

Sobre esqueletos de gigantes

El paradigma de la complejidad en las
estructuras arquitectónicas

Juan José Fontana Cabezas



Espacio Interdisciplinario
Universidad de la República
Uruguay

Interdisciplinarias
2014

Sobre esqueletos de gigantes

El paradigma de la complejidad en las
estructuras arquitectónicas

Juan José Fontana Cabezas



Espacio Interdisciplinario
Universidad de la República
Uruguay

Interdisciplinarias
2014



Espacio Interdisciplinario
Universidad de la República
Uruguay

Espacio Interdisciplinario de la Universidad de la República

José Enrique Rodó 1843

11200 Montevideo Uruguay

www.ei.udelar.edu.uy

ei@ei.udelar.edu.uy

Integraron el Comité de Referato para la edición 2014 de la Colección Interdisciplinarias:

Daniel Conde, Mónica Lladó, Claudio Martínez, Mario Moraes y Judith Sutz

Colección Interdisciplinarias 2014. *Sobre esqueletos de gigantes. El paradigma de la complejidad en las estructuras arquitectónicas.* Juan José Fontana Cabezas

Coordinación editorial: Unidad Académica del Espacio Interdisciplinario

Producción editorial: Susana Aliano Casales

Diseño: Unidad Académica del Espacio Interdisciplinario

Impresión: Mastergraf SRL

Distribución general: Espacio Interdisciplinario, Unidad de Comunicación de la Universidad de la República, Fondo de Cultura Universitaria

Primera edición, julio 2015, 500 ejemplares

ISSN: 2301-0835

ISBN: 978-9974-0-1177-9

Depósito legal:

Las opiniones vertidas corren por cuenta de los autores.

La Colección Interdisciplinarias se rige por la ordenanza de los Derechos de Propiedad Intelectual de la Universidad de la República.

Agradecimientos

Al Dr. Arq. Juan Calduch Cervera, por su apoyo como tutor de este trabajo.
A mi familia, por el apoyo: Julia, Isabela, Leticia, mis padres, Gustavo.

Índice

Agradecimientos	5
Prólogo de la Colección.....	13
Introducción.....	17

Parte I. Contextualización

Capítulo 1. La teoría clásica	29
1.1. Relación entre forma y materia	29
1.1.1. Forma y belleza: la idea de kalos en el pensamiento griego	29
1.1.2. Forma y naturaleza: el concepto de mimesis	31
1.2. La interpretación en los tratados.....	32
1.2.1. El tratado de Vitruvio: la venustas	32
1.2.2. El tratado de Alberti: concinnitas y lineamenta.....	35
1.2.3. Forma, materia y arquitectura en la teoría clásica.....	37
Capítulo 2. La forma en la naturaleza	41
2.1. Las teorías evolucionistas en el siglo XIX.....	41
2.2. La relación entre forma, función y leyes físicas en la primera mitad del siglo XX.....	43
2.2.1. Las proteínas.....	46
2.2.2. Los huesos.....	50
2.2.3. Las medusas.....	52

2.2.4. Los sistemas de empaquetamiento de espacios y el panal de abejas.....	53
2.2.5. Los radiolarios.....	54
2.2.6. Forma y leyes físicas en las ciencias naturales en la primera mitad del siglo XX.....	56
2.3. Bases conceptuales de la TGS en la segunda mitad del siglo XX.....	57
2.3.1. La teoría del caos y la no linealidad.....	59
2.3.2. La teoría de las catástrofes.....	61
2.3.3. La teoría de la autoorganización.....	63
2.3.4. La teoría de los fractales.....	64

Capítulo 3. Los inicios de la modernidad en el siglo XVII..... 69

3.1. La relación entre forma y materia: el aporte de Galileo Galilei.....	69
3.1.1. Las máquinas	70
3.1.2. La idea de límite.....	73
3.2. Los conceptos de eficacia y optimización	74
3.3. El reflejo en la arquitectura: la construcción eficaz y optimizada	75
3.3.1. La máquina militar: la fortificación abaluartada.....	75
3.3.2. Evolución de los perímetros amurallados europeos en los inicios de la modernidad	78
3.3.3. Cálculo y experimentación.....	81
3.3.4. La escisión de los estudios de diseño y mecánica.....	85

Parte II. Las formas estructurales en la arquitectura reciente

Capítulo 1. El análisis estructural a principios del siglo XX 89

Capítulo 2. Las estructuras de barras..... 93

2.1. Surgimiento de las estructuras trianguladas.....	93
2.1.1. El desarrollo de las cometas celulares.....	93
2.1.2. Modelos de crecimiento: lineal, fractal y celular fractal..	97
2.2. El traslado a la arquitectura a mediados del siglo XX.....	101
2.2.1. El aporte de Robert Le Ricolais	101
2.2.2. El aporte de Richard Buckminster Fuller	106
2.3. Desarrollo reciente de las estructuras de barras	112
2.3.1. Philadelphia City Tower (1952-1957).....	112
2.3.2. Centro Georges Pompidou (1969-1977).....	116
2.3.3. Cubierta sobre el Patio Reina Elizabeth II en el Museo Británico (1994-2000).....	123
2.3.4. Centro Nacional de Natación de Pekín (2003-2008).....	128
2.4. Evolución reciente en el diseño de las estructuras de barras.....	133

Capítulo 3. Las estructuras superficiales 137

3.1. Las estructuras superficiales a principios del siglo XX	137
3.1.1. Surgimiento de las superficies parabólicas e hiperbólicas a finales del siglo XIX	137
3.1.2. El sistema geodésico	142
3.1.3. El hormigón armado y las cáscaras estructurales a principios del siglo XX.....	143
3.2. Las cáscaras complejas a mediados del siglo XX.....	148
3.2.1. Las cubiertas de la Ópera de Sydney	148
3.2.2. Las bóvedas gausas de Eladio Dieste.....	155
3.3. Las estructuras de membrana a mediados del siglo XX	163
3.3.1. El desarrollo del método de los elementos finitos	163
3.3.2. El nuevo desarrollo de las tensoestructuras	164
3.3.3. Los métodos form finding.....	169
3.4. Desarrollo reciente de las estructuras superficiales	172
3.4.1. Cubiertas sobre los edificios para las Olimpiadas de 1972 en Múnic.....	172

3.4.2. Salón Multiusos para la Exposición Federal de Jardinería de Mannheim (1973-1975)	178
3.4.3. Nubes de La Défense (1982-1989)	181
3.4.4. Los experimentos de NOX.....	186
3.4.5. El revestimiento del Centro Nacional de Natación de Pekín (2003-2008)	192
3.5. Evolución reciente en el diseño de las estructuras superficiales.....	196
Capítulo 4. Las estructuras aporticadas	201
4.1. Los puentes de Robert Maillart	201
4.2. Jean Prouvé y la industrialización de la construcción	206
4.3. Las estructuras aporticadas en la segunda mitad del siglo XX.....	210
4.3.1. Los espacios servidos y sirvientes de Louis Kahn.....	210
4.3.2. Los proyectos de Rinaldo Semino en la década de 1960.....	214
4.3.3. Los rascacielos de SOM	218
4.3.4. Las naves de planta libre	231
4.4. Desarrollo reciente de las estructuras aporticadas.....	236
4.4.1. El Commerzbank en Frankfurt (1991-1997)	236
4.4.2. La Mediateca de Sendai (1995-2002)	242
4.4.3. Cubierta del Estadio de Chemnitz (1996)	250
4.4.4. Cubierta del edificio Expo en el Congrexpo de Lille (1989-1994)	256
4.5. Evolución reciente en el diseño de las estructuras aporticadas	260

Parte III. Conclusiones provisionales

1. Resumen.....	269
2. Antecedentes.....	269

3. La época reciente	272
3.1. La eficacia en las estructuras	272
3.2. La optimización de las estructuras	276
4. El paradigma de la naturaleza	280
Índice de figuras y tablas	335
Sobre el autor.....	341

Prólogo de la Colección

Los libros de la Colección Interdisciplinarias intentan responder a algunos desafíos que resumiré a continuación.

El proceso de fragmentación del conocimiento se ha acentuado a lo largo de los siglos, y se justifica en la ampliación del conocimiento y en la creación de condiciones para que la investigación sea eficaz. Ninguna ciencia particular puede ofrecer un modelo unificado para explicar todo el mundo. Se puede decir que nunca nadie tuvo tal pretensión. No es menos cierto, sin embargo, que los esfuerzos globalizadores, las visiones macrocósmicas, caracterizaron todas las ciencias, a las naturales especialmente en los siglos XVII y XVIII, a las sociales en el siglo XIX, e impregnaron la formación de muchos de nosotros, en los años centrales del siglo pasado.

Es frecuente asociar a la revolución copernicana con un cambio sustancial de la concepción que el hombre tenía de sí mismo y de su lugar en el cosmos. Las observaciones y teorías desarrolladas entre 1500 y 1700 por Copérnico, Giordano Bruno, Tycho Brahe, Kepler, Galileo, Newton... permitieron elaborar teorías sobre los movimientos de los planetas en base a leyes sencillas, las cuales explicaban, además, la existencia de las mareas, la caída de los cuerpos y muchos otros fenómenos que antes eran considerados completamente desconectados. Estas teorías generaron una inmensa confianza en el saber objetivo y el reconocimiento del universo como materia en movimiento, regido por leyes naturales. La aceptación de que todo el mundo obedece a leyes conocibles y que los fenómenos físicos son predecibles si se conocen suficientemente sus causas, resultó consecuencia inmediata de aquella revolución.

Pero hoy se puede decir que aquellos afanes generalizadores han perdido fuerza, que cuesta mucho distinguir cuáles son las líneas principales del progreso y que cada vez tiene menos adeptos la creencia de que se puede entender el todo y cada una de las partes en función de relaciones de causa-

efecto, transparentes y lineales. A tal punto que desde diversos ámbitos de las ciencias naturales y exactas, y también desde áreas de la economía y otras disciplinas sociales, ha ganado fuerza la necesidad de estudiar los aspectos inestables, no completamente predecibles, desordenados, de los fenómenos.

En otro orden de cosas, diversos sectores interesados en el quehacer social y cultural se pregunten cuál es el grado de desorganización de la sociedad actual, dónde pueden llevar estos procesos llamados de desideologización.

Algunas constataciones en este sentido:

- Hay una pronunciada deshumanización, robotización y aislamiento de la vida social, que está haciendo perder hábitos y culturas generados a lo largo de la actividad mancomunada y solidaria de la humanidad.
- Se percibe un incremento de las desigualdades sociales y la diferenciación entre el norte y el sur (olvidemos por ahora el este), que lleva a muchos a preguntarnos si no estaremos en camino de una nueva diferenciación de especies.
- Existe un deterioro palpable (muchas veces ocultado) del medio ambiente, que se mide, no en las escalas de los tiempos geológicos, sino en las de una generación humana.

La dificultad para percibir cuáles son las regularidades de las transformaciones sociales y económicas, las trabas para aplicar las teorías sobre el desarrollo histórico que tanto impacto causaron en la primera mitad del siglo pasado, generan la búsqueda de estructuras de pensamiento diferentes, que en algún sentido rompan con aquel modelo copernicano (tomado este como paradigma de otras muchas revoluciones científicas). En particular, crecen los sectores de la opinión pública que detectan que la naturaleza y la sociedad presentan contenidos muy ricos y sustanciales, a pesar del desorden que se percibe en la superficie. Y que tratan de comprender y sistematizar esa riqueza «cubierta» por el desorden.

El anterior Rector, Rodrigo Arocena, en su prólogo a esta misma colección observaba que la especialización y la fragmentación del conocimiento tienen «por lo menos tres consecuencias negativas. Una atañe al conocimiento mismo: parece difícil llegar a conocer realmente algo, por ejemplo, el cambio climático, si no conectamos lo que al respecto nos dicen diferentes disciplinas. Una segunda consecuencia potencialmente negativa se refiere al uso valioso del conocimiento: parece difícil afrontar, por ejemplo, la problemática nutricional e infecciosa de los niños que asisten a las escuelas en barrios carenciados de Montevideo sin conjugar los aportes de variadas

especialidades. Una tercera consecuencia que puede tener la fragmentación del conocimiento se relaciona con su democratización [...] ¿Cómo hace un ciudadano “de a pie” para hacerse una idea de lo que conviene a la comunidad en relación a un problema complejo? Los expertos pueden y deben asesorar pero, aunque lo hagan en términos comprensibles para no expertos, sus opiniones se basan en sus especializaciones respectivas, por lo que no necesariamente incluyen un enfoque de conjunto; además, ciertas opiniones de expertos suelen contraponerse a las de otros expertos». Los encuentros y diálogos entre disciplinas pueden contribuir a que la ciudadanía pueda hacer un uso informado y autónomo del conocimiento a la hora de adoptar decisiones sobre asuntos que a todos atañen.

Roberto Markarian

Rector de la Universidad de la República

Introducción

El crítico de arquitectura estadounidense Charles Jencks fue el primero en abordar la relación entre las ciencias de la complejidad y la arquitectura en su libro *The Architecture of the Jumping Universe*, de 1995. Según Jencks, la forma arquitectónica debe seguir la visión del mundo y, en la actualidad, esta se encuentra en plena transformación debido a los aportes recientes de la ciencia. En 1997 edita el número 9-10 de la revista *Architectural Design*, titulado «Nonlinear Architecture. New Science = New Architecture?», en el cual aborda, junto a una serie de colaboradores, algunos conceptos vinculados a las nuevas teorías científicas que cree están modificando el modo en que entendemos la arquitectura y presenta una serie de proyectos contemporáneos que considera paradigmáticos de este cambio. En 2002 publica el libro *The New paradigm in architecture. The language of Post Modernism*, en el que analiza el surgimiento de un nuevo movimiento en el ámbito de la arquitectura al que denomina como *posmoderno*, que encuentra en los nuevos programas informáticos de diseño la herramienta adecuada para alcanzar sus objetivos: un nuevo nivel de heterogeneidad y de complejidad que reemplaza a los ideales de la modernidad.

En los últimos quince años, fruto de estos textos, se han realizado numerosas investigaciones en el ámbito académico y han aparecido diversas publicaciones y artículos en prestigiosas revistas arquitectónicas de todo el mundo que se han ocupado del tema del traslado a la arquitectura de conceptos tales como complejidad, caos, azar, indeterminismo, autoorganización, emergencia, no linealidad o fractalidad, surgidos en el mundo científico en el marco de la *teoría general de sistemas* (TGS). Prácticamente no se han desarrollado, sin embargo, trabajos sobre la influencia que estas ideas han tenido en el ámbito específico del diseño de estructuras en la arquitectura.

El análisis desarrollado en el presente texto es histórico. Se trata de un estudio sobre la evolución reciente del diseño estructural en el marco de algunas ideas surgidas en el siglo XVI que definieron los inicios de la Era Moderna, y bajo la influencia de conceptos surgidos en el ámbito de las ciencias de la complejidad en los últimos 60 años. Los resultados obtenidos, que evalúan el modo en que el diseño estructural adopta en la actualidad los modelos científicos vigentes, son válidos en el ámbito de la historia y la teoría de la arquitectura y de las estructuras.

Las hipótesis en las que se basa son las siguientes:

- 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 el presente y ha provocado en los últimos 60 años el surgimiento de un nuevo nivel de complejidad en la geometría, el diseño, el cálculo y la fabricación de los proyectos arquitectónicos, a la luz de las nuevas teorías científicas. Esta búsqueda tiene como principal objetivo la producción de estructuras bellas, racionales y económicas.
- Diversos conceptos que caracterizan a la ciencia contemporánea, surgidos en el marco de la TGS, 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.

El objetivo último de este estudio es profundizar en los vínculos existentes entre arte y ciencia, analizando correlaciones entre arquitectura y teorías científicas contemporáneas. Particularmente, se realiza 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 TGS, 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.

Para ello se realizó, en una primera etapa de análisis bibliográfico, una aproximación al fenómeno del traslado al ámbito de las estructuras arquitectónicas del pensamiento y las ideas científicas de una época a través de una exposición sistemática de estas relaciones en algunos momentos

relevantes de la historia, fundamentalmente en el marco de la Era Moderna. Se efectuó, a continuación, un análisis de esta relación en la época reciente.

Se procedió a la confección de un soporte teórico basado en la bibliografía que permitiera explicitar las principales ideas y los conceptos que podrían haber influido en el diseño estructural en distintos momentos de la historia, fundamentalmente en el marco de la Era Moderna. Se estudió el concepto de belleza y la relación entre forma y materia en el pensamiento griego clásico, y el traslado de estas ideas a la época romana y renacentista, a partir de los tratados de Vitruvio y de Alberti.

Se analizó, a continuación, el cambio ocurrido durante el siglo XVI en la concepción de la relación entre forma y materia y el surgimiento de la idea de límite con la obra de Galileo Galilei, el traslado a la construcción durante el siglo XVII 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 los conceptos sobre la relación entre forma, función y leyes físicas que surgieron en el ámbito de las ciencias naturales a principios del siglo XX. Se abordaron los fundamentos teóricos de las principales teorías científicas enmarcadas en la TGS: las teorías del caos, de la no linealidad, de las catástrofes, de la autoorganización y de los fractales.

Se elaboró, por otra parte, un soporte teórico, basado en la bibliografía y en visitas de obra, que permitiera visualizar las principales soluciones estructurales utilizadas en distintos momentos de la historia de la arquitectura, fundamentalmente en el marco de la Era Moderna, en obras que podrían ser consideradas como paradigmáticas y representativas de su época. Se estudiaron a continuación los procesos de concepción, diseño y materialización de dichas obras. Para ello, se indagó en proyectos publicados en prestigiosos y reconocidos libros, escritos, tratados y revistas internacionales de arquitectura. A partir del supuesto de que la finalidad última en la producción de estructuras arquitectónicas a lo largo de toda la Era Moderna es la de crear obras bellas, racionales y económicas, se intentaron descubrir las principales ideas que sustentaron el diseño de estos proyectos paradigmáticos, analizando la relación entre los modelos de generación de forma, los métodos de diseño, los métodos de cálculo y los procedimientos de construcción empleados.

Organización del texto

En una primera etapa de contextualización se analizan el concepto de belleza y la relación entre forma y materia en la teoría clásica, la relación entre forma, función y leyes físicas en las ciencias naturales durante el siglo XIX y

principios del siglo XX, y la consolidación de las bases conceptuales de la TGS durante la segunda mitad del siglo XX.

En una segunda etapa de análisis se establecen los principales criterios empleados a principios del siglo XX para el diseño y cálculo de estructuras, y a continuación se investiga 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 nuevos conceptos surgidos a partir del desarrollo de la TGS, tales como complejidad, autoorganización, emergencia, no linealidad y fractalidad.

Esta investigación se ha dividido en tres partes, de modo de analizar la evolución reciente de tres tipologías estructurales que, si bien no abarcan la totalidad de los tipos estructurales empleados en la arquitectura, han sido consideradas como representativas de lo acontecido en la evolución reciente de la disciplina.

Dichas tipologías han sido denominadas como: estructuras de barras, estructuras superficiales y estructuras aporticadas.

Se entiende por *estructuras de barras o reticuladas* a aquellas compuestas por bielas o elementos lineales, generalmente articulados en sus extremos o que presentan vínculos más o menos simples con las otras unidades estructurales. Las barras que componen dichas estructuras resultan fundamentalmente sometidas a esfuerzos de compresión o tracción.

Se entiende por *estructuras superficiales* a aquellas en las que la capacidad portante es confiada a un elemento en el que dos de sus dimensiones predominan claramente sobre la tercera. En general, se trata de estructuras que poseen una gran liviandad con relación a la magnitud de las cargas que son capaces de soportar.

Se entiende por *estructuras aporticadas* a aquellas compuestas por elementos lineales de gran rigidez, vinculados entre sí por empotramientos o por vínculos que impiden total o parcialmente el giro relativo de las barras. Las piezas que componen dichas estructuras resultan, fundamentalmente, sometidas a esfuerzos de flexión compuesta esviada y torsión.

En muchas obras arquitectónicas dichas tipologías estructurales no se presentan en forma pura o aislada, sino superpuestas y combinadas.

Un pórtico o una superficie estructural, por ejemplo, pueden estar formados total o parcialmente por piezas reticuladas. Los vínculos entre los distintos elementos de una estructura, por otra parte, no siempre son articulaciones o empotramientos perfectos, de modo que en sus secciones pueden aparecer combinados los esfuerzos de flexión con los axiles.

A lo largo del análisis, por lo tanto, aparecen casos ambiguos o ejemplos en los que son difusos los límites entre dichas tipologías y la división opera con el objetivo de la dilucidación de determinados conceptos teóricos más que como una estricta clasificación.

En el análisis de la evolución de cada una de estas tres tipologías se comenzó examinando la situación a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, se consideraron, a continuación, los cambios acontecidos hacia mediados del siglo XX y, finalmente, se estudiaron proyectos desarrollados en la segunda mitad del siglo XX y principios del siglo XXI.

Al final de cada una de las tres partes en que se ha dividido el análisis se realiza una síntesis de los principales conceptos manejados y se extraen conclusiones provisionales parciales relativas a la evolución reciente de cada una de las tres tipologías estructurales. Por último, se extraen conclusiones provisionales del modo en que las estructuras arquitectónicas han evolucionado en los últimos años en su búsqueda de la belleza, la racionalidad y la economía.

Criterios de selección de los ejemplos recientes analizados

Como criterio general, se seleccionaron proyectos desarrollados a partir de la segunda mitad del siglo XX que pudieran ser considerados como paradigmáticos y representativos de un cambio en la manera de concebir las estructuras arquitectónicas. Se trata de obras construidas a partir de concursos internacionales de arquitectura o de grandes proyectos realizados por arquitectos renombrados con una gran difusión bibliográfica. En estos proyectos excepcionales es que, habitualmente, se justifica una reflexión innovadora sobre los modos de proyectar y construir las estructuras.

Para el análisis de la evolución reciente en las estructuras de barras se seleccionaron:

- La Philadelphia City Tower de Louis Kahn y Anne Tyng, proyecto no construido pero absolutamente innovador en su tiempo por el modo de concebir la rigidez de la estructura de un rascacielos, fruto del trabajo previo de Kahn con el ingeniero Robert Le Ricolais y de la pasión de Tyng por el estudio de las estructuras naturales.
- El Centro Georges Pompidou, proyectado a partir de un concurso internacional por los jóvenes arquitectos Richard Rogers y Renzo Piano, en colaboración con Ove Arup & Partners. El innovador concepto sobre la flexibilidad del espacio que se encuentra en las

bases conceptuales del diseño de este edificio exigió la búsqueda de una novedosa solución estructural.

- La cubierta sobre el Patio Reina Elizabeth II, en el Museo Británico de Londres, diseñada por Foster & Partners, consistente en una delicada intervención sobre un edificio con alto valor patrimonial, que requirió de la aplicación de novedosos procesos de diseño y construcción para la definición de su compleja geometría.
- El Centro Nacional de Natación de Pekín, proyectado por PTW Architects en colaboración con Ove Arup & Partners, tras resultar ganadores del concurso internacional convocado para su diseño. Este edificio presenta una solución estructural de alta complejidad geométrica, basada en un eficaz sistema de empaquetamiento de espacios, que requirió del empleo de un innovador proceso de trabajo para que pudiera cumplirse con los plazos previstos.

Para el análisis de la evolución reciente en las estructuras superficiales se seleccionaron:

- Las cubiertas sobre los edificios para las Olimpiadas de 1972 en Múnich, proyectadas por Behnisch & Partners en colaboración con Frei Otto y su equipo, luego de ganar un concurso. Debido a su gran escala debieron ser diseñadas a través de una combinación novedosa de métodos que involucraron la construcción de diversos modelos materiales y el desarrollo de nuevos programas informáticos.
- El Salón Multiusos para la Exposición Federal de Jardinería de Mannheim, proyectado por Mutschler, Langner & Partners en colaboración con Frei Otto y su equipo. Se trata igualmente de un proyecto ganador de un concurso que requirió del desarrollo de procedimientos innovadores de autoorganización de la materia, para la optimización estructural de su forma y su posterior construcción.
- Las nubes de la Défense, proyectadas inicialmente por Otto von Spreckelsen como parte del proyecto ganador del concurso internacional del Gran Arco y desarrolladas posteriormente por Paul Andreu en colaboración con Peter Rice. El diseño de estas tensoestructuras pretende materializar la metáfora de la nube utilizando el ordenador como herramienta esencial para la búsqueda de nuevas formas.

- Los experimentos llevados a cabo por el grupo holandés Nox para el diseño de algunos de sus proyectos, que desarrollan los experimentos clásicos de *form finding* utilizados por Antoni Gaudí o Frei Otto, intentando sacar el máximo partido a las capacidades de cálculo de los ordenadores actuales.
- El revestimiento del Centro Nacional de Natación de Pekín, cuyo diseño fue optimizado para cumplir con diferentes roles en distintos sistemas del edificio.

Para el análisis de la evolución reciente en las estructuras aporticadas se seleccionaron:

- El Commerzbank de Frankfurt proyectado por Foster & Partners, cuyo llamado internacional a concurso establecía en sus bases la importancia del diseño sustentable. Una compleja organización espacial con características fractales fue diseñada integralmente con una compleja estructura y un complejo sistema de iluminación y acondicionamiento natural del aire.
- La Mediateca de Sendai proyectada a partir de un concurso por Toyo Ito. Con un sistema constructivo poco usual en el ámbito de la arquitectura e inspirado en el diseño de barcos, este edificio adquiere una gran rigidez a través de la compleja geometría de su estructura, que le permite resistir los sismos que suelen presentarse en Japón.
- La cubierta del estadio de Chemnitz, diseñada por Peter Kulka y Ulrich Könings en colaboración con Cecil Balmond. Fruto igualmente de un concurso internacional, este proyecto fue ajustado a través de un procedimiento algorítmico con características no lineales que emula los procesos de generación de formas naturales.
- La cubierta del edificio Expo en el Congrexpo de Lille, proyectada por Rem Koolhaas en colaboración con Cecil Balmond. Se trata de un diseño que integra estructura con revestimientos, sistemas de protección frente a incendios y sistemas de acondicionamiento mecánico del aire.

Fuentes y bibliografía

Las fuentes de este trabajo son principalmente textos, artículos de revistas, escritos, conferencias, entrevistas, fotografías y dibujos.

El estudio del concepto de belleza y de 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 realizó fundamentalmente a través de la lectura de las traducciones de José Luis Oliver y de José Ortiz y Sanz de los tratados de Vitruvio y de la traducción de Javier Fresnillo del tratado de Alberti. Se realizó, por otra parte, un análisis de algunas obras de Wladislaw Tatarkiewicz y de Joaquín Arnau Amo. Tartarkiewicz, catedrático de la Universidad de Varsovia, fue uno de los principales historiadores de la filosofía, el arte y la estética del siglo XX y un importante promotor del concepto de *pluralismo estético*, que desarrolló a lo largo de toda su obra: los valores estéticos, creía, no son ni subjetivos ni relativos, son simplemente numerosos y no pueden reducirse a un patrón. Fue, por otra parte, un gran conocedor del pensamiento griego clásico y su tesis doctoral trató sobre la obra de Aristóteles. Los textos de Joaquín Arnau, catedrático de la Escuela de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Valencia, fueron seleccionados por el profundo análisis que contienen sobre la teoría de la arquitectura en los tratados de Vitruvio y de Alberti desde una perspectiva contemporánea.

Los cambios ocurridos durante el siglo XVI en la concepción de la relación entre forma y materia y el surgimiento de la idea de límite, el traslado a la construcción durante el siglo XVII 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, fueron analizados a través de la lectura de algunas obras de Galileo Galieli, fundamentalmente: *Le Meccaniche*, *El ensayador* y *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, del tratado de Cristóbal de Rojas, que recoge a finales del siglo XVI, por primera vez en castellano, los conocimientos de las nuevas fortificaciones abaluartadas, y de algunas obras de Fernández-Galiano, Alexander Tzonis, Liane Lefaivre y Alexandre Koyré. Fernández-Galiano ha desarrollado los conceptos de organismo y máquina como paradigmas de la arquitectura moderna, y Tzonis y Lefaivre han tratado el tema de la mecanización de la arquitectura, la construcción y el diseño en el seminario dictado en la ciudad de Toledo «Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad». Los principales contenidos de dicho encuentro han sido recogidos en un libro homónimo que ha tenido una gran difusión y aceptación en toda España e Hispanoamérica. Alexandre Koyré, fundador de la

actual historiografía de la ciencia y de la técnica, fue probablemente el primero en vislumbrar en el nacimiento de la física y la mecánica galileana, durante los siglos XVI y XVII, una verdadera revolución científica que cambió la forma de entender el mundo.

Las bases conceptuales de las teorías evolucionistas del siglo XIX y los conceptos sobre la relación entre forma, función y leyes físicas, que surgieron en el ámbito de las ciencias naturales a principios del siglo XX, se estudiaron a través de la obra de Jean Baptiste de Lamarck, Ernst Haeckel y D'Arcy Thompson.

Se abordaron los fundamentos teóricos de las principales teorías científicas enmarcadas en la TGS: las teorías del caos, de la no linealidad, de las catástrofes, de la autoorganización y de los fractales, principalmente a través de algunas obras de Ludwig von Bertalanffy, Ilya Prigogine, Benoît Mandelbrot, René Thom, Humberto Maturana y Francisco Varela, Mae-Wan Ho y Peter Saunders. Ludwig von Bertalanffy fue el creador de la TGS; Ilya Prigogine, laureado con el Premio Nobel de Química en 1977, colaboró al desarrollo de la teoría del caos; Benoît Mandelbrot fue el creador de la geometría fractal; René Thom fue el fundador de la teoría de las catástrofes; Humberto Maturana y Francisco Varela desarrollaron el concepto de autopoiesis basado en la autoorganización de la materia viva, mientras que la especialista en ingeniería genética Mae-Wan Ho y el matemático Peter Saunders fueron convocados por Charles Jenks para colaborar con conceptos vinculados a las nuevas teorías científicas en la edición del número 9-10 de la revista *Architectural Design*, titulado «Nonlinear Architecture. New Science = New Architecture?».

Se indagó, por otra parte, en proyectos arquitectónicos publicados en prestigiosos y reconocidos libros, escritos, tratados y revistas internacionales, tales como: *L'Architecture d'Aujourd'hui*, *Techniques & Architecture*, *Architectural Design*, *Architectural Review*, *The Arup Journal*, *Architectural Record*, *Domus*, *Casabella*, *Zodiac*, *El Croquis*, *Quaderns*, *A+U* y otras.

Parte I. Contextualización

Capítulo 1. La teoría clásica

1.1. Relación entre forma y materia

1.1.1. Forma y belleza: la idea de kalos en el pensamiento griego

El término griego utilizado para denominar a la belleza, *kalos*, era en un principio más amplio que el moderno concepto de belleza en castellano y comprendía, además de a las cosas u objetos bellos, a los pensamientos y a las costumbres bellas (Tatarkiewicz, 2001: 154). Con el paso de los siglos se produjeron cambios en el uso del término desde este concepto amplio de belleza hacia un concepto exclusivamente estético, si bien, hasta fines de la antigüedad, la corriente platónica mantuvo vivo el concepto de *kalos* que incluía a la belleza moral.

La gran teoría de la belleza de la antigüedad, que se formuló aproximadamente en el siglo V a.C. con los pitagóricos y con Platón y que predominaría en el pensamiento filosófico hasta fines del Renacimiento, a pesar de algunas críticas y oposiciones, afirmaba que la belleza consiste en las proporciones, en el ordenamiento de las partes de un todo y en sus interrelaciones (Tatarkiewicz, 2001: 157).

Los pitagóricos fueron los primeros en afirmar que el orden y la proporción eran bellos y adecuados y que, gracias a los números, todo parecía bello. Platón aceptó esta teoría y afirmó, a su vez, que la conservación de la medida y la proporción siempre era algo bello. Nada que sea bello, decía, lo es sin proporción.

Para Aristóteles las principales formas de la belleza eran el orden, la proporción y la precisión y, según los estoicos, la belleza del cuerpo consistía

en la relación que la proporción de los miembros mantenían entre sí y con el todo.

La belleza era, por lo tanto, objetiva y formulable, dependía de que las proporciones del objeto fueran las adecuadas, de la armonía de sus partes y de la conservación de sus medidas. Podía alcanzarse estudiando las relaciones matemáticas entre las distintas partes de un conjunto y entre estas y el todo. Armonía, proporción y número eran su base objetiva, es decir, ciertas proporciones y disposiciones eran bellas en sí mismas, independientemente de quien las creara u observara. Era inmutable, podía experimentarse, conocerse y estudiarse en las formas perfectas que eran las naturales, pero no inventarse o improvisarse. El camino apropiado para el arte era, pues, imitar las proporciones perfectas que podían descubrirse en la naturaleza, no copiar su apariencia, sino lo esencial detrás de las formas, es decir, aquellas proporciones constantes.

Para Sócrates, sin embargo, además de la belleza objetiva existía la belleza subjetiva, existían cosas bellas en sí mismas, pero también cosas bellas solo para las personas que las utilizaban, pues eran aptas para un determinado fin (Tatarkiewicz, 2001: 165). La belleza, entonces, podía basarse también en la aptitud que un determinado objeto tenía para lograr un objetivo y no solo en sus proporciones. A partir de Sócrates se origina, de esta manera, una idea alternativa a la idea clásica de belleza: la *belleza de lo adecuado*, que complementará a la gran teoría hasta que en el siglo XVIII se transforme en una teoría independiente.

En su teoría del hilemorfismo, por otra parte, Aristóteles afirmaba que todo cuerpo se halla constituido por dos principios esenciales: la materia y la forma. La forma era la esencia que llevaba a las cosas a tener un determinado comportamiento y la materia quedaba condicionada por dicha forma. Define así, como causa formal, a aquel impulso que es capaz de organizar la materia de cada ser de acuerdo con su esencia. El proceso de formalización consistía en ordenar y organizar la materia de las cosas basándose en su ser esencial y está regido por leyes exclusivamente formales, como el orden y la proporción, ajenas totalmente a la materia y al tamaño. La forma es, por lo tanto, independiente de la materia (Calduch, 2001: 11). Aristóteles acepta incluso que exista la forma sin materia, pero nunca la materia sin forma.

La forma en el pensamiento aristotélico es la que determina las propiedades esenciales de las cosas y es independiente de la materia. Las formas, además, son bellas según la gran teoría clásica cuando existen orden, precisión y determinadas proporciones entre sus partes y entre estas y el todo. La materia siempre se encuentra subordinada, según las teorías de la

época antigua, a las condiciones de la forma, a sus órdenes y proporciones. La belleza es, entonces, una característica objetiva de la forma, ciertas proporciones y disposiciones son bellas en sí mismas, y es ajena a la materia que forma las cosas.

1.1.2. Forma y naturaleza: el concepto de mimesis

La teoría de la imitación surgió en la época clásica de Grecia. El primer significado del término *mimesis* designaba ciertos actos de culto que llevaban a cabo los sacerdotes durante las ceremonias religiosas, que incluían danza y música, pero a partir del siglo V a.C. el término pasa progresivamente del culto a la filosofía y comienza a designar la reproducción del mundo externo (Tatarkiewicz, 2001: 301). Demócrito definió el término *mimesis* como la imitación del funcionamiento de la naturaleza. Más tarde, Sócrates introdujo la idea de que la imitación es la función básica de artes como la pintura y la escultura, idea que fue aceptada tanto por Platón como por Aristóteles y que se convirtió, durante varios siglos, en la principal teoría de las artes (Tatarkiewicz, 2001: 302).

Platón y Aristóteles dividieron las artes en *originales*, como la arquitectura, e *imitativas*, como la pintura, la escultura o la poesía, y aplicaron sus teorías sobre la mimesis únicamente a estas últimas. Según Platón el arte imitaba a la realidad y se trataba de «una copia pasiva y fidedigna del mundo exterior» (Tatarkiewicz, 2001: 302). Según Aristóteles el arte imitaba igualmente a la realidad (la naturaleza), pero esta imitación no consistía en una copia fidedigna, sino en una representación personal del artista que podía presentar las cosas más o menos bellas de lo que en realidad eran o incluso «como podrían o deberían ser» (Tatarkiewicz, 2001: 303). Era tarea del artista descubrir aquellas características de la realidad que eran generales y esenciales, es decir, representar la idea de naturaleza perfeccionada, de modo que se debían descubrir aquellos órdenes y proporciones que fueran adecuados y bellos.

Dado que la forma de las cosas era la que creían que determinaba sus propiedades esenciales, y que esta era independiente de la materia, estas teorías sobre la mimesis no tuvieron ninguna incidencia sobre la materialización de las obras de arte. Imitar la naturaleza consistía exclusivamente en imitar sus formas, independientemente de cualquier otra característica física. En el Renacimiento, estas teorías sobre la mimesis volvieron a convertirse en la base principal de la teoría artística y alcanzaron su apogeo (Tatarkiewicz, 2001: 305).

Si bien la arquitectura no era considerada en la antigüedad una disciplina imitativa, en la práctica arquitectónica resultaba evidente una actitud

mimética con relación a determinadas características de la realidad. Puesto que el objetivo de la arquitectura era construir edificios bellos y no era posible alcanzar la belleza sin orden, armonía y proporción, la arquitectura griega y, en particular, la arquitectura sagrada, reproducía aquellos principios que consideró como constituyentes esenciales de la naturaleza: sus proporciones, su armonía y su orden.

La práctica arquitectónica griega llevó a cabo, entonces, una mimesis de la idea de naturaleza perfeccionada (Grillo, 2005: 100), reproduciendo sus proporciones, su armonía y su orden a través del uso de los órdenes arquitectónicos clásicos.

1.2. La interpretación en los tratados

1.2.1. *El tratado de Vitruvio: la venustas*

En el capítulo III del libro I de su célebre tratado *Los diez libros de arquitectura*, Vitruvio estableció los objetivos que un edificio debía lograr: «seguridad, utilidad y belleza» (Vitruvio, 1995: 73), o en latín: *firmitatis*, *utilitatis* y *venustatis*. Estos tres objetivos fueron retomados por numerosos autores, a partir del Renacimiento, que los elevaron al grado de principios fundamentales de la arquitectura.

En cuanto a la belleza o *venustas* de los edificios, explica Vitruvio:

Obtendremos la belleza cuando su aspecto sea agradable y esmerado, cuando una adecuada proporción de sus partes plasme la teoría de la simetría. (Vitruvio, 1995: 73).

Los seis elementos que constituyen la arquitectura y que son, por lo tanto, los medios a través de los cuales alcanzar estos tres objetivos, se enumeran en el capítulo II del libro I:

La arquitectura se compone de la Ordenación —en griego, *taxis*—, de la Disposición —en griego, *diathesis*—, de la Euritmia, de la Simetría, del Ornamento y de la Distribución —en griego, *oeconomia*—. La Ordenación consiste en la justa proporción de los elementos de una obra, tomados aisladamente y en conjunto, así como su conformidad respecto a un resultado simétrico. [...] La Disposición es la colocación apropiada de los elementos y el correcto resultado de la obra según la calidad de cada uno de ellos. [...] La Euritmia es el aspecto elegante y hermoso, [...] se logra cuando los elementos de una obra son adecuados, cuando simétricamente se corresponde la altura respecto a la anchura, la anchura respecto a la

longitud y en todo el conjunto brilla una adecuada correspondencia. La Simetría surge a partir de una apropiada armonía de las partes que componen una obra; [...] El Ornamento es un correcto aspecto de la obra o construcción que consta de elementos regulares, ensamblados con belleza. [...] La Distribución consiste en la administración apropiada de materiales y de terrenos, unida a unos costes ajustados y razonables de las obras. (Vitruvio, 1995: 69-72).

Con respecto a los materiales de construcción, parecería que la única característica que la arquitectura debe tener en cuenta es la económica. No se nombra ninguna característica física o mecánica que describa la resistencia de estos frente a las solicitaciones exteriores o cómo van a comportarse y conservarse con el paso del tiempo. Según Vitruvio, por otra parte, la belleza de un edificio depende fundamentalmente de la adecuada proporción de sus partes y del conjunto. En el capítulo II del libro VI dice que «la mayor preocupación de un arquitecto debe ser que los edificios posean una puntual proporción en sus distintas partes y en todo su conjunto» (Vitruvio, 1995: 233).

La materia queda así supeditada a la forma, tal como la concibió Aristóteles en su teoría del hilemorfismo, y la belleza depende de las proporciones y la armonía de las partes que componen el edificio. Ahora bien, a la hora de elegir las proporciones con las cuales diseñar y construir, algunas en particular deberían ser aceptadas como *universalmente bellas*: aquellas con las que la naturaleza había creado al cuerpo humano.

Al respecto se expresa Vitruvio en el capítulo I del libro III:

La disposición de los templos depende de la simetría, cuyas normas deben observar escrupulosamente los arquitectos. La simetría tiene su origen en la proporción, que en griego se denomina analogía. La proporción se define como la conveniencia de medidas a partir de un módulo constante y calculado y la correspondencia de los miembros o partes de una obra y de toda la obra en su conjunto. Es imposible que un templo posea una correcta disposición si carece de simetría y de proporción, como sucede con los miembros o partes del cuerpo de un hombre bien formado. (Vitruvio, 1995: 131).

