le Ricolais	114
4.2.2.2	Richard Buckminster Fuller	123
4.2.3	Desarrollo reciente de las estructuras de barras	132
4.2.3.1	Philadelphia City Tower (1952-1957)	132
4.2.3.2	Centro Georges Pompidou (1969-1977)	140
4.2.3.3	Cubierta sobre el Patio Reina Elizabeth II, Museo Británico (1994-2000)	150
4.2.3.4	Centro Nacional de Natación de Pekín (2003-2008)	157
4.2.4	Evolución reciente en el diseño de las estructuras de barras	163
4.3	Las estructuras superficiales	167
4.3.1	Las estructuras superficiales a principios del siglo XX	168
4.3.1.1	Surgimiento de las superficies parabólicas e hiperbólicas a finales del siglo XIX	168
4.3.1.2	El sistema geodésico	173
4.3.1.3	El hormigón armado y las cáscaras estructurales a principios del siglo XX	175
4.3.2	Las cáscaras complejas a mediados del siglo XX	184
4.3.2.1	Las cubiertas de la Opera de Sydney	184
4.3.2.2	Las bóvedas gausas de Eladio Dieste	193
4.3.3	Las estructuras de membrana a mediados del siglo XX	203
4.3.3.1	El desarrollo del Método de los Elementos Finitos	203
4.3.3.2	El nuevo desarrollo de las tensoestructuras	206
4.3.3.3	Los métodos "form finding"	210
4.3.4	Desarrollo reciente de las estructuras superficiales	213
4.3.4.1	Cubiertas sobre los edificios para las Olimpiadas de 1972 en Munich	213
4.3.4.2	Salón Multiusos para la Exposición Federal de Jardinería de Mannheim (1973-1975)	223
4.3.4.3	Nubes de la Défense (1982-1989)	228
4.3.4.4	Los experimentos de Nox	232
4.3.4.5	El revestimiento del Centro Nacional de Natación de Pekín (2003-2008)	244
4.3.5	Evolución reciente en el diseño de las estructuras superficiales	249
4.4	Las estructuras aporticadas	255
4.4.1	Los puentes de Robert Maillart	256
4.4.2	Jean Prouvé y la industrialización de la construcción	261
4.4.3	Las estructuras aporticadas en la segunda mitad del siglo XX	269
4.4.3.1	Los espacios servidos y sirvientes de Louis Kahn	269
4.4.3.2	Los proyectos de Rinaldo Semino en la década de 1960	278
4.4.3.3	Los rascacielos de S.O.M.	284
4.4.3.4	Los "Umbrella buildings"	304
4.4.4	Desarrollo reciente de las estructuras aporticadas	314
4.4.4.1	El Commerzbank en Frankfurt (1991-1997)	314
4.4.4.2	La Mediateca de Sendai (1995-2002)	326
4.4.4.3	Cubierta del Estadio de Chemnitz (1996)	336
4.4.4.4	Cubierta del edificio Expo en el Congrexpo de Lille (1989-1994)	344
4.4.5	Evolución reciente en el diseño de las estructuras aporticadas	351

5 Conclusiones provisionales	359
6 Bibliografía y fuentes	373
6.1 Bibliografía	374
6.2 Fuentes	414

TOMO II: ANEXO

	página
Philadelphia City Tower (1952-1957)	3
Centro Georges Pompidou (1969-1977)	18
Cubierta sobre el Patio Reina Elizabeth II en el Museo Británico (1998-2002)	34
Centro Nacional de Natación de Pekin (2003-2007)	51
Las bóvedas gausas de Eladio Dieste	71
Cubiertas sobre los edificios para las Olimpiadas de 1972 en Munich	95
Salón Multiusos para la Exposición Federal de Jardinería de Mannheim (1973-1975)	115
Nubes de la Défense (1982-1989)	122
El Commerzbank en Frankfurt (1991-1997)	135
La Mediateca de Sendai (1995-2002)	152
Cubierta del Estadio de Chemnitz (1996)	177
Cubierta del Edificio Expo en el Congrexpo de Lille (1989-1994)	189

B: Resumen del contenido de la tesis

Este trabajo, que se inserta en el ámbito de los estudios históricos sobre el diseño estructural en la arquitectura, analiza la evolución reciente de dicha disciplina en el contexto del pensamiento y las teorías científicas surgidas en la segunda mitad del siglo XX.

Las hipótesis en que se basó fueron:

- 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.
- 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 ámbito de la Teoría General de Sistemas, tales como *caos, azar, indeterminismo, autoorganización, emergencia, no-linealidad o fractalidad*, han sido adoptados en las investigaciones recientes sobre la eficacia y la optimización de las estructuras arquitectónicas, provocando el surgimiento de un nuevo nivel de complejidad en el diseño, el cálculo y la fabricación de los proyectos arquitectónicos.

Particularmente se pretende analizar el 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 estos nuevos conceptos surgidos a partir del desarrollo de la *Teoría General de Sistemas* y sus teorías científicas asociadas, tales como las teorías del *Caos*, de las *Catástrofes*, de la *Autoorganización* y de los *Fractales*.