Es decir, un edificio no puede ser bello si las proporciones de sus partes y las de estas con respecto al conjunto no son las proporciones que pueden observarse en la naturaleza y, más particularmente, en su obra más sofisticada: el cuerpo humano. En el capítulo I del libro III, Vitruvio analiza las proporciones que poseen o deberían poseer entre sí las dimensiones de algunos de sus miembros y estas, a su vez, con respecto a la totalidad del cuerpo. El rostro, por ejemplo, desde el mentón hasta las raíces del pelo, debería estar dividido

en tres partes iguales por líneas a la altura de la base de la nariz y de las cejas. Tanto el rostro como la mano, miden o deberían medir la décima parte de la altura total del cuerpo, la cabeza la octava parte, el pie la sexta parte, el pecho la cuarta parte, etc. Finalmente, concluye que las dimensiones del resto de los miembros que no analiza deberían estar igualmente determinadas por proporciones fijas con respecto a las dimensiones totales del individuo.

Leonardo da Vinci se inspiró en un pasaje de este mismo capítulo para realizar, en 1492, uno de sus más famosos estudios sobre las proporciones del cuerpo humano: *El hombre de Vitruvio*.

El ombligo es el punto central natural del cuerpo humano. En efecto, si se coloca un hombre boca arriba, con sus manos y sus pies estirados, situando el centro del compás en su ombligo y trazando una circunferencia, esta tocaría la punta de ambas manos y los dedos de los pies. La figura circular trazada sobre el cuerpo humano nos posibilita el lograr también un cuadrado: si se mide desde la planta de los pies hasta la coronilla, la medida resultante será la misma que la que se da entre las puntas de los dedos con los brazos extendidos; exactamente su anchura mide lo mismo que su altura, como los cuadrados que trazamos con la escuadra. (Vitruvio, 1995: 132-133).

Para los antiguos romanos los conceptos de armonía y proporción, ya aplicados por los griegos, no eran una invención del hombre, sino que podían observarse en la naturaleza, modelo de belleza por excelencia. Los antiguos griegos habían descubierto estas proporciones y las habían plasmado con cuidado en sus edificios y, fundamentalmente, en sus templos; por este motivo, sus obras poseían una belleza que había perdurado a lo largo de los siglos.

Vitruvio dictamina el camino que la arquitectura debía seguir: «sólo nos queda hacernos eco de quienes, al construir los templos de los dioses inmortales, ordenaron las partes en sus obras con el fin de que, por separado y en su conjunto, resultaran armónicas, en base a su proporción y simetría» (Vitruvio, 1995: 135).

El único camino a la belleza es, entonces, el camino de la mimesis de las leyes naturales y en este camino se puede seleccionar lo que se considere mejor, lo más bello. Con la misma lógica puede retomarse lo mejor del arte griego antiguo en esta búsqueda de la perfección. En arquitectura, por lo tanto, las buenas proporciones deben estar basadas en las proporciones perfectas: aquellas que posee un hombre con una buena complexión.

Al igual que para los antiguos, la naturaleza continúa siendo para Vitruvio el máximo referente de belleza y armonía. La arquitectura, si pretendía

ser bella, debía reproducir a la naturaleza y, siguiendo las ideas de Aristóteles, debía tomar de ella solo algunas leyes o principios esenciales, representando así al orden cosmológico perfecto y supremo.

1.2.2. El tratado de Alberti: concinnitas y lineamenta

La mayoría de los escritores del Renacimiento opinaban que la belleza era objetiva e inmutable y el deber del artista era simplemente revelar sus leyes. (Tatarkiewicz, 2001: 240).

La belleza en arquitectura o *concinnitas* (en latín original), definida por Alberti en el capítulo II del libro VI de su tratado *De Re Aedificatoria* de 1450, consistía en «la armonía entre todas las partes del conjunto, conforme a una norma determinada, de forma que no sea posible reducir o cambiar nada sin que el todo se vuelva más imperfecto» (Alberti, 1991: 246). No era, por lo tanto, una cuestión de preferencias individuales o subjetivas, sino de razón objetiva y universal. La disposición armoniosa de las partes de un cuerpo es, entonces, la que determina su belleza.

Según esta interpretación de Alberti, no existía para el arte un camino más seguro hacia la belleza que el de imitar a la naturaleza, pero siguiendo el pensamiento aristotélico, este debía imitar sus leyes profundas y sus proporciones inmutables más que su apariencia (Tatarkiewicz, 2001: 305-306). La belleza, como consentimiento y acuerdo de las partes, puede existir, entonces, tanto en la naturaleza como en la razón humana. Se generalizó entonces la idea de que el arte, además de imitar a la naturaleza, podía igualmente imitar a sus mejores imitadores: a los antiguos. Esta idea, hacia finales del siglo XVII, ya había prácticamente sustituido a la idea original de imitar a la naturaleza: había que imitarla, pero del mismo modo en que lo habían hecho los antiguos. Según Alberti, las lecciones que nos enseña la naturaleza ya habían sido aprendidas por los antiguos griegos, quienes trasladaron a la arquitectura sus leyes de la armonía, las proporciones y la simetría y las habían utilizado para definir los órdenes arquitectónicos clásicos.

Como los organismos no siempre están constituidos según las mismas proporciones, pensaba Alberti, sus cuerpos pueden resultar más esbeltos o más robustos y como las necesidades programáticas en la edificación varían en finalidad y función, los antiguos habían definido tres órdenes:

Uno fue el más compacto y el más apropiado para el esfuerzo y para durar: a este lo denominaron dórico: otro era airoso, bellísimo: lo llamaron corintio; al intermedio, en cambio, integrado casi por elementos de cada uno de los dos anteriores, le dieron el nombre de

jónico. Así pues, tales fueron sus elucubraciones sobre el cuerpo en su conjunto. (Alberti, 1991: 385).

En el capítulo I del libro I de su tratado, Alberti afirmaba que el objetivo del diseño arquitectónico o trazado o *lineamenta* (en latín original) es asignar a los edificios y a sus partes una posición apropiada, una proporción exacta, una disposición conveniente y un orden agradable, es decir, hacerlos bellos.

[...] es labor y función del trazado fijar a los edificios y a sus partes un lugar adecuado, por un lado, una determinada proporción y una disposición decorosa, por otro, y una distribución agradable, de modo que la conformación entera del edificio y su configuración descansen ya en el trazado mismo. Y el trazado no depende intrínsecamente del material, sino que es de tal índole que podemos intuir que subyace un trazado en edificios diversos, en donde es posible observar un aspecto único e idéntico, en donde sus componentes, el emplazamiento de cada uno de dichos componentes y su ordenación se corresponden en todos y cada uno de sus ángulos y líneas. Y será posible proyectar en mente y espíritu las formas en su totalidad, dejando a un lado todo el material; tal objetivo lo conseguiremos mediante el trazado y previa delimitación de ángulos y líneas en una dirección y con una interrelación determinadas. Puesto que ello es así, en consecuencia el trazado será una puesta por escrito determinada y uniforme, concebida en abstracto, realizada a base de líneas y ángulos y llevada a término por una mente y una inteligencia culta. (Alberti, 1991: 61-62).

El diseño no involucra nada que dependa del material con el que se construirá el edificio, afirma más adelante, no sigue las leyes de la materia. El diseño se realizará trazando ángulos y líneas, definiendo proporciones y órdenes, con el objetivo de dotar al edificio de belleza, independientemente de los materiales con los que se materialice su construcción.

Según el análisis de Arnau, el concepto de *lineamenta* de Alberti sintetiza tres aspectos: las líneas y ángulos que traza el diseñador al realizar un dibujo o plano, los contornos de las imágenes que se perciben con la vista y las aristas de los edificios (Arnau Amo, 1988). Es decir que el dibujo, la imagen visual y la forma de un edificio son los aspectos que definen su belleza y no dependen de la materia con que esté hecho. La materialización del edificio no forma parte, entonces, del proceso de diseño y no tiene incidencia sobre sus cualidades estéticas.

La belleza en arquitectura, siguiendo las teorías de Aristóteles y de Vitruvio, permanecerá durante el Renacimiento exclusivamente vinculada

a cuestiones formales como la armonía, el orden y las proporciones e independiente de cuestiones materiales.

1.2.3. Forma, materia y arquitectura en la teoría clásica

La gran teoría formulada por los pitagóricos y por Platón, que afirmaba que la belleza consistía en el orden, la armonía y las proporciones de las partes de un todo, dominó en el pensamiento filosófico y en la teoría artística entre los siglos V a.C. y XVIII d.C., más allá de críticas o teorías alternativas que fueron surgiendo a lo largo de este período (Tatarkiewicz, 2001: 160).

Para los principales teóricos de la arquitectura del Renacimiento e incluso del Barroco, la belleza en arquitectura era un concepto objetivo y dependía de reglas exclusivamente formales que era posible aprender observando la naturaleza. Según Alberti, el subjetivismo y relativismo en cuestiones artísticas eran signos de ignorancia y, según François Blondel, la arquitectura tenía su propia belleza objetiva que el arquitecto podía descubrir pero no inventar; belleza que tenía las mismas reglas que en la naturaleza, que era independiente del tiempo y de las condiciones y que dependía de la disposición de las partes de un todo y de sus proporciones (Tatarkiewicz, 2001: 240-244).

La mimesis de la naturaleza fue un concepto básico en la teoría del arte, tanto en la Antigua Grecia como en el Renacimiento, y alcanzó su apogeo en el siglo XVI. El arte debía imitar, según Alberti, las leyes de la naturaleza más que su apariencia, y los clasicistas franceses opinaban que no debía imitar a la naturaleza en su estado bruto, sino una vez se hubieran corregido sus fallos y se hubiera realizado una selección (Tatarkiewicz, 2001: 306-307). La naturaleza se concebía dominada por leyes racionales, como las leyes de la armonía y la proporción, y regulada por ritmos matemáticos que el artista debía descubrir y analizar. Pero a finales del siglo XVII se impone la idea de que la arquitectura debía imitar a la naturaleza de la misma manera en que había sido imitada en la antigüedad. Los órdenes arquitectónicos clásicos sintetizaban los estudios de los antiguos griegos sobre las leyes naturales y los trasladaban a la arquitectura, por lo tanto podía también imitarse, en la búsqueda de la belleza objetiva y universal, a la arquitectura clásica. Esta idea se extendería hasta finales del siglo XVIII como la postura académica por excelencia.

A lo largo de los veintitrés siglos, durante los cuales la gran teoría clásica de la belleza se impuso en la teoría artística y arquitectónica, se consideró que las cualidades estéticas de un edificio dependían exclusivamente de sus cualidades formales y no de las materiales. Forma y materia se encontraban

completamente disociadas. La búsqueda de la belleza era una búsqueda de dominio de las reglas formales, fundamentalmente de la regla de las proporciones. La naturaleza era el principal referente y la materia que componía a las obras arquitectónicas no tenía ningún tipo de incidencia en el proceso de búsqueda de belleza.

Pero estas reglas absolutas de diseño, basadas en las proporciones, traerían grandes inconvenientes de aplicarse estrictamente a la arquitectura. Según el mismo Vitruvio, citado por Auguste Choisy (Choisy, 1980: 301), en una construcción «existen [...] piezas que, aumentadas o disminuidas de escala, se tornarían impropias para su fin» y cuyas proporciones debían entonces cambiar a medida que cambiaba la escala del edificio. Choisy cita en su libro *Histoire de l'Architecture*, de 1899, el ejemplo del atrio en forma de patio cubierto con pórticos laterales: en el atrio de un edificio pequeño apenas podría estarse de pie si se le aplicaran las mismas proporciones que las recomendadas para los atrios de los edificios grandes. Para evitar este tipo de inconvenientes es necesario prever una serie de variantes y adaptaciones de acuerdo a la escala del edificio que se está proyectando.

Tomemos como ejemplo el atrio en forma de patio cubierto con doble hilera de pórticos laterales. Para un edificio muy grande, Vitruvio aconseja dar a los pórticos que bordean el patio, una profundidad y una altura iguales al $1/5$ de su longitud; en un patio de 100 pies, tendremos pórticos de 20 pies de ancho, por 20 de altura. Si se reduce la principal dimensión a 30 pies: la profundidad y la altura de los pórticos, reducidas en proporción, serían sólo de 6 pies; es decir, que apenas se podría estar de pie. Frente a esta anomalía Vitruvio abandona la fórmula que conviene a los grandes edificios y determina el ancho y la altura de los pórticos en base a $1/3$ del largo, es decir, 10 pies. El principio de las relaciones simples subsiste, pero a cada escala, corresponde una fórmula de proporción especial. En resumen, cuando se trata de templos concebidos de acuerdo a un programa abstracto, los romanos admiten que un edificio pequeño se construye a semejanza de uno grande; pero su sentido práctico no admite la idea de que una casa sea la miniatura de un palacio. En su arquitectura privada por vez primera vemos considerar la escala de manera auténtica. (Choisy, 1980: 302).

Por otra parte, 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 estos parezcan viables en modelos a escala reducida, podrían derrumbarse si se construyesen de tamaños mayores manteniendo las mismas proporciones.

[...] incluso hay algunas que, al ver sus diseños, parecen francamente viables, pero cuando se hacen de tamaño natural se vienen abajo; podemos ratificarlo con el siguiente ejemplo: con una barrena se puede hacer un agujero de medio dedo, de un dedo y de dedo y medio; si quisiéramos hacer un agujero de un palmo con el mismo procedimiento, ello no sería posible; si se tratara de horadar un agujero de medio pie o de mayor tamaño, es sencillamente impensable. Por la misma razón, lo que parece viable en modelos de escala reducida también parece factible en modelos de mayores proporciones, pero sólo en algunos prototipos. (Vitruvio, 1995: 396).

Habiendo entonces los Rodios pedido á Cálías previniese su máquina contra la helépolis, y la volase dentro de la ciudad como tenia ofrecido, respondió que no podía ser; porque no todas las proporciones se extienden á todos los casos, sino que algunas, en exemplares pequeños, si se trasladan á grandes con las reglas mismas, hacen su efecto: otras no sufren modelo, y se fabrican en sí mismas; y otras en fin, vistos los modelos parecen practicables; pero pasando á grandes no corresponden. Podemoslo advertir así: hacese con una barrena un agujero de medio dedo, de uno, ó de uno y medio; pero si quisieremos del modo mismo hacerle de quatro dedos, no podemos: de medio pie ó mayor ni aun parece imaginable. Igualmente pues, lo que vemos practicar con algunos exemplares pequeños, en otros no muy grandes parece posible; pero en los mayores no puede conseguirse de la misma forma. (Vitruvio, 1992: 264-265).

A partir del siglo XVII comenzó a surgir un nuevo proceso de diseño que superó estos inconvenientes, abandonando las reglas formales para centrarse específicamente en las características materiales y en las dimensiones de los elementos constructivos: el *proceso moderno de diseño*.

Capítulo 2. La forma en la naturaleza

2.1. Las teorías evolucionistas en el siglo XIX

En el siglo XVIII, Jean Baptiste de Lamarck definió la ciencia de la biología como «el estudio de los seres vivos», hecho por el cual se le considera su fundador. Según Lamarck, todo lo que es común al mundo vegetal y al animal, así como todas las facultades que son propias a cada uno de esos seres debe constituir, sin excepción, el único y vasto objeto de la biología. A finales del siglo XVIII formuló su tesis de la evolución de animales y plantas basada en la herencia de los caracteres adquiridos, la ley del uso y del desuso y la tendencia al progreso de la materia viviente, amparándose, asimismo, en otros principios actualmente obsoletos, como la generación espontánea.

Según Lamarck, las condiciones medioambientales provocan cambios en las partes de los organismos que son heredables. Un órgano, por lo tanto, es creado por su necesidad y constante uso y se desarrolla conforme se usa o se pierde debido a su desuso. Lo natural, creía, es lo que existe en la naturaleza; todas las formas naturales tuvieron un origen y se encuentran, hasta el día de hoy, en continua transformación. Varios son los ejemplos de los que se valió para sustentar sus ideas, como el oso hormiguero, que debido a un proceso hereditario había perdido sus dientes y alargado su lengua, ya que no masticaba sino que atrapaba insectos para comer, tal como el medio ambiente se lo exigía, o la jirafa, que alargó su cuello como resultado de la necesidad de obtener alimento de árboles cada vez más altos (Hickman et ál., 2003: 6).

Las ideas de Lamarck llegan a su punto culminante con la publicación de su obra *Filosofía zoológica*, en 1809, donde concreta su concepción de la evolución de los animales como regida por cuatro leyes fundamentales: la naturaleza tiende a incrementar el tamaño de los seres vivientes hasta un

límite predeterminado, los nuevos órganos se producen como resultado de una nueva necesidad, los órganos alcanzan un desarrollo que es proporcional al grado de uso al que están sometidos y todas las características adquiridas por un individuo son transmitidas a su progenie (Hickman et ál., 2001: 105-106).

Esboza, entonces, su teoría de la evolución biológica que puede sintetizarse de la siguiente manera: los individuos cambian físicamente durante su vida para adaptarse al medio que habitan; los organismos adquieren caracteres que no tenían sus progenitores; estos cambios o caracteres adquiridos se deben al uso o desuso de sus órganos; los caracteres adquiridos se transmiten por herencia biológica a sus descendientes; la sucesión de cambios adaptativos muestra una tendencia hacia la complejidad y la perfección. Por lo tanto, no son los órganos, esto es la naturaleza y la forma de las partes del cuerpo de un animal, lo que da lugar a sus costumbres, sino que es la manera de vivir y las circunstancias en que se ha encontrado el individuo o sus antepasados de donde proviene lo que, con el tiempo, ha constituido la forma de su cuerpo (Collins, 1988: 152).

Los organismos, por otra parte, generan nuevas necesidades cuando se producen cambios en el ambiente. Esta característica determina que se vean obligados a utilizar ciertos órganos en mayor o menor medida o incluso a no utilizarlos, lo que provoca que estos órganos sufran formación, desarrollo, atrofias o desaparición; finalmente, por efecto de estas variables, se producen cambios o alteraciones en sus constituciones. Estos hechos se pueden resumir en que *la función crea al órgano*.

La expresión del arquitecto estadounidense Louis Sullivan «form follows function» (la forma sigue a la función), uno de los principios funcionalistas más influyentes en la arquitectura de la primera mitad del siglo XX, es una analogía biológica basada en este principio lamarckiano, que fue fundamentalmente aplicada en sus inicios para el diseño de edificios en altura (Collins, 1988: 157).

La idea de que las distintas especies provienen de otras por cambios graduales y acumulativos, surgirá poco después con los trabajos de Malthus, Lyell y Darwin, que reunirán teorías geológicas y biológicas que explican la historia de la Tierra y de la vida en forma conjunta.

Ernst Haeckel, biólogo, filósofo y ferviente evolucionista, popularizó el trabajo de Charles Darwin defendiendo que la evolución estaba dirigida hacia una complejización progresiva, que tenía al ser humano como meta final. Sus ideas fueron recogidas en 1866 en su libro *Generelle Morphologie der Organismen (Morfología general de los organismos)*. Haeckel sostenía que todos los organismos, tanto unicelulares como animales y plantas, procedían de una sola forma ancestral e introdujo el término *ecología*, entendido como la

ciencia que estudia las relaciones de los seres vivos con su ambiente, definición que luego ampliará al estudio de las características del medio ambiente, incluyendo el transporte de materia y energía, así como su transformación por las comunidades biológicas.

Sus numerosos estudios acerca de la biología marina le condujeron a comparar la simetría de los cristales con la de los animales más simples y a postular un origen inorgánico para los mismos. Haeckel buscaba una interpretación general de la naturaleza basándose en la teoría de la evolución, intentando integrar en ella incluso la historia de la cultura. Dividió la ciencia natural en química, morfología y física, en correspondencia a las tres cualidades de la naturaleza: materia, forma y energía.

Entre 1899 y 1904 desarrolló su obra *Kunstformen der Natur (Formas artísticas en la naturaleza)*, con cien láminas ilustradas que catalogaban y agrupaban las diversas morfologías orgánicas.

2.2. La relación entre forma, función y leyes físicas en la primera mitad del siglo XX

En 1917, el biólogo y matemático escocés D'Arcy Thompson abordó por primera vez el estudio de la naturaleza con herramientas físicas y matemáticas en su libro *On growth and form (Sobre el crecimiento y la forma)*. Las fuerzas físicas, afirmaba, son las que forman directamente a los organismos y los ideales de la geometría euclidiana predominan en las formas naturales, porque las leyes naturales favorecen la simplicidad como una óptima representación de esas fuerzas.

El intento de reconocer un diseño integrador en la naturaleza y una unidad de propósitos en la diversidad de las formas naturales, lo lleva al estudio de una enorme variedad de fenómenos, como los patrones de crecimiento de las células, la estructura de los copos de nieve o las franjas de las cebras. El análisis de las diferencias entre el mundo orgánico e inorgánico, de los objetos animados e inanimados, dice, ha ocupado la mente de muchos hombres, mientras que pocos se han dedicado a la búsqueda de aquellos principios comunes o similitudes esenciales entre ellos. La forma de cualquier partícula de materia, viva o inerte, y los cambios que se observan en sus movimientos y en su crecimiento, pueden, en todos los casos, ser explicados por la acción de fuerzas, de torsión, compresión y tracción, que influyen a la vez el crecimiento, la función y la forma (Thompson, 1945: 958-1025).

Los huesos de un esqueleto caerían al piso en un museo sin alambres o clavos que los mantuvieran unidos, pero en los seres vivos, la compresión

de su peso propio, así como la tracción desarrollada por los músculos y ligamentos, mantiene al esqueleto unido. Las estructuras hechas por el hombre se mantienen en pie gracias a las mismas tensiones. Los puentes victorianos, estructuras basadas en cables de acero que cuelgan de pilastras de mampostería, brindan a D'Arcy Thompson la analogía que buscaba con las estructuras de los seres vivos (Thompson, 1945: 989-993). El empleo de huesos y tendones en la naturaleza, creía que estaba relacionado con el uso de la piedra y el acero en la construcción. El diseño de las estructuras vivas podía, entonces, seguir los mismos principios que los de las obras de ingeniería.

Un elemento estructural muy útil en puentes, plantas y animales es el tubo. Los tubos son livianos y rígidos, aunque tengan tendencia a colapsar en la zona central, sobre todo si son largos. Los huesos de las alas de los albatros, por ejemplo, son estructuras tubulares en las que la sustancia ósea se reduce a una delgada cáscara, casi vacía en su interior (Thompson, 1945: 971).

El peso que una columna tubular puede soportar es inversamente proporcional al cuadrado de su altura. El tallo del bambú colapsaría de no estar dividido en unidades de menor longitud por tabiquillos transversales y el fémur humano se ensancha hacia la zona central para evitar el colapso. Por el mismo motivo, los órdenes clásicos establecían un ligero ensanche de las columnas en su zona central: la éntasis o hinchazón.

Vitruvio decía en su tratado que las columnas deben ser más angostas arriba que abajo, de manera de aumentar su solidez, imitando a los troncos de los árboles; debía, además, hacerse una pequeña disminución del diámetro en la parte inferior, de modo que se formara una especie de barriga en la zona media. Explicando el origen de la columna dórica, decía que esta tuvo en diversos tiempos y edificios distintas proporciones, pero que originalmente medía seis diámetros de alto, derivando esta proporción del cuerpo humano en el que el largo del pie es la sexta parte de la altura total del individuo.

[...] lo denominaron «templo dórico», [...] Quisieron colocar unas columnas en este templo pero, al no dominar sus proporciones y pensando de qué medida las podrían lograr, con el fin de que fueran apropiadas para soportar todo el peso y que además ofrecieran en su aspecto una belleza contrastada, midieron la huella de la pisada del pie del hombre y lo aplicaron (como módulo) para levantar las columnas. Descubrieron que un «pie» equivale a la sexta parte de la altura del hombre y, exactamente así, lo aplicaron a sus columnas, [...] De esta manera, la columna dórica era una respuesta a la proporción del cuerpo humano y sobresalía, en los edificios, por su solidez y su belleza. (Vitruvio, 1995: 160-161).

Pero las estructuras tubulares también pueden reforzarse con fibras longitudinales. Los tallos son los responsables de resistir las cargas aplicadas en las plantas y pueden aumentar el volumen de las fibras si es necesario. A medida que una manzana crece y se vuelve más pesada, la rama se vuelve más fuerte y no más gruesa. D'Arcy Thompson descubrió que una planta joven de girasol se rompía bajo el peso de 160 gramos, pero si se cargaba sin llegar a la rotura con 150 gramos, por ejemplo, durante dos días, la carga de rotura se incrementaba a más de 250 gramos (Thompson, 1961: 985-986). La tensión es en las formas naturales un estímulo directo para el crecimiento y este debe coordinarse con adaptaciones estructurales.

Las formas ideales de la geometría ofrecen soluciones eficaces a ciertos problemas morfológicos. Así, la espiral que aparece en moluscos, cuernos de mamíferos y semillas de flores, es la manera más eficaz de agrupar, manteniendo la misma forma a medida que el tamaño aumenta. Las formas naturales no son caprichosas, sino que buscan la eficiencia. Las estrategias evolutivas favorecidas por las especies se han basado en la adopción o preferencia de algunas formas funcionales: ciertas formas son más eficaces que otras para algunas funciones. En el ordenamiento de las semillas del girasol y en el patrón de crecimiento de las hojas de una lechuga, por ejemplo, pueden subyacer los mismos principios matemáticos.

En 1202, el matemático italiano Leonardo Pisani, conocido como Fibonacci, describió una sucesión numérica: *la sucesión de Fibonacci*, en la cual cada término es igual a la suma de los dos anteriores: 1,1,2,3,5,8,13,21 y así sucesivamente. Un número de esta serie dividido por el siguiente tiende a dar la razón proporcional característica entre las partes mayor y menor de la sección áurea: aproximadamente 0,618033988... Podemos encontrar la serie de Fibonacci al analizar, por ejemplo, la espiral de crecimiento de la caparazón de un molusco, el ordenamiento espiral de un cono de pino, el orden de crecimiento de las ramas de un árbol o la disposición de los pétalos de diversas flores. Las espirales organizadas de acuerdo a la serie de Fibonacci han demostrado ser una excelente forma de completar el espacio en sistemas que se encuentran en constante crecimiento.

Hacia mediados del siglo XX, Le Corbusier desarrolló el Modulor: un sistema de dimensionado que responde a las medidas del cuerpo humano, basado en los principios de la sección áurea o en la serie de Fibonacci, que puede ser utilizado como instrumento de diseño en la fase de proyecto. Dos series interdependientes de Fibonacci, la serie roja y la serie azul, se deducen a partir de las dimensiones de un hombre con su mano levantada. El Modulor, como gama de dimensiones armónicas a la escala humana y aplicable universalmente a la

arquitectura y a la mecánica, es un sistema en el que se pretende conciliar las nociones de orden y proporción, típicas de la arquitectura griega o renacentista, basadas en trazados reguladores y en series matemáticas, con la cultura de la construcción industrializada de la primera mitad del siglo XX.

2.2.1. Las proteínas

La relación entre forma y función es especialmente evidente en las proteínas. Cada proteína posee una estructura tridimensional particular en la que pueden reconocerse una serie de niveles interdependientes y, en cada uno de ellos, su estructura formal refleja su función.

La estructura de las proteínas puede jerarquizarse en cuatro niveles (Hickman et ál., 2001: 26): una estructura primaria que corresponde a la secuencia de aminoácidos, una estructura secundaria que provoca la aparición de motivos estructurales, una estructura terciaria que define la estructura de las proteínas compuestas por un solo polipéptido y una estructura cuaternaria, si interviene más de un polipéptido.

Una cadena polipeptídica consiste en una cadena lineal de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos. El primer lugar de la cadena corresponde al grupo amino terminal y la estructura primaria es la secuencia en la que están situados todos los constituyentes hasta llegar al carboxilo terminal. La estructura lineal del péptido define en gran medida las propiedades de niveles de organización superiores de la proteína.

La estructura secundaria de las proteínas es el plegamiento que la cadena polipeptídica adopta gracias a la formación de enlaces de hidrógeno entre los átomos que forman el enlace peptídico. Al comparar la estructura tridimensional de diferentes proteínas se pone de manifiesto que en distintas regiones se repiten varios esquemas de plegamiento. Dos de estos esquemas, descubiertos en 1951, son particularmente frecuentes: la *hélice alfa* y la *lámina plegada beta* (Alberts et ál., 1992: 114). Los aminoácidos en una hélice alfa están dispuestos según una estructura helicoidal dextrógira con unos 3,6 aminoácidos por vuelta, formando un cilindro rígido. Cada aminoácido de la hélice forma dos puentes de hidrógeno con su enlace peptídico. En total son siete enlaces de hidrógeno por vuelta, lo cual estabiliza enormemente la hélice. La lámina plegada beta se forma por el posicionamiento paralelo de dos cadenas de aminoácidos dentro de la misma proteína, en el que los grupos amino de una de las cadenas forman enlaces de hidrógeno con los grupos carbonilo de la opuesta.

La estructura terciaria es el modo en que la cadena polipeptídica se pliega en el espacio, es decir, cómo se enrolla una determinada proteína.

Está mantenida por enlaces iónicos y puentes de hidrógeno entre las cadenas laterales de los aminoácidos, enlaces hidrofóbicos y eventualmente puentes disulfuro.

La estructura cuaternaria de una proteína es la forma en la que se asocian las distintas subunidades constituyentes, si es que existen. Para poder hablar de estructura cuaternaria es necesario que la proteína esté formada por varias subunidades. Deriva, entonces, de la conjunción de varias cadenas peptídicas asociadas, conformando un ente o multímero que posee propiedades distintas a las de sus monómeros componentes. Dichas subunidades pueden asociarse entre sí mediante puentes de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas o puentes salinos.



Figura 1. Estructuras primaria, secundaria y terciaria de las proteínas. Estructura cuaternaria: ilustración extraída de Internet (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/86/Argonne%27s_Midwest_Center_for_Structural_Genomics_deposits_1%2C000th_protein_structure.jpg), © Matt Howard / CC-BY-SA 2.0.

La estructura de una gran proteína posee, entonces, varios niveles de organización, y cada nivel se constituye a partir del anterior en una organización jerárquica que va creciendo en complejidad (Alberts et ál., 1992: 117). Las estructuras formadas por las proteínas son capaces de soportar grandes tensiones. La queratina, por ejemplo, es una proteína que se presenta en forma de microfibrillas, a modo de cuerda. Es el componente principal de las capas más externas de la epidermis de los vertebrados, de pelos, uñas, plumas, cuernos y pezuñas. Sus principales cualidades son la dureza y la resistencia. La cadena polipeptídica de esta proteína se enrolla en una hélice alfa dextrógira que se estabiliza por puentes de hidrógeno entre los aminoácidos. La resistencia adicional que posee proviene del enrollamiento levógiro de cuatro de las hélices anteriores para formar una superhélice denominada *protofibrilla* (Koolman et ál., 2005: 70). Ocho protofibrillas se combinan y forman agregados denominados *fibrillas intermedias*; a su vez, cientos de estos agregados se combinan para formar una matriz proteica llamada *macrofibrilla*. Finalmente, una fibra de cabello esta constituida por el apilamiento de células formadas por macrofibrillas.

La molécula de colágeno, el elemento estructural más importante en los seres vivos, es una estructura helicoidal compleja cuyas propiedades mecánicas se deben tanto a su composición biomecánica, como a la disposición de sus moléculas. Sus principales propiedades son su gran resistencia a la tracción y su elevado modulo de elasticidad. El colágeno se origina a partir de una proteína precursora llamada *tropocolágeno*, que está formada por tres cadenas polipeptídicas o cadenas alfa. Cada cadena alfa está constituida por un polipéptido, formado por una repetición en grupo de tres aminoácidos (Koolman et ál., 2005: 68-70). Las tres cadenas se enrollan y se fijan mediante enlaces transversales para formar una triple hélice dextrógira, con una distancia entre vueltas de 8,6 nanómetros. El diámetro de las fibras colágenas, en los diferentes tejidos, es muy variable y su organización también, apareciendo en general como un material altamente ordenado. En la piel de los mamíferos las fibras están organizadas como cestos de mimbre, lo cual les permite resistir tracciones ejercidas en múltiples direcciones. En los tendones lo están en forma de haces paralelos que se alinean a lo largo del eje principal de tracción. En el tejido óseo se disponen en forma de láminas delgadas y superpuestas, paralelas unas a otras y formando un ángulo recto con las capas adyacentes, conformando así las trabéculas.

El colágeno aparece también allí donde es necesario proteger o donde se necesita un material que resista la tracción o los cambios de volumen, como la dermis o las fascias musculares. Los vasos sanguíneos, que son tubos,

mantienen su forma gracias a una trama en espiral de fibras de colágeno de soporte.

Las subunidades proteicas pueden también autoensamblarse para formar grandes estructuras. El empleo de una o unas pocas subunidades para construir estructuras de gran tamaño presenta algunas ventajas (Alberts et ál., 1992: 123-124): la repetición permite reducir la cantidad de información genética necesaria para definir la forma, la asociación a través de múltiples enlaces facilita tanto el ensamblaje como la disgregación de los componentes y se minimizan los posibles errores en la síntesis de la estructura. Un único tipo de subunidad proteica puede ensamblarse consigo mismo para formar una estructura mayor: láminas planas siguiendo patrones hexagonales, tubos, anillos, esferas, etc.

Muchos virus simples, por ejemplo, adoptan la forma de una esfera hueca, a modo de caparazón, formada por cientos de subunidades proteicas idénticas. La caparazón esférica del virus TBSV (*Tomato Bushy Stunt Virus*), por ejemplo, de unos 33 nm de diámetro, está formada por el empaquetamiento de 180 subunidades proteicas idénticas, de 386 aminoácidos cada una (Alberts et ál., 1992: 125).

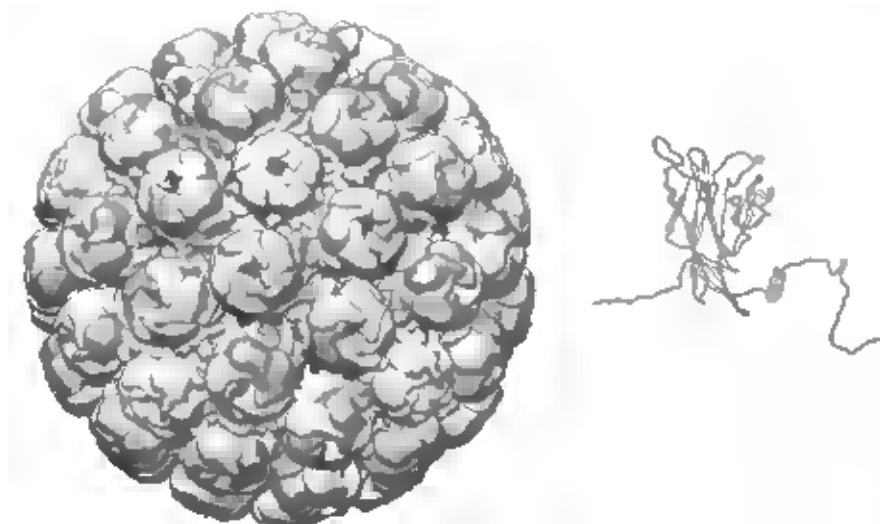


Figura 2. Virus del simio 40 y detalle de la proteína de su envoltente. Ilustración extraída de Internet (https://en.wikipedia.org/?title=Protein_structure#/media/File:Protein_structure_examples.png), © Axel Griewel / CC-BY-SA 3.0.

2.2.2. Los huesos

La forma de un esqueleto está siempre determinada por consideraciones mecánicas y tiende a manifestarse como un diagrama de las tensiones que sobre él actúan. Las trabéculas de los huesos, ordenadas según la dirección del peso o reforzando a aquellas trabéculas que se encuentran alineadas según dicha dirección, forman una red tridimensional de una gran complejidad geométrica que se encuentra en continuo estado de cambio (Thompson, 1945: 984).

D'Arcy Thompson nos muestra cómo en una sección longitudinal de un fémur humano (Thompson, 1961: 977-978), las trabéculas se extienden en líneas curvas desde la cabeza hasta la médula del hueso y se cruzan con otros paquetes lineales en forma ortogonal. La disposición de las trabéculas es realmente un diagrama de isostáticas de tracción y compresión, es decir, la naturaleza refuerza al hueso en las direcciones en las que está más solicitado. Las líneas de compresión a partir de la superficie superior, que recibe el peso del cuerpo, descienden formando un paquete sobre el lado comprimido. Las líneas de tracción suben por el lado opuesto y se extienden por la cabeza perpendicularmente al sistema de isostáticas de compresión. Este mismo fenómeno puede observarse en cualquier hueso que soporte un peso y pueda, además, estar sometido a esfuerzos de flexión. Así, el peso transmitido sobre la cabeza del fémur llega en parte al suelo a través del talón y en parte a través de la articulación con el hueso cuboide, hasta el empeine. Tenemos, entonces, dos miembros en compresión que se separan, unidos en el pie por un ligamento o miembro en tracción por el lado inferior.

D'Arcy Thompson analizó, igualmente, la disposición de las trabéculas en el esqueleto de diferentes animales. El oso, por ejemplo, camina con las plantas de los pies y la disposición de las trabéculas en los huesos de sus piernas es similar a la del hombre. El talón del gorila es similar al del hombre, pero el peso que soporta es menor, ya que su postura erecta no es ni perfecta ni constante y la disposición de sus trabéculas presenta mayores diferencias con respecto a las humanas. En otros monos el talón va levantado y, por consiguiente, la dirección de las trabéculas se diferencia aún más (Thompson, 1961: 980).

El hueso está constituido por un tejido conectivo, que consiste esencialmente en una matriz extracelular mineralizada y células especializadas. El principal componente orgánico de esta matriz es el colágeno tipo I, que supone alrededor del 90 %. El 10 % restante lo componen una serie de proteínas no estructurales, entre las que se encuentran la osteocalcina, la osteonectina, algunas fosfoproteínas, sialoproteínas, factores de crecimiento y proteínas séricas (Arnett, 2004: 1).

La fase inorgánica está compuesta por minúsculos cristales de un mineral llamado *hidroxiapatita*, que se incrustan entre las fibras de colágeno para formar un material que reúne las características adecuadas de rigidez, flexibilidad y resistencia. La matriz ósea es, así, la responsable de las extraordinarias propiedades biomecánicas del hueso. Aunque la dureza se debe a sus componentes minerales, sin la existencia de la retícula de colágeno sería frágil. Estas fibras de colágeno forman un entramado que proporciona al hueso flexibilidad y resistencia a la tracción, mientras que los minerales le confieren dureza, rigidez y resistencia a la compresión.

Los huesos largos constan de tres partes: una parte central llamada *diáfisis* y dos extremidades llamadas *epífisis*. Una sección de la epífisis muestra una estructura ósea alveolada, denominada *hueso esponjoso*. Es allí donde las trabéculas siguen las líneas de transmisión de los esfuerzos. La diáfisis, donde las sollicitaciones por flexión son más fuertes, consiste en un tubo hueco de hueso compacto.

El tejido óseo es una estructura viva y muy plástica que no se encuentra nunca en reposo, se renueva constantemente. Incluso los huesos largos que al llegar a la edad adulta han adquirido su forma y tamaño definitivos son continuamente remodelados, destruyéndose hueso viejo que es sustituido constantemente por hueso nuevo (Arnett, 2004: 5-6). Las pequeñas trabéculas se forman y deforman adoptando configuraciones dictadas por las fuerzas a que está sometido el esqueleto y no por la herencia genética. Este cambio de forma se produce a través de dos procesos coordinados: por un lado, crecimiento por depósito sucesivo de laminillas de tejido óseo en la zona en que existe un requerimiento mecánico y, por otro, remoción del tejido óseo en las zonas en que no hay esfuerzos de tracción ni de compresión.

Si un hueso se rompe y sana de forma que sus partes queden fuera de la posición original, el sistema trabecular se remodela en pocas semanas para adaptarse al nuevo sistema de fuerzas y esta reconstrucción se extiende a gran distancia del punto de fractura.

Las tensiones resultantes de las sollicitaciones mecánicas son el principal regulador del remodelado de algunos huesos. Los huesos largos y las vértebras parecería que necesitan cargas pequeñas pero frecuentes para mantener su masa ósea. Es decir que la masa y la resistencia del esqueleto estarían determinadas por la necesidad de resistir cargas y por las deformaciones impuestas por las actividades de la vida diaria del individuo (Arnett, 2004: 6).

2.2.3. Las medusas

Dejando caer una gota de tinta en un vaso con agua, se puede observar cómo esta se transforma en un anillo vorticular que se expande y atenúa a medida que desciende, generando formas con notables similitudes a las de una medusa. A la vez que se expande, se ondula y desdobra en lazos descendentes que vuelven a convertirse en vórtices que se expanden nuevamente mientras continúan descendiendo y así sucesivamente, hasta que la tinta se diluye lo suficiente como para dejar de ser percibida.

La gota de tinta que se va abriendo camino tiende a arrastrar agua tras de sí por fricción fluida, lo que genera vórtices retardadores. Este efecto tiende a reducirse al mínimo al ir disminuyendo paulatinamente el tamaño de la gota que se abre en sucesivos lazos descendentes, aumentando la velocidad de movimiento de la tinta dentro del agua.

Al caer una gota de aceite en parafina se genera un primer anillo vorticular del que se desprenden aproximadamente cuatro brazos que vuelven, a su vez, a formar nuevos anillos vorticiales y así sucesivamente, generando un mecanismo fractal que minimiza la fricción entre los dos fluidos y permite al aceite desplazarse y expandirse a mayor velocidad (Thompson, 1945: 395-397).

El cuerpo de una medusa está formado en un 98 % por agua. De ejemplares con un peso de 6 kilogramos, apenas se han obtenido 10 gramos de materia orgánica. Es realmente un cuerpo líquido adaptado para desplazarse dentro de otro líquido.

Las medusas están compuestas por una campana con dos superficies, una superior llamada *exumbrela* y una inferior llamada *subumbrela* (Barnes, 1989: 116). La boca se abre en el extremo de una extensión tubiforme llamada *manubrio*, que pende del centro de la subumbrela y del que pueden salir tentáculos. Además, la umbrela puede alargarse en tentáculos umbrelares que pueden o no presentar cavidad tentacular, una extensión de la cavidad gastrovascular.

La dirección general de nado de las hidromedusas es vertical. A través de pulsaciones puede impulsarse hacia arriba y, si se relaja, puede hundirse lentamente. Para desplazarse horizontalmente dependen casi por completo de las corrientes de agua (Barnes, 1989: 119).

Es evidente la similitud formal entre las distintas variedades de medusoides y las configuraciones geométricas que surgen del movimiento de líquidos dentro de otros líquidos. La umbrela se asemeja notablemente a los anillos vorticiales que se observan en el movimiento de las gotas de tinta en agua o de aceite en parafina y los tentáculos se asemejan a los lazos descendentes que se abren camino para disminuir la fricción entre los fluidos.

2.2.4. Los sistemas de empaquetamiento de espacios y el panal de abejas

En cualquier conjunto de cuerpos originalmente esféricos y de tamaño uniforme que se empaqueten, como sucede con las burbujas en la espuma de jabón o con las células de los tejidos dérmicos, las distintas unidades adoptarán formas semejantes entre sí en tanto se encuentren en el interior de una masa uniforme. Si las observamos en una sección, sus lados se aplanarán de forma similar y tenderán a encontrarse en ángulos de 120° en el caso de las burbujas de jabón (que están en contacto con el mismo medio hacia cualquier dirección, es decir, con el aire exterior o el interior de otras burbujas) o de las células de las capas profundas de la piel, o en ángulos próximos a los 90° en el caso de las células superficiales de la dermis (expuestas al aire por un lado y en contacto con el protoplasma, por el otro, lo cual da lugar a evidentes diferencias de tensiones).

Las características geométricas generales que pueden observarse en las células de una dermis son fácilmente deducibles de la posición que ocupan, en función de las tensiones a que quedan sometidas.

Si apilamos un conjunto de bolas de pan de idéntico tamaño y aplicamos sobre ellas una presión uniforme, cada bola estará en contacto con otras doce, desarrollándose doce superficies que tienden a ser planas a medida que las bolas de pan tienden a ocupar todo el espacio. Obtendremos, así, un sólido regular llamado *rombododecaedro* (Thompson, 1945: 544-545).

El rombododecaedro es la forma sólida que durante mucho tiempo se creyó que, en asociación apretada, podía contener el mayor espacio posible con una superficie mínima. Pero Lord Kelvin descubrió que con sólidos de catorce caras llamados *tetrakaidecaedros*, el espacio se llena y reparte homogéneamente en compartimentos con una economía de superficie aún mayor que la que se consigue con los rombododecaedros (Thompson, 1945: 548-553). El tetrakaidecaedro está limitado por tres pares de cuadriláteros iguales y cuatro pares de hexágonos iguales.

En un sistema homogéneo de películas fluidas, como se puede suponer con bastante certeza que existe en el interior de una masa de espuma de jabón, donde las películas son libres de deslizarse o girar unas sobre otras y tienen aproximadamente el mismo tamaño, la masa tiende a dividirse en células tetrakaidecaédricas. Si se aprieta una masa de bolas de arcilla, al menos las interiores adoptan forma de rombododecaedros, pero si se humedecen esas bolas de manera que puedan deslizarse unas sobre otras, tenderán a adoptar formas tetrakaidecaédricas. En varios parénquimas vegetales las formas de las células alcanzan o se aproximan a configuraciones tetrakaidecaédricas,

aunque en general la fricción, viscosidad y solidificación de los tejidos impiden la formación de geometrías exactas.

Ambas configuraciones, rombododecaedros y tetrakaidecaedros, se producen en la naturaleza, los primeros por compresión de esferas sólidas empaquetadas y los segundos cuando un sistema líquido de esferas puede resbalar y deslizarse para empaquetarse de forma más apretada aún.

Si imaginamos un conjunto de cilindros sobre un plano, todos iguales entre sí, en contacto unos con otros y representados en sección como círculos iguales, cada uno de ellos estará en contacto con otros seis a su alrededor. Si todo el sistema se encuentra bajo una presión uniforme, los seis puntos de contacto entre los círculos tenderán a extenderse hasta formar líneas o superficies de contacto. Los círculos tenderán, entonces, a convertirse en hexágonos regulares.

Una de las más conocidas agrupaciones de formas hexagonales en la naturaleza es el panal de abejas. Se trata de un conjunto de cilindros idénticos, comprimidos hasta transformarse en prismas hexagonales dispuestos en dos capas, una mirando hacia un lado y otra hacia el opuesto, lo cual supone un problema en el encuentro de los extremos interiores. Si los cilindros tuvieran extremos esféricos, cada uno estaría en contacto con otros tres de la otra capa y por presión mutua se convertirían en pirámides triédricas o secciones de un rombododecaedro (Thompson, 1945: 525-532).

En 1700 se hicieron los primeros cálculos referentes a la medida de los ángulos de los rombos en los fondos piramidales de las celdas del panal. El ingeniero italiano Maraldi fue el primero en encontrar la solución correcta: $109^{\circ} 28'$, conocido hoy día como ángulo de Maraldi.

Una configuración mínima, con el consiguiente ahorro de materiales en las paredes de cera, parece ser el principio que rige la construcción del panal. Así, los hexágonos empaquetados y el rombododecaedro en los extremos, proporcionan el perímetro menor con relación al espacio contenido, es decir, determinan la forma de la celda que puede contener la mayor cantidad de miel, utilizando la menor cantidad de cera posible y empleando el menor esfuerzo de construcción.

2.2.5. Los radiolarios

Los radiolarios constituyen un grupo de protozoarios marinos rizópodos, es decir, que se mueven por medio de pseudópodos, que poseen un esqueleto perforado formado por sílice (Thompson, 1945: 708-716). Estos diminutos esqueletos, a pesar de su tamaño, son extremadamente complejos y presentan una extraordinaria variedad formal. Su constitución silíceas les otorga dureza,

resistencia y rigidez, dando origen a un tejido óseo más ligero y delicado que el de los organismos calcáreos.

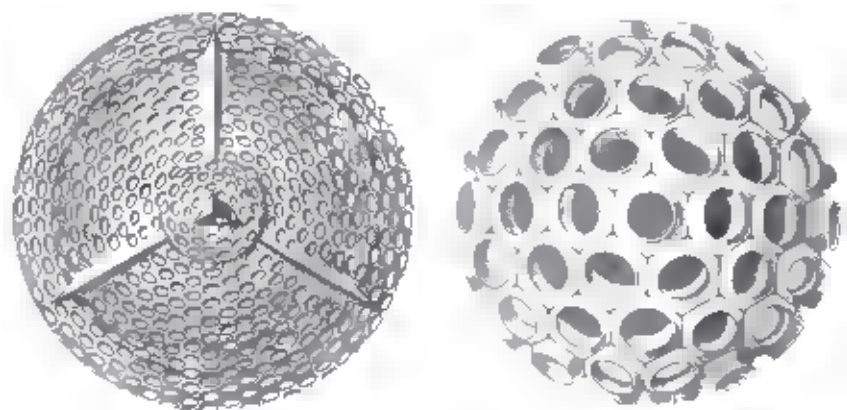


Figura 3. Esqueletos de radiolarios. Imágenes extraídas de *Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*, láminas 7 y 11 (Haeckel, 1862).

El cuerpo de estos organismos consiste en una masa esférica de protoplasma alrededor de la cual, separado por una cápsula porosa, se extiende un protoplasma espumoso con multitud de alvéolos y lleno de un fluido similar al agua de mar. Los alvéolos pueden aparecer más o menos aislados y esféricos o reunirse en una espuma rígida de células poliédricas. Suponiendo que la superficie externa esté cubierta por una capa de vesículas uniformes, de apariencia espumosa, tenderá a formarse una malla regular de hexágonos. Pero una ordenación de hexágonos no es capaz de encerrar un espacio, por lo que suelen aparecer, además, algunos pentágonos y heptágonos. Existen algunos casos en los que las vesículas tienen tamaños regulares, otros en los que la malla se desarrolla en niveles sucesivos originando un sistema de esferas concéntricas. También existen especies que desarrollan perpendicularmente a la superficie de la esfera, allí donde coinciden tres vesículas externas, aristas radiales que forman una serie de épisculas.

Si se construye un tetraedro regular de alambre y se sumerge en una solución jabonosa, se obtiene un sistema de seis películas que se encuentran, de tres en tres, en cuatro aristas y estas se extienden desde las esquinas hasta el centro de simetría de la figura. Allí se juntan, de dos en dos, con el ángulo de Maraldi y las películas coinciden, de tres en tres, formando un ángulo sólido como el que se observa en los extremos interiores de las celdillas de un panal de abejas. Esta configuración es fácilmente distinguible en algunas especies

de radiolarios (Thompson, 1945: 714-716). La figura de alambre puede no ser rectilínea, sino tener como base un tetraedro esférico y pueden existir, además, burbujas centrales de diferentes tamaños, pero que siempre forman ángulos de Maraldi en sus cuatro esquinas, de modo que las tensiones de sus propias paredes se equilibran con las de las películas que sostienen.

La forma de los esqueletos de los radiolarios es siempre análoga a la interacción de tensiones superficiales en el sistema de protoplasma. Los esqueletos se forman por sedimentación de sílice en las paredes y aristas de las múltiples superficies y tabiques, actuando siempre la ley de área mínima.

2.2.6. Forma y leyes físicas en las ciencias naturales en la primera mitad del siglo XX

En el siglo XIX Lamarck introdujo en las ciencias biológicas la idea de que la forma en la naturaleza es producto de la función que cumple: *la necesidad crea los órganos* 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 estas ideas de Lamarck, a principios del siglo XX, 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 explicarse siempre por la acción de fuerzas y cuando la búsqueda de la eficiencia es lo primordial, tanto las estructuras naturales como las diseñadas por el hombre pueden seguir los mismos principios morfológicos.

Las medusas, los empaquetamientos de células o de burbujas, los panales de abeja o los esqueletos de los radiolarios son algunos de los ejemplos más sencillos que utiliza D'Arcy Thompson para analizar cómo las fuerzas físicas determinan la forma de los organismos y de los fenómenos de la naturaleza. Cada organismo tiene sus propiedades específicas y, gracias a ellas, adopta una forma determinada, pero existen innumerables fenómenos morfológicos que no son exclusivos de los seres vivos, sino que son manifestaciones más o menos simples de leyes físicas ordinarias, afirmaba, como la ley del área mínima o del gasto mínimo de energía.

La herencia genética no es, pues, la única responsable de la morfología de los seres vivos. Si bien algunos miembros de una ballena se parecen a los de una morsa, esto no significa que dicha similitud provenga necesariamente de un ancestro en común, sino que puede deberse a la necesidad de adaptación a condiciones ambientales similares. Tanto moluscos como vertebrados han desarrollado por separado ojos sofisticados de idéntica morfología. La física y la química de la visión son comunes y en ambos casos determinan la forma

estructural de los órganos. Según D'Arcy Thompson, entonces, la selección natural tiene una función limitada en la evolución de las especies, solo elimina 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 un objeto, en síntesis, depende de las fuerzas que sobre él actúan. Observándolo, se pueden deducir las fuerzas que han actuado o están actuando sobre él. La forma de los organismos vivos depende de la combinación de fuerzas internas de cohesión molecular, interacción electroquímica de la materia y fuerzas generales, como la gravedad. Los mamíferos, por ejemplo, viven en un mundo dominado por la gravedad. En el mundo de las bacterias la gravedad tiene escasa influencia y son determinantes, en cuestiones morfológicas, las propiedades electroquímicas de la materia. Por ello, el cupero humano, hasta donde se puede entender hoy día, presenta una extraordinaria complejidad formal que surge de una organización jerárquica en la que siempre las tensiones a que están sometidas las distintas partes pueden explicar con bastante certeza sus formas, desde la compleja 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 su esqueleto a una escala mayor. Esta extraordinaria complejidad formal es la responsable de las extraordinarias propiedades físicas del cuerpo.

La información genética aislada, entonces, no especifica por completo la forma, sino que esta queda también determinada por la acción combinada de las fuerzas naturales presentes en el medioambiente y las leyes matemáticas.

Los organismos viven también sometidos al dilema energético. Un organismo que no cuida la energía que lo rodea no será capaz de sobrevivir, ya que la energía disponible es limitada. Todos los procesos biológicos, por lo tanto, están optimizados energéticamente y la forma en la naturaleza parece ser, también, el resultado de dicha optimización.

2.3. Bases conceptuales de la TGS en la segunda mitad del siglo XX

La TGS surge en la década de 1950 como un esfuerzo de estudio interdisciplinario dedicado a encontrar propiedades comunes a las entidades o sistemas, presentes en todos los niveles de la realidad, pero que tradicionalmente han sido objeto de estudio de disciplinas académicas diferentes.

Si bien en sus inicios se encuentra reducida al campo de las ciencias naturales, pronto se vio su capacidad de inspirar desarrollos en otras disciplinas,

surgiendo en la segunda mitad del siglo XX un cuerpo teórico aún en pleno desarrollo, que engloba un conjunto de teorías interrelacionadas, como la del caos, la de las catástrofes, las teorías de la autoorganización o la de los fractales. Dichas teorías tienen como rasgos distintivos la vocación interdisciplinaria, en contraposición a la diferenciación de disciplinas científicas y el holismo como visión de la globalidad, frente a la especialización del reduccionismo surgido con Descartes.

La ciencia moderna es el resultado de la tendencia a separar el todo en partes y se ha caracterizado por la especialización siempre creciente que ha llevado a los científicos a encerrarse en sus áreas específicas de investigación y a desconocer los problemas de otras disciplinas. Sin embargo, han surgido de forma independiente en la historia de la ciencia moderna, problemas y concepciones muy similares en áreas del conocimiento muy distintas (Bertalanffy, 1989: 30). Ludwig von Bertalanffy critica la visión del mundo fraccionada en diferentes áreas, como física, química, biología, sociología, etc. La naturaleza, dice, no está dividida en ninguna de esas partes. Bertalanffy creía que estas divisiones son arbitrarias, que presentan fronteras sólidamente definidas, así como espacios vacíos entre ellas e introduce el concepto de una TGS (Bertalanffy, 1989: 9). Uno de los objetivos de la TGS es la formulación de aquellos principios que son válidos para los sistemas en general. Como consecuencia de la existencia de principios y propiedades generales en los distintos sistemas es que aparecen similitudes estructurales o isomorfismos en las distintas disciplinas (Bertalanffy, 1989: 32-33).

En 1926, Jan Smuts había definido el concepto de holismo, en su libro *Holismo y evolución*, como la tendencia de la naturaleza a formar todos que son mayores a la suma de sus partes. Las denominadas *partes* son distinciones analíticas abstractas incapaces de expresar adecuadamente un conjunto.

El enfoque mecanicista, predominante a principios del siglo XX, parecía desdeñar lo que es esencial a los fenómenos de la vida. Bertalanffy, en contraposición, comienza a considerar a los organismos vivos como *sistemas* y cree que el principal objetivo de las ciencias biológicas debe ser el descubrimiento de los principios de organización de la materia viva en sus distintos niveles (Bertalanffy, 1989: 10). La TGS afirma que las propiedades de los sistemas no pueden describirse significativamente a partir de sus elementos separados, la comprensión de los sistemas solo ocurre cuando se estudian globalmente, involucrando todas las interdependencias de sus partes. Por otro lado, los sistemas siempre existen dentro de otros más grandes, de modo que se asume la necesidad de analizar los problemas a distintas escalas. Los organismos vivos, por ejemplo, presentan actividades coherentes en todos

los niveles, coordinadas en un continuo desde los niveles moleculares hasta los macroscópicos, de modo que las partes y el todo siempre están mutuamente implicados (Ho, 1997: 46-47).

2.3.1. La teoría del caos y la no linealidad

La *teoría del caos* es la rama de las matemáticas y la física surgida a partir de los trabajos de Henri Poincaré, Gastón Julia y Edward Lorenz, entre otros, que trata sobre los comportamientos impredecibles y no lineales de los sistemas dinámicos.

Los *sistemas lineales* son aquellos en los que la totalidad es exactamente la suma de las partes, es decir, aquellos que pueden dividirse en varios sistemas más simples que se resuelven por separado y luego se juntan (Saunders, 1997: 52). Los *sistemas no lineales* son mucho más difíciles de analizar matemáticamente y, salvo algunas excepciones, no se conocen soluciones analíticas para las ecuaciones diferenciales no lineales que describen su evolución temporal. Presentan un comportamiento impredecible denominado como *caótico* (Addison, 2001: 6).

Una de las principales características de los *sistemas caóticos deterministas* es que tienen una gran dependencia de las condiciones iniciales. En un sistema del que se conocen sus ecuaciones características y que es, por lo tanto, un sistema determinista y dadas unas determinadas condiciones iniciales, se puede conocer exactamente su evolución en el tiempo. Pero en el caso de los sistemas caóticos, una mínima diferencia en esas condiciones iniciales conduce a enormes discrepancias en los resultados. Ejemplos de tales sistemas son la atmósfera terrestre, el sistema solar o los movimientos de las placas tectónicas. Aun conociéndose las ecuaciones exactas que describen el comportamiento de un sistema, si los datos iniciales no son exactos, no se podrá predecir qué pasará con el sistema en el futuro. Como los datos raramente o nunca son exactos, un sistema caótico, por más que sea determinista, es impredecible.

Para la mayoría de los fenómenos físicos es casi imposible especificar con total exactitud las condiciones iniciales y siempre existen, además, perturbaciones durante su desarrollo, por ello es posible predecir el comportamiento de los sistemas caóticos deterministas solo por períodos cortos de tiempo, ya que rápidamente los pequeños errores iniciales y las pequeñas perturbaciones hacen que el proceso parezca aleatorio (Prigogine, 1997: 32-33).

Esta es la característica distintiva del *caos determinista*: predictibilidad en el corto plazo debido al determinismo e impredecibilidad a largo plazo

debido a la alta sensibilidad a las condiciones iniciales y a las perturbaciones (Saunders, 1997: 53).

La ciencia clásica enfatizaba los factores de equilibrio, orden, estabilidad. Hoy vemos fluctuaciones e inestabilidad por todas partes. Estamos empezando a ser conscientes de la complejidad inherente del universo. (Prigogine, 1995: 1).

Nuestro universo no funciona mecánicamente como un reloj, decía Ilya Prigogine, no es cerrado. Nos encontramos en un sistema flexible en el que siempre existe la posibilidad de que alguna inestabilidad conduzca a algún nuevo mecanismo. Tenemos realmente, aseguraba, un universo abierto. Ya sea a consecuencia de fluctuaciones internas o de fuerzas externas, la ruptura del equilibrio de un sistema no siempre lleva al caos o a la destrucción, sino que también puede originar una estructura nueva, en un nivel superior.

Cerca del estado de equilibrio las leyes de la naturaleza son universales; lejos del estado de equilibrio las leyes son específicas. Esas inestabilidades exigen un flujo de energía, disipan energía, de ahí el nombre de *estructuras disipativas* de estos sistemas nuevos y más complejos (Toffler et ál., 1980).

Así, el no equilibrio es creador de estructuras que solo existen lejos del equilibrio y reclaman para sobrevivir una cierta disipación de energía. Prigogine sugiere que se puede considerar la evolución como un proceso que conduce hacia organismos biológicos y sociales crecientemente complejos y diversificados a través del nacimiento de nuevas estructuras disipadoras de orden superior.

Es posible, entonces, desarrollar orden a partir del caos. En el preciso momento en que una estructura salta a un nuevo estado de complejidad, es imposible predecir qué forma va a adoptar, pero una vez elegido un camino, una vez que ha nacido la nueva estructura, vuelve a dominar el determinismo.

El universo, según Jencks, es mucho más creativo, libre, autoorganizado y abierto de lo que Newton, Darwin y otros suponían. Jencks define «complejidad» como la teoría que analiza cómo pueden alcanzarse organizaciones emergentes a partir de la interacción de sus componentes cuando estos son empujados fuera del estado de equilibrio (por un incremento de la energía, materia o información) hacia el umbral entre el orden y el caos. En este umbral es donde a menudo los sistemas cambian: saltan, se bifurcan o interactúan creativamente de una manera no lineal e impredecible. En este tipo de procesos emergen espontáneamente cualidades como la autoorganización, surgen patrones fractales, se forman atractores y se incrementa a menudo la complejidad (Jencks, 1997b: 8).

Las teorías neodarwinistas sobre la evolución suponen que las mutaciones genéticas ocurren al azar y que algunas de ellas llevan a cambios en los organismos. Si estos cambios son ventajosos, tienden a perdurar. No especifican qué tipo de conexión existe entre el material genético y el organismo, pero asumen implícitamente que es lineal, es decir, que un cambio importante en el organismo debe ser causado por un cambio importante en el genoma. Como es altamente improbable que el importante cambio genético necesario para originar un organismo significativamente distinto y además viable pueda ocurrir por azar, concluyen que los cambios evolutivos deben ser graduales. Pero si asumiéramos que la evolución es un proceso no lineal, analiza Saunders, cambiaría esta idea. Dado que los sistemas no lineales tienen en general múltiples trayectorias estables, los grandes cambios no ocurren necesariamente como largas secuencias de cambio menores, deberíamos, por el contrario, esperar que los organismos permanecieran más o menos inalterados por un largo período de tiempo y que cambiaran rápidamente cuando el sistema se moviera a una trayectoria alternativa (Saunders, 1997: 55).

La teoría del equilibrio puntuado, de Niles Eldredge y Stephen Gould, explica la discontinuidad de los cambios evolutivos estableciendo que la evolución se concentra en eventos relativamente breves de especiación, seguidos por largos períodos de estancamiento o gradualismo evolutivo (Hickman et ál., 2001: 121).

2.3.2. La teoría de las catástrofes

La *teoría de las catástrofes*, del matemático francés René Thom, nace como una nueva manera de considerar todas las transformaciones y discontinuidades que se producen de un modo brusco e imprevisto en un proceso (Lu, 1976: 95-96), aplicando la topología. Cuando el agua se congela o hierve, cambiando de estado, cuando un edificio se derrumba, cuando una gota de agua colma un vaso o cuando un sismo sacude la tierra, se produce lo que Thom denomina *catástrofe*: una interrupción de los procesos normales o una discontinuidad de la realidad. Las catástrofes simbolizan los procesos evolutivos que generan cambios cualitativos, el momento en que un sistema se transforma internamente de modo radical y surge algo diferente.

Esta teoría pretende analizar, entre otros temas, las discontinuidades en el comportamiento y la evolución de los sistemas vivos, complementando a las teorías genéticas en un intento por explicar el origen de las formas vivientes. La evolución natural se basa en la competencia entre las distintas especies por la obtención de los recursos naturales y entre individuos de la misma especie por la propagación del material genético. Esta lucha da como

resultado un proceso evolutivo inseparable del entorno. Pero la información y la complejidad no parecen haberse incrementado gradualmente a lo largo de la historia de la vida en la Tierra.

Los paleontólogos han descubierto, más bien, saltos abruptos en el incremento de la complejidad estructural y funcional del registro de fósiles (Fromm, 2004: 39). Es necesaria una separación entre microevolución y macroevolución, las cuales se rigen por un gradualismo de los cambios en el primer caso y por el saltacionismo en el segundo. La vida puede aumentar de complejidad de a saltos, sin obedecer a las leyes clásicas de la evolución de las especies que proponen un modelo exclusivamente gradual. La evolución puede ser, entonces, gradual y continua o puntuada y abrupta (Fromm, 2004: 3-4), tal como proponen Eldredge y Gould. Los cambios fruto de la competencia y la lucha dan origen, seguramente, a una fluctuación evolutiva gradual y continua, pero son en general cambios sin demasiada relevancia que originan especies aproximadamente igual de complejas que sus predecesoras. Los sucesos de aumento de complejidad están más bien relacionados con crisis biológicas. Un gran cambio en complejidad es a menudo la respuesta a un gran desafío o a una catástrofe medioambiental (Fromm, 2004: 140).

En condiciones de abundancia la vida tiende a competir entre sí, la cooperación no es necesaria; pero cuando sobreviene una crisis o catástrofe los sobrevivientes se ven obligados a ayudarse mutuamente para superarla. Es en esas ocasiones cuando suelen darse saltos de complejidad y estos rara vez se invierten. Es decir, que una vez surgida una entidad más compleja, esta tiende a persistir. Y lo mismo que ocurre con las especies animales o vegetales ocurre con las sociedades, con las células, con las macromoléculas o con la dinámica atmosférica y terrestre.

La teoría de las catástrofes puede también aplicarse al ámbito del diseño estructural para analizar el colapso simultáneo de las estructuras. El método de *modalidades de colapso simultáneo* (SMF) supone que una estructura se encuentra optimizada si todos sus componentes se encuentran al límite de la resistencia cuando la estructura completa está al borde del colapso. Normalmente, los límites de resistencia son considerados en este método a través de las condiciones de estabilidad elástica y no de la resistencia del material. El término 'simultáneo', por otra parte, implica que todas las piezas alcanzan su estado límite en una única hipótesis de carga (Gallagher, 1985: 4).

2.3.3. La teoría de la autoorganización

La *autoorganización* se define como el proceso a través del cual la organización interna de un sistema, normalmente abierto, aumenta de complejidad sin ser guiado por ningún agente externo, exhibiendo generalmente propiedades emergentes.

Jean-Marie Lehn, galardonado con el Premio Nobel de Química en 1987, citado por Jochen Fromm, menciona la autoorganización como la principal causa de la emergencia de la complejidad (Fromm, 2004: 21). Esta propiedad, por ejemplo, permite a los organismos adaptarse a su entorno, sobrevivir y evolucionar. Desde la materia dividida hasta la condensada, dice Lehn, luego organizada, viva y finalmente consciente, el camino es hacia el incremento de la complejidad a través de la autoorganización.

Desde la materia viva hasta la materia condensada, primero, y luego desde esta última hasta la materia organizada, viva y pensante, la expansión del universo nutre la evolución de la materia hacia un aumento de su complejidad mediante la autoorganización y bajo la presión de la información. La tarea de la química es revelar las vías de la autoorganización y trazar los caminos que conducen de la materia inerte —a través de una evolución prebiótica puramente química— al nacimiento de la vida, y de aquí a la materia viva, y luego a la materia pensante. (Lehn, 2011: 9).

Las propiedades que definen un determinado nivel de complejidad, resultan y pueden ser explicadas por aquellas pertenecientes al nivel precedente. Pero en cada nuevo nivel de complejidad emergen nuevas características que no existían en los niveles precedentes, que pueden deducirse de las características de los niveles inferiores, pero no reducirse a ellas (Fromm, 2004: 20).

Los biólogos Humberto Maturana y Francisco Varela, investigando la clase de sistema que es un ser vivo (Maturana et ál., 1998: 11), propusieron el término *autopoiesis* como la condición de existencia de los seres vivos en la continua producción de sí mismos. Según Maturana y Varela, son autopoieticos los sistemas que presentan una red de procesos u operaciones que continuamente especifican y producen su propia organización a través de la producción o destrucción de sus propios componentes, como respuesta a las perturbaciones del medio (Maturana et ál., 1998: 69), de modo que, aunque el sistema cambie estructuralmente, dicha red permanece invariante durante toda su existencia. Los seres vivos, según esta definición, son sistemas autopoieticos y están vivos solo mientras están en autopoiesis. Son redes de producción molecular en las que las moléculas producidas generan con sus interacciones

la misma red que las produce. Los seres vivos son sistemas determinados en su estructura (Maturana et ál., 1998: 24). Es una determinada organización lo que los caracteriza y no sus componentes (Maturana et al., 1998: 51), y esta organización está sujeta a las leyes físicas del entorno en que viven.

La autoorganización aparece también en algunos sistemas inorgánicos, por lo que presenta características que trascienden a las ciencias biológicas. En este sentido, la teoría de la autopoiesis proporciona una concepción del mundo que sugiere una continuidad entre la materia viva y la inerte.

El concepto de autoorganización implica, entonces, la existencia de sistemas con una capacidad de orden producido en virtud de sus propiedades materiales.

La creencia de que el flujo de información desde el ADN al ARN y desde este a las proteínas era irreversible, es decir, la noción de un código genético definitivo que especifica una función o una forma independientemente del contexto celular y medioambiental, conocida como el «dogma central» de la biología molecular, fue superada con el hallazgo de los primeros ejemplos de inversión de este flujo de información. Howard Temin descubrió en 1970 que los retrovirus, carentes de ADN, eran capaces de invertir el flujo de la información genética al sintetizar ADN a partir de ARN. Este fenómeno se denominó *transcripción inversa*. La información genética parece estar sujeta a influencias del contexto celular y medioambiental. Los genes pueden ser recodificados o editados por las células, pueden ser silenciados o convertidos a secuencias diferentes. La organización del genoma es infinitamente variable, dinámica y fluida, los genes mutan frecuentemente, algunas secuencias se borran y otras se agregan (Ho, 1997: 46).

Estos cambios se cree que pueden ocurrir por el normal desarrollo de los organismos o en respuesta a desafíos del entorno, a través de procesos de autoorganización.

2.3.4. La teoría de los fractales

[...] cuanto más exploramos el universo, más nos topamos con el elemento narrativo, presente a todos los niveles. Es inevitable pensar en Sherezade, que solo interrumpía una historia para empezar otra más hermosa si cabe. También la naturaleza nos presenta una serie de narraciones inscritas unas dentro de otras: la historia cosmológica, la historia a nivel molecular y la historia de la vida y del género humano hasta llegar a nuestra propia historia personal. En cada nivel asistimos al surgimiento de lo nuevo, de lo inesperado. (Prigogine, 1995: 1).

La teoría de los objetos fractales, de Benoît Mandelbrot, pretende construir una geometría de la discontinuidad y las turbulencias, una morfología del caos.

Entre 1975 y 1977, Mandelbrot elaboró la definición de *fractal* como un objeto geométrico generado por un proceso iterativo, cuya estructura básica se repite en diferentes escalas, es decir, que posee autosimilaridad exacta o estadística y cuya dimensión de Hausdorff es fraccionaria o no entera (Addison, 2001: 8; Talanquer, 1996: 21-26). A partir de esta definición se construyó un conjunto de nuevas reglas para explorar la geometría de la naturaleza, reconociéndose a los fractales como herramientas potencialmente útiles para analizar un gran número de fenómenos físicos (Talanquer, 1996: 21).

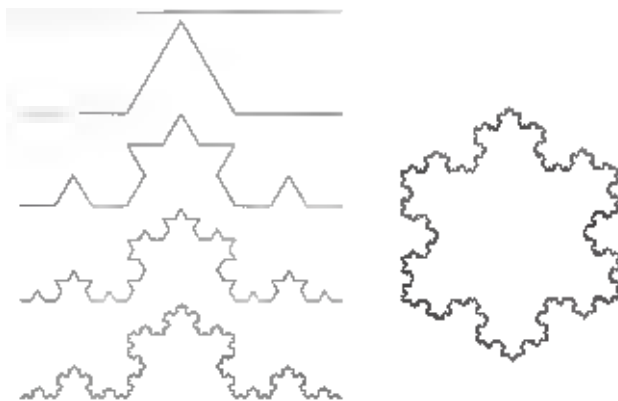


Figura 4. Curva de von Koch y copo de nieve de von Koch. Esquema realizado por el autor.

Las formas fractales, aquellas cuyas partes se asemejan al todo, sirven para modelizar muchas de las formas que pueden observarse en la materia biológica, al igual que las simetrías (las formas básicas que solo necesitan la mitad de información genética) y las espirales (las formas de crecimiento y desarrollo de una forma básica hacia la ocupación de un mayor espacio).

La fractalidad puede ser entendida como una de las herramientas a las que la evolución recurre para producir saltos cualitativos en la complejidad de las formas biológicas (Fromm, 2004: 3-4), es decir, posibilitan catástrofes o hechos extraordinarios que dan lugar a nuevas realidades más complejas, como las hojas que presentan una morfología similar a la pequeña rama de la que forman parte que, a su vez, presentan una forma similar a la rama mayor, que, a su vez, es similar a la forma del árbol y, sin embargo, cualitativamente

no es lo mismo una hoja (forma biológica simple) que una rama o un árbol (forma biológica compleja).

Muchas veces las formas fractales se adecuan a la definición anterior. Otras no y, en lugar de observarse la misma estructura en proporciones menores de la figura principal, serán evidentes rasgos y patrones nuevos. La fractalidad puede ser lineal o no lineal. Se denomina como *formas fractales lineales* a aquellas definidas por un simple cambio en la variación de sus escalas y que son, por lo tanto, idénticas en todas sus escalas hasta el infinito. Se denomina como *formas fractales no lineales* a aquellas que se generan a partir de distorsiones complejas o no lineales. La autosimilitud, por lo tanto, es exacta en las formas fractales lineales o regulares (Addison, 2001: 8) y estadística en las no lineales o caóticas (Addison, 2001: 27).

La primera forma fractal pura que se ha definido, el *polvo de Cantor*, fue descrita por el matemático alemán Georg Cantor en 1872. A pesar de ser una figura extremadamente sencilla, presenta autosimilitud a cualquier escala, su dimensión de Hausdorff es fraccionaria (con valor aproximado de 0,6309) y es producido por un proceso de iteración (Falconer, 2003: xviii). El polvo de Cantor se inicia con un segmento lineal que se divide en tres segmentos menores de la misma longitud, de los cuales se extrae el central. Este proceso se repite indefinidamente sobre los segmentos de los extremos que van permaneciendo y al final del mismo, si suponemos que existe un final, se habrá producido el polvo de Cantor.

La curva de Koch es una forma matemática fractal definida por Niels Helge von Koch en 1904. Esta curva parte de un segmento inicial que se divide en tres partes iguales, sustituyéndose la parte central por dos segmentos de la misma medida que forman un triángulo equilátero con el segmento suprimido. Cada uno de los segmentos obtenidos de la iteración anterior se vuelve a dividir en tres partes iguales y se procede sucesivamente de la misma manera. El *copo de nieve* de Koch es otra figura fractal ideada por Koch, similar a la anterior, pero a partir de los lados de un triángulo equilátero.

El triángulo de Sierpinski es un polígono fractal inventado por el matemático polaco Waclaw Sierpinski en 1915. En el interior de un triángulo equilátero (Falconer, 2003: xix-xx), se traza otro triángulo equilátero cuyos vértices coincidan con los puntos medios de los lados del triángulo original. Esta nueva figura tendrá una orientación invertida con respecto a la primera. A continuación se elimina de la figura ese nuevo triángulo invertido, de manera de conservar únicamente los tres triángulos equiláteros menores en que quedó dividido el triángulo original. Luego se repite o itera el mismo procedimiento

para cada uno de los tres triángulos menores y así sucesivamente, obteniéndose como resultado final un triángulo de Sierpinski.

Benoît Mandelbrot fue uno de los primeros científicos en utilizar ordenadores para estudiar la fractalidad. Analizó, por ejemplo, el conjunto que se obtiene como representación del sistema dinámico descrito por la ecuación $z_{n+1} = z_n^2 + c$, conocido como *conjunto de Mandelbrot* (Falconer, 2003: 223-242). Se trata de un sistema determinista pero impredecible, pues no hay ningún algoritmo que permita conocer, a priori, si un punto del plano pertenece al conjunto o no, solo lo podemos saber iterando. Es decir, se trata de un sistema caótico determinista con una estructura extraordinaria, como puede apreciarse ampliando la imagen y observando detalles a distintas escalas en su frontera.

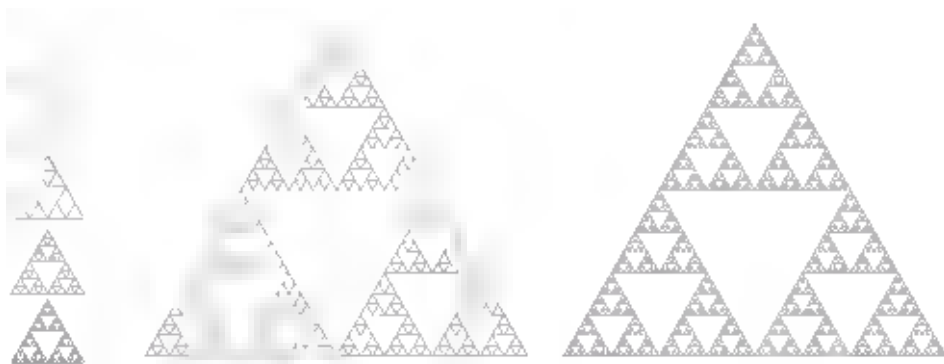


Figura 5. El triángulo de Sierpinski. Esquema realizado por el autor.

Una de las contribuciones más significativas de la geometría fractal ha sido su capacidad para generar nuevos modelos para la forma de ciertos fenómenos naturales, tales como plantas, nubes, formaciones geológicas o fenómenos atmosféricos. La forma de un cabello podría considerarse como fractal si se observa desde los niveles microscópicos la morfología de la queratina, que se presenta en forma de protofibrillas que se agrupan para formar microfibrillas, que a su vez se agrupan en macrofibrillas que forman, finalmente, las fibras de cabello. El diseño del sistema esquelético-muscular de una pierna humana, por ejemplo, sigue igualmente un principio fractal, desde la estructura primaria de proteínas como la queratina y el colágeno, pasando por la subestructura de los huesos, músculos, tendones y fascias, hasta la morfología de la pierna completa.

Capítulo 3. Los inicios de la modernidad en el siglo XVII

3.1. La relación entre forma y materia: el aporte de Galileo Galilei

La revolución científica ocurrida en el siglo XVII fue el resultado del abandono de la actitud espiritual clásica. En tanto que el hombre clásico o antiguo se dedicaba a la contemplación y estudio de las leyes naturales, el hombre moderno inició un proceso de dominio de la naturaleza.

Conocer era, para la ciencia aristotélica, reflejar mentalmente las estructuras esenciales del universo. La finalidad del hombre era dilucidar esos conocimientos, es decir, la contemplación de las leyes o esencias inmutables de todas las cosas. Los científicos del siglo XVII transformaron radicalmente este modo de pensar y vieron a la naturaleza como una gran máquina que, en última instancia, podríamos nosotros mismos diseñar. La vida contemplativa dejó paso así a la vida activa. La física cartesiana y la galileana serán uno de los mayores logros de este período y la geometría y las matemáticas serán los principales instrumentos desarrollados (Tzonis et ál., 1984: 27-53).

Para Galileo Galilei la naturaleza era un libro escrito en lenguaje matemático que había que aprender a leer.

En su libro *Il Saggiatore*, de 1623, decía:

La filosofía está escrita en ese grandísimo libro que tenemos abierto ante los ojos, quiero decir, el universo, pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, a conocer los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lengua matemática y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es imposible entender ni una palabra; sin ellos es como girar vanamente en un oscuro laberinto. (Galilei, 1984: 62-63).

3.1.1. Las máquinas

En su libro *Le Meccaniche*, de 1600, un tratado sobre máquinas simples siguiendo la escuela de Aristóteles, Galileo analizó la idea de «momento». Definió el concepto de *gravedad* como la tendencia natural de un cuerpo, determinada por la cantidad de materia que lo constituye, a moverse hacia abajo, tendencia que puede modificarse según las relaciones que cada cuerpo mantiene con las otras partes de un sistema mecánico. El momento es, entonces, según Galileo, la modificación de la intensidad de esa tendencia según la posición relativa de un cuerpo en una balanza, un plano inclinado, etc. El momento estático es su potencia evaluada por la distancia al centro de rotación del sistema, de donde se derivan las leyes de la palanca. El momento de descenso por un plano inclinado está en función de la inclinación del plano, desde un máximo para el plano vertical donde no se modifica la gravedad, hasta cero en un plano horizontal. El diseño de varios de los instrumentos mecánicos analizados en su obra, tales como la polea, el torno o la palanca, que permiten el movimiento de grandes pesos con el empleo de fuerzas reducidas o moderadas, estuvo basado en estos conceptos.

En la Jornada Segunda de su último libro, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (*Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*), de 1638, considerado el primer libro de la historia sobre mecánica de estructuras, observó que muchos aparatos que funcionaban sin problemas a una determinada escala, no lograban hacerlo correctamente, sin embargo, a una escala mayor.

Leonardo da Vinci, citado por Tzonis y Lefaivre (Tzonis et ál., 1984: 40), ya había dicho que «un soporte con doble diámetro que otro resiste ocho veces más carga que él, teniendo los dos las mismas alturas» y que «muchos soportes juntos son capaces de resistir una carga mayor que si están separados unos de otros».

Galileo comprendió que las propiedades geométricas de los cuerpos no eran las únicas que explicaban sus comportamientos; sino que era necesario también observar sus propiedades materiales. La geometría y las proporciones no pueden controlar, entonces, el comportamiento estructural, que está ligado también al material y al tamaño de la máquina (Tzonis et ál., 1984: 40).

Las edificaciones griegas, romanas y renacentistas se basaban en el uso de los órdenes arquitectónicos: un conjunto de leyes geométricas inmutables, deducidas de la naturaleza. Galileo, a partir de sus análisis de máquinas, refutó estas ideas y propuso un nuevo proceso de diseño: las máquinas están sometidas a condiciones materiales cambiantes que solo pueden conocerse a través de la observación. 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.

Las proporciones y la forma no la pueden preservar de la rotura. Observó, por ejemplo, la necesidad de emplear mayor número de puntales y andamios para sostener una galera de gran tamaño antes de su botadura al mar que los que necesitan las embarcaciones más pequeñas, para evitar la rotura a causa de su mayor peso propio (Galilei, 1976: 70).