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, primeramente, 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 de los de mecánica en las escuelas europeas. Se estudiaron las bases conceptuales de las teorías evolucionistas del 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 obras arquitectónicas paradigmáticas.

A partir de dichos soportes teóricos se analizaron las principales *ideas* que sustentaron el diseño de estos proyectos, 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 con el objetivo de evaluar la evolución del diseño de tres tipologías estructurales: las estructuras de barras, las superficiales y las aperticadas.

Contextualización

Forma, materia y arquitectura en la Teoría Clásica

La Gran Teoría clásica que afirmaba que la belleza consistía en el orden, la armonía y las proporciones de las partes de un todo, dominó el pensamiento filosófico y la teoría artística entre los siglos V a.C. y XVIII d.C.

Forma y materia se encontraban completamente disociadas en el proceso de diseño arquitectónico clásico. La naturaleza, principal referente de lo bello, 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. Pero estas reglas absolutas del diseño, basadas en las proporciones, traerían grandes inconvenientes de aplicarse estrictamente a la arquitectura. Según el mismo Vitruvio, en una construcción "*existen (...) piezas que, aumentadas o disminuidas de escala, se tornarían impropias para su fin*" y cuyas proporciones deberían entonces cambiar a medida que cambia la escala del edificio. En el último capítulo del décimo libro de su tratado, que versa sobre máquinas de defensa, Vitruvio reconoce que es importante tener en cuenta el tamaño de los artefactos ya que aunque éstos parezcan viables en modelos a escala reducida, podrían derrumbarse si se construyesen de tamaños mayores, manteniendo las mismas proporciones.

Para Sócrates, además de la belleza objetiva, existía la belleza subjetiva. Existían cosas bellas en sí mismas pero también cosas bellas sólo para las personas que las utilizaban, pues eran aptas para un determinado fin. La belleza, entonces, podía también radicar en la aptitud que un determinado objeto tenía para lograr un objetivo y no sólo en sus proporciones. Se origina, de esta manera, una idea alternativa a la idea clásica de belleza: la belleza de lo adecuado.

A partir del siglo XVII comenzará a instaurarse un nuevo proceso de diseño arquitectónico que superará la disociación clásica entre forma y materia, abandonando reglas exclusivamente formales para centrarse en las características materiales y en las dimensiones de los elementos constructivos: el proceso moderno de diseño.

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.

La forma de nuestro cuerpo, hasta donde podemos entenderla hoy día, es el resultado de una organización jerárquica extraordinariamente compleja en la que siempre las tensiones a que están sometidas sus partes pueden explicar con bastante certeza sus formas, desde la estructura de las proteínas a una escala microscópica, hasta la disposición de las trabéculas en los huesos porosos, la forma tubular de los huesos compactos o la morfología de nuestro esqueleto a una escala mayor. Esta extraordinaria complejidad formal es la responsable de las extraordinarias propiedades físicas de nuestro cuerpo.

Los inicios de la modernidad en el siglo XVII

Conocer era, para la ciencia aristotélica, reflejar mentalmente las estructuras esenciales de la naturaleza. La finalidad del hombre era dilucidar esos conocimientos, es decir, la contemplación y análisis de las leyes inmutables del universo. 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 último libro, "*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*" de 1638, considerado el primer libro de la historia sobre Mecánica de estructuras, Galileo Galilei observa que muchos aparatos que funcionan sin problemas a una determinada escala, no logran hacerlo correctamente a una escala mayor. 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 una máquina grande se construyese con el mismo material y las mismas proporciones que una más pequeña, la grande no sería tan fuerte ni tan resistente como la pequeña.

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

Galileo observa los cuerpos de varios animales analizando la dependencia existente entre la forma, el tamaño y el material. Estudia tanto el mundo de las máquinas como el de la naturaleza, dando origen a la teoría del *funcionamiento mecánico* de los seres vivos que se mantendrá vigente hasta principios del siglo XIX, cuando Lamarck establezca la ciencia de la biología como *el estudio de los seres vivos*, que dará origen a las teorías organicistas.

Con el propósito de alcanzar la eficacia en la construcción de máquinas, introduce la noción de *límite*. Tanto para las máquinas que crea el hombre como para los cuerpos en la naturaleza, decía, existen límites que no pueden sobrepasarse y que es necesario determinar a través de experimentos. Comprende, de este modo, la necesidad de establecer un método analítico para evaluar la resistencia de un elemento frente a las fuerzas

exteriores. 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, directamente 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. 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.

Conclusiones provisionales

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.

Antecedentes

Algunas de estas ideas pueden encontrarse en obras construidas con anterioridad a este período y diseñadas, en general, como resultado de una búsqueda de la eficacia y la optimización formal de una determinada tipología constructiva.

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 que, equipado con cañones capaces de destruir fácilmente las fortificaciones medievales, se convirtió en una fuerte amenaza. 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 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 novedoso método para la construcción de cometas de grandes dimensiones 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* y que tenía por objetivo la optimización de la relación entre el peso y la superficie de vela expuesta al viento, de modo de asegurar la estabilidad del vuelo de la cometa.