[...] abandonad, pues, la idea [...] de que las máquinas y los artefactos compuestos de la misma materia y que mantienen con toda exactitud las mismas proporciones entre sus partes hayan de ser [...] proporcionalmente dispuestas a resistir y a ceder a los choques y violencias externas, puesto que se puede demostrar geoméricamente que las más grandes son siempre, proporcionalmente, menos resistentes que las menores. [...] hay un límite que se impone con necesidad no solo a todas las máquinas, sino a las naturales incluso, y más allá del cual no puede pasar ni el arte ni la naturaleza, ni siquiera en el caso de que las proporciones permanezcan invariables y la materia idéntica. (Galilei, 1976: 70).



Figura 6. Mecanismos estudiados por Galileo Galilei. Ilustraciones extraídas de *Le Meccaniche*, figuras 4, 5 y 7 (Galilei, 1960).

Si dibujáramos dos huesos que cumplieran la misma función en dos animales de distinto tamaño de modo que la longitud del más grande fuera el triple que la del más pequeño, analizó 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.

[...] dibujemos la figura de un hueso alargado solamente tres veces más de lo que era, pero habiendo aumentado su grosor en tal proporción que pudiese realizar en el animal grande la función que

correspondería al hueso más pequeño en el animal también más pequeño. [...] podéis ver que desproporcionada es la figura del hueso agrandado. De aquí se deduce que quien quisiera mantener, en su inmenso gigante, las proporciones que se dan entre los miembros de un hombre normal, tendría o bien que encontrar un material mucho más duro y resistente para formar así los huesos, o bien que admitir una disminución de su potencia en relación con la de los hombres de estatura normal; de otro modo, si su altura creciese de manera desmesurada, acabaría derrumbándose por obra de su propio peso. [...] pienso que un perro pequeño podría llevar sobre sí dos o tres perros iguales a él, mientras que no creo que un caballo pudiese sostener ni siquiera un caballo de sus mismas medidas. (Galilei, 1976: 237).

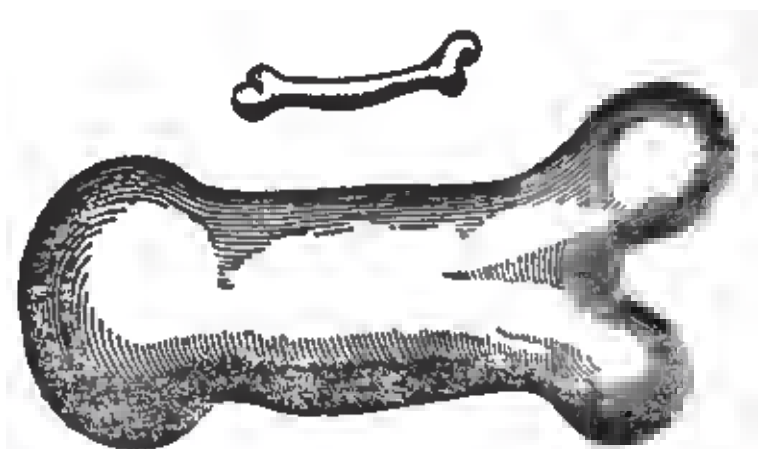


Figura 7. Dos huesos de distinto tamaño y similar resistencia. Ilustración extraída de *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, de Galileo Galilei (Galilei, 1976: 237).

La resistencia de los elementos estructurales depende, entonces, directamente, además del material, del tamaño que tengan y a medida que este 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, a través de los órdenes arquitectónicos, es, entonces, falsa.

Galileo Galilei observó los cuerpos y esqueletos de varios animales, como caballos, perros y hormigas, analizando la dependencia existente entre la

forma, el tamaño y el material. Estudió 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 mantuvo vigente hasta principios del siglo XIX, cuando Lamarck establezca la ciencia de la biología como *el estudio de los seres vivos*, que dio origen a las teorías organicistas.

3.1.2. La idea de límite

El propósito de Galileo no era contradecir la teoría aristotélica de la forma situada en un plano más elevado que la materia, sino simplemente alcanzar la eficacia en el arte de la construcción de máquinas e introduce la noción de *límite* (Tzonis et ál., 1984: 42). 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 la realización de experimentos. En la construcción de máquinas hay uno y solo un elemento estructural que, una vez cargado, funciona al límite entre la rotura y la no rotura, mientras que cualquier otro rompería o sería capaz de resistir un esfuerzo mayor. Comprendió, de este modo, la necesidad de establecer un método analítico para evaluar la resistencia de un elemento frente a las fuerzas exteriores.

En su libro *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, estableció una serie de proposiciones sobre el comportamiento resistente de distintas piezas sometidas a distintos tipos de carga (Galilei, 1976: 218-236). Estudió, por ejemplo, la resistencia a la rotura de una pieza prismática sosteniendo un mismo peso en su extremo, pero dispuesta con el lado mayor de su sección transversal en vertical o en horizontal y determina que la fuerza necesaria para llevar la pieza a su agotamiento en el primer caso es mayor que en el segundo. La misma regla o el mismo prisma que sea más alto que ancho, ofrecerá así mayor resistencia a la rotura de canto que de plano, dependiendo su rigidez de la proporción que guarden la altura y el espesor.

Dedujo que en los prismas de igual longitud pero distinto ancho, la resistencia crece en proporción al cubo de los diámetros de sus bases, que los prismas y cilindros que difieren en longitud y ancho tienen una resistencia a la rotura directamente proporcional a los cubos de los diámetros de sus bases e inversamente proporcional a sus longitudes respectivas y que las resistencias de dos cilindros de la misma cantidad de materia y de la misma longitud, uno de los cuales sea hueco y el otro macizo, guardan entre sí la misma proporción que sus diámetros.

Planteó, por otra parte, una serie de problemas a resolver, como, por ejemplo, determinar la proporción según la cual crece la intensidad del

peso propio (momento) con relación a la rotura de un prisma o cilindro que se alarga en sentido horizontal; o dado un cilindro o un prisma que tenga la mayor longitud compatible con no romperse debido a su propio peso y dada una longitud mayor, encontrar el grosor de otro cilindro o prisma que bajo la longitud dada sea *el único y el mayor* capaz de resistir su propio peso.

La mecánica, desde su nacimiento con Galileo Galilei, se conformó, así, como una teoría aplicable a cualquier tipo de estructuras, ya sean naturales o máquinas construidas por el hombre y pronto se trasladó a la arquitectura: a elementos constructivos y estructurales como pilares, ménsulas, cubiertas y muros, «así pues, poco a poco todo el conjunto del tejido constructivo se va considerando en analogía con la máquina» (Tzonis et ál., 1984: 41). Entonces fue que la forma en arquitectura empezó a entenderse, no tanto como idea abstracta determinada por la armonía y las proporciones, sino principalmente por el comportamiento de la materia: por sus materiales y sus dimensiones.

3.2. Los conceptos de eficacia y optimización

A mediados del siglo XVII los conceptos de *eficacia y optimización*, que confluyeron por primera vez en el diseño de máquinas y sobre todo de máquinas militares, comenzaron 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 normas clásicas. Se inició, así, un proceso irreversible, un nuevo tipo de pensamiento que se fue proyectando paulatinamente sobre el diseño de cualquier producto: el *concepto moderno de diseño* (Tzonis et ál., 1984: 31).

El beneficio económico, es decir, el control de los costos de la producción, se encuentra en el origen de la búsqueda de una organización racional de la materia en las construcciones. Por eso, el desarrollo del mercantilismo favorece el proceso de mecanización del diseño. En sus inicios, el nacimiento de este nuevo sistema conceptual tuvo muy poca repercusión. La difusión de la mecanización en la arquitectura fue un proceso lento en sus comienzos pero irrevocable. En la arquitectura militar es donde pueden encontrarse, ya a partir del siglo XVI, los primeros ejemplos y hacia fines del siglo XVIII, la mecanización del diseño rebasa los problemas de construcción y estabilidad en las obras edilicias para entrar en el funcionamiento propio del edificio. Comenzó, entonces, a exigirse a la arquitectura eficacia en todos sus ámbitos, inclusive en la organización espacial de actividades. Los proyectos de la Academia Francesa de las Ciencias para el Hotel Dieu de París, basados en estudios de circulación

de aire y el proyecto de Jeremy Bentham para el edificio Panopticon de 1787, que lograba el dominio visual absoluto de todo un gran espacio interior desde un único punto que no podía, a su vez, ser visto, puso en evidencia la difusión de estas nuevas ideas (Tzonis et ál., 1984: 43-44).

3.3. El reflejo en la arquitectura: la construcción eficaz y optimizada

3.3.1. La máquina militar: la fortificación abaluartada

Desde finales del siglo XV se produjo una escisión en el ámbito de la arquitectura de todo lo concerniente a las construcciones militares, de modo que la competencia en materia de fortificaciones recayó exclusivamente en ingenieros especializados que fueron denominados *ingenieros militares*. La norma de la eficacia fue aplicada por primera vez al diseño de máquinas en el ámbito específico de lo militar y fueron estos ingenieros los primeros en trasladarla y aplicarla a las construcciones arquitectónicas.

Francesco di Giorgio, citado por Tzonis y Lefaivre (Tzonis et ál., 1984: 43), señalando las ventajas del bastión triangular frente a la torre circular decía que «la fuerza de la fortaleza depende más de la cualidad de la planta que de el grosor de los muros». Durante el siglo XVI las fortificaciones evolucionaron en la búsqueda de la optimización entre los gastos de construcción, es decir, la longitud de la muralla a construir y la máxima seguridad, o sea, la impenetrabilidad de la fortificación. Durante los siglos XVII y XVIII la influencia de la máquina, como paradigma para el diseño de plantas de recintos amurallados, será cada vez mayor.

El invento del cañón, a finales de la Edad Media, obligó a repensar los perímetros amurallados que hasta entonces defendían asentamientos y centros poblados. 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 allí existentes, se convirtieron rápidamente en una fuerte amenaza. Los altos muros, muy efectivos frente a ataques con catapultas, cepos y otras armas antiguas, eran un objetivo fácil para el nuevo tipo de artillería, ya que una bala de cañón lanzada a menos de 100 metros de su objetivo era capaz de romper cualquier muralla de ladrillo o piedra. El rápido desarrollo de las armas de fuego pronto permitió lanzar proyectiles cada vez más rápidamente y con mayor precisión, por lo que resultaba cada

vez más fácil para el ejército atacante concentrar el fuego en una zona de la muralla a efectos de crear una brecha.

El arte de la fortificación consistió en brindar al ejército sitiado el mayor número de ventajas posible durante un enfrentamiento con el ejército sitiador, por lo que al momento de fortificar un recinto era necesario hacerlo, como decía Giacomo Lanteri en su libro *Due libri del modo di fare le fortificationi di terra intorno alle città e alle castella per fortificarle*, de 1559, a la proporción del poderío bélico del enemigo y no del propio.

Para oponerse con eficacia al poder destructivo de estas nuevas armas, los ingenieros italianos introdujeron una serie de innovaciones decisivas en los sistemas defensivos a lo largo del siglo XVI. Por un lado, las murallas pasaron a construirse con tierra y a revestirse con piedra o ladrillo para absorber mejor el impacto de los proyectiles lanzados por los cañones. Por otra parte, como no era posible alcanzar grandes alturas con este tipo de muros, a efectos de la vigilancia y defensa de la base de la muralla, esta comenzó a plegarse, surgiendo así los bastiones y los revellines que caracterizaron a este nuevo tipo de fortalezas. El *bastión* es un reducto fortificado que se proyecta hacia el exterior del cuerpo principal de la fortaleza y que se sitúa generalmente en las esquinas; fueron diseñados geométricamente a efectos de cubrir tanto los paños de muralla adyacentes como otros bastiones con fuego cruzado, evitando la aparición de ángulos muertos. El *revellín*, por su parte, es una fortificación triangular situada frente al cuerpo de la fortificación principal, generalmente del otro lado del foso, cuyo objetivo es dividir al ejército atacante y proteger también la muralla con fuego cruzado. Tanto bastiones como revellines eran utilizados como plataformas de artillería, obligando al ejército atacante a situarse más lejos de los muros y disminuyendo, de esta manera, su efectividad.

Comenzaron a construirse, además, terraplenes en pendiente llamados *glacis* para mantener a las murallas ocultas del fuego horizontal de artillería. El enemigo que se acercaba no veía más que un talud de tierra y no podía, por lo tanto, tirar contra la obra de mampostería, a la vez que se encontraba obligado a avanzar al descubierto (Griffith et ál., 2006: 39-41).

Con el fin de retardar aún más el momento en que el ejército atacante pudiera tomar la muralla, comenzaron a aparecer también otros dispositivos separados del cuerpo principal de la fortaleza, como las medialunas, las tenazas o las contraguardias, que no representaban un refugio para el asaltante una vez que hubieran sido tomados.

Como resultado de todas estas transformaciones, se eliminaron las murallas planas y rectangulares típicas de la Edad Media que permitían al

nuevo enemigo concentrar fácilmente el fuego de los cañones en un punto de la muralla y surgieron las fortalezas con forma de estrella, capaces de dispersar el poder de fuego del nuevo atacante.

Para conquistar mediante asalto este tipo de fortificaciones, era necesario establecer un sitio que las privara de todo contacto con el exterior por un período prolongado y situar una batería de cañones que, tras miles de disparos, creara una brecha en la muralla que permitiera el asalto de la infantería. La necesidad de bloquear dichas fortalezas durante períodos prolongados, a veces más de un año, requería un elevado número de soldados y aumentaba enormemente el coste de la guerra, por lo que pocos ejércitos de esa época eran realmente capaces de sitiar una ciudad dotada con este tipo de defensas.

Las fortificaciones tipo traza italiana tuvieron un gran éxito y fueron utilizadas durante los siguientes 300 años en toda Europa, especialmente en Francia y en los Países Bajos. Estas nuevas técnicas surgidas en Italia se recogieron en el primer tratado francés de fortificaciones, escrito por Jean Errard y publicado en París en el año 1600: *La fortification réduite en art et démontrée*, que es un antecedente de la obra de Vauban.

A finales del siglo XVII Vauban perfeccionó el diseño de este tipo de fortificaciones construyendo numerosas ciudadelas abaluartadas con revellines, glacis, medialunas, tenazas, reductos, palisadas, fosos y todos los avances de su época. En la evolución de su obra, que pretendió alcanzar progresivamente la máxima eficacia defensiva multiplicando los obstáculos para el atacante, de modo que pudiera incluso caer un bastión y mantenerse a salvo la fortaleza, es posible distinguir tres sistemas amurallados diferentes. Neuf-Brisach, ubicada en las proximidades de la frontera con Alemania, es la última ciudad fortificada diseñada y construida por Vauban entre los años 1699 y 1702; con una planta octogonal de 800 metros de diámetro y un espesor de muralla de 4,3 metros, es el único ejemplo construido en Europa del tercer sistema de fortificaciones.

Cristóbal de Rojas en su tratado de 1598 *Teoría y práctica de fortificación conforme a las medidas y defensas de estos tiempos* y Diego González de Medina Barba en su *Examen de fortificación* de 1599, fueron quienes recogieron y sistematizaron primero, en España, el conjunto de conocimientos que había sido elaborado por los tratadistas italianos y franceses acerca de las nuevas fortificaciones abaluartadas (Carvajal, 1985: 55). Según Cristóbal de Rojas, el ingeniero militar debía tener conocimientos de geometría, matemáticas y experiencia en la materia.

En su tratado de 1598 analizó los sistemas modernos de fortificaciones abaluartadas, aconsejando distintas maneras de remodelar o sustituir los sistemas defensivos contruidos según las antiguas normas medievales de diseño, por modernos recintos capaces de resistir el ataque de un ejército provisto de cañones.

En 1582, con la iniciativa del entonces Aposentador Mayor Juan de Herrera, Felipe II fundó la Academia Real Mathematica de Madrid, con el objetivo de formar ingenieros militares que pusieran sus conocimientos al servicio de la Corona Española. En 1674 se fundó en Bruselas la Academia Militar del Ejército de los Países Bajos. La Real y Militar Academia de Matemáticas de Barcelona, heredera de la tradición docente de la Academia de Bruselas, fue fundada por Felipe V en 1720 como Primera Academia Militar de mis Reinos, con el objetivo de instruir a los oficiales destacados del ejército español. Más adelante, en 1803, se creó la Academia Especial del Cuerpo de Ingenieros de Alcalá de Henares y en 1805 la Academia de las Armas Generales de Zamora, que asumieron las funciones de la Academia de Barcelona.

Las materias impartidas en estas academias militares, entre las que se podían destacar aritmética, geometría práctica, trigonometría, topografía, artillería, fortificación, ataque y defensa de las plazas, mecánica y maquinaria, hidráulica, construcción y arquitectura civil, tenían como principal objetivo la difusión de los nuevos conocimientos científicos adquiridos a lo largo de los últimos dos siglos.

A lo largo del siglo XVIII sus alumnos, mayoritariamente oficiales y cadetes procedentes de los regimientos de infantería, caballería y dragones, eran los que, como funcionarios al servicio de la Corona Española, se hicieron cargo de la mayoría de las obras públicas construidas en España y en sus colonias, tales como caminos, carreteras, puertos, canales, arsenales y fortificaciones, aplicando la nueva norma de la eficacia.

3.3.2. Evolución de los perímetros amurallados europeos en los inicios de la modernidad

Los perímetros amurallados para la defensa de ciudades o plazas fueron contruidos en Europa, desde la Antigüedad y hasta el siglo XV, con paños de muralla de planta circular o poligonal, de una altura importante, a los que podían eventualmente adosarse torres. Vitruvio establecía, en el capítulo VI del libro primero de su tratado, que tanto los paños de muralla como sus torres adosadas, debían tener forma preferentemente circular, evitándose siempre los ángulos salientes.

Auguste Choisy en su *Historia de la arquitectura* establecía que en la Edad Media las murallas siempre eran trazadas según el relieve natural del terreno y se interrumpían por torres flanqueantes cada 40 metros, como máximo, de modo que cada paño de muralla comprendido entre dos torres pudiera ser defendido por tiros cruzados de ballesta. La forma considerada como ideal para las torres, por otra parte, era la circular, aunque por razones de economía solían hacerse muchas veces cuadradas (Choisy, 1980: 617-621).

La evolución de las fortificaciones concebidas para la defensa frente a ataques de ejércitos equipados con armas arrojadizas y escaleras sufrió transformaciones que podrían considerarse menores, desde la Antigüedad hasta principios del siglo XV. Fueron construidas a lo largo de este período en distintas regiones y por diferentes civilizaciones, en distintos materiales, con paños de muralla simples o dobles, con o sin torres adosadas, con perfiles almenados o rectos, pero siempre con formas más o menos simples en planta: circulares, rectangulares o siguiendo el perfil del terreno o de la ciudad preexistente que defendían. Alcanzaban, por otra parte, la mayor altura posible atendiendo a los equipamientos disponibles para su construcción y a otros criterios de optimización de recursos materiales.

Pero el rápido desarrollo de las armas de artillería durante los siglos XV y XVI llevó a una transformación geométrica repentina y radical de las fortificaciones, suceso que podría catalogarse como hecho extraordinario o catástrofe. Súbitamente, como respuesta defensiva al poderío de las nuevas armas, aparecieron las plantas en forma de estrella y se redujo drásticamente la altura de los paños de muralla que, cuanto más altos fueran, más vulnerables resultaban a los tiros de cañón.

La evolución geométrica de las fortificaciones, que pasó a tener como objetivo la optimización de la relación entre la superficie de muralla a construir y la seguridad frente a un ataque con cañones, llevó a la aparición progresiva de bastiones, medialunas, revellines y glacis, que fueron definiendo un perímetro amurallado estrellado con características fractales.

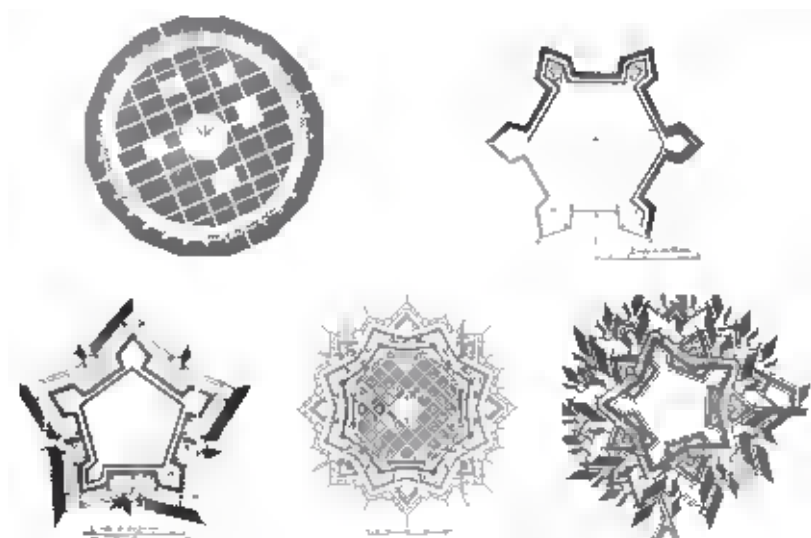


Figura 8. Algunos perímetros amurallados europeos ordenados cronológicamente.

Notas: De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: A: Planta de una ciudad. Ilustración extraída de Los Diez Libros de Arquitectura, de Vitruvio. B: Plano para delinear la línea magistral del recinto de una plaza según sistema de Vauban. Lámina 3 de «Elementos de fortificación», de Le Blond, extraída de Los tratados de arquitectura militar publicados en España durante el reinado de Carlos III. C: Plano de una plaza fortificada. Grabado de Manuel Rodríguez; lámina 1 de «Elementos de fortificación», de Le Blond, extraída de Los tratados de arquitectura militar publicados en España durante el reinado de Carlos III. D: Plano de Neuf Brisach, Vauban, 1699-1702. E: Ciudadela de Lille. Plano de Müller, realizado en 1746, sobre el proyecto de Vauban.

Cada nueva punta que aparecía tenía su razón de ser en la defensa a una determinada distancia y con un determinado ángulo de los paños adyacentes de muralla con un tiro de cañón. Esta súbita transformación de una tipología constructiva y estructural, que no había sufrido cambios importantes desde la Antigüedad, puede interpretarse como un salto repentino o puntuado. Formas más complejas aparecieron como respuesta a un cambio en el entorno: la presencia de un arma de ataque y de defensa más sofisticada y poderosa, con el objetivo de optimizar la relación entre costos de construcción y beneficios de protección. Estas formas emergentes tuvieron características fractales que recuerdan al copo de nieve de von Koch.

Tal como ocurrió en la evolución de algunas formas naturales, la búsqueda de la eficacia condujo a la geometría de los perímetros amurallados europeos de los siglos XVI y XVII a adquirir características fractales.

3.3.3. Cálculo y experimentación

A partir de los estudios sobre elasticidad de Robert Hooke, quien buscaba obtener un resorte espiral que reemplazara el péndulo de los relojes, surgió en 1678 la conocida como *Ley de Hooke* (Timoshenko, 1957a: 2-3). Su expresión «*Ut tensio sic vis*» (como la tensión así es la fuerza), se convirtió en una de las leyes de la mecánica de materiales más influyente en el desarrollo de la ingeniería estructural durante el siglo XIX.

A finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII, diversos científicos se dedicaron a estudiar el problema de la flexión. Mariotte, en 1670, aplicó la Ley de Hooke a las fibras de una viga y observó que algunas de ellas se estiraban y otras se acortaban y definió como frontera la profundidad media de la viga, desarrollando el concepto de «eje neutro» (Benévolo, 1987: 20). En 1717, Johann Bernoulli enunció el principio de los desplazamientos virtuales, método empleado aún hoy en la determinación de las deformaciones elásticas en estructuras. Posteriormente su hijo, Daniel Bernoulli, estudió el problema de la determinación de la curva elástica de barras flexionadas. Leonard Euler, influido por Daniel Bernoulli, estudió los problemas de las curvas elásticas de vigas y pilares y empleó el método del Trabajo Mínimo; contribuyó, además, al avance de la disciplina con su discusión sobre el pandeo.

Charles August Coulomb publicó en 1776 el primer análisis correcto de los esfuerzos en una viga con sección rectangular. Aplicó la Ley de Hooke a las fibras, situó la superficie neutra en su posición correcta, desarrolló el equilibrio de las fuerzas en la sección con las fuerzas externas y evaluó correctamente los esfuerzos. También consideró la etapa plástica e indicó que en la rotura, bajo ciertas condiciones, la superficie neutra debería moverse a otra posición. Thomas Young, por otra parte, introdujo en este período el concepto de «módulo de elasticidad». Trató también problemas de torsión de ejes y flexión de vigas en voladizo y el problema de la tensión y compresión excéntrica en barras de sección rectangular.

Louis Marie Henri Navier publicó en 1826 la primera edición de sus *Leçons*, el primer gran texto de mecánica en la ingeniería, basado en las lecciones impartidas por él mismo en la École Polytechnique de Paris (Benévolo, 1987: 20). No solo representaba un buen tratado sobre la resistencia y las deformaciones de vigas de cualquier sección, sino que, además, incluía análisis de arcos, columnas con cargas excéntricas, puentes colgantes y otros numerosos problemas técnicos. Navier fue quien desarrolló la primera teoría general de los sólidos elásticos, así como el primer tratamiento sistemático de la teoría de estructuras.

Lamé y Clapeyron introdujeron el concepto de igualdad del trabajo externo e interno en una estructura deformada. En 1833 publicaron un artículo que presentaba importantes avances sobre el análisis de esfuerzos en cilindros y esferas huecas y que introducía la idea del elipsoide de esfuerzos. En 1852, Lamé publicó el primer libro sobre elasticidad y en 1857 Clapeyron presenta su *teorema de los tres momentos* para el análisis de vigas continuas.

Estos y otros refinamientos físicos y matemáticos fueron fundamentales en el siglo XIX para el auge de las estructuras de acero y a principios del siglo XX para el desarrollo de nuevos sistemas estructurales. El perfeccionamiento de la imprenta, por otra parte, favoreció la rápida difusión de todos estos nuevos conocimientos.

La Science des Ingénieurs, de Bernard Forest de Belidor, publicado en París en 1729, es considerado el primer tratado sobre problemas de construcción basado en principios matemáticos y métodos algebraicos en lugar de aplicar las reglas tradicionales (Collins, 1998: 191), o el primer gran tratado de ingeniería moderna que representó un cambio de dirección en el dimensionamiento de la estructura a partir de procedimientos numéricos (Galindo, 2000: 47). Este tratado, que consta de seis libros organizados en dos volúmenes, presenta diversas teorías abstractas surgidas de los avances en los conocimientos de las leyes de la mecánica, expone un conjunto de conocimientos teóricos y empíricos acerca de la materia y trata de la manera de resolver tipológicamente una edificación, de las estimaciones que es necesario realizar para su puesta en obra y de las decoraciones, defendiendo sistemáticamente el álgebra y la mecánica como el lenguaje en que deberían expresarse los conocimientos arquitectónicos. El primer libro está consagrado al dimensionamiento de muros de contención; en el segundo se analiza la mecánica de bóvedas y en el tercero, las propiedades físicas y la aplicación en la construcción de materiales como piedra, ladrillo, cal, arena, puzolana, yeso y morteros (Galindo, 2000: 53).

El propósito principal de este tratado es sustituir la experiencia por un nuevo sistema teórico como vía para alcanzar el verdadero conocimiento. Los saberes que resultan de la práctica y que se transmiten de generación en generación reproducen sistemáticamente los mismos errores, según Belidor, citado por Galindo, y el conocimiento permanece estancado «en un estado de imperfección, tal como ocurre con la arquitectura» (Galindo, 2000: 48), que es incapaz de resolver analíticamente problemas que requieran de conocimientos matemáticos. El moderno ingeniero, al contrario del arquitecto que es incapaz de asimilar los nuevos conocimientos científicos, tiene la responsabilidad de la eficiencia (Galindo, 2000: 48-51).

Mientras tanto, en el ámbito académico de Francia y por orden de Jean-Baptiste Colbert, ministro de finanzas de Luis XIV, comenzó a realizarse un estudio exhaustivo de los materiales de construcción utilizados en la época. Empezó a observarse detalladamente, por ejemplo, la calidad de las piedras empleadas en París y sus alrededores y el papel que los factores climáticos jugaban en su deterioro (Tzonis et ál., 1984: 46). A estos siguieron otros estudios: ensayos de resistencia de barras de madera, metal y vidrio, realizados por Mariotte entre 1670 y 1680; pruebas de deformación de vigas de madera realizadas por Parent entre 1707 y 1708; ensayos de pandeo previo a la rotura realizados por Buffon; etc.

De este modo, en 1729 existían ya numerosas investigaciones para determinar las resistencias a compresión, tracción y flexión de maderas, metales y vidrio (Collins, 1998: 191). Estos pasos hubieran sido inconcebibles sin el apoyo institucional y posibilitaron la construcción de proyectos como el puente sobre el Sena en Neuilly (1768-1772), diseñado por Rodolphe Perronet, cuyos pilares fueron dimensionados, por primera vez en la historia, mediante estrictos cálculos mecánicos y a diferencia de puentes anteriores en los que el ancho se acotaba como un quinto de la luz de los tramos que sobre ellos descansaban, pudieron reducirse aquí a un décimo (Collins, 1998: 190; Tzonis et ál., 1984: 46).

Para la construcción de la iglesia Santa Genoveva de París, actual Panteón (1764-1790), proyectada por el arquitecto Jacques Soufflot en 1755 y culminada, tras su muerte, por Jean Baptiste Rondelet y Maximilien Brébion, se realizó una enorme cantidad de ensayos y estudios en todas las canteras de Francia y en parte de Europa, a efectos de encontrar el tipo de piedra idóneo para resistir las tensiones originadas por las descargas de la gran cúpula. En esta obra se pretendió dar a cada elemento estructural una función estática precisa y las mínimas dimensiones necesarias para desempeñar adecuadamente su función, para lo cual se determinó el concepto de coeficiente de seguridad (Benévolo, 1987: 20). Por otra parte, se introdujo el uso del hierro para mejorar la unión y trabazón de los sillares, garantizándose la estabilidad de la cornisa a través de una tupida red de barras metálicas dispuestas de acuerdo a los esfuerzos de la piedra, «casi como la armadura de una obra moderna en hormigón armado» (Benévolo, 1987: 27).

Rondelet, quien disponía de toda la información acerca del diseño de esta iglesia, publicó en París, a partir del año 1802, su tratado *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*. Se trata del primer tratado histórico de construcción desvinculado de otras cuestiones arquitectónicas, que ha cumplido un rol primigenio con respecto a la teoría de la construcción contemporánea, abarcando temas como albañilería, carpintería, procedimientos de dimensionado

de muros, bóvedas, etc., que hasta el momento eran objeto de publicaciones aisladas, pero que no formaban parte de los tratados arquitectónicos (González Moreno-Navarro, 1993: 191). Según Rondelet, citado por Collins, «el fin esencial de la arquitectura era construir edificios sólidos empleando cantidades exactas de materiales seleccionados y distribuyéndolos con destreza y economía. [...] construir edificios que combinaran de la forma más bella las partes necesarias para su fin» (Collins, 1998: 209).

El gran aporte de la ingeniería al diseño arquitectónico y estructural, en este período, es la abstracción en la definición de los elementos estructurales que dejan de ser considerados como elementos estándar de los órdenes clásicos (Collins, 1998: 192), con proporciones constantes, para comenzar a ser diseñados en función de su material y de las cargas que debían soportar.



Figura 9. Iglesia Santa Genoveva de París, diseñada por Jacques Soufflot (1764-1790). Fotografía del autor, 2006.

Durante el siglo XVII, por otra parte, ya se habían generalizado en Europa las políticas económicas mercantilistas, con el consiguiente auge de las estrategias orientadas a conseguir balanzas comerciales favorables en los distintos estados. Para ello resultaba fundamental restringir la importación de productos, al mismo tiempo que fomentar la producción nacional, de modo que los estados se propusieron impulsar, mediante leyes, tanto las industrias nacionales como las privadas. Francia apostó por este modelo en tiempos de Jean-Baptiste Colbert, quien impulsó la creación de industrias estatales

y favoreció a un amplio conjunto de empresas privadas a las que distinguió con el título de «manufacturas reales». Entre las industrias vinculadas a la construcción impulsadas en este período en Francia pueden destacarse las fundiciones, los arsenales y la producción de vidrio. Surge, entonces, por primera vez y de manera aún incipiente, la posibilidad de industrializar la arquitectura y de aplicar la norma de la eficacia a la producción arquitectónica.

3.3.4. La escisión de los estudios de diseño y mecánica

Durante el siglo XVII, en la Academia Real de Arquitectura de Francia tenían similar importancia las discusiones sobre la mecanización del diseño que aquellas sobre estética. Sin embargo, pronto empezó a observarse un distanciamiento entre la búsqueda de satisfacción estética y la mecanización de la arquitectura, regida por la norma de la eficacia económica. La satisfacción estética, que implicaba la búsqueda del placer en la organización visual de los elementos constructivos, puede considerarse complementaria al proceso de mecanización, pero ambos procesos se convirtieron con el tiempo en antagónicos. (Tzonis et ál., 1984: 48-49).

La organización de los estudios académicos en Francia, que se encontraba a la vanguardia de los progresos científicos de la época, sirve de modelo para varios países de Europa (Benévolo, 1987: 22). En 1747 se estableció la École des Ponts et Chaussées (Escuela de Puentes y Caminos) en París, que asumió las enseñanzas técnicas impartidas por la vieja Academia Real, y en 1748 se fundó la École du Génie Militaire de Mézières (Escuela de Ingenieros Militares de Mézières) (Collins, 1998: 189).

Fue durante la segunda mitad del siglo XVIII, por lo tanto, cuando la ciencia de la ingeniería comenzó a existir como ciencia independiente en el mundo académico y surgió una nueva figura: el ingeniero civil moderno, que basaba sus diseños en el cálculo científico. Se estableció, por primera vez en esta época, la dualidad entre arquitectos e ingenieros. El prestigio de la antigua Academia hizo sombra sobre las escuelas de ingeniería en sus inicios, pero el progreso de la ciencia fue ampliando paulatinamente el campo de actuación de los ingenieros y restringiendo el de los arquitectos. A finales de este siglo surgieron dos instituciones nuevas en París: la Escuela de Bellas Artes y la Escuela Politécnica, que sustituyeron a la vieja Academia y desarrollaron con su propio estilo de enseñanza y sus propias ideas el concepto de diseño (Tzonis et ál., 1984: 48-49). Este modelo francés de enseñanza fue seguido en varios países europeos con la fundación, a principios del siglo XIX, de diversas escuelas técnicas con planes de estudios basados en los parisinos: en Praga en 1806, en Viena en 1815 y en Karlsruhe en 1825 (Benévolo, 1987: 22).

Parte II. Las formas estructurales en la arquitectura reciente

Capítulo 1. El análisis estructural a principios del siglo XX

James Maxwell desarrolló el primer método de análisis de estructuras estáticamente indeterminadas, basado en la igualdad entre la energía interna de deformación de una estructura cargada y el trabajo externo realizado por las cargas aplicadas. Posteriormente, presentó su diagrama de esfuerzos internos para estructuras de barras, que reúne en un solo trazado todos los polígonos de equilibrio de los nudos de una estructura reticulada. Este diagrama fue posteriormente desarrollado por Luigi Cremona, por lo que hoy se conoce como el *diagrama de Maxwell-Cremona*.

Enrico Betti publicó en 1872 una generalización del teorema de Maxwell, hoy conocida como el *teorema de reciprocidad de Maxwell-Betti*.

Otto Mohr desarrolló, en 1868, un método para determinar las deformaciones en una viga, conocido como el *método de la viga conjugada*. Desarrolló también una extensión del método de Maxwell para el análisis de estructuras indeterminadas, utilizando los principios del trabajo virtual y complementó el diagrama de Williot para el análisis gráfico de deformaciones de reticulados, desarrollando el hoy conocido como *diagrama de Mohr-Williot*. En 1882 creó una técnica para representar gráficamente los esfuerzos en los distintos puntos de un sólido que permite, a su vez, visualizar las relaciones entre los esfuerzos normales y cortantes, determinar las tensiones principales, las máximas tensiones de corte y las tensiones en planos inclinados (Gere, 2007: 483): el *círculo de Mohr*.

Alberto Castigliano presentó, en 1873, el principio del *trabajo mínimo*, que había sido sugerido anteriormente por Menabrea y que es hoy conocido como el *primer teorema de castigliano*. En 1879 publicó en París su libro *Théoreme de l'Équilibre de Systèmes Elastiques et ses Applications*, fundamental en el desarrollo del análisis hiperestático de estructuras.

Por su parte, Hardy Cross publicó, en 1930, su *Método de distribución de momentos*, que revolucionó el análisis de las estructuras de pórticos continuos. Este método de aproximaciones sucesivas evade la resolución de sistemas de ecuaciones, como las presentadas en los métodos de Mohr y Maxwell y no será hasta las últimas décadas del siglo XX, cuando la resolución de sistemas de ecuaciones deja de ser un problema con el auge de los programas informáticos para cálculo estructural, que su popularidad caiga.

A fines del siglo XIX se generalizó la idea de que las entidades físicas, naturales o artificiales están formadas por una materia activa y otra pasiva, es decir, materia encargada de la estabilidad y materia sin la cual la estática continuaría verificándose (Cardellach, 1970: 5). El desarrollo del hormigón armado y la experiencia que se fue adquiriendo en su empleo llevó al vaciado paulatino de las antiguas estructuras macizas, tendiendo a permanecer en las construcciones únicamente las líneas de firmeza. Se tendió a emplear cada vez más la mínima cantidad de materia y a hacerla trabajar uniformemente al máximo de su resistencia. Comenzaron a desarrollarse diversos métodos para descubrir la forma y la ubicación de esas líneas de firmeza de los miembros resistentes y empezó también a estudiarse la aptitud de las distintas formas para reaccionar frente a las acciones exteriores. El equilibrio estático en una estructura se supondrá generado por las reacciones internas en la masa de los materiales estructurales, que se oponen a las acciones exteriores. El análisis de este equilibrio puede estudiarse seccionando la estructura transversalmente mediante un plano deslizante (Cardellach, 1970: 16), de modo que quede siempre dividida en dos regiones y debe verificarse que las fuerzas exteriores actuantes en una región se equilibren con las interiores de la otra. Si se determina el «eje central de momentos» para cada uno de los sistemas de fuerzas que quedan en una de las regiones, por ejemplo la izquierda, a medida que el plano seccionador se desliza, se podrá determinar el lugar de los puntos del espacio para los que el momento es mínimo. Este lugar geométrico es una línea del espacio, en general alabeada, que se ha llamado «línea potencial de acción externa» (Cardellach, 1970: 17) o «línea de presiones». Si la fibra media de la estructura se adapta a esta línea, la estructura resultaría solicitada únicamente a compresiones o tracciones. De esta forma es posible materializar los puntos estratégicos del espacio, desde el punto de vista mecánico, cuya situación es la más ventajosa para resistir los sistemas de fuerzas exteriores y, por lo tanto, la forma de la estructura cuyo dimensionado resulta el más racional y económico.

De admitirse la inexistencia de flexiones en las barras, puede plantearse la descomposición de la fuerza exterior en tantas componentes como barras

afectadas (Cardellach, 1970: 23), sentándose así las bases de los métodos de cálculo de sistemas de múltiples elementos articulados en forma de celosías o estructuras cuyos miembros están constituidos por múltiples elementos articulados. En estas estructuras se supone que las piezas concurren a una articulación que evita todo efecto de empotramiento y el cálculo parte del principio de una uniformidad de reacciones en la materia. Las secciones transversales de cada barra tienden a separarse o a aproximarse paralelamente en función de estas fuerzas externas y a estas acciones se oponen reacciones de la materia rigurosamente uniformes por unidad de superficie. Considerando una sección cualquiera de la estructura, la resultante de las fuerzas en una de las dos regiones en que queda dividida podría descomponerse gráficamente sobre las direcciones de las barras intersectadas por la sección considerada. Este es el sistema seguido por Cullman, Ritter, Maxwell y Cremona para el análisis de las estructuras de barras.

Capítulo 2. Las estructuras de barras

2.1. Surgimiento de las estructuras trianguladas

2.1.1. El desarrollo de las cometas celulares

El diseño de sistemas estructurales basados en la triangulación del espacio tuvo origen a finales del siglo XIX y las primeras experiencias en este campo surgieron en la evolución del diseño de cometas. Lawrence Hargrave introdujo, en 1893, el concepto de *montaje celular* con el diseño de una cometa en forma de caja, compuesta por dos células rectangulares unidas (Bell, 1903). Este modelo representó una mejora sustancial en la capacidad de elevación e inspirándose en la observación de ciertas aves que eran capaces de levantar vuelo sin batir sus alas, inició una búsqueda de formas aerodinámicas que lo llevaran al principio de que dos o más superficies, una encima de la otra, logran mejor sustentación que una única superficie más larga.

El espacio intermedio entre ambas células es la característica esencial de este diseño y de él depende la estabilidad del vuelo. Cuanto mayor sea, la cometa tenderá a adoptar una posición más horizontal en el aire y los movimientos verticales y las oscilaciones tenderán a desaparecer. Pero este diseño resultó, según Graham Bell, un tanto frágil y requería la incorporación de piezas adicionales para evitar deformaciones por flexión o torsión. Estos añadidos restaban en general eficiencia, aumentando la relación entre el peso y la superficie de vela expuesta e incrementando la resistencia frontal al paso del viento a través de la cometa. La adopción de la forma triangular para las celdas implica un considerable aumento de resistencia estructural sin necesidad de utilizar riostras internas. Pero este aumento se lograba únicamente en la dirección transversal. En la dirección del eje longitudinal,

sin embargo, la estructura seguía siendo débil y era necesaria la adición de riostras diagonales que, por no encontrarse en la dirección del viento, no afectaban a la resistencia frontal de la cometa, pero añadían algo de peso.

Alexander Graham Bell propuso, entonces, la forma tetraédrica para los elementos estructurales o armazones y en especial el tetraedro regular, formado por cuatro triángulos equiláteros y seis aristas iguales. Con esta geometría se optimizaban las características de resistencia y ligereza de las cometas. En 1903 publicó un artículo en la revista *National Geographic Magazine*, titulado «The Tetrahedral Principle In Kite Structure», en el que intentaba resolver el problema de la construcción de una máquina más pesada que el aire que pudiera volar y alojar tripulación. Una máquina voladora adecuadamente construida, decía, debería ser capaz de volar como una cometa y, a la inversa, una cometa adecuadamente construida debería poder ser usada como máquina voladora si fuera autopropulsada (Bell, 1903: 219-251).



Figura 10. Evolución del modelo de cometa de Lawrence Hargrave. Ilustraciones realizadas por el autor a partir de las descripciones en «The Tetrahedral Principle In Kite Structure», (Bell, 1903).

Hasta el momento prevalecía la creencia de que cuanto mayor fuera el tamaño de un artefacto volador, más dificultoso resultaría elevarlo en el aire. El matemático Simon Newcomb, en su artículo «Is the Airship coming?», de 1901, propuso construir dos máquinas voladoras con la misma forma y los mismos materiales, pero de modo que el tamaño de una fuera el doble del tamaño de la otra. El peso de los cuerpos es proporcional al cubo de sus dimensiones. El cubo de 2 es 8, por ello, la máquina pesada pesará 8 veces más que la ligera. Pero para las superficies se aplica el cuadrado de la dimensión. Como el cuadrado de 2 es 4, la máquina más pesada expone 4 veces más superficie de vela al aire y, por ello, tendrá desventaja en la relación entre la superficie de vela y el peso. Newcomb concluye, por lo tanto, que si se agranda lo suficiente

una estructura eficiente a pequeña escala, terminará resultando demasiado pesada como para volar (Newcomb, 1901: 432-435).

Let us make two flying machines exactly alike, only make one on double the scale of the other in all its dimensions. We all know that the volume, and therefore the weight of two similar bodies are proportional to the cubes of their dimensions. The cube of two is eight. Hence the large machine will have eight times the weight of the other. But surfaces are as the squares of the dimensions. The square of two is four. The heavier machine will therefore expose only four times the wing surface to the air, and so will have a distinct disadvantage in the ratio of efficiency to weight. (Newcomb, 1901: 432-435).



Figura 11. Modelo del Mabel 2, construida con células tetraédricas; Popular Science Monthly Volumen 64 (1903-1904).



Figura 12. Modelo de una cometa flotante, construida con células tetraédricas; Popular Science Monthly Volumen 64 (1903-1904).

Efectivamente, muchos investigadores cayeron en el error de creer que grandes estructuras eran capaces de volar, porque un modelo hecho a menor escala había demostrado ser eficiente. Graham Bell se dio cuenta, sin embargo, que este razonamiento era válido para dos modelos idénticos que únicamente difieran en sus dimensiones, pero si las cometas grandes estaban compuestas por pequeñas cometas formando una estructura celular, los resultados eran diferentes. Las dimensiones pueden incrementarse sin que crezca la relación entre el peso y la superficie de sustentación siguiendo el principio tetraédrico. La forma final de la cometa, por otra parte, no tiene que ser necesariamente tetraédrica (Bell, 1903: 219-251). Allí donde dos células se encuentran se juntan también dos barras, pero esta redundancia es innecesaria, una única barra puede cumplir la función de las dos sin ocasionar pérdida de resistencia estructural. La cometa celular tiene, entonces, la ventaja, según Graham Bell, de que mantiene constante la relación entre el peso y la superficie de vela, a medida que crece.

Pero en 1993 el profesor Patrick Prosser, de la Universidad de Glasgow, demostró que la relación entre el peso y la superficie de vela disminuye al aumentar el número de células correctamente distribuidas en que se subdivide

la cometa, si se tiene en cuenta el peso de las uniones de la estructura tetraédrica (Suay Belenguer, 2000a: 25). Es decir, que cuanto más se subdivide la cometa, más eficiente se vuelve la relación entre el peso y la superficie de vela (Suay Belenguer, 2000a: 31) y, en la práctica, se ha demostrado que este tipo de cometas poseen un vuelo más estable cuanto mayor es el número de células que las componen.

El uso de celdas tetraédricas, concluía Graham Bell en su artículo, no se limita a la construcción de cometas y máquinas voladoras, sino que es aplicable a cualquier estructura en la que se deseen combinar las propiedades de resistencia y ligereza (Bell, 1903).

2.1.2. Modelos de crecimiento: lineal, fractal y celular fractal

Se podría denominar como *modelo de crecimiento lineal* al modelo de crecimiento descrito por Simon Newcomb en su artículo «Is the Airship coming?». Este modelo es el mismo en el que se basaba Galileo Galilei al aumentar el espesor de un hueso de gigante para que su resistencia fuera similar a la del mismo hueso en una persona de tamaño normal (figura 7), en su libro *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*. 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 estas 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 sus secciones resistentes crecen más rápidamente que su longitud, tal como Galileo Galilei afirmaba. Pero esta variación no parece responder linealmente al aumento del peso. Teniendo en cuenta las esbelteces geométricas medidas en los huesos de las extremidades posteriores de algunos animales se puede 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 que 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 % (ver tabla 1). La esbeltez del hueso del hombre de estatura normal medida en el dibujo realizado por Galileo Galilei (figura 7) es casi 250 % mayor que la esbeltez del hueso del gigante, cuya longitud ha sido aumentada tres veces.

Si se observa la estructura interna de huesos análogos en distintos animales, se puede 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 este soportar, parecería ser mayor el volumen óseo ocupado por la cavidad medular y por el hueso esponjoso.

En el interior de algunos huesos de animales de gran tamaño, puede observarse una cavidad medular mayor que la que proporcionalmente se encuentra en huesos similares de animales pequeños. El espesor de sus paredes, por otra parte, suele aumentar hacia la zona media de dicha cavidad que, en los extremos, aparece reforzada con hueso esponjoso.

Los huesos de todos los mamíferos se forman a partir de los mismos componentes, fundamentalmente el colágeno tipo I, de modo que la naturaleza debe ingeniar para diseñar estructuras de distintos tamaños con el mismo material. Cuando un 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.

Los huecos en el hueso esponjoso o en la cavidad medular del húmero de una vaca alcanzan, de esta manera, una escala superior a los huecos en los húmeros de los perros o de los gatos. O si se pensaran 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, se podría 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.

Hueso		Esbeltez
Fémur izquierdo en visión craneal	équido	8.5
	bóvido	9.2
	perro	12.0
	gato	10.1
	conejo	11.0
Húmero izquierdo en visión lateral	équido	6.3
	bóvido	7.2
	perro	12.6
	gato	12.0
	conejo	11.6
Huesos dibujados por Galileo Galilei	gigante	3.2
	hombre normal	7.3

Tabla 1. Esbelteces geométricas de algunos huesos de animales. Se determinó en todos los casos la esbeltez geométrica como el cociente entre la longitud total del hueso y su menor ancho.

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 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 se le podría denominar *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.

La optimización del peso del esqueleto es aún más sofisticada en los vertebrados capaces de volar. Los huesos largos de las aves de gran tamaño poseen huecos rellenos de aire y no de médula ósea, llamados *huesos neumáticos*, que están reforzados en su interior con estructuras espaciales trianguladas al estilo de viga Warren. Esta configuración geométrica les otorga propiedades excepcionales de ligereza y de resistencia.

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. 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 *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, se obtendrá, 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 (figura 2).

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 (Bell, 1903).

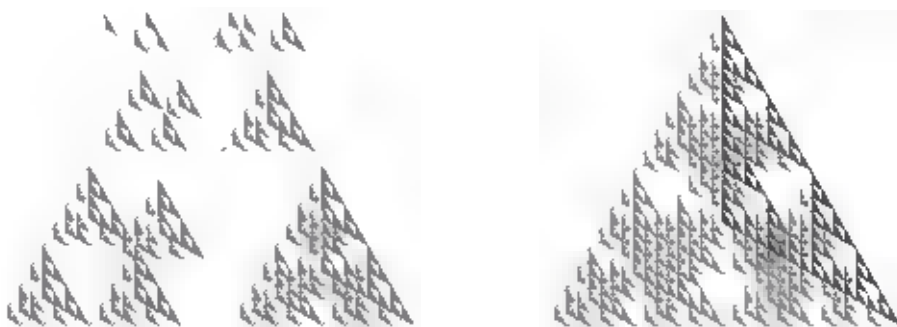


Figura 13. Modelo de crecimiento celular fractal según el principio tetraédrico inventado por Alexander Graham Bell. Esquema realizado por el autor.

2.2. El traslado a la arquitectura a mediados del siglo XX

2.2.1. El aporte de Robert Le Ricolais

Las estructuras espaciales de barras basadas en la triangulación aparecieron como un nuevo lenguaje arquitectónico a partir de la publicación de los ensayos del ingeniero francés Robert Le Ricolais, titulados *Essais sur des systèmes reticulés à trois dimensions*, en los años 1940 y 1941.

Le Ricolais consideraba que las formas naturales eran más eficientes desde el punto de vista mecánico que las construidas por el hombre y dedicó gran parte de su carrera a la observación de diversas estructuras y organismos en la naturaleza a los que denominaba «prodigios naturales», como los radiolarios, las caparazones de los moluscos o los cristales minerales. Hacia la década de los años 1940 había desarrollado una metodología de investigación que le permitía deducir principios constructivos y estructurales de la observación de estructuras naturales. Un modelo geométrico, decía, es el resultado de una determinada acción mecánica (Mc Cleary, 1997b: 22-23).

En 1935 publicó un artículo titulado *Les tôles composeés et leurs applications aux constructions métalliques légères*, en el que intentaba trasladar a la industria de la construcción los avances de la aeronáutica en materia de revestimientos resistentes (Mc Cleary, 1997b: 21). Le Ricolais analizó lo que denominaba «perfiles de economía máxima en la naturaleza», observando que los sistemas de ondulaciones complejas no son sino perfiles estáticos adaptados a determinadas solicitaciones. Inspirado en el estudio de caparazones de moluscos, cuyos diseños en espirales curvas y ondulaciones sinusoidales les permiten resistir eficazmente tanto compresiones como torsiones (Mc Cleary, 1997b: 23), propuso en este artículo un diseño de pilares tubulares de doble capa con ondulaciones en dos sentidos, unidos en los puntos de contacto de las generatrices por puntos de soldadura: el *sistema Isoflex*. Las piezas que ensayó con este sistema presentaron una gran inercia a las vibraciones y un aligeramiento considerable del peso propio.

No creo que se deba ignorar a los radiolarios. Son algo más que una mera curiosidad y deberíamos estudiarlos cuidadosamente como obras altamente elaboradas. (Mc Cleary et ál., 1997a: 137).

El biólogo Monod-Herzen, citado por Le Ricolais en su artículo «Survey of works; Structural Research 1935-1971» (Le Ricolais, 1973: 21), fue el primero en describir el esqueleto de un radiolario como una malla esférica de unos 2 mm de diámetro compuesta por una red semiregular de hexágonos y triángulos yuxtapuestos. Cada hexágono, decía, es la base de una pequeña

pirámide hexagonal compuesta por barras tubulares de silicio de entre 0,1 y 0,2 mm de largo y de entre 0,003 y 0,005 mm de espesor, en la cúspide de la cual se apoya un epísculo con dirección radial. Una membrana exterior se apoya en los extremos de los epísculos transmitiendo al esqueleto las presiones ejercidas por el fluido en que el radiolario se encuentra inmerso. De esta manera, todas las barras del esqueleto se encuentran únicamente sometidas a esfuerzos de compresión o tracción.

Observando la forma de algunas especies de radiolarios, Le Ricolais descubrió que en sus esqueletos era posible visualizar algunos temas que Lord Kelvin había desarrollado sobre particiones igualitarias del espacio y se dedicó al estudio de las particularidades de algunas especies con el objetivo de encontrar posibles aplicaciones constructivas. Se centró, fundamentalmente, en la idea de separación en dos grandes zonas estructurales: un núcleo comprimido, compuesto por redes hexagonales trianguladas en el espacio formando poliedros y una membrana externa en tracción, unida al núcleo a través de epísculos (Mc Cleary, 1997b: 23). En esta configuración geométrica, no reconoció un modelo formal a seguir, sino un modelo de organización, de disposición estructural. Conceptos surgidos de la observación de estos microorganismos, tales como economía de material, geodesia, partición igualitaria del espacio e isotropismo, son los temas centrales de sus ensayos de 1940.

Surgen así dos estrategias estructurales fundamentales que aparecerán a lo largo de todo su trabajo posterior: separación y equilibrio mutuo entre zonas comprimidas y traccionadas (principio observado en el análisis estático del esqueleto de los radiolarios: núcleo interior comprimido y membrana exterior traccionada) y estructuración del espacio con formas poliédricas (principio observado en la geometría del esqueleto y de los epísculos de los radiolarios).

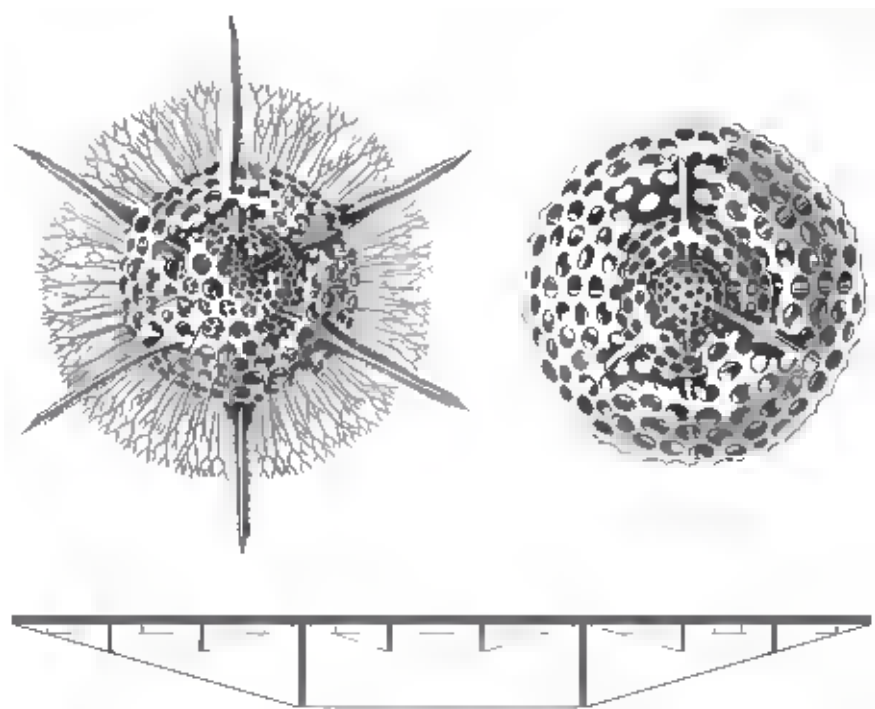


Figura 14. Especies de radiolarios con esqueletos automórficos (fractales) estudiados por Le Ricolais. Ilustraciones extraídas de *Die Radiolarien* (Rhizopoda Radiaria), lámina 24 (Haeckel, 1862), y esquema de la viga automórfica Polyten, realizado por el autor.

Le Ricolais era un ferviente admirador de las vigas tipo Queen Post con pendolones o péndolas como solución estructural para salvar grandes luces, en las que a través del añadido de barras verticales comprimidas, soportadas por un tirante inferior traccionado, se acorta la longitud libre de la barra superior. Inspirado en la observación de una especie de radiolarios, cuyo esqueleto estaba formado por tres esferas concéntricas de distinto tamaño dispuestas una dentro de otra y unidas por epísculos, diseñó la viga Polyten como optimización de la solución clásica de la cercha Queen Post con dos pendolones, mediante el uso de *repeticiones fractales o automórficas*, tal como él las denominaba, en su interior.

En la búsqueda de optimización de una tipología estructural, por lo tanto, aplicó el concepto de fractalidad, tal como ya había hecho Graham Bell en sus investigaciones sobre estructuras de cometas celulares, varias décadas antes de que Mandelbrot hubiera definido dicho concepto. La viga Polyten se genera a través de un proceso que sigue el modelo de crecimiento fractal.

La longitud libre de las barras del cordón superior, en una cercha clásica Queen Post con dos pendolones, se reduce a la tercera parte comparada con la de una viga simple y el momento flector actuante en dichas barras, para la misma carga uniformemente distribuida, se reduce a la novena parte, ya que está en función del cuadrado de la luz. Si en cada tercio del cordón superior se repite la misma solución, con tres pares de pendolones y tres tirantes a una escala menor, la luz libre se reduce a la novena parte y el momento flector resulta 81 veces más pequeño. Si se repite por tercera vez la misma operación a una escala aún menor, la luz libre del cordón superior disminuye 27 veces y su momento flector 729 veces.

Es decir, a medida que se repite la solución de acortar la luz libre del cordón superior con un tensor y dos pendolones en el interior de la cercha, se puede optimizar progresivamente el aprovechamiento de los materiales, mejorando la configuración geométrica y sin necesidad de aumentar la altura total.

A partir del estudio de estructuras cristalográficas, llegó a la conclusión de que es necesario establecer una comparación del grado de isotropismo de las distintas redes o configuraciones espaciales. Este es el núcleo temático de su ensayo de 1941. Descubrió que cuanto más se expanda una estructura en las tres direcciones del espacio, o sea, cuanto mayor espacio ocupe, menos se deformará. El momento de inercia es proporcional a la resistencia a la deformación y está, por lo tanto, estrechamente ligado al concepto de isotropismo (Mc Cleary, 1997b: 24).

Analizó comparativamente tanto volúmenes como redes capaces de ocupar el espacio de forma homogénea (Mc Cleary, 1997b: 28). Tomando como referencia la esfera (isotropismo = 1) y el cubo (isotropismo = 0,62), llegó a la conclusión de que el tetrakaidecaedro (isotropismo = 0,98) es la forma más efectiva de ocupar el espacio, superando al cuboctaedro (isotropismo = 0,88).

Con el objetivo de descubrir las configuraciones geométricas más eficientes, es decir, las más resistentes con el empleo mínimo de material, realizó una serie de ensayos de vigas atirantadas diseñadas a partir de distintas geometrías. Los ensayos, decía, son sus compañeros de intuición y la intuición estructural no existe sin un razonamiento.

Llegó a la conclusión de que los sistemas tridimensionales basados en la equipartición del espacio en volúmenes tetraédricos y romboédricos asociados, se comportan como cuerpos homogéneos y sensiblemente isótropos, en tanto no se presenten problemas locales de pandeo.

Las estructuras basadas en la geometría cuboctaédrica, de gran volumen para un perímetro dado de barras, resultan muy eficientes para

resistir tanto flexiones como torsiones y utilizan perfiles ligeros y de sección constante, lo cual simplifica enormemente su producción. Estas estructuras, en las que es posible introducir la perfección de las formas naturales, afirmaba Le Ricolais, darán origen a una nueva arquitectura del acero de una escala sin precedentes, por su capacidad de extender a los perfiles laminados las ventajas de los revestimientos portantes.

Con los sistemas FPR (polígono funicular de revolución) profundizó en el estudio de la asimetría estructural entre tracción y compresión, descomponiendo las estructuras en una red de cables traccionados entretejidos que definen una superficie mínima e investigando para la parte comprimida la forma de un elemento de gran rigidez y peso mínimo. Le Ricolais evitó, en general, la diferenciación tradicional entre elementos traccionados y comprimidos dispuestos alternadamente (como en una viga Warren, por ejemplo) y descompuso toda la estructura en dos grupos claramente independientes, que se equilibran mutuamente (Mc Cleary et ál., 1997a: 43-44).

Descubrió que con un peso de unas 11 libras, un esqueleto humano es capaz de soportar el peso completo del cuerpo: unas 150 libras más las cargas adicionales de sobrepeso (Mc Cleary et ál., 1997a: 135). Poco peso, por lo tanto, y gran solidez estructural. Analizando una microfotografía de la estructura interna de un hueso descubrió una red tridimensional de gran complejidad geométrica. Dedujo, entonces, que una buena forma de diseñar estructuras es utilizar elementos huecos, livianos y con gran rigidez, y propuso que su sistema Isoflex se convierta en un sistema de barras trianguladas.

[...] el arte de la estructura es cómo y dónde colocar los huecos, construir con huecos [...] el arte de fabricar una estructura ligera reside en trabajar con elementos grandes y pesados. (Mc Cleary, 1997c: 40).

Cada estructura superficial podría tener su equivalente esquelético y viceversa (Mc Cleary, 1997b: 24). Llegó así al diseño de la «columna automórfica», una versión esquelética de su superficie ondulada tubular, basada en el empleo de barras trianguladas. La rigidez de la columna automórfica puede asimilarse a la de un tubo delgado con el mismo peso y con igual radio de giro, pero tiene la ventaja de prevenir la aparición de pandeos localizados y utilizar, por lo tanto, la sección comprimida hasta el límite de su resistencia. Sustituye así un tubo delgado por un conjunto de barras, de igual cantidad de materia, dispuestas según una configuración geométrica triangulada formando poliedros perforados y geoméricamente indeformables.

Estos sistemas, decía Le Ricolais, pueden utilizarse para pilares o soportes de grandes dimensiones que permitan en su interior la circulación

vertical o la conducción de instalaciones y combinados con el uso de forjados suspendidos y mallas de cables pretensados. Creía que podían resultar idóneos para la construcción de estructuras de grandes luces como el Esferovector o el Cosmorama, diseñados con el sistema FPR

En la búsqueda de estructuras son posibles dos actitudes opuestas, decía Le Ricolais, comenzar con un bloque y trabajar por medio de escisiones o, por el contrario, comenzar con una célula germinal para llegar a la forma definitiva por medio de adiciones (Mc Cleary, 1997c: 39). La columna automórfica es el resultado de un proceso de diseño del segundo tipo, es decir, surge de la repetición o iteración de una unidad elemental. Esta unidad, como ocurre en el caso de las unidades o subunidades proteicas que se autoensamblan, ya contiene en su propia geometría la información necesaria para multiplicarse y acoplarse a unidades semejantes para formar estructuras de mayor escala y complejidad.

Le Ricolais reconoció que los huecos que se generan en el interior de un elemento estructural comprimido de esta escala, gracias a los cuales se obtienen una gran inercia y un gran radio de giro, pueden ser aprovechados con otros fines. De la misma manera que el interior hueco de los principales huesos de un esqueleto es aprovechado para alojar la médula ósea, el interior hueco de una columna tubular puede ser utilizado para alojar actividades de servicio como la circulación vertical de personas, ductos o cañerías. La geometría de la estructura puede definir, de esta manera, espacios de distintas escalas dispuestos según una determinada jerarquía que recuerda la compleja organización geométrica de huecos en el interior de algunas formas naturales.

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».

2.2.2. El aporte de Richard Buckminster Fuller

Richard Buckminster Fuller inventó el *domo geodésico* hacia finales de la década de 1940, como aplicación de las ideas sobre geometría energética que había desarrollado durante la segunda guerra mundial y como ensayo sobre el problema de la escasez de vivienda. La esfera es la forma geométrica

que encierra el mayor volumen posible con una determinada superficie o con una determinada cantidad de material. Los domos de Fuller eran, por lo tanto, estructuras superficiales en forma de casquete esférico, de modo de contener el mayor espacio interior posible con el empleo de la mínima cantidad de material. Respondían a una búsqueda de optimización de la cantidad de energía necesaria para la prefabricación, el traslado y el montaje de una vivienda. Las estructuras de estos domos consistían en mallas trianguladas, inspiradas en la forma de algunos esqueletos de radiolarios.

El pabellón de los Estados Unidos para la Exposición Universal de Montreal en 1967, con 200 pies de altura y 250 pies de diámetro, es su obra más reconocida. Este inmenso domo generaba un volumen interior de 6,7 millones de pies cúbicos, superior al de San Pedro en Roma, con un peso total similar al de uno solo de los pilares de dicha catedral: unas 800 toneladas (Fuller, 1969a: 68). Fue construido con el objetivo específico de demostrar la alta eficiencia de este tipo de estructuras por unidad de peso, energía y tiempo invertidos en su construcción. Estaba diseñado, al igual que la mayoría de los grandes domos construidos por Fuller, por unidades estructurales tridimensionales conformadas por triángulos exteriores conectados con hexágonos interiores, dispuestos en forma esférica. La forma geométrica resultante de estas unidades era el icosaedro, un volumen de veinte lados compuesto por triángulos equiláteros idénticos, que garantizaba una inercia geométrica suficiente como para resistir los esfuerzos de flexión derivados de su forma circular.

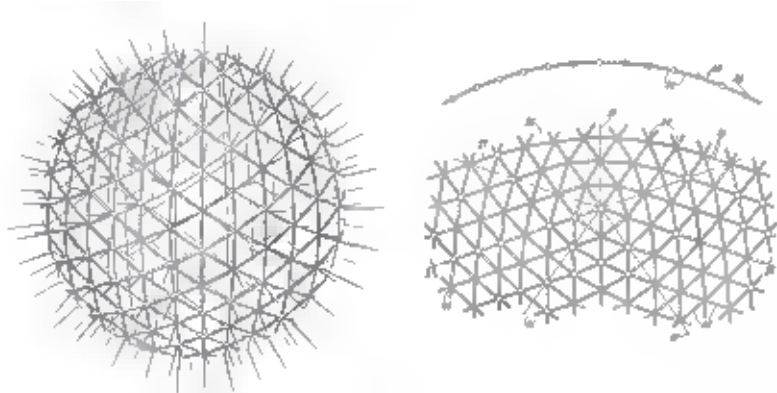


Figura 15. Esqueleto de radiolario y detalle de la malla del Domo Geodésico de Buckminster Fuller. Ilustraciones extraídas de *Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*, lámina 10 (Haeckel, 1862) y de la Patente de Estados Unidos n.º 2.682.235, del 29 de junio de 1954.

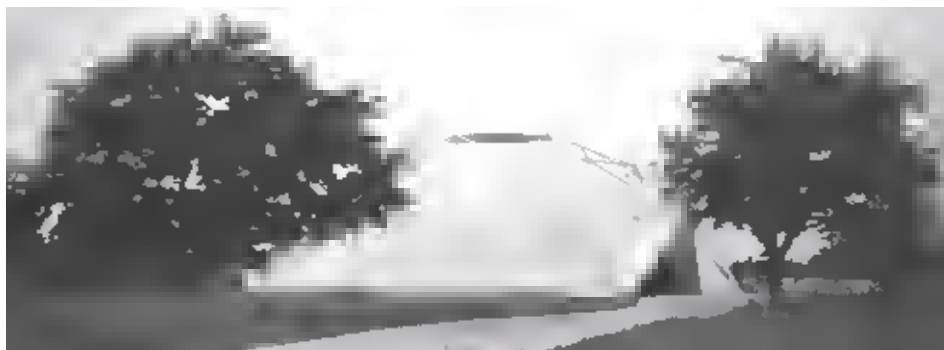


Figura 16. Domo Geodésico de Buckminster Fuller montado en el Campus de Vitra, Basilea. Fotografía del autor, 2000.

Esta geometría fue criticada en su momento por Robert Le Ricolais, quien creía que el perfil de los grandes domos debía seguir una geometría parabólica de modo de adaptarse a la línea de presiones y minimizar los esfuerzos de flexión. La geometría circular, sin embargo, simplificaba las tareas de fabricación de las barras, los nudos y el proceso de montaje en obra del domo. Las tipologías de barras, según su longitud y las tipologías de nodos, según los ángulos de encuentro de las barras, disminuían notablemente al mantenerse constante la curvatura de la superficie del domo en todo su desarrollo. De esta manera la estructura en su conjunto podía formarse a partir de la repetición o iteración de algunas pocas unidades elementales siguiendo el segundo principio de Le Ricolais (comenzar con una célula germinal para llegar a la forma definitiva por medio de adiciones), tal como ocurre en la naturaleza con el autoensamblaje de subunidades proteicas para la formación de estructuras laminares de mayor complejidad (el virus del simio 40 de la figura 2, por ejemplo). Es decir, a partir de la repetición de una única unidad simple de forma icosaédrica, se puede generar una unidad de mayor complejidad como el domo.

La influencia de la gravedad podría considerarse despreciable en el estado tensional del caparazón proteico de un virus o del esqueleto de un radiolario, por sus dimensiones microscópicas y por encontrarse estos organismos, en general, inmersos en medios líquidos. La geometría esférica es idónea en este tipo de estructuras sometidas a esfuerzos uniformes en todas direcciones. Pero en el caso del domo, en el que son determinantes los esfuerzos derivados de su propio peso, la geometría parabólica sería la más apropiada desde el punto de vista estático. Sin embargo, la economía espacial de la forma esférica, la rigidez geométrica de la malla espacial triangulada y el poco tiempo que requería su montaje al construirse a partir de la repetición de

un único módulo de base, hicieron de este sistema estructural uno de los más fuertes, livianos y eficientes de su época.

La superficie del domo estaba cubierta por unos 2.000 minidomos de acrílico, capaces de abrirse, cerrarse y cambiar de color a lo largo del día para controlar la entrada de luz, aire y sonido. Algunos de estos minidomos dejaban salir al exterior el aire caliente y la humedad a través de válvulas; otros eran sensibles a la luz o al sonido; otros podían alojar pequeñas pantallas y en conjunto, funcionaban como una inmensa superficie controlada por un ordenador central que emulaba la sensibilidad de la piel humana (Rohan, 2003: 54-56).

La unidad básica de la superficie, el minidomo, hacía referencia a la estructura total, el domo, representando las ideas cosmológicas de Fuller de microcosmos dentro de macrocosmos o de un orden universal fractal o autorreferencial (Rohan, 2003: 52). Fuller construye sus domos siguiendo la idea aristotélica de que una obra de arte es una representación personal del universo, que reproduce sus leyes formales y representa el orden cosmológico perfecto y supremo. La obra del hombre se convierte así en una prolongación de la obra divina, los principios que rigen al arte pueden ser los mismos que los que rigen la naturaleza.



Figura 17. Pabellón de Estados Unidos para la Exposición Universal de Montreal (1969). Fotografía extraída de Internet (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Biosph%C3%A8re_de_Montr%C3%A9al_en_juillet_2011.jpg), © Idej Elise / CC-BY-SA 3.0.



Figura 18. Vivienda DDU: Dymaxion Deployment Unit. Fotografía: Wolcott, Marion Post.

Fuller había iniciado en 1927 sus investigaciones sobre el concepto *Dymaxion* (abreviatura de *dynamic maximum ions*), en su búsqueda de cómo aprovechar al máximo los materiales de construcción o cómo sacar lo máximo de lo mínimo, es decir, cómo obtener la máxima eficiencia por unidad de materia empleada.

En 1944 presentó la patente de una vivienda capaz de ser producida masivamente: la Dymaxion Deployment Unit (DDU), cuyo diseño había desarrollado junto a la *Butler Manufacturing Company* de Kansas City, que en ese entonces se dedicaba a la fabricación de silos de chapa ondulada. Por encargo de las Fuerzas Armadas de Estados Unidos, durante la segunda guerra mundial, tuvo la oportunidad de construir cientos de unidades que fueron trasladadas al Golfo Pérsico como alojamiento para tropas del ejército. Podía armarse y desarmarse fácilmente, tenía paredes exteriores con estructura de acero y revestimiento de chapa ondulada y cubierta en forma de cáscara convexa, también con estructura de acero y chapas de acero galvanizado, que se montaba en el suelo y, posteriormente, se elevaba (Cobbers et ál., 2010: 72-75).

Luego de finalizada la guerra Fuller publicitó sin éxito este proyecto como vivienda particular de bajo costo. Para Fuller los recursos materiales de la Tierra no eran propiedad de ningún individuo, nación o generación y debían, por lo tanto, ser utilizados responsablemente de modo de no agotarlos. La

tarea fundamental del arquitecto era investigar cómo poner la tecnología al servicio de las personas, para mejorar su calidad de vida y minimizar el consumo de energía y materiales.

Fuller consideraba a la vivienda más como un servicio que como una comodidad y creía que la única solución para brindar viviendas dignas a toda la población era producirlas industrialmente en grandes cantidades, lo cual implicaba transportes, tanto de materias primas como de productos finales, por lo que el peso era uno de los principales factores a tener en cuenta. Si la estructura trabaja fundamentalmente a tracción y no a compresión el peso total del edificio se reduce sustancialmente.

Sus investigaciones sobre sistemas de construcción basados en la tecnología y en la racionalización de los procedimientos constructivos lo llevaron a desarrollar varios prototipos de viviendas Dymaxion, como la Dymaxion House de 1927 o la Wichita House, realizada a escala real en 1947 en Kansas.

El proyecto de 1927 consistía en una vivienda de planta hexagonal suspendida de un mástil central, también hexagonal, que alojaba la circulación vertical de acceso. Este mástil resultaba el único elemento de la estructura principal sometido a esfuerzos de compresión y se diseñó como un tubo hueco, con el propósito de otorgarle una gran inercia geométrica.

Este sistema estructural tiene grandes similitudes con algunos de los diseños FPR de Le Ricolais, como el Esferovector, que descomponen la estructura en zonas diferenciadas según el tipo de sollicitación estática y que privilegian el uso de la tracción. El hueco en el interior del pilar central comprimido es aprovechado para alojar la circulación vertical, tal como proponía Le Ricolais en su estudio de la columna automórfica como solución de soporte para grandes estructuras suspendidas.

En la planta de la vivienda puede observarse la repetición automórfica de un módulo hexagonal a distintas escalas para la definición del perímetro del cerramiento exterior, de los módulos interiores de servicios, del pilar central tubular e incluso de algunos muebles y del pavimento. Este módulo se divide, a su vez, en seis submódulos triangulares. Esta modulación colabora a la generación de una imagen orgánica y facilita el empaquetamiento de la vivienda, que fue pensada para ser producida en una fábrica y transportada en camión hasta el lugar de implantación.

La Wichita House, construida en 1947, es otra variante de las ideas de Fuller sobre las viviendas Dymaxion. A través de una malla de cables, cuelga de un mástil central compuesto por siete perfiles de acero inoxidable de unos 7 metros de altura que, dadas sus dimensiones menores a las del proyecto de

1927, solo alojaba en su interior las cañerías de la instalación sanitaria de los dos baños y la cocina. La forma circular de su planta permitía el empleo de una reducida superficie de cerramiento para contener el espacio interior y, por lo tanto, menos peso a la hora de la fabricación y el transporte de la vivienda. Todas las paredes de la vivienda fueron construidas con plástico y aluminio reciclado de chatarra de naves y aeroplanos de la posguerra. Incluidos los muebles empotrados, todo el proyecto pesaba tan solo 2.200 kg (Cobbers et ál., 2010: 86-91).

El diseño de las viviendas Dymaxion estaba pensado para minimizar los gastos energéticos de producción, transporte, puesta en obra y mantenimiento, intentando dar respuesta al problema de la escasez de viviendas en la década de 1930 y 1940. Estos proyectos no parecen responder a preocupaciones formales o de estilo, la imagen es la resultante de la optimización de sus distintos componentes, teniendo en cuenta el estado de avance de la industria de la construcción. En este sentido, podría decirse que siguen las ideas de Sócrates sobre la belleza de lo adecuado. Los diseños Dymaxion son bellos, porque son idóneos para cumplir con el objetivo para el cual fueron diseñados.

2.3. Desarrollo reciente de las estructuras de barras

2.3.1. *Philadelphia City Tower (1952-1957)*

Entre 1952 y 1957, Louis Kahn y Anne Tyng diseñaron un rascacielos de unos 180 metros de altura para el centro de Filadelfia, el Philadelphia City Tower, que emerge del terreno y asciende en forma de hélice con una estructura de barras de hormigón armado prefabricado, geométricamente basada en la repetición de un módulo tetraédrico. El concepto estructural básico era el de un rascacielos geodésico con un comportamiento similar al de una gran viga empotrada en el terreno, que gracias a su geometría tetraédrica adquiriría una gran resistencia a la flexión.

La estructura principal se conformaba a partir de barras de hormigón de unos 25 metros de longitud formando tetraedros de unos 20 metros de altura. Estos tetraedros se ensamblan entre sí generando una grilla espacial de 9 niveles de altura que rellena completamente el espacio de la torre. La intersección de las barras principales de hormigón entre sí fue resuelta con capiteles de 3,3 metros de altura, también de hormigón armado, que albergan en su interior funciones secundarias como depósitos, baños y subestaciones para las distintas instalaciones mecánicas de la torre. Cada uno de los 9 niveles principales, de 20 metros de altura, se divide a su vez hasta en 6 niveles por

medio de entresijos con formas variadas en planta, acomodándose a los diferentes requisitos programáticos (Ayad, 1997: 140).

La compleja organización jerárquica de huecos resultante de la geometría de la estructura, define la jerarquía de usos del edificio, en sintonía con las ideas de Kahn sobre la separación entre espacios servidos y espacios sirvientes.

Los forjados huecos de hormigón armado, prefabricados y pretensados, tienen aproximadamente 1 metro de espesor y salvan luces de hasta 18 metros. En los 9 niveles principales se extienden en tres áreas hexagonales adosadas que rigidizan horizontalmente la estructura tetraédrica primaria de barras. Están formados por una serie de membranas según una geometría igualmente tetraédrica y alojan en su interior diversas instalaciones como ductos de aire acondicionado, luminarias y todas las tuberías y cableados del edificio. En la Galería de Arte de la Universidad de Yale, construida entre 1951 y 1953, Kahn ya había experimentado con forjados de hormigón armado visto, moldeado en sitio, formando tetraedros huecos capaces de alojar instalaciones.

En tiempos góticos, decía Kahn, los arquitectos construían con piedras macizas, hoy es posible construir con piedras huecas (Abalos et ál., 1992: 55).

Louis Kahn realizó numerosos trabajos junto a Robert Le Ricolais en la Universidad de Pensilvania, en donde tuvo oportunidad de conocer sus investigaciones y sus ideas. La geometría de este proyecto refleja una clara adhesión a las reflexiones de Le Ricolais sobre la importancia de la isotropía, la inercia y el sistema de huecos en una estructura.

Fruto de la influencia de las ideas de Le Ricolais resultó, seguramente, la concepción de la estructura como un organismo natural con un estricto orden espacial jerárquico. El esquema en planta de la torre, con sus trazados reguladores en forma de triángulos y hexágonos, fue probablemente inspirado en la microfotografía de una diatomea (Ayad, 1997: 131) publicada en el libro *On growth and form* de D'Arcy Thompson, texto de gran influencia en la arquitectura de mediados del siglo XX y citado por Anne Tyng en su artículo *Geometric extensions of consciousness* (Tyng, 1969: 145), en relación con la génesis de las formas en la naturaleza.

En la planta de uno de los forjados principales del edificio es posible trazar diversas mallas con módulos triangulares y hexagonales a distintas escalas que regulan la posición de los elementos compositivos primarios, como los encuentros entre los pilares inclinados de hormigón o los núcleos de servicio. En cada uno de los tres hexágonos mayores en que se dividen las plantas de los entresijos es posible inscribir tres hexágonos menores, tres de cuyos vértices coinciden con los centros de los núcleos de servicios de esa

planta. Los otros tres, coinciden con los centros de los núcleos de la planta superior. Igualmente inscripto en un hexágono se encuentra el patio central en el que se ubica uno de los núcleos de servicio, rodeado por seis grupos de ductos verticales que albergan las instalaciones. Estos núcleos vinculan en vertical toda la torre, garantizando el libre recorrido de las instalaciones a lo largo de todas las plantas, pero no forman parte de la estructura. Este patio y los tres núcleos de escaleras definen, a su vez, un módulo triangular de mayor escala en el encuentro entre las tres zonas hexagonales principales de la planta, cuyos vértices se ubican en el centro de los tres núcleos de servicio que lo rodean (figura 19).

Los núcleos de servicio, ubicados en los vértices de los tetraedros principales, es decir, allí donde concurren tres de las barras de hormigón prefabricado que definen la estructura primaria de la torre, tienen forma en planta de hexágono irregular y pueden subdividirse en trece triángulos equiláteros.

En alzado, el módulo generador de la sección de la torre es el triángulo de 20 metros de altura formado por las barras diagonales de la estructura primaria y los forjados principales. Dentro de estos triángulos pueden reconocerse otros semejantes de menor escala formados por las intersecciones de las mismas barras con los ejes de los entresijos secundarios. En la sección de los módulos de servicio pueden visualizarse triángulos semejantes de escala aún menor y en la sección de los forjados con huecos tetraédricos se observan los triángulos de menor escala.

Analizando las tres dimensiones es posible reconocer tetraedros semejantes de al menos cinco escalas diferentes, entre la del módulo estructural principal de 20 metros de lado y la de los huecos interiores de los forjados. Estos huecos generados en el interior de la malla espacial rígidamente triangulada, que llenan por completo el espacio interior de la torre, están dispuestos según una jerarquía de escalas que define sus posibles usos. Algunos albergan instalaciones, otras áreas de servicio, otros espacios de trabajo y otros grandes espacios de uso público.