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. 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, las máquinas voladoras o los huesos, 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 expuesta al viento 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 Simon Newcomb, aumentar en exceso el tamaño de las cometas si se pretende que éstas sean capaces de volar.

Analizando algunos esqueletos de mamíferos puede observarse que cuanto mayor sea el tamaño de un animal 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 esta variación no parece responder linealmente al mayor aumento del peso en relación al incremento de las secciones. Teniendo en cuenta las esbelteces geométricas medidas en los huesos de las extremidades posteriores de algunos animales podemos concluir que, a medida que aumenta el tamaño, la disminución de la esbeltez es menor de lo que podría esperarse atendiendo exclusivamente a las variaciones de peso. La altura de una vaca es del orden del triple o el cuádruple de la altura de un perro o un gato medianos y su peso es unas 30 o 40 veces mayor, sin embargo, observando los esqueletos de sus patas traseras llevados al mismo tamaño, no se aprecia una proporcional diferencia de esbelteces. La esbeltez del fémur del perro y del gato es mayor que la del fémur de la vaca, pero la diferencia oscila en el entorno del 10% y el 30%. La diferencia de esbelteces en el húmero, para los mismos animales, es algo mayor: entre el 60% y el 70%. Pero la esbeltez del hueso del hombre de estatura normal, medida en el dibujo realizado por Galileo Galilei, es casi 250% mayor que la esbeltez del hueso del gigante, cuya longitud ha sido aumentada tres veces.

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 ingeniarse para diseñar estructuras de distintos tamaños con el mismo material. Cuando un mamífero alcanza grandes tamaños, aparecen huecos en el interior de sus huesos que son proporcionalmente mayores a los de los mamíferos pequeños, es decir, su estructura interna es más compleja. O si pensáramos las sucesivas escalas de huecos en el hueso como generadas mediante un proceso iterativo, desde los espacios intersticiales en el interior de la estructura de las cadenas polipeptídicas o en los sucesivos pliegues de la molécula de colágeno, hasta aquellos en el interior de las trabéculas y de 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 de la geometría de sus huecos es mayor.

Una estructura jerárquica más compleja en la que se generan huecos de mayores escalas y un engrosamiento diferenciado de las paredes de hueso compacto de acuerdo a la concentración de tensiones que existe en las distintas zonas, son entonces algunos de los mecanismos geométricos que la naturaleza parece utilizar para aumentar la escala de sus estructuras óseas, atenuando el impacto del aumento de su propio peso. A este proceso de crecimiento podríamos denominarlo como **crecimiento fractal**, ya que van apareciendo progresivamente y en forma jerárquica, huecos de mayores tamaños en el interior de las estructuras óseas a medida que aumentan de tamaño.

Las investigaciones realizadas por Graham Bell sobre la optimización de la forma de cometas, que parten del trabajo realizado por Lawrence Hargrave, hacen evolucionar la cometa celular formada por celdas prismáticas a la forma tetraédrica. Bell reconoce en la *triangulación espacial* un mecanismo geométrico de rigidización estructural. Se da cuenta, además, que adicionando celdas tetraédricas según un determinado modelo de crecimiento, podía crear cometas de gran tamaño en las que creyó que la relación entre el peso y la superficie de vela expuesta al viento se mantenía constante. Más tarde se demostró que dicha relación disminuía favorablemente para el vuelo de la cometa si se tenía en cuenta el

peso propio de los nudos. Este modelo de crecimiento, que permite la creación de grandes estructuras a partir de la adición de pequeñas células siguiendo un procedimiento con características fractales, podría ser denominado como **modelo de crecimiento celular fractal**. 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 obtendremos finalmente una estructura de forma tetraédrica a partir de la adición de células tetraédricas menores, agrupadas jerárquicamente. 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 por la naturaleza para la creación de estructuras, tales como las caparazones de virus formadas por la agrupación de subunidades proteicas. 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, además de cometas, varios barcos, una estructura cortavientos, una vivienda y una torre de observación de 72 pies de altura.

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, recurrían a la *autoorganización* de la materia para la definición de su geometría y presentaban 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, inéditas hasta el momento en el campo de la construcción y con extraordinarias cualidades resistentes. La sencillez del procedimiento de montaje de estas superficies y el empleo de elementos estandarizados de uso común permitían un importante ahorro económico.

El filósofo y matemático Alfred Whitehead decía que el proceso, más que la sustancia, es el constituyente fundamental de la naturaleza. Los genes de un individuo, se cree hoy día, no poseen la información de su forma final sino más bien la información del proceso de generación de su forma en un determinado entorno. La información genética depende, según esta teoría, de la física de procesos denominados *form finding* para la generación de la forma de un individuo.

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 denominado en este trabajo como *formas complejas adaptadas a las solicitaciones 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 solicitaciones 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 los métodos de diseño

empleados por Maillart, si bien son analíticos y no utilizan experimentos materiales, recurren al concepto de *autoorganización* de la materia para reducir la cantidad de material necesario en las estructuras.

Hacia mediados del siglo XX comienzan a diversificarse los materiales empleados en la industria de la construcción y se inicia el proceso de teorización de algunos de los conceptos que, en las últimas décadas, han definido un nuevo nivel de complejidad en el diseño de las estructuras edilicias.

A través de las cáscaras de hormigón armado, de hormigón prefabricado y de cerámica armada, se explora el potencial de las estructuras laminares para cubrir espacios de grandes luces. Diseñadores como Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi, Felix Candela, Eero Saarinen o Eladio Dieste asumen la complejidad inherente al diseño de este tipo de estructuras que, previo al desarrollo de los programas informáticos de cálculo, no era posible analizar estáticamente con precisión.

Las soluciones basadas en geometrías parabólicas o catenarias son muy eficaces en el aprovechamiento de la materia al minimizar los esfuerzos de flexión, tal como algunos experimentos de autoorganización de la materia indican, pero las soluciones con geometrías esféricas, muchas veces, simplifican los procesos de fabricación al mantener constante el radio de curvatura. Esta discordancia se trasladó también al diseño de estructuras superficiales de barras y se convirtió en una polémica entre dos grandes personalidades como Robert Le Ricolais y Richard Buckminster Fuller.

Jean Prouvé abordó el problema de la *optimización* de las formas arquitectónicas atendiendo a los procesos de prefabricación, transporte y montaje en obra e investigó el potencial del aluminio y de la chapa plegada de acero como materiales estructurales.

Prouvé consideraba a los formalismos como una negación de la propia arquitectura. La maquinaria disponible para el cortado y doblado de metales, el apilamiento de materiales, los sistemas de empaquetamiento, las dimensiones de los vehículos de carga y transporte, la posibilidad de montaje y desmontaje de las distintas piezas por parte de un número limitado de operarios y consideraciones estáticas, en función de los esfuerzos a resistir, 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 la primera mitad 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. Si bien D'Arcy Thompson no utilizó explícitamente el concepto de *fractalidad*, en varios de sus análisis y dibujos sobre organismos y procesos naturales aparecen formas con características fractales, como por ejemplo, en los análisis de gotas de un líquido diluyéndose en otro líquido, de la formación de los esqueletos de algunas especies de radiolarios, de la constitución de ciertos tejidos, o en los esquemas de los tentáculos de las medusas, de las nervaduras de las alas de las libélulas, de los cristales de la sal común o de las líneas de sutura de algunas caparzones.

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 figuras como Poincaré, Lord Kelvin, Ernst Haeckel o 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 que sobre ella actúan 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. De este modo, inspirado en la observación de una forma viviente, recurre al concepto de fractalidad para optimizar el comportamiento de una estructura de barras (tal como había hecho Graham Bell en sus investigaciones sobre estructuras de cometas celulares), 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 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, en la que se enmarcan gran parte de los trabajos que realizó junto a estudiantes de la Universidad de Pensilvania y varios proyectos innovadores diseñados por célebres arquitectos e ingenieros a lo largo de 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".

Buckminster Fuller fue uno de los principales precursores del concepto de *optimización energética* de los edificios. Para investigar la forma de una malla estructural que se adapte a las superficies esféricas de sus domos geodésicos se inspiró en el sistema geodésico inventado por Barnes Wallis y en las configuraciones geométricas de los esqueletos de los radiolarios, analizados por Haeckel y D`Arcy Thompson.

El concepto de fractalidad está también presente en su obra. Para Fuller la arquitectura debe reflejar las leyes naturales y un edificio es, por lo tanto, un universo dentro del universo.

La época reciente

A partir de la segunda mitad del siglo XX, conceptos como complejidad, azar, autoorganización, emergencia, no-linealidad y fractalidad se trasladan sistemáticamente al ámbito del diseño de estructuras arquitectónicas promoviendo el desarrollo de formas complejas. 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.

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 **métodos de form finding**, de **modelos de crecimiento celular fractal**, del diseño con **formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas**, y de la **separación entre espacios sirvientes y espacios servidos**.

Los conocimientos acerca de los procesos de autoorganización de la materia son fundamentales para el diseño de cualquier estructura traccionada. Frei Otto retomó, a partir de la construcción de sus primeras tensoestructuras en la década de 1950, los experimentos de **form finding** que Gaudí había inventado a finales del siglo XIX 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. Se destacan, entre otros, los experimentos con películas de

jabón para producir modelos de tensoestructuras de membranas y de redes de cables pretensados con áreas mínimas, 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 y cáscaras comprimidas con la forma inversa de formas traccionadas suspendidas, los experimentos con hilos para investigar estructuras ramificadas, los experimentos con montañas de arena para estudiar construcciones con barro 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, Frei 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 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. Dado que se trata de una estructura sometida exclusivamente a esfuerzos de tracción, que su peso propio tanto a la escala del modelo como a la de la cubierta real resulta despreciable con relación a la magnitud de las cargas que es capaz de soportar y que el acero presenta un comportamiento bastante cercano al de un material homogéneo, continuo e isótropo, de ser idénticas las tensiones en los cables, el tamaño y la forma de sus secciones no afectarían mayormente a su comportamiento elástico. Pero debido a las importantes dimensiones de la obra, la precisión geométrica que podía alcanzarse en un modelo reducido con la tecnología y el tiempo disponibles, no era suficiente como 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 cálculos matemáticos hechos por ordenador. Fue necesario, entonces, el desarrollo de nuevos programas capaces de modelizar con exactitud el comportamiento de una cubierta suspendida pretensada.