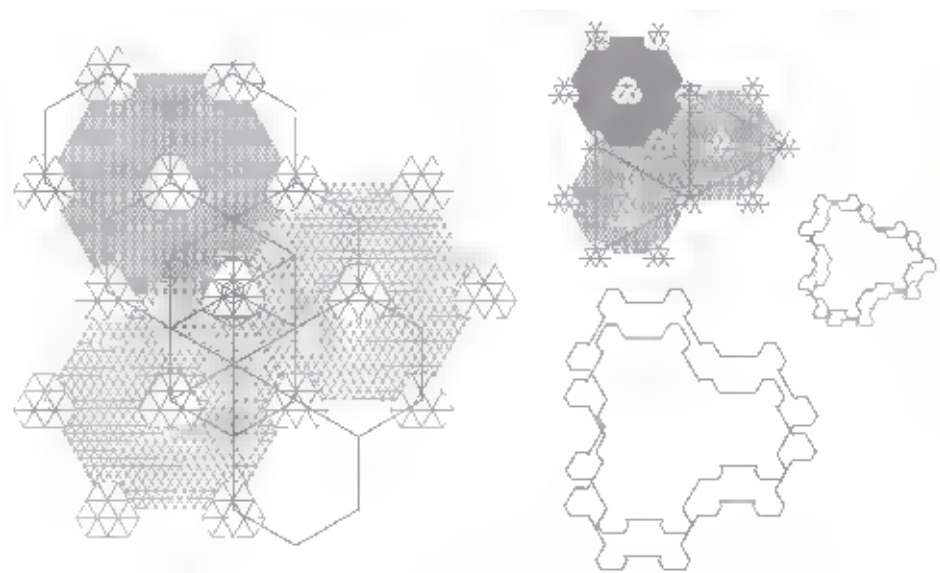


Figura 19. Plantas de forjados de la Philadelphia City Tower con superposición de trazados reguladores del diseño. Esquema realizado por el autor.

Una disposición de huecos jerárquica, similar a la del Philadelphia City Tower, es posible identificar en otros proyectos teóricos diseñados por la misma época con estructuras de barras, como la ciudad tetraédrica de Buckminster Fuller, de 1965, capaz de albergar a un millón de habitantes (Fuller, 1969b: 80-83) o algunos proyectos de Yona Friedman, y también en algunas estructuras construidas como el pabellón francés para la Expo de Bruselas de 1958, del ingeniero René Sarger (Banham, 2001: 59-60) o el pabellón temático Man the Producer para la Expo de Montreal de 1967, de Guy Desbarats (Banham, 2001: 111-115). Una gran diversidad de espacios de distintas escalas surge en estos proyectos a partir de iteraciones del módulo tetraédrico principal hacia el interior del edificio, estableciendo la rigidez de la malla de barras y la complejidad geométrica la estructura. Este principio geométrico de subdivisión de los módulos principales podría definirse como un proceso de crecimiento celular fractal, similar al que utilizaba Graham Bell para generar sus cometas tetraédricas. Como resultado se obtuvo una estructura espacial de barras de excelente rigidez, gracias a la triangulación y a la subdivisión en módulos de distintos tamaños.

2.3.2. Centro Georges Pompidou (1969-1977)

La idea proyectual del Centro Pompidou es la de un gran contenedor con una estructura flexible, capaz de acoger en su interior cualquier tipo actividad cultural, tal como las bases del concurso establecían. El edificio fue concebido como una gran máquina en donde cualquier cosa pudiera suceder, de modo que una de las principales premisas era la de generar espacios no elitistas, siguiendo el fervor populista de la revuelta intelectual de los años 1960. Una de las consecuencias de esta interpretación, en cuanto a la funcionalidad del edificio, es la exigencia de flexibilidad, entendida como la capacidad del organismo arquitectónico de admitir una continua recalificación de sus espacios en función de las modificaciones en sus condiciones de uso (Piano, 1973a: 145).



Figura 20. Centro Georges Pompidou. Fotografía: Arq. Marcos Dagnino Eirin, 2006.

El diseño estructural, fruto del trabajo en conjunto de los arquitectos proyectistas con el equipo Estructuras 3 de Ove Arup & Partners, dirigido por el ingeniero Ted Happold y con la participación del ingeniero Peter Rice (Rice, 1998a: 16), se inició ya en las primeras etapas de definición del partido arquitectónico. Sin embargo, a pesar de esta temprana colaboración entre arquitectos e ingenieros, no se había llegado a una clara definición de la estructura en el proyecto presentado a concurso en el año 1970. Según Peter Rice, un proyecto participante de un concurso internacional como el del Centro Beaubourg no debía estar demasiado ajustado, ya que el tiempo de

que dispone el jurado para dedicar a cada propuesta es limitado y alcanza solo para retener el espíritu y las ideas directrices del proyecto (Rice, 1998a: 18).

La idea estructural que se esbozó para esta instancia fue la de materializar el edificio como un gran esqueleto de barras de acero formado por pilares, vigas, elementos reticulados y tirantes en forma de cruz, capaz de soportar grandes áreas de forjados libres de interferencias. Este entramado estructural, sin embargo, aparecía apenas sugerido detrás de una serie de pantallas, paneles de información, anuncios, mensajes de texto, rampas, ascensores y circulaciones horizontales que, con una estética pop, eran los que definían la imagen del proyecto. A partir de estas ideas iniciales y hasta la solución final, se ensayaron una gran variedad de soluciones experimentales. El principal problema técnico era el de salvar una luz de aproximadamente 45 metros sin apoyos intermedios, soportando la sobrecarga de una pesada biblioteca pública que, de acuerdo a los criterios proyectuales de flexibilidad adoptados, podía ubicarse en cualquier parte del edificio (Rice, 1998a: 21).

Poco después de ganado el concurso Peter Rice tuvo la oportunidad de viajar a Japón, en donde visitó los edificios construidos para la Exposición Internacional de 1970 en Osaka. Las gigantescas uniones de acero fundido de una estructura reticulada tridimensional de unos 290 x 110 metros que cubría parte de la Plaza del Festival, proyectada por Kenzo Tange junto con el Yoshikatsu Tsuboi Institute y la firma Kawaguchi & Engineers, llamaron su atención (Rice, 1998a: 22). Algunos temas abordados en la exposición titulada «Progreso en armonía», como la plaza pública a gran escala y los equipamientos mecánicos para las vías de circulación, temas surgidos en la década de 1960 en las discusiones de los últimos CIAM, del Team X y del grupo Metabolista, coincidían con temas abordados por el Centro Pompidou, de modo que en la posterior resolución de su proyecto de ejecución tuvo seguramente gran influencia la materialización de los edificios observados por los ingenieros de Arup & Partners en este viaje a Japón. El corazón del recinto ferial, La Plaza del Festival, era según Kenzo Tange un gran foro abierto a la espontaneidad, a la participación y a los intercambios (Tange et ál., 1970: 110).

Peter Rice asoció la gigantesca estructura que cubría la Plaza del Festival de Osaka con el particular atractivo que siempre sintió por las grandes estructuras metálicas construidas en el siglo XIX. A través de la elección de ciertos motivos ornamentales y una cuidadosa resolución de uniones y detalles en acero fundido, dice Peter Rice, estas estructuras expresan la visión singular de su diseñador y nos recuerdan que fueron proyectadas y construidas gracias al trabajo de hombres, de los cuales llevan su marca (Rice, 1998a: 22). El Centro Pompidou era una obra excepcional y justificaba el empleo de un material

inusual, por lo que el equipo de proyectistas decidió utilizar el acero fundido para su estructura. Esta decisión fue tomada incluso antes de haberse diseñado la estructura y sin tener sus proyectistas una idea clara de cómo se diseñaba con ese material (Rice, 1998a: 25), fabricado aún en algunas fundiciones con métodos artesanales que apenas habían sufrido modificaciones desde mediados del siglo XIX. Era necesario, entonces, adaptar esta tradición a las exigencias de confiabilidad de finales del siglo XX. La idea de utilizar el acero fundido llevó, por otra parte, a la idea de convertir el proceso de ensamblaje en el principio de la solución estructural, en el espíritu del proyecto.

El subsuelo de tres niveles del proyecto ocupa la totalidad de la parcela. Allí se ubican áreas de servicio, estacionamientos, salas insonorizadas de cine y espectáculos, etc., conformando un basamento subterráneo de hormigón armado sobre el que se apoya la estructura metálica. Esta estructura superior, visible tanto desde el interior como desde el exterior del edificio, se diseñó de una manera simple y repetitiva a través de 14 pórticos paralelos que salvan la luz menor. El proyecto ajustado preveía que esta luz menor, para los espacios interiores, alcanzara los 44,8 metros. Si agregamos las zonas de circulación sobre las fachadas longitudinales la luz alcanza los 56,8 metros. Estas tres zonas debían estar incluidas en el interior de la estructura.

Cada uno de los pórticos se compone de seis vigas reticuladas que soportan los niveles superiores y descargan en los extremos de ménsulas conocidas como vigas Gerber o gerberettes, que se apoyan en pilares tubulares y se estabilizan en sus extremos a través de una red de tirantes. El ingeniero alemán Heinrich Gerber fue el primero en construir una estructura con esta solución: el puente sobre el río Main, en Hassfurt, de tres tramos sobre cuatro apoyos. Los tramos reticulados laterales salvaban luces de 26 metros y mensulaban hacia el interior del puente, recibiendo en los extremos de las ménsulas a la viga reticulada central. De esta manera se lograba salvar una luz entre apoyos de 42 metros en el tramo central, utilizando tramos discontinuos de vigas reticuladas de luces menores. El uso de la viga tipo Gerber 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. La clave está en ubicar los apoyos del tramo central y los extremos de las ménsulas en aquellos puntos en que los momentos flectores hubieran sido nulos de haberse construido los tres tramos con continuidad.

La estructura se rigidiza frente a las cargas de viento a través del agregado de bielas que forman triángulos en los pórticos de los extremos y de una malla de tirantes fijados a los extremos exteriores de las vigas Gerber,

sobre las fachadas longitudinales. Esta estructura externa de equilibrio de las ménsulas y de estabilización frente al viento termina de definir la imagen de las cuatro fachadas.

La estructura primaria del edificio define, entonces, una serie de espacios principales y secundarios. Al exterior de la fachada principal a la plaza, 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 principal, sobre la plaza, es la resultante de la superposición de la estructura de base con estas capas de circulación. Sobre la fachada longitudinal posterior, hacia la Rue du Renard, 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.



Figura 21. Escalera mecánica suspendida de los extremos de las vigas Gerber del Centro Pompidou, sobre la plaza. Fotografía del autor, 2006.

El edificio se convierte así en un gran organismo cuyo principal objetivo es la liberación del espacio interior de cualquier tipo de obstrucción, tanto de la estructura como de las circulaciones verticales, de los ductos de

instalaciones o de los tabiques. La única excepción la constituye un muro interior cortafuegos impuesto por la normativa francesa de prevención en caso de incendios. En total se generan 7.500 m² en cada nivel, libres de todo obstáculo, en los cuales es posible desarrollar cualquier tipo de actividad cultural. Los únicos espacios rodeados por paredes son los servicios higiénicos y algunas oficinas privadas, construidas como contenedores de obra, fáciles de montar, desmontar y transportar.

A efectos de crear este gran espacio interior, donde se distribuyen hoy día las exposiciones temporales del Museo de Arte Moderno y del Centro de Creación Industrial de París, la colección permanente del Museo, la biblioteca pública, la administración y el hall del Museo y del Centro, la estructura define dos grandes espacios residuales entre los planos donde se ubican los pilares (las fachadas longitudinales) y los planos de los tirantes. Estos espacios secundarios se aprovechan para alojar funciones de servicio que permiten el funcionamiento del gran espacio interior. El sistema estructural define, de esta manera, una clara división entre espacios servidos y espacios sirvientes, tal como se aprecia en la obra de Louis Kahn, bien conocida por los arquitectos Piano y Rogers.

R.R.: [...] Le "Yale Art Gallerie", construite par Kahn à New Haven, montre le début d'un espace flexible. On a toujours noté le couple espace servi/espace servant. (Piano et ál., 1973: 38).



Figura 22. Vigas Gerber del Centro Pompidou, sobre la fachada lateral. Fotografía: Arq. Marcos Dagnino Eirin, 2011.

Los vacíos de distintas escalas generados por la estructura principal definen una organización jerárquica que repercute en la distribución espacial de los distintos programas del edificio, tal como proponía Le Ricolais a partir de sus análisis de configuraciones estructurales tridimensionales. La particularidad del Centro Pompidou es que estos espacios secundarios son trasladados a las fachadas principales y definen, por lo tanto, la imagen del proyecto. Esta particularidad es enfatizada a través de la exacerbación de las características mecánicas de los servicios alojados en estas zonas y del uso de colores.

La idea de hacer del ensamblaje el principio del diseño estructural es una manera de poner en evidencia las características mecánicas de la estructura, también presente en estas zonas de servicio. Las piezas estructurales se diseñan como elementos autónomos, de modo que el conjunto resulte un ensamble articulado en el que sus componentes solo están en contacto en algunos puntos. El hueco en el apoyo de la viga Gerber sobre el pilar, por ejemplo, reafirma esta idea, aligerando la unión y enfatizando el proceso de ensamblaje.

El diseño de la estructura del Centro Pompidou deriva de la elección del principio de las vigas Gerber, como adecuación de los pórticos de grandes luces a las características del acero fundido y al proceso de ensamblaje en obra, por lo que el diseño de estas piezas fue considerado como prioritario y su compleja forma final surge de la optimización de tres factores: las solicitaciones estáticas a las que quedaban sometidas, su proceso de fabricación con acero fundido y el proceso de ensamblaje con el resto de la estructura.

Las tensiones actuantes sobre las vigas Gerber fueron los principales datos para el diseño de su forma (Rice, 1998a: 28). Cada viga se definió como una pieza única, de acero fundido, que se extiende a partir del tirante, pasa por el pilar, lo rodea por ambos lados y se prolonga hasta recibir a la viga reticulada. Sus secciones son delgadas en el extremo del tirante, se ensanchan y tienen dos alas a la altura del pilar, donde el momento flector es máximo y nuevamente delgadas donde se apoya la viga reticulada. Como ocurría en los arcos de hormigón armado que Robert Maillart diseñaba para sus puentes, las distintas secciones se adaptan a las solicitaciones a las que están sometidas, definiendo una compleja forma que varía a lo largo del eje de la pieza. La sección en forma de doble T, presente a lo largo de casi toda la longitud de la pieza, es idónea para resistir los esfuerzos de flexión. Las exigencias del moldeado del acero influyen en los espesores de las alas superiores e inferiores y la forma de la abertura superior y de las aberturas laterales, reflejan la secuencia de montaje.

Grandes rótulas esféricas se colocaron en el extremo en que descarga la viga reticulada y allí donde la viga Gerber se apoya en el pilar. Estas

articulaciones son necesarias para prevenir la transmisión de esfuerzos de flexión a los pilares y disminuir la esbeltez de los mismos.

El diámetro exterior de los pilares de 80 cm, por otra parte, es un límite impuesto por su proceso de fabricación: el moldeado centrífugo (Rice, 1998a: 29). Esta técnica consiste en hacer girar un molde cilíndrico alrededor de su eje mientras se vierte acero fundido en su interior. Cuanto más acero sea vertido, por lo tanto, mayor será el espesor del tubo. Para los pilares del Centro Pompidou se mantuvo constante el diámetro exterior en toda la altura, de modo que los detalles de ensamblaje no sufrieran alteraciones y su espesor se aumentó en las zonas de mayores esfuerzos.

El diseño del proyecto de ejecución del ambicioso anteproyecto del Centro Pompidou exigió la búsqueda de una solución estructural innovadora. La idea de un gran contenedor flexible y libre de obstáculos, que sirviera como lugar de encuentro para el más amplio público y se convirtiera en un icono de la cultura contemporánea, fue el desencadenante de una búsqueda de soluciones estructurales sugerentes y eficaces para salvar grandes luces. El diseño estructural del Centro Pompidou podría considerarse como exitoso, en la medida en que tanto el sistema como los materiales elegidos han resultado claves para el funcionamiento, la espacialidad y la imagen del edificio, respetando las ideas arquitectónicas del proyecto ganador del concurso.

A.A.: Ce projet diffère-t-il beaucoup de celui présenté au concours?
Vos conceptions initiales ont-elles évolué pendant les études?

R.P.: [...] Nous l'avons toujours considéré ainsi; une machine énorme et souple dans laquelle l'information, accessible à tous était dispensée dans une série d'espaces; un lieu abritant toutes formes d'activités hétérogènes, un outil répondant à de multiples fonctions. [...]

A.A.: Cette définition a-t-elle changé au cours des études?

R.P.: Non. [...]

(Piano et ál., 1973: 34-35).

R.P.: [...] Pour moi "l'Architecture" comprend un constant aller et retour entre le programme et les détails de construction. Notre projet est très travaillé, mais la clarté initiale n'est pas perdue.
(Piano et ál., 1973: 38).

El Centro ha cumplido ya sus primeros 35 años de vida y, efectivamente, se ha convertido en uno de los monumentos más reconocidos y visitados de París por el público internacional y en uno de los principales íconos de la arquitectura de finales del siglo XX.

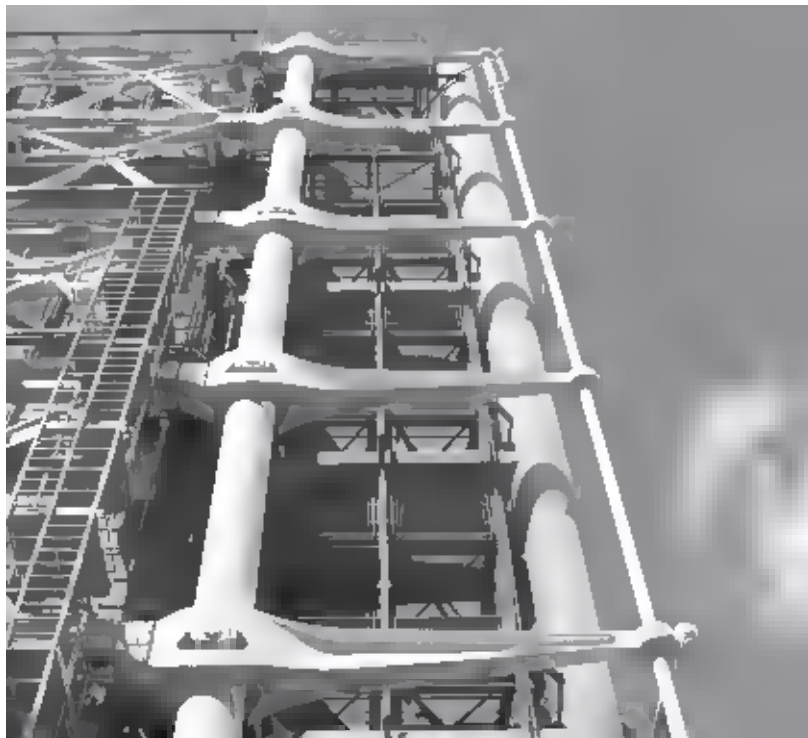


Figura 23. Detalle de fachada lateral del Centro Pompidou. Fotografía: Arq. Marcos Dagnino Eirin, 2011.

2.3.3. Cubierta sobre el Patio Reina Elizabeth II en el Museo Británico (1994-2000)

La geometría única e irregular de la cubierta sobre el Patio Reina Elizabeth II en el Museo Británico de Londres, diseñada por Foster & Partners en colaboración con Buro Happold, resulta de una problemática también única: la de cubrir el espacio irregular entre el domo circular de la Sala de Lectura y las fachadas interiores originales del edificio diseñado por el arquitecto Robert Smirke en el siglo XIX.

Foster había ya colaborado con Buckminster Fuller en proyectos teóricos de grandes cubiertas geodésicas que generaban en su interior

un microclima propio, de modo de «generar lo máximo con lo mínimo»: el proyecto Climatroffice y un teatro subterráneo bajo un patio en Oxford, pero ninguno había sido finalmente construido. Estos proyectos investigaban temas que Foster retomó en esta obra, como la flexibilidad, el ahorro de energía, la iluminación natural, la ligereza y la máxima contención de espacio con la menor envolvente posible.

A la hora de elegir el sistema estructural más apropiado, se optó por una cubierta abovedada de doble curvatura formada por una malla triangulada de acero que podría considerarse como la versión esquelética de una cáscara, siguiendo las ideas de Le Ricolais. Los estudios preliminares para el diseño de la forma de la cubierta incluyeron una maqueta con una película de jabón inflada entre el borde circular y el cuadrangular, que fue medida y utilizada como base para la forma final definida por ordenador (Castle, 2002: 77). El concepto de autoorganización como mecanismo de diseño de una estructura económica y eficaz está, por lo tanto, implícito desde las primeras etapas de elaboración del proyecto. La resolución de la irregular geometría obligó luego a recurrir al uso de programas informáticos de generación de forma, que Foster & Partners desarrollaron en colaboración con Mike Cook y Steve Brown de Buro Happold y con el matemático Chris Williams (Foster et al., 2001: 46).

La altura de la cubierta debía ser suficiente como para permitir la presencia de los pórticos clásicos en el centro de las fachadas interiores del museo, pero no debía provocar un fuerte impacto visual que alterara la imagen exterior. La forma final, que capturaba la esencia de la maqueta con la película de jabón y consideraba las limitaciones de altura, se generó completamente por ordenador. Consistía en una grilla de elementos radiales que salvan la luz entre la Sala de Lectura y el edificio del museo, intersectada por dos espirales que giran en sentidos opuestos, generando una malla triangulada similar a la que Buckminster Fuller diseñó para la patente de su Domo Geodésico de 1954. Esta forma irregular, de doble curvatura y compuesta por una malla geodésica de barras formando una superficie rígida, tiene un claro antecedente en los dibujos que Ernst Haeckel realizó sobre esqueletos de radiolarios en el siglo XIX. El diseño de esta estructura, por lo tanto, pertenece a la línea de investigaciones sobre estructuras livianas deducidas a partir de analogías con formas naturales que iniciaron Le Ricolais y Fuller.



Figura 24. Vista interior del patio Reina Elizabeth II, en el Museo Británico. Fotografía: Arq. Marcos Dagnino Eirin, 2006.

La transición desde el perímetro interior, de menor longitud, hasta el exterior, de mayor longitud, fue resuelta con triángulos pequeños en el centro que aumentan progresivamente de tamaño hacia los extremos. El número de triángulos de la malla fue optimizado, de modo que no resultaran ni demasiado pequeños como para que el número de barras fuera demasiado elevado, ni demasiado grande como para que en los bordes se generaran formas residuales. Sin el desarrollo de una herramienta informática específica para la problemática particular de la irregularidad geométrica, hubiera sido imposible la resolución de la cubierta. La complejidad de la problemática se tradujo, en este diseño, en una malla espacial triangulada con una compleja geometría, cuyo ajuste es posible únicamente gracias al empleo de herramientas informáticas que permiten un rápido cálculo de la geometría y de la estática.

Las 4.878 barras de acero que conforman el diseño final de la cubierta, son todas diferentes. Aproximadamente el 70 % de ellas tienen espesor constante, pero varían en longitud, y el 30 % restante son de espesor variable. Por otra parte, debían ser fabricadas con tolerancias mínimas para poder recibir sin inconvenientes a los 3.312 paneles de vidrio de revestimiento. Para

la fabricación de las barras la empresa austríaca Waagner Biro, encargada de la construcción, realizó modificaciones a un robot normalmente utilizado en la industria automovilística que cortó y numeró por el lado superior las piezas a partir de la información que recibía directamente desde un programa CAD con el modelo tridimensional completo de la cubierta (Foster et ál., 2001: 46). Este proceso es conocido como CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing) o fabricación asistida por ordenador.

La irregularidad de la forma de la cubierta implicó un diseño de alta complejidad en el que todas las barras tienen diferentes espesores, longitudes y ángulos de encuentro. El uso del ordenador en la definición de la geometría, en el proceso de fabricación de las barras y los nudos, y en el posicionamiento final en obra resulta imprescindible, por lo tanto, para alcanzar las tolerancias requeridas. La materialización de estructuras con este grado de complejidad implica el trabajo coordinado de profesionales de múltiples disciplinas y el manejo de grandes volúmenes de información, por lo que únicamente algunas pocas grandes firmas internacionales de arquitectos e ingenieros y algunas pocas empresas constructoras especializadas pueden abordarlo a través de un trabajo en colaboración.

A principios de 1996, un equipo formado por integrantes de Foster & Partners y Buro Happold trabajaron en el diseño de un sistema optimizado de cubierta integrando los elementos estructurales con los soportes y fijaciones de los paneles de vidrio (Foster et ál., 2001: 46). De esta forma, la estructura que en un principio se pensó formada por perfiles tubulares huecos de acero que soportaban una piel de vidrio independiente, se transformó en un sistema integral de perfiles rectangulares huecos que resuelve tanto la estructura como el marco de los cerramientos vidriados.

La estructura de barras de la cubierta conforma una única pieza apoyada en todo su perímetro, exterior e interior. En su perímetro interior, sobre la Sala de Lectura, se apoya en un anillo de 20 pilares nuevos que se agregan a la estructura original de acero fundido. Estos llevan la carga de la cubierta directamente a las fundaciones sin sobrecargar la antigua estructura. Los nuevos pilares, formados por perfiles tubulares huecos de acero rellenos de hormigón, se esconden en una cámara detrás del nuevo revestimiento de piedra de la Sala de Lectura, que también aloja otros servicios verticales como cañerías de desagüe de pluviales, ductos de ventilación, etc. (Foster et ál., 2001: 49).

Una nueva estructura circular que envuelve al antiguo domo actúa como diafragma de rigidización frente a movimientos horizontales y se encuentra apoyado sobre soportes deslizantes, de modo que flota sobre los pórticos históricos. En su perímetro exterior, la cubierta descansa sobre los muros

originales, conectada por pequeños pilares de acero a una nueva viga pretil de hormigón armado. El apoyo permite también los deslizamientos horizontales, de modo de no transmitir cargas horizontales a las antiguas estructuras de mampostería. Las deformaciones en la malla de la cubierta fueron estrictamente controladas durante todo el proceso de montaje. Los paneles de vidrio fueron posicionados en obra según una secuencia preestablecida, de modo que las deformaciones de la malla se dieran de acuerdo a los modelos matemáticos previstos. Finalmente, la deformación en vertical alcanzó los 15 cm y se expandió 9 cm en horizontal sobre los apoyos deslizantes, tal como estaba previsto (Foster et ál., 2001: 60-61).

El diseño integrado de diferentes componentes técnicos en una obra de alta complejidad, tales como estructura, cerramientos, sistemas de acondicionamientos de aire e instalaciones, implica un importante ahorro de materiales, energía y tiempo de obra. Esta optimización de la construcción implica el trabajo conjunto de profesionales de diferentes disciplinas que deben afrontar en equipo la resolución imaginativa y novedosa de un problema técnico seguramente único e irrepetible. En este ejemplo, estructura, cerramiento vidriado y protección solar se resuelven en un único sistema, minimizándose así el peso de la cubierta y poniéndose en evidencia las características de transparencia y simplicidad geométrica de la intervención.

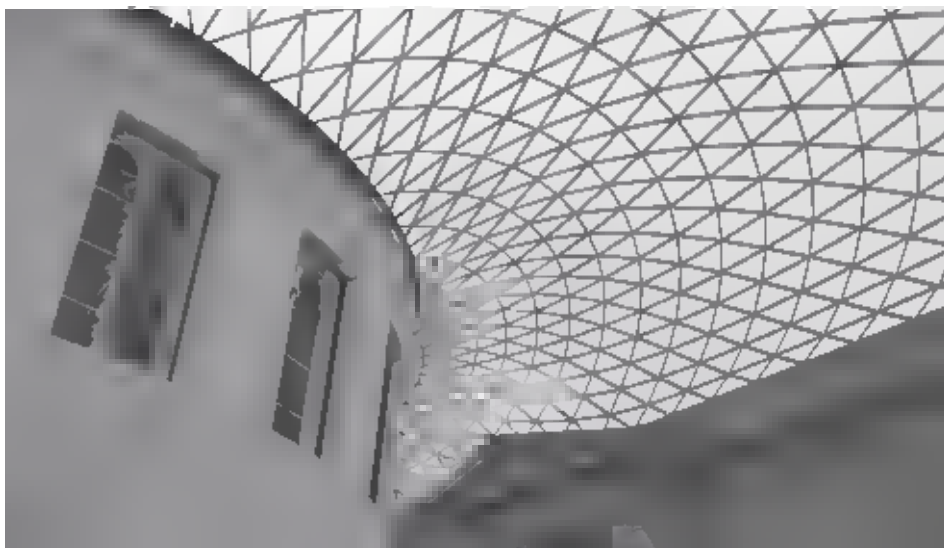


Figura 25. Vista interior de la cubierta del patio Reina Elizabeth II, en el Museo Británico. Fotografía del autor, 2006.



Figura 26. Vista panorámica interior del patio Reina Elizabeth II, en el Museo Británico. Fotografía: The Great Court, M.chohan, 2007.

2.3.4. Centro Nacional de Natación de Pekín (2003-2008)

El Centro Nacional de Natación de Pekín (CNNP) fue diseñado por el equipo de arquitectos australianos PTW Architects junto con la firma inglesa de ingenieros Arup & Partners, quienes resultaron ganadores del concurso internacional convocado por las autoridades chinas y la CSCEC (China State Construction Engineering Corporation). Se trata de un edificio que cubre una superficie de 70.000 m² y alberga en su interior cinco piscinas, un restaurante y gradas con capacidad para 17.000 espectadores.

El proyecto consiste en un prisma hueco de base cuadrada de 175 metros de lado y 35 metros de altura, cuya estructura se proyecta como un marco tridimensional continuo, con un espesor de 3,6 metros en las cuatro caras verticales y de 7,2 metros en la cubierta. La geometría de la malla de este marco se basó en la forma conocida más eficiente de subdividir el espacio tridimensional: la espuma de Weaire-Phelan.

En el siglo XIX, Lord Kelvin había planteado el problema de subdividir con una superficie de área mínima el espacio tridimensional en múltiples compartimentos de igual volumen y propuso el tetrakaidecaedro como solución. Los físicos irlandeses Denis Weaire y Robert Phelan, utilizando el programa informático Surface Evolver descubrieron en 1993 una espuma que, formada por dos tipos de compartimentos, uno con forma de tetradecaedro (con 2 caras

hexagonales y 12 caras pentagonales) y otro con forma de dodecaedro (con sus 12 caras pentagonales), rellenaba completamente el espacio tridimensional con una superficie 0,3 % menor que la espuma de Kelvin, formada por tetrakaidecaedros (A+U, 2005a: 126). La espuma de Weaire-Phelan es, al día de hoy, la forma conocida más eficiente de subdividir el espacio y por este motivo fue elegida como base para el diseño de la malla estructural del CNNP. El concepto de autoorganización está implícito en la elección de esta geometría.

El diseño de la malla del CNNP continúa los estudios de Le Ricolais sobre el grado de isotropismo de las redes espaciales. Cuanto mayor espacio ocupe una estructura, decía Le Ricolais, mayor inercia adquirirá y presentará mayor resistencia a las deformaciones. Con este criterio, había descubierto que una estructura de barras basada en la geometría cubo-octaédrica presentaba una alta eficiencia para resistir tanto flexiones como torsiones. Una estructura de barras coincidente con las aristas de los compartimentos de la espuma de Weaire-Phelan, se convertiría en la malla que rellena completamente el espacio de mayor inercia conocida. A pesar de su aparente complejidad, por otra parte, esta forma de subdividir el espacio se basa en un alto grado de repetición formal, ya que se genera a partir de la reiteración de tan solo dos módulos con tres tipos de caras, cuatro tipos de bordes y tres tipos de nodos, por lo que los altos valores de inercia se alcanzarían con una malla generada por cuatro tipos de barras y tres tipos de nudos.



Figura 27. Vista exterior del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

Partiendo de una porción del espacio ocupada por una malla esquelética de barras basada en el diseño de esta espuma y girada algunos grados con respecto a los ejes cartesianos, se cortó un prisma con las dimensiones del

edificio y de este prisma se extrajeron tres volúmenes interiores: la zona de la piscina para natación y saltos ornamentales, la zona de la piscina de waterpolo y el centro de recreo (Gonchar, 2008: 151). Como resultado de esta operación se obtuvo la geometría de la estructura del edificio que consiste en una cáscara continua, tanto en las paredes como en la cubierta, formada por una malla de gran rigidez geométrica, ideal para resistir las cargas de viento por tifones, nieve y sismo que pueden presentarse en Pekín. Esta estructura espacial se completa con una serie de mallas planas en las fachadas interiores y exteriores, que terminan de formalizar los frentes del edificio como cortes de la espuma y reciben a los paneles de revestimiento.

Tanto la retícula espacial como las fachadas planas reflejan, según Tristran Carfrae, director del grupo encargado del proyecto, citado por Gonchar, una imagen orgánica de alta complejidad acentuada por el giro realizado en la malla (Gonchar, 2008: 151), a pesar de estar generadas por la repetición de unos pocos elementos un número elevado de veces.

El modelado manual de una estructura de barras de esta complejidad es una tarea que lleva varios meses, por lo que el equipo de Arup & Partners desarrolló, en la etapa del concurso, un programa informático específico para generar la geometría de la malla, con más de 22.000 barras y 12.000 nudos (Carfrae, 2008: 130), en unos pocos minutos. La sistematización de esta operación, además de ahorrar tiempo, redujo la probabilidad de error humano. El modelo geométrico así determinado se exportó a otros programas para el dibujo de la planimetría de obra, la confección de maquetas y el cálculo estructural.

A efectos de presentar al concurso una pieza que permitiera una mejor visualización de la estructura, se fabricó una maqueta con polvo de nylon sinterizado y resina epoxi solidificada con láser, a través de un proceso similar al de la estereolitografía. Este procedimiento permitió la realización de un modelo físico exacto en un tiempo muy breve a partir del modelo digital tridimensional, con detalles prácticamente imposibles de lograr con herramientas tradicionales de confeccionado de maquetas, con lo cual en la etapa del concurso fue posible avanzar en el diseño del edificio y de la estructura hasta pocas horas antes de la finalización de los plazos de entrega. Sin el uso de estos recursos informáticos de última generación hubiera resultado imposible el proyecto y diseño de una estructura de tal complejidad geométrica en los plazos planteados por el concurso.



Figura 28. Vista interior del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

Las barras de la malla fueron diseñadas, tras el concurso, con perfiles tubulares huecos de acero unidos por nudos esféricos, también de acero. Los ingenieros de Arup & Partners desarrollaron un programa de análisis y optimización estructural que, a través de un proceso iterativo, determinó el tamaño mínimo necesario para cada una de las barras de acero de la malla sometida a 190 estados de carga diferentes, generando de esta manera la estructura más liviana y económica posible (Gonchar, 2008: 152). Los datos de tamaño, forma y peso de las barras fueron guardados, a continuación, en una base de datos. Gracias al alto grado de sistematización alcanzado en el proceso de diseño y cálculo de la estructura, fue posible la generación de planos de obra con un gran nivel de precisión en un tiempo reducido. Antes de que comenzara la obra, el equipo de ingenieros entregó a la empresa constructora el modelo tridimensional del edificio, planos tradicionales en dos dimensiones y una base de datos completa de las barras de la malla.

Los paneles de revestimiento del edificio, tanto de las fachadas exteriores como de las interiores, se diseñaron con almohadillas de etileno-tetrafluoroetileno (ETFE), mucho más liviano que el vidrio, por lo que la estructura resultó fuertemente aliviada. Al quedar entre las dos capas

de almohadillas de ETFE, por otra parte, el acero permanece protegido del ambiente exterior y del ambiente interior de las piscinas, con altos niveles de cloro (Pearson, 2008: 102). Este sistema de revestimiento fue igualmente utilizado en obras como el Proyecto Edén, de Nicholas Grimshaw o en el estadio Allianz Arena en Múnich, de Herzog y de Meuron.

Los edificios destinados a albergar piscinas olímpicas utilizan habitualmente una gran cantidad de energía para su calefacción. El CNNP fue diseñado para un uso energético eficiente, capturando hasta el 90 % de la energía solar que incide sobre la envolvente del edificio y utilizándola para iluminarlo naturalmente y para calefaccionar, tanto el agua de las piscinas como el aire interior. Se estima que se ha logrado un ahorro del 30 % de la energía necesaria para la calefacción y del 55 % de la energía para la iluminación artificial, con respecto a los niveles de consumo habituales de un edificio deportivo de similares características (Carfrae, 2008: 130).

Desde el punto de vista energético, el edificio se comporta como un gran invernadero. El espacio entre las fachadas exteriores e interiores se utiliza una gran cámara de aire ventilada, que en verano libera al exterior el calor captado y en invierno lo impulsa con ventiladores hacia el interior. El diseño estructural se integra, entonces, con el diseño de sistemas de acondicionamiento natural, convirtiéndose los huecos de la malla en una cámara de aire que permite la optimización energética del edificio.

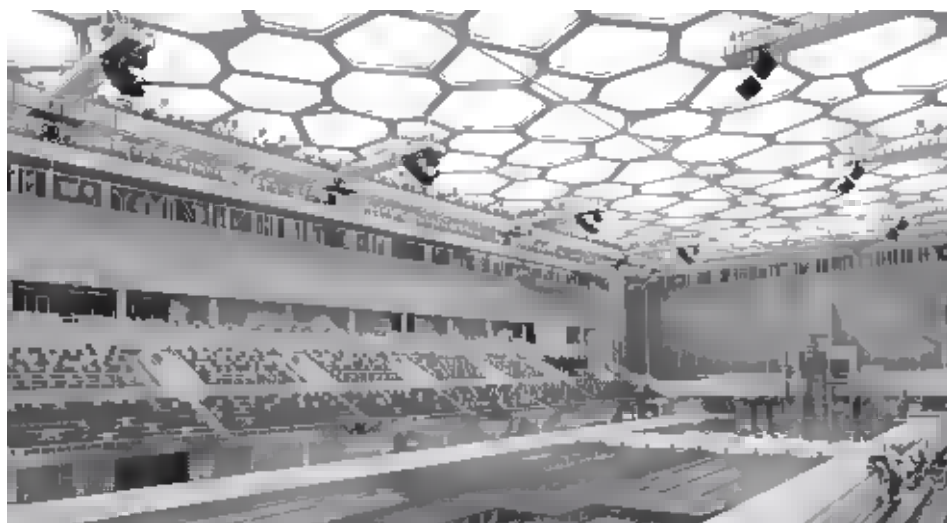


Figura 29. Vista interior del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

2.4. Evolución reciente en el diseño de las estructuras de barras

El uso del mecanismo de la triangulación en la construcción de estructuras de barras se remonta a la época antigua cuando se diseñaban, por ejemplo, cerchas planas de madera para sostener cubiertas inclinadas de templos, palacios o villas. Pero el diseño de sistemas estructurales basados en la *triangulación del espacio* es relativamente reciente. Las primeras experiencias surgieron a finales del siglo XIX con el objetivo de optimizar el diseño de aparatos voladores en los que resultaban fundamentales las características de rigidez y liviandad. A principios del siglo XX, Alexander Graham Bell propuso la forma tetraédrica como módulo para la construcción de grandes estructuras ligeras y resistentes, reconociendo en la triangulación espacial un eficaz mecanismo geométrico de rigidización.

Durante la primera mitad del siglo XX, Robert Le Ricolais desarrolló conceptos como geodesia, partición igualitaria del espacio e isotropismo a partir de la observación de algunas formas en la naturaleza y descubrió que cuanto más se expande una estructura en el espacio, mayor es su inercia y menores son sus deformaciones. Por primera vez los conceptos de inercia, rigidez y triangulación se entrelazan en la búsqueda de la eficiencia de las estructuras espaciales de barras, que se convierten en una nueva tipología estructural con un enorme potencial para la arquitectura. Sus diseños de vigas atirantadas, de columnas automórficas y de redes espaciales tuvieron una enorme influencia en el diseño de innumerables proyectos que investigan, hasta el día de hoy, la ligereza de las estructuras.

A mediados del siglo XX surgieron una serie de proyectos arquitectónicos que comenzaron a aplicar las ideas de Graham Bell y de Le Ricolais: los domos de Fuller o de Makowski, los rascacielos geodésicos de Kahn y Tyng, las cubiertas de grandes luces de Royce, Hurley y Stewart, de Muchow, Haller y Larson o 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 y que define la organización espacial del edificio. En el Philadelphia City Tower de Kahn y Tyng, en la Ciudad Tetraédrica de Fuller y en el Pabellón Man the Producer de Guy Desbarats, estos espacios a distintas escalas son generados a partir de iteraciones hacia el interior del edificio de un módulo tetraédrico principal, según un principio geométrico de *crecimiento celular fractal*, similar 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 *mallla fractal de huecos* en el espacio.

La clave para diseñar un gigante, parecería enseñarnos la naturaleza y el trabajo de algunos arquitectos e ingenieros, consiste en aprender a trabajar adecuadamente la geometría según una apropiada jerarquía de escalas.

Durante la segunda mitad del siglo XX se produce el desarrollo de las herramientas informáticas, lento en sus inicios pero sin interrupciones y a un ritmo cada vez más acelerado, de modo que hoy día es posible el dibujo, cálculo y fabricación de estructuras de barras con geometrías complejas en tiempos extremadamente breves. Desde las últimas décadas del siglo XX se cuenta con programas informáticos capaces de resolver con exactitud las solicitudes de estructuras con geometrías complejas. Frente a problemas particulares de alta complejidad, como los planteados por la cubierta irregular sobre el patio del Museo Británico o por la mallla del CNNP, resulta relativamente sencillo para las grandes firmas de ingeniería, que cuentan con el apoyo de profesionales en matemáticas y en programación, el desarrollo de programas informáticos específicos que garanticen exactitud y eliminen la posibilidad de error humano.

La cubierta del Museo Británico se resolvió con un asombroso grado de optimización estructural; cada barra tiene la sección mínima necesaria y muchas de ellas, además, tienen secciones variables. No existen dos barras idénticas, varían tanto sus longitudes como sus espesores y todos los encuentros se producen con diferentes ángulos en los nudos. Soluciones con este grado de complejidad son posibles gracias a la incorporación de procesos de fabricación asistidos por ordenador (CAD/CAM).

La mallla del CNNP, con una compleja geometría, fue sometida a 190 estados diferentes de cargas. Abordar tareas de esta complejidad con métodos manuales de dibujo, de cálculo o de fabricación implicaría enormes insumos de tiempo con altísimas probabilidades de error.

Esta forma de trabajo, que implica la cooperación de un número elevado de profesionales en distintas disciplinas y la necesidad de acceder a tecnología de última generación, solo puede generarse a partir de la colaboración de algunas pocas empresas internacionales especializadas en la construcción de edificios complejos con grandes firmas de arquitectos e ingenieros.

Sin embargo, los principios estructurales aplicados en el diseño de las complejas estructuras de barras construidas a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, parecen generalmente basarse en ideas como la triangulación espacial, la modulación y equipartición del espacio, la geodesia y la búsqueda de la máxima inercia con el mínimo peso, desarrolladas a lo largo de la

primera mitad del siglo XX. La cubierta abovedada de doble curvatura del Museo Británico está formada por una malla triangulada de acero que podría considerarse como la versión esquelética de una cáscara, el diseño de la malla del CNNP continúa los estudios de Le Ricolais sobre el grado de isotropismo de las redes espaciales y los grandes domos, como La Geoda en el Parque de la Villette de París, el Jardín Botánico Nacional de Gales de Foster & Partners o el Proyecto Edén de Grimshaw, siguen los principios de geodesia y modulación, establecidos por Buckminster Fuller.

El diseño de estructuras tridimensionales de barras con características fractales, impulsado por trabajos teóricos, como los rascacielos para Philadelphia de Kahn y Tyng o la ciudad tetraédrica de Fuller, no ha sido retomado en los últimos años pese al surgimiento de las matemáticas fractales y al importante desarrollo de potentes herramientas informáticas de diseño, que parecen ser idóneas para este tipo de estudios.

La posibilidad de calcular con exactitud formas complejas ha hecho realidad, sin embargo, el diseño de grandes estructuras optimizadas a través de ensayos de autoorganización o *form finding*. La forma final de cubiertas como la del patio del Museo Británico o las del Proyecto Edén, se basan en estudios preliminares con películas de jabón, y la geometría de la malla estructural del CNNP es fruto del desarrollo de numerosos experimentos de empaquetamiento de esferas. La exactitud y la velocidad del cálculo por ordenador han permitido el diseño de geometrías más eficaces que permiten salvar luces cada vez mayores con este tipo de estructuras.

El manejo e intercambio de grandes volúmenes de información a gran velocidad ha estimulado, por otra parte, la integración entre el diseño estructural y el de otras disciplinas arquitectónicas con el objetivo de la optimización global de la edificación. De este modo, arquitectos e ingenieros de Foster & Partners y de Buro Happold optimizaron el diseño de la cubierta en el patio del Museo Británico, integrando los elementos estructurales con los soportes y fijaciones de los paneles de vidrio, y técnicos de PTW Architects y de Ove Arup & Partners diseñaron en colaboración, para el CNNP, un sistema constructivo único capaz de resolver a la vez estructura, cerramiento y acondicionamiento natural, optimizando tanto recursos materiales como energéticos y convirtiéndose en un símbolo de progreso para la nación china.

Capítulo 3. Las estructuras superficiales

3.1. Las estructuras superficiales a principios del siglo XX

3.1.1. Surgimiento de las superficies parabólicas e hiperbólicas a finales del siglo XIX

A finales del siglo XIX, el ingeniero ruso Vladimir Shukhov comenzó a trabajar en el diseño de sistemas estructurales livianos, económicos y rápidos de montar para cubrir espacios de grandes luces. Sus obras tenían por objetivo la búsqueda del máximo rendimiento de los recursos disponibles, tanto materiales como humanos, y pueden entenderse como investigaciones sobre sistemas constructivos y estructurales ligeros, económicos y de rápida puesta en obra. Torres, depósitos elevados de agua, faros, mástiles de barcos y cubiertas de grandes luces son algunos de los programas con los que trabajó.

Utilizando sofisticadas ecuaciones diferenciales para el análisis de superficies de doble curvatura y basándose en los trabajos previos de los matemáticos Pafnuty Chebyshev y Nikolai Lobachevsky, descubrió una nueva familia de sistemas estructurales conocidos luego como *hiperboloides de revolución y paraboloides hiperbólicos*.

Las cubiertas de los ocho pabellones que diseñó para la Exposición Industrial y Artística de toda Rusia, de 1896, en Nizhni Novgorod, consistían en mallas de barras y perfiles normalizados de acero formando superficies hiperbólicas que cubrían un área total de unos 27.000 m². Cuatro pabellones se techaban con cubiertas colgantes traccionadas y cuatro con bóvedas comprimidas (Graefe et ál., 1990: 43). Próximo a los pabellones construyó un tanque de 114.000 litros de agua elevado a una altura de 25 metros para

abastecer a la exposición, utilizando una estructura de perfilería de acero similar a la de las cubiertas. Una malla de barras y perfiles metálicos rectos, dispuestos de manera oblicua, formaban una superficie de doble curvatura de gran rigidez y liviandad. Esta fue la primera estructura hiperbólica de revolución jamás construida.

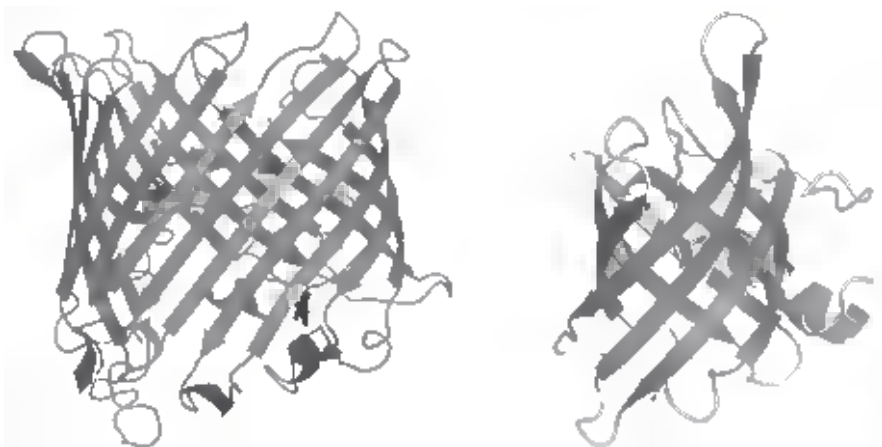


Figura 30. Estructura «barril beta» de proteínas porinas. Ilustraciones extraídas de Internet (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sucrose_porin_1a0s.png y https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rbp_1brp.png), © Opabinia regalis / CC-BY-SA 3.0.

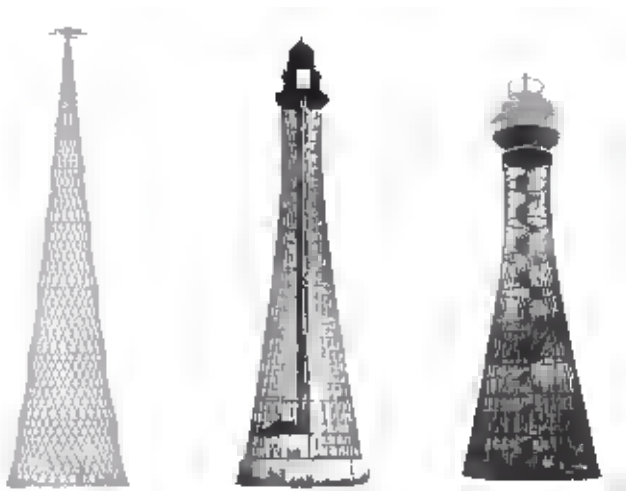


Figura 31. Tres torres diseñadas por Shukhov. De izquierda a derecha: Depósito elevado de agua para la Exposición Industrial y Artística de toda Rusia (1896), proyecto original de la Torre Shabolovka (1919) y Faro de Adziolog (1908).



Figura 32. Cubiertas suspendidas para la Exposición Industrial y Artística de toda Rusia, de 1896, en Nizhni Novgorod.



Figura 33. Aro central de pilares de una de las cubiertas suspendidas para la Exposición Industrial y Artística de toda Rusia, de 1896, en Nizhni Novgorod.



Figura 34. Cubiertas reticuladas comprimidas para la Exposición Industrial y Artística de toda Rusia, de 1896, en Nizhni Novgorod.

La industrialización rusa, en los siguientes años, demandó la construcción de numerosos tanques de agua elevados y Shukhov recibió cientos de encargos (Graefe et ál., 1990: 45), ya que su sistema era más económico y de mayor celeridad constructiva que cualquier otro sistema constructivo de la época.

Shukhov fue el primero en construir estructuras superficiales de doble curvatura utilizando elementos rectos. A partir de la puesta en obra de elementos lineales, simples y estandarizados, como son los perfiles normalizados de acero, obtuvo una superficie compleja de doble curvatura, inédita hasta el momento en el campo de la construcción y con cualidades resistentes extraordinarias. La particular geometría de estas nuevas tipologías estructurales permitía obtener mallas de gran rigidez solicitadas exclusivamente a esfuerzos axiales, de modo que resultaban particularmente livianas y aptas para salvar grandes luces. Por primera vez en una estructura de acero no existía una clara distinción entre elementos principales y secundarios, todos los elementos estructurales estaban sometidos al mismo tipo de esfuerzos.

La sencillez del procedimiento de montaje y el empleo de elementos estandarizados de uso común permitían un importante ahorro económico. Estos factores fueron determinantes en el éxito del trabajo de Shukhov.

La configuración geométrica de estas estructuras presenta similitudes con la forma que adoptan algunas proteínas. Las fibras de colágeno, por ejemplo, se organizan en la piel a modo de cestos de mimbre, de modo de

generar una red capaz de resistir tracciones en varias direcciones, y en las trabéculas de los huesos se disponen en forma de láminas superpuestas formando ángulos rectos con respecto a las capas adyacentes. Las capas de tejido conectivo del mesenterio contienen paquetes de fibras de colágeno intercaladas con fibras elásticas y fibras argirófilas en distintas direcciones, formando grandes redes que envuelven y fijan a las paredes abdominales algunos órganos del aparato digestivo.

La estructura cuaternaria de ciertas proteínas, como por ejemplo las porinas, consiste en el agrupamiento de una serie de láminas beta que se tuercen y enrollan para formar una estructura cerrada con forma de barril, denominada *barril beta*, con evidentes similitudes formales a los empaquetamientos de perfiles de acero en forma de hiperboloide de revolución que desarrolló Shukhov para sus torres.

Gracias a la gran economía de recursos de los sistemas constructivos que desarrolló, en los años siguientes construyó cientos de estructuras en todo el mundo, fundamentalmente cáscaras reticulares y torres hiperbólicas. La Torre Shabolovka en Moscú y el Faro de Adziolog en Ucrania son algunas de sus obras más espectaculares.

La torre para la Red de Radiodifusión Shabolovka de Moscú fue diseñada en el año 1919. Contaba con nueve tramos hiperbólicos superpuestos que alcanzaban una altura de 350 metros, es decir, 50 metros más que la Torre Eiffel, pero utilizando tan solo el 25 % del total del acero de la torre parisina. Pero la escasez de metales en Rusia, tras la guerra civil obligó a reducir la torre que fue finalmente construida en 1922 con solo 150 metros de altura (Graefe et ál., 1990: 48). El diseño de esta torre consiste en el apilamiento de seis módulos con forma de hiperboloide de revolución, tal como los que ya había utilizado para soportar numerosos tanques elevados de agua. Pero la forma final resultaba aproximadamente cónica, debido a la progresiva reducción de los diámetros de los sucesivos módulos. Gracias a su estructura en forma de malla abierta y a la forma cónica, que baja el centro de gravedad de la construcción, se minimizaba la incidencia de la presión de viento en la torre.

Los detalles de la estructura eran todos de una gran simplicidad constructiva. Las barras longitudinales del hiperboloide consistían en dos perfiles UPN n.º 14 que se fijaban a anillos intermedios de rigidización, formados por perfiles simples UPN n.º 10. El anillo inferior consistía en dos perfiles angulares de 100x100x6 mm que se fijaban mediante bulones de anclaje a la fundación. Para la fijación de los distintos módulos entre sí se utilizaron dos perfiles angulares de 100x100x10 mm unidos por un pequeño reticulado.

Los módulos se montaban en obra según un sistema telescópico inventado por Shukhov que no requería el empleo de grúas o andamios. Los tramos más altos se construían en el interior de los más bajos y mediante un sistema de cinco poleas de madera se iban montando unos sobre otros (Graefe et ál., 1990: 48-49).

3.1.2. El sistema geodésico

El ingeniero británico Barnes Wallis desarrolló para la industria aeronáutica, durante los años previos a la segunda guerra mundial, un sistema estructural caracterizado por una trama cruzada de barras de pequeña longitud autoestabilizadas en la que cualquier carga en cualquier dirección era repartida en todo el entramado: el *sistema geodésico* (Hosch, 2007).

Hasta entonces, la estructura de los aeroplanos consistía en un esqueleto compuesto por pórticos rectangulares de los cuales se sujetaba la piel exterior con una compleja estructura de madera que añadía un peso considerable a la estructura básica. Wallis no solo eliminó el falso marco de madera, sino que, al mismo tiempo, ensanchó la estructura interior. Diseñó con superficies geodésicas tanto el fuselaje como las alas de sus aviones, obteniendo una estructura más ligera, fuerte y rígida frente a esfuerzos de flexión y torsión. El bombardero Wellesley, un monoplano de largo recorrido, fue la primer nave construida con este sistema (Hosch, 2007).



Figura 35. El bombardero Wellington, diseñado por el ingeniero Barnes Wallis (1936).

En 1936 desarrolló el proyecto del bombardero Wellington, uno de los más exitosos jamás diseñado y del cual se construyeron más de 11.000 unidades. La rigidez del sistema estructural era tal que permitía a la aeronave mantenerse en vuelo aún habiendo sufrido daños importantes. Sin embargo, el alto costo de fabricación de las estructuras geodésicas favoreció el uso del sistema de costillas paralelas en modelos posteriores, en detrimento de la resistencia de la nave.

El sistema geodésico encontró posteriormente aplicaciones en otros campos de la industria, como la construcción de botes o la construcción edilicia. El domo geodésico de Buckminster Fuller, patentado en 1954, empleaba una malla estructural triangulada que podría considerarse como una evolución de este sistema.

3.1.3. El hormigón armado y las cáscaras estructurales a principios del siglo XX

A partir de la década de 1920 comenzó a experimentarse en varios países con la construcción de cubiertas laminares de hormigón armado y esta tipología estructural llegó a alcanzar un importante auge en la década de 1950, gracias a su eficacia y economía. Se trata de una tipología estructural cuya forma colabora con el comportamiento resistente y que alcanza, por lo tanto, resultados paradigmáticos cuando «se une la sensibilidad estética con la sensibilidad estática» (Jordá, 2002b: 54), tal como se puede apreciar en la obra de arquitectos e ingenieros como Eero Saarinen, Félix Candela, Pier Luigi Nervi, Heinz Isler o Eduardo Torroja.

Pronto se convirtió en la respuesta idónea a los grandes equipamientos, tales como industrias, mercados, aeropuertos o instalaciones deportivas, que el desarrollo social y económico de la posguerra empezó a demandar.

En sus inicios, su construcción se encontraba reservada al ámbito de unos pocos especialistas debido a las dificultades que presentaban. El desarrollo de estructuras abovedadas, superficies alabeadas y cúpulas va permitiendo descubrir un nuevo universo de formas arquitectónicas extraordinariamente sugestivas en pleno auge del Movimiento Moderno, hasta que el encarecimiento de la mano de obra y de la construcción de encofrados llevó a su desuso en la década de los años 1960 (Jordá, 2002b: 51-52).

La necesidad de que el equilibrio de las estructuras quedara garantizado mediante cálculos, hizo cobrar un protagonismo especial al análisis matemático y, en algunos casos, este volvió inviable la construcción de obras razonables. A principios del siglo XX, los métodos conocidos de análisis de estructuras se basaban en la teoría de la elasticidad. En 1826, Lamé y Clapeyron desarrollaron la *analogía de la membrana*, bajo la hipótesis de que las cáscaras podrían

resistir acciones exteriores, siempre que no produjeran esfuerzos de flexión. Más tarde, C. B. Airy y A. E. Love establecieron que la teoría de la membrana solo era aplicable cuando la forma de la bóveda coincidía con la línea de presiones y desarrollaron una serie de conceptos matemáticos más exactos a la hora de estudiar cáscaras cilíndricas. Siguiendo esta línea, Carl Zeiss obtuvo las ecuaciones matemáticas que luego servirían de base a los experimentos prácticos de Weshinger.

El desarrollo de sucesivos sistemas de cálculo apoyados en experiencias prácticas llevó a la construcción de la primera gran cubierta en el Planetario de Dusseldorf, en 1926. El sistema empleado fue patentado como cubiertas Zeiss-Dywidag y tenía la particularidad de considerar a la bóveda como una viga apoyada en los tímpanos, despreciando la transmisión de cargas a los apoyos laterales.

Freyssinet, en Francia, construyó el Mercado de Reims y los Talleres Bagneux, entre 1938 y 1929.

En 1936, F. Aimond publicó su libro *Estudio estático de las velarias ligeras del paraboloides hiperbólico trabajando sin flexión*, en el que desarrolló métodos de cálculo para cubiertas de este tipo.

El primer paraboloides hiperbólico laminar lo construyó Giorgio Baroni en Milán, en 1937 (Jordá, 2002a: 124-125).

El ingeniero español Eduardo Torroja construyó la cubierta del Mercado de Algeciras en 1934 y las Tribunas del Hipódromo de la Zarzuela y el Frontón de Recoletos en 1935. Los medios de cálculo de ese entonces no eran suficientes para analizar estructuras con la complejidad geométrica de estos ejemplos. En el caso del Mercado de Algeciras, no era posible determinar con exactitud la interacción entre la cúpula esférica y las bóvedas cilíndricas de borde y en el del Hipódromo de la Zarzuela, el hecho de que las cubiertas en voladizo no fueran paraboloideas, aunque lo parecieran, impidió aplicar los métodos de cálculo entonces conocidos (Jordá, 2002a: 82).

Para resolver estos problemas, Torroja desarrolló cálculos manuales aproximados que comprobaba con el comportamiento de modelos reducidos de escala y fundó su propia empresa para el desarrollo de las tecnologías de ensayo necesarias, frente a la inexistencia de centros de análisis experimentales en España (Jordá, 2002a: 82). Una prueba de carga, decía, es el método idóneo para verificar la validez de los métodos de cálculo matemáticos. Si el análisis matemático no es lo suficientemente válido como para resolver un problema, se puede recurrir a métodos experimentales y analítico-experimentales, si bien pueden resultar caros por requerir de costosas instalaciones manejadas por personal especializado (Torroja, 1960: 375).

Para Torroja, el objetivo principal del diseño de un proyecto es que los aspectos funcionales y estéticos formen una unidad integrada, tanto en esencia como en apariencia. El cálculo, decía, no es más que una herramienta para prever si las formas y dimensiones de una construcción son aptas para soportar las cargas a que ha de estar sometida. Es una herramienta accesoria a un buen diseño y a una adecuada concepción de la forma. La experiencia y la intuición permiten una adecuada aproximación al comportamiento de las estructuras, mientras que el cálculo solo sirve para verificar las decisiones de proyecto (Jordá, 2002a: 307-312).

El Frontón de Recoletos se cubrió con una lámina cilíndrica generada por dos arcos de circunferencia de 12,3 y 6,4 metros de radio, unidos ortogonalmente y salvando una luz de 55 por 32,5 metros (Jordá, 2002a: 197). Dicha cubierta se apoyaba únicamente en los muros testeros y su espesor era de 8 cm, excepto en las cercanías del encuentro de las dos circunferencias donde aumentaba a 16 cm para soportar el mayor momento transversal y cubrir adecuadamente la gran armadura longitudinal necesaria. Dos lucernarios, que proporcionaban iluminación a la zona de juego y a la tribuna más alta, se resolvían sustituyendo la lámina por una estructura triangulada con nervios de 15 x 30 cm, formando triángulos equiláteros de 1,4 metros de lado.

Despreciando ciertos efectos que Torroja no consideró relevantes para el comportamiento de la estructura y considerando como continua la triangulación de los lucernarios, fue posible aplicar un cálculo laminar matemáticamente correcto. La resolución manual del sistema resultante, de 54 ecuaciones con 54 incógnitas, llevó varios meses de trabajo a un equipo de expertos calculistas dotados con reglas de cálculo y sumadoras mecánicas, por lo que Torroja, desconfiando por la alta probabilidad de error humano, encargó el mismo cálculo a un segundo equipo. Las dos soluciones halladas presentaron grandes diferencias, por lo que se decidió que cada equipo corrigiera el cálculo del otro. El resultado final fueron cuatro resoluciones, todas diferentes. Cuanto más trabajosos sean los cálculos, afirmaba Torroja, mayor es la probabilidad de equivocarse y, por ello, se necesita más práctica para poder detectar un error que pueda poner en peligro la estabilidad o la resistencia de una obra; es necesario verificar siempre que las ideas y los cálculos estén de acuerdo (Torroja, 1960: 372).

Torroja recurrió, entonces, al ensayo de un modelo a escala reducida de la cubierta en el que desarrolló un ingenioso sistema de aplicación de cargas, en particular la de viento, que permitió corregir los resultados de los cálculos teóricos y las pequeñas diferencias derivadas de la presencia de la zona triangulada (Jordá, 2002a: 82-83 y 220-221).

La terminal de pasajeros de la Trans World Airlines (TWA) del Aeropuerto Kennedy, en Nueva York, construida por Eero Saarinen entre 1956 y 1962, es un ícono de la arquitectura de mediados del siglo XX. Su diseño surgió, según Saarinen, de la expresión formal de tres principios: función, estructura y voluntad de ser parte del espíritu de su tiempo (Leubkeman, 1992: 108). A través del uso de formas orgánicas y sinuosas, Saarinen pretendía representar la función del edificio (Fisher, 1992: 96), pero esta referencia aerodinámica con un inusual despliegue de creatividad formal, también reflejaba una estudiada distribución de los esfuerzos estáticos (Jordá, 2002b: 55). Saarinen definió a la terminal como una construcción que expresa la espectacularidad, singularidad y excitación del viaje, por lo que la concibió como un lugar de movimiento y pasaje, más que como un espacio estático y cerrado (Papademetriou, 2001: 22).

Antes de elaborar el proyecto analizó los movimientos de los recorridos a pie de flujos de usuarios, viajeros, acompañantes y visitantes en otras terminales, observando que sus trayectorias nunca eran rectilíneas. Cuando un peatón percibe la proximidad de un obstáculo, observó, sigue un camino curvilíneo similar a las trayectorias aerodinámicas de algunos gases. Luego, este análisis teórico sobre la función sirvió como base para el desarrollo de sus conceptos sobre cómo diseñar una terminal de aviones. Las formas sinuosas de su proyecto se van ajustando al movimiento de los viajeros trasladándose desde los mostradores de la compañía hacia las áreas de espera (Papademetriou, 1992: 103). Saarinen analizó, de esta manera, al edificio como un artefacto entre máquina y órgano. La función, podría decirse, esculpe la forma de la terminal.

El diseño fue trabajado con modelos materiales. Varias maquetas a distintas escalas fueron construidas para ensayar las soluciones formales, estructurales y constructivas. Luego de los primeros croquis, el equipo de diseño comenzó a realizar maquetas en arcilla, pero como resultaron muy trabajosas, el análisis formal continuó con maquetas de cartón. A medida que el diseño avanzaba, se realizaron modelos cada vez más grandes con tiras que intentaban describir el perfil adecuado de la cubierta (Leubkeman, 1992: 108), que fue evolucionando desde una superficie única hasta cuatro cáscaras independientes soportadas por arcos y pilares en forma de Y, formando en planta una especie de estrella de cuatro puntas.

El proyecto que Jørn Utzon presentó al concurso internacional para la Ópera de Sydney, del cual Saarinen había sido jurado poco tiempo antes, tuvo seguramente una fuerte influencia en el diseño de esta cubierta, que podría considerarse como una de las primeras bóvedas con una geometría libre y orgánica de la historia de la arquitectura. Cada una de las cubiertas se apoya en dos pilares y todas ellas se encuentran, por otra parte, en el centro

de la terminal en donde se equilibran mutuamente. Las cuatro cubiertas son formalmente distintas, pero todas son superficies de doble curvatura capaces de ser generadas por componentes rectos, es decir, son superficies regladas. Las dos bóvedas mayores tienen hasta 19 pulgadas de espesor y descansan sobre vigas curvas de borde que fueron diseñadas como pliegues de la misma cáscara, que contribuyen a la estabilidad por su mayor rigidez y descargan sobre los pilares. Entre estas vigas de borde se dispusieron bandas vidriadas que dividen a las bóvedas, enfatizando la sensación de liviandad de la cubierta (Papademetriou, 1992: 103).

Las deformaciones de las bóvedas medidas en obra, unos 3,3 cm, resultaron muy por debajo de los 15 cm previstos por la firma de ingenieros Ammann & Whitney, responsables del cálculo estructural de la terminal.

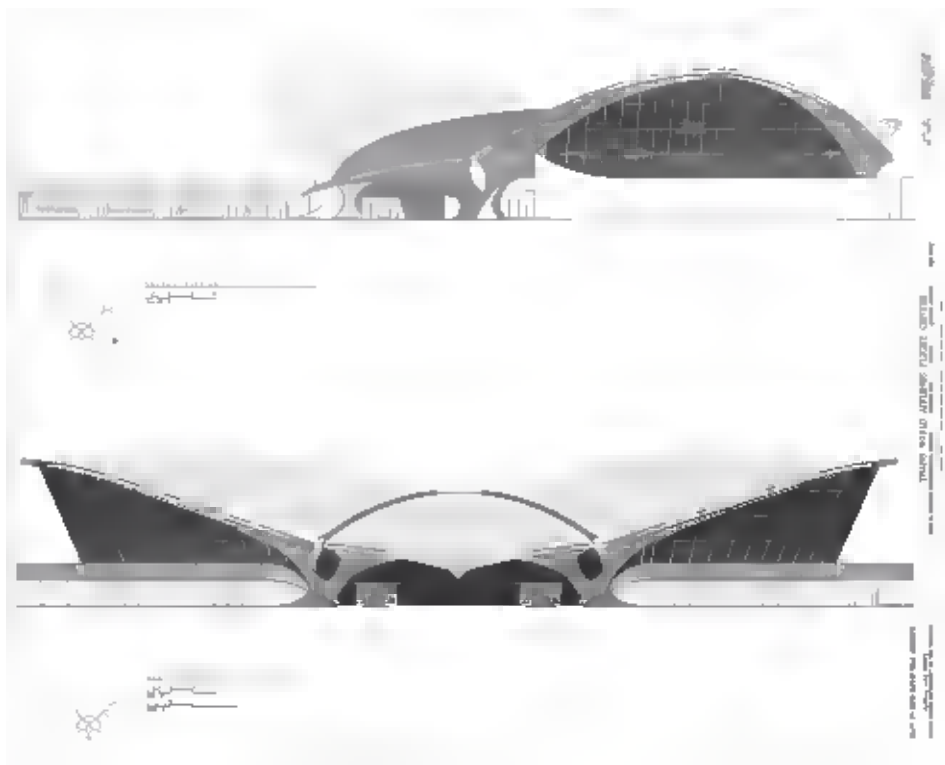


Figura 36. Fachadas de la terminal de pasajeros de la TWA del Aeropuerto Kennedy, en Nueva York (1956-1962). Historic American Buildings Survey - NY 6371.

3.2. Las cáscaras complejas a mediados del siglo XX

3.2.1. Las cubiertas de la Ópera de Sydney

En 1957 se realizó el concurso internacional de arquitectura para la construcción de un complejo de edificios en Sydney dedicado a las artes musicales y dramáticas. El programa del concurso preveía el diseño de dos salas principales, la mayor con una capacidad de unos 3.000 asientos, dedicada a la ópera y a los conciertos de la orquesta sinfónica de Sydney y la menor, con unos 1.200 asientos, a la realización de espectáculos de arte dramático. Otras dos salas menores, de unos 400 y 300 asientos respectivamente, se destinaban al teatro, a la música de cámara y a salones de reuniones.

El jurado, bajo la dirección de Eero Saarinen, eligió como ganador al proyecto del arquitecto danés Jørn Utzon, que presentaba una sugestiva propuesta de cubiertas con formas curvas libres, definidas a nivel de bocetos y cuya viabilidad técnica no resultaba totalmente clara, estableciendo que estos bocetos presentaban el concepto de un edificio que podía convertirse en una gran obra arquitectónica y que eran la propuesta más creativa y original presentada al concurso. Se destacaban, además, el diseño del auditorio a modo de un templo griego sobre una maciza base de piedra que enfatizaba el carácter natural del emplazamiento en Bennelong Point y el dinamismo de la forma de sus cubiertas, que contrastaba con el perfil de la ciudad y se integraba admirablemente con el paisaje de la bahía (Public Works, Sydney Opera House, 1959: 12).

Los objetivos proyectuales de Utzon eran que la arquitectura se expresara a través de la estructura, la cual debía ser simple, despojada y de una escala majestuosa, combinando cualidades escultóricas con una clara representación de las solicitudes estáticas (Arup et ál., 1973a: 22). El esquema preveía cuatro pares principales de cubiertas curvas o cáscaras delgadas de hormigón armado sobre el gran hall de acceso, cada una de las cuales estaba esbozada en alzado como un triángulo de bordes curvos y en sección transversal como un arco ojival. Pero si bien se sugería un determinado tipo de elemento estructural para estas cubiertas y un material, no existía una geometría claramente definida (Arup et ál., 1973b: 4-7). Las cáscaras principales se conectaban entre sí por una serie de cáscaras secundarias laterales que tampoco tenían una definición geométrica precisa.

Los primeros cálculos realizados por la firma inglesa Ove Arup & Partners, contratada luego de finalizado el concurso para el diseño estructural del edificio, determinaron que la forma general propuesta para las cubiertas

no podía materializarse a través de estructuras laminares o cáscaras delgadas de hormigón armado debido a la magnitud de los momentos flectores resultantes. La capacidad portante como membrana de las cáscaras propuestas no era suficiente para soportar las cargas de la cubierta. Esta verificación fue el inicio de un largo proceso de diseño estructural llevado a cabo entre 1957 y 1961, en el que se realizaron una larga serie de trabajos analíticos y ensayos de modelos, con el objetivo de encontrar una geometría y un sistema estructural que, siendo capaces de brindar una solución estable, no alteraran las ideas originales del proyecto. Fueron ensayadas varias soluciones en hormigón armado, hormigón prefabricado y acero, basadas en el uso de geometrías parabólicas, elípticas y circulares, entre otras (Arup et ál., 1973b: 5-10).

Era prioritaria la definición precisa de la geometría de las cáscaras, a efectos de garantizar su viabilidad estática y de racionalizar tanto el diseño como los procesos de producción y construcción del edificio. Era necesaria, igualmente, la definición de un proceso constructivo que tuviera en cuenta todos los aspectos de la obra, incluyendo la estructura, el revestimiento de las cáscaras y los diversos sistemas e instalaciones necesarios para el acondicionamiento de los espacios interiores.

Para las cubiertas se probaron, entre otras, soluciones con dos cáscaras separadas entre sí 1,2 metros y unidas por una malla de barras, estructuras reticuladas de acero (versiones esqueléticas de la cáscara, según las ideas de Robert Le Ricolais) y soluciones con costillas de hormigón prefabricado dispuestas en forma de abanico. Se construyó un modelo a escala 1/60, en metacrilato, que fue utilizado para la realización de ensayos en la Universidad de Southampton, a efectos de estudiar el comportamiento estructural de las cubiertas. A medida que se iban obteniendo resultados, estos iban siendo comparados con los obtenidos a través de métodos analíticos. El efecto de las cargas de viento sobre superficies curvas era en ese entonces desconocido, por lo que igualmente debió determinarse a través de ensayos de maquetas de madera a escala 1/100 en túneles de viento, en la Universidad de Southampton y en el National Physical Laboratory de Inglaterra. A partir de los resultados obtenidos en estos ensayos con modelos se pudo estimar que tanto las sollicitaciones de cortante como las de momento flector, eran mayores que las que habían sido inicialmente previstas y que no existía al momento ningún método analítico conocido que pudiera prever las descargas de las cubiertas a la cimentación.

Finalmente, Utzon eligió la solución en la que la superficie de las cubiertas se modelaba con costillas de hormigón prefabricado dispuestas

en forma de abanico por integrar mejor, a su criterio, diseño con sistema constructivo. El diseño de Utzon establecía que únicamente materiales básicos, tales como hormigón, acero, madera, vidrio y baldosas cerámicas, podían quedar a la vista. Los paneles cerámicos previstos para el revestimiento de las cubiertas debían ser prefabricados, lo que implicó que las cáscaras se diseñaran con una cierta regularidad en su geometría, de modo de simplificar el proceso de fabricación de los paneles al presentarse un alto grado de repetición. Se definieron, entonces, todas las cáscaras de la cubierta como trozos de una misma esfera de 75 metros de radio (Rice, 1998a: 62), descartándose soluciones con paraboloides elípticos o elipsoides, a pesar de que mejoraban el comportamiento mecánico. La superficie exterior se convirtió en un sistema de paneles prefabricados de hormigón, de 2,3 metros de longitud, modulados en forma de espiga y revestidos con paneles cerámicos. La superficie máxima de los paneles se limitó a 19,5 m² para simplificar la manipulación en obra y para controlar los efectos de los cambios de temperatura (Arup et ál., 1973b: 12-13). Sus juntas longitudinales coinciden con las juntas entre las costillas estructurales de modo de reflejar el sistema constructivo de la cubierta.

Cada cáscara principal, en alzado, se ve como un triángulo curvilíneo sostenido por su vértice inferior, mientras que en sección transversal sigue siendo un arco ojival. Cada media cáscara consiste en una serie de costillas prefabricadas de hormigón separados 3,65°, cuyos ejes son círculos de la esfera básica, por lo que todas ellas se ensanchan hacia la cumbrera (la clave del arco ojival) y se juntarían, teóricamente, en los polos de la esfera (los vértices de apoyo).

La sección de las costillas es variable, desde una forma en T llena en la base hasta una forma en Y hueca en la cumbrera y su altura va aumentando hacia la cumbrera, adaptándose a las variaciones de las solicitaciones a lo largo de la pieza. A pesar de que finalmente todas las costillas tienen longitudes diferentes, el hecho de que todas tengan la misma sección a igual distancia del polo de la esfera simplificó enormemente el proceso de prefabricación. Cada costilla está formada por segmentos ensamblados de 4,6 metros de longitud, dimensión que surge del máximo peso que la mejor grúa de la época (una Babcock-Weitz G 280 B, con modificaciones) era capaz de levantar a una altura de 30,5 metros (Arup et ál., 1973b: 11-12). El primer segmento de cada costilla se coloca por encima de un pedestal de hormigón armado fabricado in situ, que conforma el polo de la esfera. La cumbrera se crea llenando in situ por segmentos, uno por cada costilla, una viga hueca de sección constante entre los bordes superiores de las costillas. Cada segmento forma la clave de

un arco ojival que luego se pretensa a los segmentos adyacentes para formar una única viga (Arup et ál., 1973b: 12).

Debido al alto grado de complejidad que presentaba la solución de la estructura, tanto a nivel geométrico como analítico, se resolvió utilizar desde las primeras etapas de diseño una herramienta de trabajo que había sido inventada pocos años antes: *el ordenador digital*.

El diseño estructural es siempre un proceso iterativo, de modo que cualquier cambio que se realice en la forma de una estructura conduce inevitablemente a una redistribución de los esfuerzos. Este hecho resultó particularmente problemático en el diseño de la estructura de la Ópera de Sydney, dada su alta complejidad geométrica y la elevada cantidad de tiempo que requería la investigación de cada corrección que era necesario realizar (Arup et ál., 1973b: 10). Era prioritario, por lo tanto, encontrar la manera de optimizar los tiempos de cálculo. La estructura de la Ópera de Sydney fue la primera estructura de gran escala en la que se utilizaron cálculos informáticos, a pesar de que en su momento la capacidad y velocidad de los ordenadores eran muy limitadas, el desarrollo de los lenguajes informáticos estaba en sus inicios y el número de programas disponibles para cálculo estructural era escaso. De hecho, los ingenieros de la época ni siquiera tenían claro qué métodos matemáticos resultaban los más apropiados para el desarrollo de herramientas informáticas de cálculo estructural (Arup et ál., 1973b: 8 y 17).

Algunas de las cáscaras de la cubierta fueron analizadas con programas matriciales especialmente escritos y cuyos resultados fueron verificados con cálculos manuales aproximados. Una simplificación considerada para realizar el análisis de la estática de las cáscaras fue modelizarlas como una serie de arcos individuales rigidizados entre sí, quedando contenidas las dos patas de cada arco en dos planos simétricos, ninguno de los cuales resultaba vertical. Se supuso, además, que los arcos se encontraban rigidizados en la cumbrera y en varios puntos intermedios entre esta y el pedestal de apoyo, de modo de reducir los momentos flectores laterales y los torsores. Los esfuerzos axiales en la cumbrera y en las conexiones intermedias se transmitían finalmente a las cáscaras laterales. Peter Rice escribió una serie de programas basados en el método de la flexibilidad, con los cuales se analizó estáticamente y geoméricamente este modelo estructural.

Para el análisis final, cada cáscara fue además modelizada en un ordenador Ferranti Pegasus como un pórtico tridimensional rígido de barras rectas, con sección prismática, en un programa de análisis general de pórticos basado en el uso de matrices de rigideces escrito por el Dr. Ing. A. Baker. En

un ordenador Ferranti Sirius se calcularon las propiedades geométricas de las secciones de hormigón y se hallaron las solicitaciones según los ejes principales de inercia. Los resultados de este análisis fueron más tarde verificados en el programa de análisis de pórticos espaciales del Dr. Renton, en el ordenador Cambridge Edsac II.

En general, los programas matriciales empleados desarrollaban la geometría de las costillas prefabricadas a intervalos de 3 metros, determinaban el equilibrio global de la cubierta y las solicitaciones en cada costilla. Fue fundamental la definición geométrica precisa de las cubiertas, tanto para el cálculo estructural de las costillas como para la definición geométrica de los paneles cerámicos de recubrimiento. La información geométrica obtenida por ordenador fue utilizada para el diseño, para el dibujo tridimensional del edificio y para el replanteo de la obra. Estos análisis debieron ser ajustados en algunas zonas con cálculos adicionales realizados manualmente o mediante otros programas informáticos, debido a que no era posible definir con total exactitud algunos detalles de la geometría y de la rigidez de las cáscaras en los modelos informáticos adoptados (Arup et ál., 1973b: 16-18).

El proyecto presentado a concurso por Utzon fue concebido sin asesoramiento estructural (Zunz, 1988a: 5) y si bien junto con la idea arquitectónica existía una intuición sobre la materialización de las cubiertas curvas como cáscaras de hormigón armado, la escala del proyecto fue un factor imprevisto y decisivo. Desde un punto de vista técnico y teniendo en cuenta las dimensiones del proyecto, la estructura no resultaba estáticamente eficiente (Zunz, 1988a: 9). Esta situación implicó un largo trabajo de diseño en las etapas posteriores al concurso, de aproximadamente 6 años, en el que se requirió la participación de al menos 4 arquitectos y más de 200 ingenieros. El diseño del proyecto de ejecución y de los procedimientos de obra implicaron la búsqueda de múltiples soluciones innovadoras al límite de los avances de la tecnología del momento, incluyendo la adaptación de tecnologías existentes en otras áreas y el desarrollo de algunos materiales un poco más allá de sus posibilidades hasta entonces conocidas, como en el caso del hormigón pretensado, el vidrio y las resinas epoxi utilizadas para las juntas.

El ingeniero Jack Zunz, de la firma Arup & Partners, en una conferencia dictada en el Royal College of Art en el año 1987, comparó las herramientas informáticas disponibles en ese entonces con las existentes en la época en que se diseñó la Ópera de Sydney, determinando que una Ferranti Pegasus de 1965 era unas 400 veces más cara que una Apricot de 1987 y que, mientras la primera tardaba entre 12 y 14 horas para completar el análisis de un pórtico

tridimensional de una de las cáscaras, la segunda podía realizar ese mismo cálculo en tan solo 2 minutos (Arup et ál., 1973b: 6). Es decir, un ordenador de 1987 resultaba unas 400 veces más económico y unas 400 veces más veloz que uno de 1965.

El hecho de que la firma Arup & Partners debiera alquilar la Ferranti Pegasus con la que se realizaron los cálculos geométricos y estructurales de la Ópera de Sydney, debido a su elevado costo, es un indicador de lo selecto que resultaba en ese entonces el acceso a este tipo de tecnología que, en general, solo poseían las principales universidades e institutos científicos del mundo. Este factor económico, junto con el aún incipiente desarrollo de la informática, determinaba que no existieran aún experiencias sobre la aplicación de esta herramienta a procesos de diseño estructurales o arquitectónicos en el momento en que se estaba proyectando la Ópera de Sydney.