Para el diseño del Multihalle en Mannheim se construyó un modelo que podría ser considerado como una etapa preliminar en el proceso de definición de la forma. Las mediciones extraídas de este modelo fueron ingresadas a programas informáticos que analizaron tanto la geometría como la estática de la cubierta y realizaron los ajustes finales. Para la construcción de tensoestructuras de membrana, de redes de cables o de bóvedas comprimidas con materiales flexibles, tales como tablas de madera o tubos de cartón, es necesario diseñar, además de procesos de diseño, procesos de montaje en obra que recurran a la autoorganización de la materia para poder dar a la obra su forma final.

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 con los trabajos de Frei Otto 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.

El diseño del proyecto de ejecución de la Opera de Sydney, a partir del anteproyecto de Jørn Utzon, resultó un trabajo mucho más complejo del previsto por el jurado del concurso. La escala monumental del edificio fue un factor determinante y su resolución implicó avanzar más allá de lo conocido en cuanto a metodologías de organización y coordinación de trabajos de diseño, en la creación de nuevas herramientas informáticas para cálculo y dibujo de estructuras laminares y en el desarrollo de algunos materiales como el hormigón prefabricado.

Tanto la Opera de Sydney como las cubiertas del recinto olímpico de Munich resultaron un gran desafío debido a lo inédito de sus escalas. La informática parecía brindar las

herramientas más adecuadas para el diseño de sus proyectos de ejecución, con la precisión requerida y en tiempos reducidos, pero su desarrollo era aún incipiente; por este motivo, ambos proyectos se convirtieron en importantes promotores del desarrollo de nuevos programas informáticos de diseño y cálculo, y de nuevas metodologías de trabajo en colaboración interdisciplinaria, que tendrán una enorme repercusión en cómo las estructuras superficiales serán diseñadas en décadas posteriores.

Lars Spuybroek, director del grupo holandés Nox, desarrolló también 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. 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 algún cambio cualitativo trascendente y procesos en los que interviene activamente la selección del proyectista, de modo de permitir una calibración más precisa de los resultados obtenidos. 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. 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.

En algunos de estos trabajos el ordenador es una herramienta fundamental; el proceso material de *form finding* tiene por objetivo la obtención de una primera aproximación geométrica a la forma, que se ingresa a continuación a programas informáticos para ser ajustada.

La prefabricación de elementos constructivos con robots alimentados directamente con la información numérica obtenida de ordenadores, ha hecho posible la construcción de superficies resistentes con un nivel de complejidad formal inédito. Estructuras como la cubierta sobre el patio del Museo Británico en Londres de Norman Foster, la "D-Tower" en Doetinchen de Nox o el revestimiento del Centro Nacional de Natación de Pekín de PTW Architects, son novedosas aplicaciones de estas nuevas técnicas.

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. De este modo, muchas tensoestructuras se diseñan actualmente a través de procesos de *form finding* llevados a cabo en un entorno virtual o en una naturaleza simulada. 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 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 Centro Nacional de Natación de Pekín (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.

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 las secciones variables de los arcos de hormigón prefabricado de la Opera de Sydney, en las vigas Gerber de acero fundido del Centro Pompidou 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 geométrica de las superficies rígidas resistentes. La geometría es el principal factor determinante de la capacidad portante de las obras de Dieste. 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.

A mediados del siglo XX surgieron una serie de proyectos arquitectónicos que comenzaron a aplicar las ideas de Graham Bell y de Robert Le Ricolais: los domos de Fuller y Makowski, los rascacielos geodésicos de Kahn y Tyng, las cubiertas de grandes luces de Royce, Hurley y Stewart, de Muchow, Haller y Larson, de Frazer, y los arcos de Gaubek. En algunos de estos proyectos, la geometría de la estructura define huecos a distintas escalas según una jerarquía que recuerda la compleja organización geométrica de las formas naturales, definiendo la jerarquía espacial de usos del edificio.

En proyectos como la Philadelphia City Tower de Louis Kahn y Anne Tyng, la Ciudad Tetraédrica de Buckminster Fuller, el Pabellón francés para la Expo de Bruselas de 1958 de René Sarger, el Pabellón temático *Man the Producer* en la Exposición de Montreal de Guy Desbarats o en algunas estructuras reticuladas de Yona Friedman, estos espacios a distintas escalas pueden entenderse como generados a partir de iteraciones hacia el interior del edificio de un módulo tetraédrico principal, según un principio geométrico de **crecimiento celular fractal** análogo al del procedimiento 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.

Siguiendo su principio de separación entre **espacios servidos y espacios sirvientes**, Louis Kahn diseñó diversos proyectos cuya solución espacial y estructural resulta fractal, tales como la "Casa de Baños" para el Trenton Jewish Community Center o los "Laboratorios de Biotecnología Richards" para la Universidad de Pensilvania.

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 describirse como un modelo de *crecimiento celular fractal* análogo al que la naturaleza utiliza para la creación de estructuras complejas a partir de la agrupación de subunidades más simples. Semino define macroestructuras a partir de un elemento base y un principio de organización jerárquico, emulando principios de generación de formas naturales como los descritos por D'Arcy Thompson. 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.

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 llevó a la repetición de modelos geométricos probados a escala pequeña, con piezas menos esbeltas debido a la necesidad de aumentar las secciones resistentes. Las megaestructuras diseñadas por Rinaldo Semino en la década de 1960 están entre los primeros proyectos en la historia de la arquitectura que abandonaron claramente este modelo de crecimiento lineal e investigaron un modelo alternativo.

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 Myron Goldsmith, Bruce Graham y Fazlur Kahn en S.O.M., durante la década de 1960, podrían considerarse igualmente como fractales. Dichas investigaciones tenían como objetivo la búsqueda de la eficacia estructural de los edificios en altura. La figura fractal conocida como Alfombra de Sierpinski presenta, en su segunda y tercera iteración, grandes semejanzas con la geometría en planta de los rascacielos diseñados con los sistemas de "tubo dentro de tubo" y "haz de tubos". Se propuso en esta tesis, por otra parte, una serie de polígonos fractales inspirados en el diseño del Commerzbank de Frankfurt que podrían utilizarse como base para el diseño de plantas de rascacielos con el sistema de "tubos perforados".

El gigante que Galileo afirmaba se derrumbaría por su propio peso, podría comenzar a levantarse de adquirir mayor ligereza y rigidez con un incremento de la complejidad geométrica de la estructura interna de sus huesos, logrado a partir de una distribución jerárquica de huecos en la masa ósea según una malla fractal.

Existen obras en las que un diseño fractal surge a partir de una búsqueda formal no directamente vinculada a la eficacia, como en el caso de las tensoestructuras del Arco de la Défense. La estructura traccionada en el interior del Gran Arco, diseñada por Paul Andreu y Peter Rice, se descompone en múltiples tensoestructuras de menor escala buscando materializar la metáfora de una nube.

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, indeterminismo 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 surgimiento de procesos de **diseño algorítmico**.

El **diseño integrado** de elementos constructivos, que permite a 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.

El diseño de las cubiertas de la Opera de Sydney, con sus arcos ojivales compuestos por la unión de dos tramos circulares, surge como una respuesta coordinada a problemas estructurales y constructivos. La forma ojival acerca el eje de los arcos a la línea de presiones del sistema de cargas actuantes y la geometría esférica simplifica los procesos de prefabricación y montaje de la estructura de hormigón armado y del revestimiento cerámico.

Para la cubierta sobre el patio del Museo Británico, un equipo formado por integrantes de Foster & Partners y de Buro Happold trabajaron en el diseño de un sistema optimizado 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 no tienen una función simple y única, sino compleja; están siempre 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 adquiriera la mayor inercia posible frente a las deformaciones por carga horizontal, tal como recomendaba LeMessurier. 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, en los espacios de oficinas, 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 un patrón formal con características fractales.

En el nuevo Ayuntamiento para la ciudad de Londres, el trabajo en conjunto de los 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 falso techo y de depósito estanco de humos en caso de incendios y los pilares huecos funcionan a la vez como soportes y como conductos de circulación del sistema de acondicionamiento de aire.

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.

Existen, por otra parte, diversas construcciones en las que el diseño estructural está condicionado por una búsqueda de optimización energética, tanto en las etapas de producción, como en la de montaje o en el posterior desempeño del edificio. En este sentido son destacables los aportes de Buckminster Fuller, con sus investigaciones sobre domos geodésicos y sobre el concepto "dymaxion", y el trabajo de Norman Foster, quien permanentemente investiga el desarrollo de nuevos sistemas constructivos que, además de integrar estructura con cerramientos y sistemas de instalaciones, recurren a procedimientos industrializados de fabricación, de montaje en obra, y pretenden utilizar eficientemente la energía.

La malla del Centro Nacional de Natación de Pekín es un ejemplo paradigmático de búsqueda de optimización del comportamiento estructural y del desempeño energético de los edificios; el interior hueco de la estructura aporticada de barras, que sigue la geometría de la espuma de Weaire-Phelan, es utilizado como una gran cámara de aire ventilada que ilumina y acondiciona naturalmente el espacio interior durante gran parte del año.

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 el principio de separación entre espacios servidos y espacios sirvientes. Las distintas funciones programáticas en la mayoría de las obras de Louis Kahn, tales como los espacios principales y aquellos de servicio, se organizan según un determinado orden jerárquico que también observó en algunos monumentos clásicos de la arquitectura como la "Villa Rotonda" de Andrea Palladio. En el "Salk Institute" de La Jolla, el orden y la flexibilidad de los espacios, la solución estructural y las instalaciones, se integran en una única solución constructiva. 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. Al igual que para el diseño de la estructura de los "Laboratorios de Biotecnología Richards", se optó por una solución de vigas huecas aporticadas sin presencia de barras diagonales, pero en este caso con la altura de un nivel completo, de modo que en el interior de sus huecos, además de poder discurrir conductos, pueden 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 y presentado en diciembre de 1971, 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. Cerca de los apoyos, dichas vigas eran reforzadas con diagonales de modo de mejorar su comportamiento mecánico. Pero este esquema fue abandonado y se utilizaron finalmente vigas reticuladas de menor altura. Balmond analizó que el espacio que ocupan estas vigas reticuladas en el Pompidou 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 diseños de vigas Vierendeel en el libro "*S, M, L, XL*" de 1997, atendiendo a los diferentes usos programáticos de un edificio y a la consecuente optimización del comportamiento estructural, y lo utiliza para diseñar el proyecto ZKM de Karlsruhe. En dos de sus fachadas se proyectan grandes 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 estas vigas 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 los 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 que permiten el funcionamiento del gran espacio interior.

Al exterior de la fachada principal, sobre las vigas Gerber, se ubican las zonas de circulación: corredores interiores que recorren longitudinalmente todo el edificio, circulación exterior pública, escaleras principales y de servicio. La escalera mecánica principal, que permite acceder a todos los niveles, se cuelga de los extremos de las vigas Gerber. La imagen final de esta fachada, sobre la plaza, es el resultado de la superposición de la estructura de base con esta zona de circulación. Sobre la fachada longitudinal posterior se ubica toda la red de instalaciones: sistemas de climatización del aire, instalaciones eléctricas, sanitarias, montacargas, etc., con un código de colores: azul para el agua, verde para el aire, amarillo para la electricidad y rojo para las circulaciones de servicio.

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 principales 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 flexibilidad de adaptación y 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 estructural pero que permite el acceso de cualquier instalación a cualquier zona del edificio.

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 y análogamente a como Robert Le Ricolais proponía ocupar su "columna automórfica", 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 las oficinas. La retícula homogénea de pilares, que caracterizaba la planta de los edificios en altura del Movimiento Moderno, se sustituye por una disposición fractal de tubos que optimiza el comportamiento estático del edificio a la vez que libera los espacios servidos de interferencias estructurales.

El diseño de numerosos proyectos recientes, tales como rascacielos con estructuras de "haces de tubos" y "tubos perforados", o el Centro Nacional de Natación de Pekín, pueden también considerarse como el resultado de procesos de optimización entre la distribución de los distintos espacios arquitectónicos y la configuración geométrica de la estructura.

Cecil Balmond se ha planteado recientemente 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 vivas completamente idénticas. La naturaleza parece seleccionar, a través de procesos evolutivos, formas eficaces para determinados objetivos y proporciones fáciles de codificar, como la áurea. El número áureo: 1,61803398874989484... es un número irracional que teóricamente se determinaría iterando infinitas veces un algoritmo muy sencillo: $1+1/[1+1/(1+1/...)]$, definido también por la serie de Fibonacci. Según el número de veces que se itere, surge un valor diferente, de modo que un mismo proceso de generación de formas basado en este algoritmo o en la serie de Fibonacci, podría conducir a resultados diferentes.

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.

La estructura de la cubierta para el nuevo Estadio de Chemnitz, por ejemplo, consiste en una malla de arcos que, soportados en ménsula por una serie de pilares dispuestos de acuerdo a determinadas características del proyecto, resultan sometidos a los menores esfuerzos posibles de flexión y de torsión. El objetivo perseguido fue diseñar una estructura eficaz, pero que cumpla también con determinados requisitos previos impuestos por el diseño arquitectónico.

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 de este proceso se obtuvo un tubo con una imagen compleja, cuya malla de barras diagonales se adapta a las sollicitaciones 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.

Síntesis final

El traslado a la arquitectura de conceptos y teorías científicas, a partir del establecimiento en el siglo XVII de la dependencia de la forma de su constitución material, se superpone a finales del siglo XX y principios del siglo XXI con la vigencia de algunas ideas procedentes

de la estética clásica, como que la belleza en el arte se desprende de la mimesis de la naturaleza y con valores propios de la cultura actual, como la sostenibilidad y la eficiencia energética.

A mediados del siglo XX ocurre la confluencia de una serie de fenómenos: la acumulación de cierta 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, el inicio de un desarrollo explosivo de la informática que facilita el manejo e intercambio 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 la sistemática aplicación a las distintas tipologías constructivas de nuevos **conceptos** surgidos en el ámbito de las ciencias naturales que buscan explicar los procesos de generación de formas en la naturaleza, tales como complejidad, caos, azar, indeterminismo, autoorganización, emergencia, no-linealidad o fractalidad, a través de **ideas arquitectónicas** tales como *formas complejas ajustadas a las sollicitaciones físicas*, métodos de *form finding*, modelos de *crecimiento fractal*, separación entre *espacios sirvientes* y *espacios servidos*, diseño de *dispositivos optimizados para cumplir múltiples funciones*, *organización espacial jerárquica* y *diseño algorítmico*, orientando la búsqueda de la eficacia y la optimización de las estructuras en la arquitectura reciente.

C: Proceso de reelaboración necesario para la publicación de la tesis

A los efectos de adaptar el texto de la tesis doctoral al formato de una publicación dirigida a profesionales y estudiantes, considero necesario realizar los siguientes ajustes:

Extraer del punto 2 [*Introducción*] los contenidos referentes a antecedentes y alcance de la investigación, desarrollados en los ítems *Contexto disciplinar*, *Estado de la cuestión*, *Interés y justificación*, *Hipótesis*, *Objetivos*, *Plan y Método de trabajo*, y *Organización de la tesis*, eliminando los referentes a motivaciones personales y criterios de selección de ejemplos, bibliografía y fuentes.

Suprimir del punto 4.1 [*El análisis estructural a principios del siglo XX*] los contenidos descriptivos de los métodos de cálculo estudiados, extrayendo el análisis realizado según los objetivos específicos de la tesis para complementar las síntesis parciales realizadas en los puntos 4.2.4, 4.3.5 y 4.4.5 [*Evolución reciente en el diseño de las estructuras de barras, superficiales y aporticadas*].

Suprimir del punto 4.2.3 [*Desarrollo reciente de las estructuras de barras*] los contenidos descriptivos de los principales ejemplos arquitectónicos estudiados, extrayendo el análisis realizado según los objetivos específicos de la tesis para complementar la síntesis parcial realizada en el punto 4.2.4 [*Evolución reciente en el diseño de las estructuras de barras*].

Suprimir de los puntos 4.3.2, 4.3.3 y 4.3.4 [*Las cáscaras complejas a mediados del siglo XX*, *Las estructuras de membrana a mediados del siglo XX* y *Desarrollo reciente de las estructuras superficiales*] los contenidos descriptivos de los ejemplos arquitectónicos y de los métodos de cálculo estudiados, extrayendo el análisis realizado según los objetivos específicos de la tesis para complementar la síntesis parcial realizada en el punto 4.3.5 [*Evolución reciente en el diseño de las estructuras superficiales*].

Suprimir de los puntos 4.4.3 y 4.4.4 [*Las estructuras aporticadas en la segunda mitad del siglo XX* y *Desarrollo reciente de las estructuras aporticadas*] los contenidos descriptivos de los principales ejemplos arquitectónicos estudiados, extrayendo el análisis realizado según

los objetivos específicos de la tesis para complementar la síntesis parcial realizada en el punto 4.4.5 [*Evolución reciente en el diseño de las estructuras aporticadas*].

Completar el punto 5 [*Conclusiones provisionales*] con una síntesis final.

Realizar una selección de las imágenes incluidas en la tesis.

Corregir errores de sintaxis y de ortografía.

El Tomo II: Anexo, que incluye fichas y documentación gráfica de los principales ejemplos arquitectónicos estudiados, no se incluiría en la publicación.

Esquema del Índice de la tesis reelaborada:

1 Índice

2 Introducción

3 Contextualización

3.1 La Teoría Clásica

- 3.1.1 Relación entre forma y materia
- 3.1.2 La interpretación en los tratados
- 3.1.3 Forma, materia y arquitectura en la Teoría Clásica

3.2 La forma en la naturaleza

- 3.2.1 Las teorías evolucionistas en el siglo XIX
- 3.2.2 La relación entre forma, función y leyes físicas en la primera mitad del siglo XX
- 3.2.3 Bases conceptuales de la Teoría General de Sistemas y teorías asociadas, en la segunda mitad del siglo XX

3.3 Los inicios de la modernidad en el siglo XVII

- 3.3.1 La relación entre forma y materia y la idea de límite: el aporte de Galileo Galilei.
- 3.3.2 Los conceptos de eficacia y optimización
- 3.3.3 El reflejo en la arquitectura: la construcción eficaz y optimizada

4 Las formas estructurales en la arquitectura reciente

4.1 Las estructuras de barras

- 4.1.1 Surgimiento de las estructuras trianguladas a finales del siglo XIX
- 4.1.2 El traslado a la arquitectura a mediados del siglo XX: los aportes de Robert Le Ricolais y Richard Buckminster Fuller
- 4.1.3 Evolución reciente en el diseño de las estructuras de barras: triangulación, modelo de crecimiento celular fractal, organización espacial jerárquica, espacios sirvientes - espacios servidos

4.2 Las estructuras superficiales

- 4.2.1 Las estructuras superficiales a principios del siglo XX
- 4.2.2 Las superficies complejas y el método *form finding* a mediados del siglo XX
- 4.2.3 Evolución reciente en el diseño de las estructuras superficiales: *form finding*, formas ajustadas a las sollicitaciones físicas, diseño integrado de dispositivos

4.3 Las estructuras aporticadas

- 4.3.1 Las estructuras aporticadas a principios del siglo XX: el éxito del hormigón armado y el aporte de Robert Maillart
- 4.3.2 La industrialización de la construcción a mediados del siglo XX: el aporte de Jean Prouvé
- 4.3.3 Evolución reciente en el diseño de las estructuras aporticadas: modelo de crecimiento fractal, organización espacial jerárquica, espacios sirvientes - espacios servidos, formas ajustadas a las sollicitaciones físicas, diseño algorítmico

5 Conclusiones provisionales

6 Bibliografía y fuentes