Figura 37. Evolución del diseño de la fachada oeste de la Ópera de Sydney. A: croquis inicial de Utzon; B: fachada presentada al concurso por Utzon; C: fachada presentada en el reporte de avance de 1958; D: fachada presentada en el reporte de avance de 1962. Ilustraciones extraídas de *Competition drawings submitted by Jørn Utzon to the Opera House Committee, Sydney National Opera House (Red Book)* y *Sydney Opera House (Yellow Book)*.

Pero la alta complejidad del edificio determinó que valiera la pena un análisis sobre cómo incorporar las herramientas informáticas y el desarrollo de programas específicos para las problemáticas particulares de la geometría y la estática de las cubiertas. Este análisis representó un importantísimo avance en la organización de trabajos de diseño y construcción de estructuras de alta complejidad, con enormes repercusiones en los años posteriores. A partir de esta obra comenzó a afianzarse en el mundo de la arquitectura una metodología de trabajo en la que destacados arquitectos y grandes empresas de ingeniería colaboraron para el desarrollo de proyectos edilicios de alta complejidad. La empresa Ove Arup & Partners recibió en 1969 el premio Queen's Award for Industry por las innovaciones tecnológicas realizadas en el campo de las cubiertas de hormigón pretensado y en 1973, un premio especial de la UK Institution of Structural Engineers, por su contribución a la creación de la Ópera de Sydney.

A casi 40 años de inaugurado el edificio, podría decirse que los modelos estructurales utilizados en su diseño resultaron adecuados a pesar de las simplificaciones introducidas, ya que no han existido hasta el momento problemas estructurales, ni desde el punto de vista resistente ni de la durabilidad. Cabría en cualquier caso verificar, con herramientas actuales de cálculo, si los coeficientes de seguridad adoptados fueron razonables, a efectos de calificar la eficiencia de la estructura proyectada.

La introducción de la geometría circular en las cubiertas, originalmente definidas con trazos libres, parece atentar contra la imagen orgánica y natural que las primeras fachadas y los primeros croquis expresaban, pero fue necesaria para la racionalización geométrica de la obra. A pesar de ello, las cualidades escultóricas del proyecto original de Utzon se mantuvieron a lo largo de todo el proceso de diseño y el edificio se convirtió en un icono de la ciudad de Sydney, tal como el jurado del concurso previó.

3.2.2. Las bóvedas gausas de Eladio Dieste

A partir de la segunda mitad del siglo XX y a la luz de los nuevos avances tecnológicos en la industria de la construcción, el ingeniero uruguayo Eladio Dieste comenzó sus investigaciones sobre la racionalidad y la economía en las estructuras y descubrió una novedosa aplicación para uno de los materiales más tradicionales: el ladrillo.

Su trabajo tuvo como principal objetivo el desarrollo de aquellas formas que más se adecuaban a las leyes universales de la estática y descubrió, en la cerámica armada, un material idóneo para la construcción de estas formas, aún prácticamente inexplorado y con extraordinarias cualidades plásticas.

Los diseños de Dieste se basaron en el análisis de la forma y de su relación con las leyes que rigen el equilibrio de la materia. La forma de sus estructuras es el principal factor determinante de la capacidad portante y, en este sentido, sus obras desarrollaron ideas de Le Ricolais y de D'Arcy Thompson, como que un modelo geométrico debe surgir a partir de una determinada acción mecánica y que las formas son moldeadas por las fuerzas físicas.

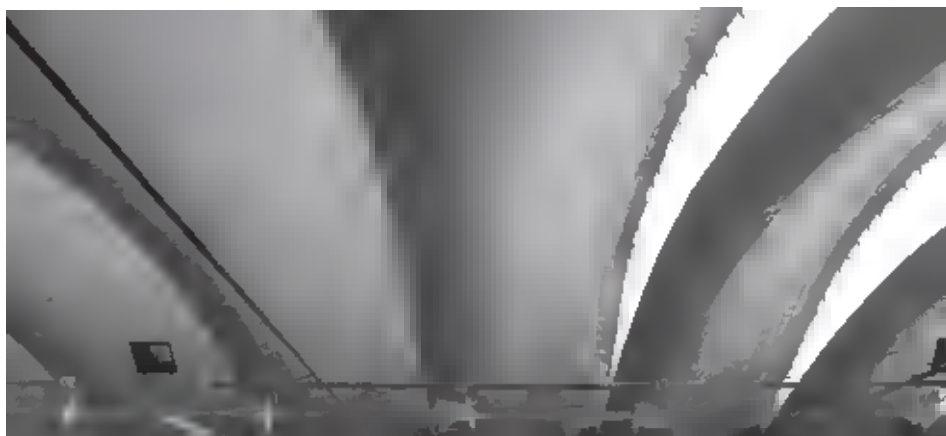


Figura 38. Bóvedas gausas del gimnasio municipal de Durazno (1973-1975), Uruguay, de Eladio Dieste. Fotografía del autor, 2011.

Las virtudes resistentes de las estructuras que buscamos dependen, pues, de su forma, por medio de ella son estables, no por torpe acumulación de materia, y nada hay más noble y elegante desde un punto de vista intelectual que esto: resistir por la forma, y tampoco nada que nos imponga más responsabilidad plástica. (Dieste, 2001a: 233-234).

Diafragmas, cúpulas, bóvedas y superficies plegadas o regladas de doble curvatura (Jiménez et ál., 2001: 30) son algunas de las tipologías estructurales que analizó para la solución de los distintos programas arquitectónicos que se le presentaron a lo largo de su carrera, tales como torres, naves industriales, grandes superficies techadas para almacenamiento de mercaderías o actividades deportivas, iglesias, tanques de agua o silos (Jiménez et ál., 2001: 22-23).

Tras sus diseños y claramente explícitos en los pocos textos que ha escrito, se encuentra una concepción moral del rol que la tecnología debiera cumplir en nuestras sociedades. La productividad y la eficacia, decía, no son fines en sí mismos; la fabricación en serie es una conquista técnica formidable pero solo si es puesta al servicio del hombre. El hombre es el verdadero fin y

el desarrollo técnico y económico nunca será bueno si lo olvida (Dieste, 2001c: 262). Una arquitectura sana, creía, no puede producirse sin un uso racional y económico de los materiales de construcción y no existe, en última instancia, diferencia entre lo económico y lo moral. Es moral lo que lleva al logro final del hombre y para este logro es indispensable una utilización racional y respetuosa de los recursos de la naturaleza (Jiménez et ál., 2001: 28).

La evolución geométrica de una superficie estructural desde una bóveda cilíndrica con apoyos laterales y tensores hasta una bóveda gausa, es un ejemplo paradigmático de las investigaciones de Dieste. En una bóveda de directriz catenaria el peso propio únicamente produce esfuerzos de compresión simple. Dicha compresión, junto a un mínimo de armaduras, vuelve a la estructura capaz de resistir, en cierto grado, flexiones. Pero más allá de ciertas luces, el problema de la flexión y el riesgo de pandeo se vuelven críticos. Si la bóveda se ondulara en dirección longitudinal, observó Dieste, aumentarían considerablemente la inercia y la rigidez con un pequeño incremento de su peso propio. Dicha ondulación, a su vez, podría ser variable desde un máximo en la clave, donde la flexión es también máxima, a cero en los apoyos, de modo de no encarecer los muros verticales con complejos sistemas de unión y descarga.

Este incremento de la rigidez evita problemas de pandeo y, al mismo tiempo, permite a la bóveda resistir acciones como la del viento, que originan tensiones superficiales distintas a las del peso propio. De este razonamiento nacen las *bóvedas gausas*, que geométricamente podrían definirse como una catenaria de cuerda fija y flecha variable que se desplaza a lo largo de un eje, de modo que sus arranques definan dos rectas paralelas contenidas en un mismo plano horizontal (Jiménez et ál., 2001: 41-43). Este tipo de bóvedas admite una disposición en forma de diente de sierra que permite iluminar y ventilar el espacio interior en toda su profundidad.

Podemos idear muchas formas, decía Dieste, algunas de las cuales resultarán lógicas, económicas y evidentemente estables, pero no sabremos calcularlas todas con sencillez. Si bien prácticamente cualquier forma puede hoy en día analizarse a través de programas informáticos basados en el método de los elementos finitos, las formas más ricas resultan en general rebeldes a análisis simples y es necesario realizar mucho análisis simple antes de alcanzarse una forma que pueda, sensata y responsablemente analizarse por ordenador (Dieste, 2001a: 228-231).

Dieste ha desarrollado complejos procedimientos manuales basados en la teoría de la elasticidad para analizar sus estructuras y no ha recurrido prácticamente al ensayo de modelos para verificar sus teorías. Ha procedido, sin embargo, gradualmente, de modo que las estructuras de pequeña escala

que construyó en primera instancia podrían considerarse como modelos de prueba de las posteriores estructuras construidas a gran escala.

La bóveda gausa de cerámica armada permite un importante ahorro de materiales y de mano de obra, pero la misma tipología fabricada en hormigón armado implicaría el montaje de extensas superficies de encofrado con una geometría compleja y dudoso reuso, debido a los prolongados tiempos de desencofrado. En la cerámica armada, en cambio, el único material que necesita fraguar es el mortero de las juntas, que representa un porcentaje de la superficie total de la cubierta del orden del 2 %, de modo que rápidamente se alcanza la resistencia necesaria para permitir el desencofrado. Construyendo las juntas entre los mampuestos lo más pequeñas posible y disponiendo en ellas una malla de acero, según Dieste, se puede alcanzar tiempos mínimos de desencofrado de 3 horas para bóvedas de hasta 15 metros de luz y de 14 horas para bóvedas de hasta 50 metros de luz (Jiménez et ál., 2001: 47). Con un único encofrado que representa una pequeña parte del área total a cubrir y que se reutiliza un elevado número de veces, es posible lograr un ritmo continuo de trabajo y construir, por lo tanto, una nave en cerámica armada de grandes dimensiones a un costo muy bajo y en muy poco tiempo.

Para la construcción del encofrado, la empresa de Dieste contó con una base de barras de acero capaz de adaptarse a distintas luces, que se completaba en obra con un molde de madera; disponía, además, de gatos hidráulicos especialmente adaptados para poder levantarse y bajarse con suavidad. Dieste desarrolló diversas técnicas y herramientas personales para la construcción de sus estructuras, como un sistema de pretensado de cables con un gato horizontal, máquinas para la fabricación de pilotes perforados o sistemas metálicos de apuntalamiento (Dieste, 2001b: 243-258).

Forma, materia, métodos de cálculo, procedimientos constructivos y diseño de equipos, resultan íntimamente relacionados en el proceso de diseño de los edificios de Dieste. Una reflexión gradual y en conjunto sobre todos estos temas está en la base de la coherencia que determina el éxito de su obra, por ello sus proyectos, además de innovadores desde un punto de vista técnico y formal, son extremadamente racionales y económicos.

No está de más que digamos que hemos hecho las obras por razones crudamente económicas, porque eran más baratas. Aún en el caso de obras más «artísticas», como las iglesias, los costos han sido irrisorios. (Dieste, 2001a: 231).

[...] Es preciso un empleo racional del esfuerzo humano y evitar el despilfarro de material, detrás del que, en definitiva, hay también esfuerzo humano. Lo contrario es simplemente una falta de

adecuación de lo que se proyecta a la realidad total de un país. Una falta de modestia y de seriedad frente a sus problemas. (Jiménez et ál., 2001: 219).

Las investigaciones de Dieste se enmarcan en una búsqueda de la belleza socrática, es decir, en una búsqueda de la aptitud de los objetos para lograr su objetivo. Las bóvedas gausas que ha construido en decenas de edificios, como en el gimnasio municipal para la ciudad de Durazno, el gimnasio para el Colegio Don Bosco de Montevideo, el Mercado de Porto Alegre, los depósitos del Puerto de Montevideo o la Iglesia de Atlántida, poseen una expresividad inusual porque sus formas complejas y minuciosamente estudiadas están excepcionalmente ajustadas a las leyes de la estática. Sus obras son, en este sentido, una representación personal de un orden natural superior, por lo que, en cierto modo, siguen también las ideas de mimesis de Aristóteles, Vitruvio y Alberti.

La Iglesia de Atlántida, proyectada por Dieste entre 1955 y 1957, fue finalmente construida en 1960 como una gran cáscara de doble curvatura, en cerámica armada, que alberga una única nave de 16 metros de ancho por 30 metros de profundidad y con una altura interior libre de 7 metros. La cubierta de esta iglesia consiste en una sucesión de bóvedas gausas de cerámica armada recubiertas con tejuela cerámica porosa. Salva una luz media de 16 metros y una luz máxima de 18,8 metros, con flechas que varían desde los 7 hasta los 147 cm y forma, junto a las paredes laterales, un pórtico de gran rigidez frente a las cargas verticales y horizontales (Jiménez et ál., 2001: 164-165).



Figura 39. Iglesia de Atlántida de Eladio Dieste (1960), Uruguay. Fotografía del autor, 2010.

El cálculo manual de una superficie de tal complejidad es prácticamente inabordable, sin embargo, Dieste modelizó intuitivamente su comportamiento estructural distinguiendo dos grandes zonas en la cubierta: una que trabaja verdaderamente como bóveda gausa, la zona de mayor flecha, y otra que prácticamente colgaba de ella, la zona inferior de menor flecha. La rigidez que presenta la primera zona es tan grande, que sin necesidad de afinar demasiado el cálculo, para Dieste resultó evidente que las máximas tensiones se encontraban lejos de los valores admisibles de los materiales y con una gran seguridad frente al riesgo de pandeo. En el valle de la bóveda, que es prácticamente horizontal, se alojan tensores de acero que resisten los empujes horizontales y que se anclan en una carrera perimetral de coronamiento de los muros laterales, de ladrillo y hormigón (Jiménez et ál., 2001: 165-166).

Las paredes laterales, de 7 metros de altura, se definen geométricamente a través de una sucesión de conoides de directriz recta a nivel del suelo y parabólica a nivel de la carrera superior que forman, junto a la bóveda, una estructura aporticada de gran rigidez lateral.

Las paredes están ancladas al contrapiso y se apoyan horizontalmente en la carrera superior de ladrillo y hormigón, que resiste los empujes de la bóveda.

Los muros verticales tienen un espesor de 30 cm y llevan, en sus hiladas, una armadura de alambre de 3 mm de diámetro que garantiza la unidad estructural del conjunto. La terminación interior de las paredes se resolvió en ladrillo visto, con un aparejo en el que los mampuestos quedan trabados con sus ángulos salientes, de modo de generar una cierta rugosidad.

Para la construcción se replanteó la superficie reglada con alambres y se fijaron las directrices. A continuación, los albañiles simplemente debieron seguir los hilos que definían la superficie en la sucesivas hiladas (Jiménez et ál., 2001: 164).

La iglesia de Atlántida es uno de los proyectos más reconocidos de Eladio Dieste y un claro exponente de las principales características de su obra: alta complejidad geométrica que surge de un detallado análisis del comportamiento estático, tanto en la definición de la cubierta como de las paredes laterales, y diseño de un proceso constructivo que optimiza el aprovechamiento de los materiales, las herramientas y la mano de obra, y que resulta de gran sencillez en relación a la complejidad formal de la estructura. Como resultado de todo lo anterior, surge una economía extrema de recursos.



Figura 40. Vistas interiores de la Iglesia de Atlántida, de Eladio Dieste. Fotografías del autor, 2010.



Figura 41. Vistas parciales de la Iglesia de Atlántida, de Eladio Dieste. Fotografías del autor, 2010.

3.3. Las estructuras de membrana a mediados del siglo XX

3.3.1. El desarrollo del método de los elementos finitos

El físico suizo Walter Ritz fue el primero en formalizar el *método de los elementos finitos* (MEF), proponiendo que las frecuencias de las líneas espectrales de los átomos podían ser expresadas por diferencias entre un número relativamente pequeño de elementos y desarrolló la formulación matemática del método basada en el cálculo variacional. El ingeniero ruso Boris Gallerkin publicó sus primeros trabajos en 1906 y propuso la incorporación del cálculo matricial al método, pero su desarrollo fue detenido por lo extenso de los cálculos necesarios para resolver un sistema con un considerable número de elementos finitos.

El uso moderno de los elementos finitos se inició en el ámbito de la ingeniería estructural a partir de la segunda mitad del siglo XX y su desarrollo ha sido desde entonces vertiginoso, llegando a posibilitar, hoy día, la resolución de cualquier problema físico formulable mediante un sistema de ecuaciones diferenciales. En sus inicios, el método se expandió lentamente debido al alto costo y a la baja disponibilidad de los ordenadores personales. Pero el acelerado avance de la informática, a finales del siglo XX, significó el desarrollo de un medio idóneo para la resolución de un gran número de ecuaciones y los problemas discretos pudieron entonces empezar a solucionarse sin mayores dificultades, aún cuando el número de elementos en que se dividiera una unidad estructural fuera elevado.

Hoy en día el MEF está considerado como una de las herramientas más potentes y confiables para la solución de problemas de ingeniería. La constante evolución de los programas informáticos de diseño asistido por ordenador (CAD) y de aquellos basados en el MEF, permite diseñar y calcular fácilmente estructuras cada vez más complejas, con procesos de modelado y de presentación gráfica de los resultados cada vez más sencillos. Incluso ya es una realidad la conexión inteligente entre las técnicas asistidas por ordenador de diseño (CAD), de análisis estructural basadas en el método (MEF) y de fabricación (CAM).

La base conceptual del método consiste en la transformación de una unidad estructural, que en principio es continua, en otra discretizada en partes convenientemente elegidas. El elemento estructural queda así internamente transformado para su estudio, reemplazándose su continuidad original por un número finito de elementos discretos, unidos a través de vínculos en determinados puntos (Zienkiewicz et ál., 2000: 2-3). El primer paso para la solución del problema es determinar las propiedades de cada elemento a

partir de su geometría, los datos de carga y la naturaleza del material. Se determina, entonces, una matriz de rigidez para cada elemento, junto con sus correspondientes cargas nodales, que a continuación se ensamblan en una matriz general. Una vez introducidas las condiciones de contorno puede resolverse el sistema de ecuaciones y obtenerse los desplazamientos (las incógnitas), junto con las tensiones y fuerzas internas de cada elemento, satisfaciendo en todos los puntos las condiciones de compatibilidad de desplazamientos y de equilibrio. A través de este artificio es posible estudiar situaciones más o menos complejas con métodos sencillos y abordables por modelos matemáticos, que pueden manejarse cómodamente con un programa informático (Zienkiewicz et ál., 2000: 5-10).

Este método resulta óptimo para determinar la distribución de tensiones y deformaciones en un continuo elástico. Los casos particulares de dichos problemas incluyen elementos bidimensionales sometidos a tensión o deformación plana, sólidos de revolución, placas y láminas flexadas y análisis general de sólidos tridimensionales.

3.3.2. El nuevo desarrollo de las tensoestructuras

El hombre ha construido estructuras traccionadas desde tiempos inmemoriales, pero el estudio sistemático de sus aplicaciones arquitectónicas desde un punto de vista analítico y formal, tuvo un cambio radical a mediados del siglo XX impulsado por el trabajo de varios arquitectos e ingenieros entre los que se pueden destacar Frei Otto, Fritz Leonhardt, Kenzo Tange, Yoshikatsu Tsuboi y Eero Saarinen.

Ligereza, flexibilidad y adaptabilidad han sido siempre las principales cualidades asociadas con esta tipología estructural, que hasta la primera mitad del siglo XX era materializada principalmente con marcos de madera u ocasionalmente de acero, cubiertos con lonas generalmente de tela de algodón (Burkhardt, 2000a: 964) o pieles de animales (Gardner, 1985: 157). Pero en décadas posteriores, gracias al desarrollo de la industria de los plásticos, aparecieron en el mercado una nueva gama de materiales sintéticos de alta resistencia y durabilidad, aptos para la construcción de cubiertas de grandes luces, tales como el PVC y el PTFE (Moritz, 2000: 1053). Posteriormente aparecerán los materiales compuestos por polímeros y fibras orgánicas, tanto naturales como sintéticas, las mallas metálicas y, más recientemente, el ETFE. Todas estas membranas y tejidos han ido evolucionando y pueden garantizar, hoy en día, niveles de durabilidad y seguridad similares a los de los sistemas constructivos tradicionales.

En las décadas de 1950 y 1960, tras la segunda guerra mundial, se construyeron en diversas partes del mundo una serie de edificios con cubiertas soportadas por mallas de cables de acero pretensado que retomaban las investigaciones realizadas por Shukhov sobre sistemas estructurales livianos, basados en el uso de barras de acero traccionadas.

El arquitecto polaco Matthew Nowicki diseñó el J. S. Dorton Arena, en Raleigh, Carolina del Norte, inaugurado en 1952, cuya cubierta de doble curvatura descansaba sobre una malla de cables pretensados, sostenidos por dos arcos parabólicos comprimidos de hormigón armado que se cruzaban.

La cubierta del Cilindro Municipal de Montevideo, inaugurado en 1956 para la Primera Exposición Nacional de Producción de Uruguay y diseñado por Leonel Viera, consistía en una malla de 256 cables radiales que colgaban de un aro exterior comprimido de hormigón armado, de 96 metros de diámetro y de un aro interior de acero traccionado. Los cables fueron pretensados por el peso propio de las losetas prefabricadas de hormigón armado que sostenían y por el peso de varios miles de mampuestos cerámicos que se subieron temporalmente a la cubierta, mientras fraguaba el mortero colocado entre las juntas de las losetas.

En 1959 se inauguró el David Ingalls Ice Hockey Rink, de la Universidad de Yale, en New Haven, diseñado por Eero Saarinen y el ingeniero Fred Severud, y en 1965 el aeropuerto Dulles, en Washington, también diseñado por Eero Saarinen junto con los ingenieros Amman & Whitney.

En 1962 se construyó la cubierta colgante sobre el estadio Hovet de Estocolmo, diseñado por el arquitecto Paul Hedqvist y el ingeniero David Jawerth.

Para los Juegos Olímpicos de 1964 en Tokyo, Kenzo Tange y los ingenieros Yoshikatsu Tsuboi y Uichi Inoue construyeron dos estadios, uno para natación y otro para basquetbol, con cubiertas colgantes de acero. La estructura del estadio que alberga las piscinas de natación reformula la tipología de los puentes colgantes que comenzaron a construirse a finales del siglo XIX: de un cable principal soportado por dos grandes pilares y de un par de costillas de hormigón armado con forma de arco, se cuelga una serie de cables paralelos que definen la superficie de doble curvatura de la cubierta.

Forma, estados de carga, métodos de fabricación y procedimientos de puesta en obra se encuentran en estrecha relación en este tipo de estructuras y se han resuelto en distintos lugares según las particularidades de la industria local.



Figura 42. Estadio Olímpico de Tokyo diseñado por Tange, Tsuboi e Inoue para los Juegos Olímpicos de 1964. Fotografía del autor en dos tomas, 1998.

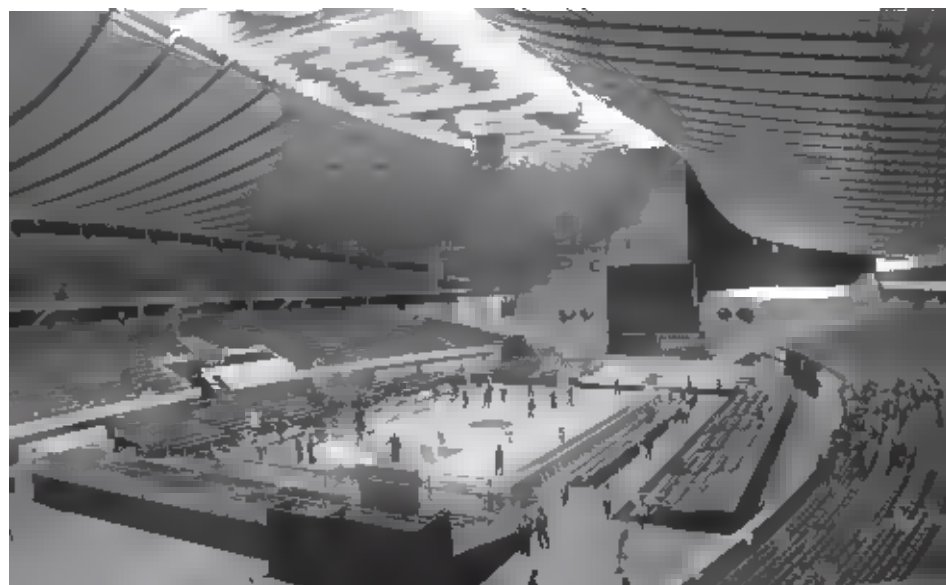


Figura 43. Vista interior del estadio Olímpico de Tokyo. Fotografía extraída de Internet (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yoyogi_national_1st_gymnasium_20120103.jpg), autor: User:STB-1.

Nuestros tiempos demandan edificios ligeros, que ahorren energía, móviles y adaptables, en resumen, más naturales, decía Frei Otto, quien veía en el desarrollo de las tensoestructuras una manera más ética de aprovechar los recursos naturales y una posibilidad de profundizar en la comprensión de la naturaleza (Otto et ál., 2006: 13). En la década de 1950, Otto formó una asociación con el fabricante de carpas Peter Stromeyer, fruto de la cual

surgió el diseño y la construcción de numerosas estructuras de membrana de doble curvatura para ferias y espectáculos públicos (Forster, 1980: 7-8), tales como el pequeño pabellón para la Exposición Federal del Jardín de 1957, en Colonia, las tensoestructuras de la Exposición Nacional Suiza de 1964, en Lausana, y la cubierta del teatro al aire libre Masque de Fer de 1965, en Cannes. Con cada nuevo proyecto Otto iba perfeccionando sus cubiertas traccionadas: el sistema de montaje en obra, los materiales utilizados, el diseño de las uniones, las técnicas de pretensado de las membranas y los métodos de diseño.

En 1967, un equipo formado por Rolf Gutbrod, Frei Otto y Fritz Leonhardt, diseñó el pabellón alemán para la Exposición Internacional de Montreal. Se trataba de una cubierta de unos 8.000 m² construida con un tejido de poliéster que se suspendía de una red de cables de acero de 50x50 cm y 12 mm de espesor, colgada de 8 mástiles y anclada a algunos puntos bajos (Minke, 1968: 140). Esta red de cables definía una compleja superficie de doble curvatura formada por una sucesión de paraboloides hiperbólicos que se integraban asombrosamente con los jardines de los alrededores. La cubierta colgante del pabellón alemán, al igual que las precedentes construidas con sistemas estructurales análogos, era extremadamente liviana y económica en el uso de materiales, ya que resultaba sometida exclusivamente a esfuerzos de tracción, y era igualmente muy rápida de montar. Su forma, sin embargo, era inusualmente irregular, compleja y orgánica y para determinarla fue necesario construir siete modelos con películas de jabón, telas, alambres de acero (para ensayar las cargas) e incluso con madera (para experimentar en un túnel de viento). Otto abordó por primera vez, en esta obra, el diseño de una estructura traccionada con una geometría compleja y definió un proceso de diseño que fue el antecedente directo del utilizado para el proyecto de las cubiertas sobre los edificios olímpicos de 1972 en Múnich.

En el Institut für Leichte Flächentragwerke (IL, Instituto para las Estructuras Ligeras) de Stuttgart, Otto dirigió numerosos experimentos con el objetivo de generar modelos de membranas con áreas mínimas. Una superficie de área mínima es el área más pequeña en el interior de un perímetro cerrado que describe una forma con esfuerzos de membrana que son iguales en todos los puntos y en todas las direcciones (Burkhardt, 2000a: 964).

Las películas que se forman sumergiendo un marco rígido en agua destilada con detergente y a continuación retirándolo, son planas si el marco es plano y curvas si el marco es tridimensional, formando la superficie de menor área posible dentro del marco en la que se cumple que todos los puntos de la misma están sometidos a iguales valores de tensión. Si se

construye una membrana con la forma de una superficie de área mínima, las tensiones a las que esta quedará sometida serán constantes y su espesor podrá ser igualmente constante. Frei Otto desarrolló en el IL de Stuttgart una máquina para crear películas de jabón y proyectarlas con luces paralelas en una pantalla en la que pudieran registrarse, fotografiarse y medirse, para luego construir modelos con telas a partir de la información recabada. Las formas que se obtuvieron con este procedimiento fueron excelentes para la construcción de cubiertas livianas, con membranas textiles o con redes de cables pretensados.

Este interés de Otto por el análisis de la relación entre forma y solicitaciones estáticas en algunos fenómenos naturales con el objetivo de comprender y optimizar un sistema estructural, puede considerarse en la línea de las investigaciones morfológico-estructurales llevadas a cabo por Robert Le Ricolais y Buckminster Fuller.

En 1975, Leonhardt y Andrä construyeron una torre de enfriamiento de 180 metros de altura en Schemehausen. Su estructura con forma de hiperboloide, compuesta por una malla de cables pretensados entre dos aros de 110 y 140 metros de diámetro respectivamente, retoma el sistema constructivo desarrollado por Shukhov a principios del siglo XX para la construcción de torres con mallas de perfiles normalizados.

En los años 1960 comenzó el desarrollo de programas informáticos basados en análisis por elementos finitos y matrices de rigidez para determinar con exactitud la forma óptima y las tensiones resultantes en cubiertas traccionadas, complementando o sustituyendo el trabajo con modelos o maquetas. Estos métodos de análisis estructural asumían que las deformaciones en las estructuras eran pequeñas y podían ser ignoradas, pero una de las principales características de las tensoestructuras es que esta premisa no se cumple, ya que cuando cambia el sistema de cargas aplicado sobre ellas, cambian su forma (Rice, 1980: 2), porque necesariamente deben adaptarse a la línea de presiones del sistema estático al que están sometidas. Por este motivo se inventaron varios programas, basados en técnicas y dispositivos dinámicos, que modelizan adecuadamente la forma en que se comportan las tensoestructuras y fueron insertados en los programas usuales de análisis estructural para perfeccionar el modelado de este tipo de membranas.

Estos programas informáticos alcanzaron un grado de perfeccionamiento tal, que los límites de lo que puede ser diseñado y construido, decía Peter Rice, no son ya los límites de los métodos de cálculo, sino los límites del material mismo y de la creatividad del diseñador (Rice, 1998a: 112). Según

Frei Otto, los avances informáticos para el cálculo y diseño de tensoestructuras durante la segunda mitad del siglo XX han sido asombrosos, pero los modelos materiales siguen siendo irremplazables como métodos visuales y técnicos de verificación, por lo que siempre los utiliza en los inicios y en el final del proceso de diseño de una obra (Burkhardt, 2000b: 968).

3.3.3. Los métodos form finding

El filósofo y matemático inglés Alfred Whitehead decía que el proceso, más que la sustancia, es el constituyente fundamental de la naturaleza (Whitehead, 2007: 53-54). Forma y función se encuentran intrincadamente relacionadas en los seres vivos. 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 (Weinstock, 2004: 14). La información genética depende, según esta teoría, de la física de procesos denominados *form finding* para poder generar la forma de un individuo.



Figura 44. Dibujo de vista exterior de la Iglesia de la Colonia Güell en Barcelona, Antoni Gaudí.

Los métodos *form finding* comenzaron a utilizarse como instrumentos de diseño a finales del siglo XIX, basados en procedimientos empíricos que utilizaban la autoorganización que algunos sistemas materiales desarrollaban bajo la influencia de ciertas fuerzas externas (Hensel et ál., 2004b: 20). Reproducían mecanismos naturales de autoorganización intentando descubrir formas eficaces para una determinada función.

El arquitecto Antoni Gaudí fue uno de los primeros en diseñar sus construcciones, basado en este tipo de experimentos, desarrollando procedimientos que le permitían encontrar formas óptimas para resistir las fuerzas gravitatorias. En 1898 proyectó la iglesia de la Colonia Güell que contaba con 5 naves y varias torres, la más alta de las cuales alcanzaba los 40 metros de altura, e inventó un método absolutamente novedoso para determinar la forma de su estructura y calcularla.

En el techo de un galpón cercano a la construcción, fijó un panel de madera en el que había dibujado a escala 1:10 la planta oval de la iglesia y de los puntos correspondientes a los apoyos de los pilares colgó una malla de cuerdas que coincidían con los ejes de los elementos estructurales. Esta malla, sometida a la carga de bolsitas con perdigones que representaban el peso de la construcción, tomó la forma de un arco catenario tridimensional. Invirtiendo este modelo obtuvo la forma de una estructura que, sometida a su propio peso, trabajaría exclusivamente a esfuerzos de compresión. Luego de ajustada la forma final de la iglesia, en la zona de anclaje de las cuerdas que simulaban los pilares, Gaudí midió con dinamómetros las descargas finales de la estructura.

Este método de diseño y cálculo cayó en desuso por varias décadas luego de la muerte de Gaudí, hasta que fue retomado por el arquitecto alemán Frei Otto, a mediados del siglo XX.

Frei Otto ha dedicado gran parte de su vida profesional al estudio de la naturaleza como fuente de nuevos conocimientos aplicables al diseño y la construcción de edificios y ha tenido un particular interés en el análisis de los procesos naturales de autogeneración de formas, lo que lo condujo a desarrollar numerosos métodos de *form finding* o de modelado por autoorganización de la materia. En el IL de Stuttgart ha desarrollado y dirigido una gran variedad de experimentos, con el objetivo de reproducir procesos naturales de generación de formas eficaces para determinadas funciones. Entre ellos se destacan: experimentos con películas de jabón para producir modelos de tensoestructuras de membranas y redes de cables pretensados con áreas mínimas; experimentos con membranas traccionadas por aire o agua hechas con pieles de goma u otros materiales capaces de

endurecer luego de inflados; experimentos con cadenas y redes de cadenas para hallar formas de construcciones colgantes estabilizadas por su propio peso y cáscaras comprimidas con la forma inversa de formas traccionadas suspendidas, tal como hacía Antoni Gaudí; experimentos con hilos para investigar estructuras ramificadas; experimentos con montañas de arena para estudiar construcciones con barro y experimentos con discos giratorios para investigar la estabilidad de construcciones de mampostería frente a cargas horizontales (Otto et ál., 2006: 55-71). Estos experimentos consisten en procedimientos físicos relativamente simples que ponen en marcha, artificialmente, procesos naturales de selección de formas optimizadas para cumplir una determinada función. Podría decirse que la sistematización de estos experimentos, tal como fue realizada en el IL por Frei Otto, vuelve más comprensible la manera en que la naturaleza selecciona sus formas y pone en evidencia la infinita diversidad de morfologías posibles para cumplir óptimamente con una determinada función.

Las estructuras neumáticas soportadas por fibras o tejidos, se cree fueron el sistema estructural utilizado por las formas de vida más primitivas. Las investigaciones realizadas para el desarrollo de este tipo de estructuras con membranas textiles implicaron un progreso significativo en el entendimiento de los orígenes de la vida y de sus procesos formales. A través de procesos similares, se cree que toman forma células, órganos e incluso algunas criaturas vivas. Muchas de estas estructuras permanecen blandas y otras solidifican posteriormente (Otto et ál., 2006:45).

Hoy en día es posible llegar a resultados similares a los de estos experimentos utilizando programas informáticos especializados. El arquitecto alemán Bodo Rasch ha desarrollado modelos numéricos basados en los experimentos físicos llevados a cabo por Frei Otto y los ha combinado con programas de dibujo asistido por ordenador (CAD) (Otto et ál., 2006: 57).

En el futuro se prevé la creación de varios modelos numéricos con la ayuda de algoritmos informáticos basados en matemáticas fractales que puedan ser utilizados para simular estos procesos de autogeneración de formas. Pero según Frei Otto, el único procedimiento que puede llevar al hallazgo de lo novedoso y lo sorprendente es la generación de formas a través de experimentos físicos (Songel, 2010: 177). El ordenador, en cambio, siempre hallará formas regidas por las lógicas con las que ha sido programado por el hombre y que son, por lo tanto, ya conocidas.

3.4. Desarrollo reciente de las estructuras superficiales

3.4.1. Cubiertas sobre los edificios para las Olimpiadas de 1972 en Múnich

El objetivo principal del proyecto ganador del concurso para los edificios olímpicos de Múnich en 1972, presentado por los arquitectos Behnisch & Partners, era el de generar un paisaje arquitectónico que cubriera distintos tipos de actividades, tanto deportivas como recreativas o de ocio, y que se integrara con el paisaje natural circundante en el que se encontraban un parque y un lago.

La previsión de que luego de terminados los Juegos Olímpicos la zona se convirtiera en un gran centro recreativo al aire libre para toda la ciudad, fue la finalmente decisiva para la construcción de tan ambicioso proyecto (Eeckhout, 1972: 19). Los equipamientos previstos incluían un estadio, un gimnasio, piscinas interiores, un restaurante, zonas para actividades recreativas al exterior y una serie de cubiertas suspendidas para la protección de todos estos espacios.

El área del estadio que se pretendía cubrir tenía una superficie de 34.550 m², el gimnasio 21.750 m², las piscinas 11.900 m² y los espacios exteriores protegidos 6.600 m². En total, las cubiertas resguardan del clima una superficie de 74.800 m² (Eeckhout, 1972: 20).

Los principales elementos que componían estas estructuras colgantes eran la piel exterior, la red de cables, los cables de borde, los mástiles y las torres, los tensores principales, los anclajes y las fundaciones. Según las prescripciones generales impuestas por los diseñadores (Eeckhout, 1972: 21-22), la piel exterior debía ser lo más transparente y liviana posible, de modo de proteger del clima pero no tapar el paisaje y las conexiones entre la piel y la malla de cables no debían afectar esta transparencia. En las piscinas y el gimnasio, falsos techos suspendidos de la malla de cables que repitieran su forma garantizarían los niveles necesarios de aislación térmica y acústica.

La malla estaría compuesta por cables de un único espesor, de modo que en las zonas de mayores esfuerzos sería más densa. Las torres serían de secciones tubulares variables con el menor diámetro exterior posible, aumentándose preferentemente el espesor de la pared de los tubos. Los mástiles, más bajos que las torres, tendrían también el menor diámetro exterior posible, pero serían de sección constante.

El arquitecto Frei Otto fue llamado en 1968 para desarrollar el proyecto de ejecución de las tensoestructuras presentadas al concurso, con la colaboración de Behnisch & Partners y de la firma de ingenieros Leonhardt+Andrä y bajo su dirección fueron realizados, en el IL de Stuttgart, una serie de modelos para el estudio de la forma de las cubiertas. El procedimiento de diseño que en

principio se planificó seguir era similar al que Otto ya había desarrollado para el diseño de la cubierta del pabellón alemán en la Exposición Internacional de 1967 en Montreal, con cinco fases principales (Eeckhout, 1972: 26), el estudio de modelos con películas de jabón, el desarrollo de modelos con telas, la construcción de modelos con cables de acero, la realización de ensayos de carga y la definición de los patrones geométricos de la malla.

Para lograr una primera aproximación al diseño de una cubierta con una distribución óptima de tensiones, se construyeron una serie de modelos con películas de jabón. Pero la ausencia de cargas exteriores alejaba en parte a estos modelos de la forma de una cubierta real sobre la que pudieran actuar, además de su peso propio, cargas variables como la de viento y sobrecargas. Por esta razón, Frei Otto desarrolló modelos de este tipo solamente de algunas partes de la cubierta en la zona del estadio, aunque finalmente ninguna de ellas se diseñó con la forma exacta de una película de jabón (Eeckhout, 1972: 27).

Una segunda aproximación a la forma óptima de las cubiertas consistió en el desarrollo de un modelo de todo el proyecto a escala 1:200, confeccionado con telas poliéster, para investigar la adecuada distribución de torres y mástiles comprimidos de los cuales colgaría la cubierta. De esta manera se determinaron las alturas libres interiores del proyecto y las flechas necesarias para evitar la aparición de zonas horizontales en donde pudiesen acumularse agua o nieve. Dada la dificultad de dibujar en papel la superficie curva tridimensional de la red de cables, la maqueta con tela resultaba un medio de diseño eficiente y económico, y fue la base para los primeros cálculos geométricos que permitieron la construcción de un modelo más avanzado para ser sometido a ensayos de carga (Eeckhout, 1972: 27-28). La tela poliéster, al igual que la malla de cables, es una red ortogonal de fibras con un patrón cuadrado que puede deformarse en rombos. Un trozo plano de tela puede fácilmente adquirir formas curvas tridimensionales de doble curvatura. Extendiendo la tela poliéster del modelo final se pudo medir la longitud real de la cubierta para determinar aproximadamente el patrón de la malla y construir los modelos finales con cables de acero. Por patrón de la malla se entiende la longitud final de cada uno de los cables y el desarrollo plano de cada una de las piezas que forman la cubierta.

Estas últimas maquetas, construidas con cables de acero a escala 1:125, permitieron la realización de ensayos de carga de los cuales debía extraerse toda la información necesaria (fuerzas, geometría y deformaciones) para el diseño final y el cálculo estructural. Para que esto fuera posible, según Otto, el modelo debía coincidir con la cubierta real en geometría, elasticidad y en vínculos exteriores (Hensel et ál., 2004b: 24). Una vez armado el modelo, todos los cables debieron ser pretensados y fijados de a uno por vez hasta

que toda la tensión previa necesaria fue introducida en la cubierta, con una distribución óptima en toda la superficie. Este trabajo implicó un enorme insumo de tiempo (Eeckhout, 1972: 30-32). La geometría de este modelo, construido a partir de las dimensiones extraídas del modelo con tela poliéster, debía ser lo más exacta posible, ya que cualquier error sería luego transmitido a la obra ampliado 125 veces.



Figura 45. Cubiertas para los edificios de las Olimpiadas de 1972 en Múnich. Fotografías del autor.



Figura 46. Cubiertas para los edificios de las Olimpiadas de 1972 en Múnich. Fotografías del autor.

Finalmente se decidió construir este modelo con un cable de cada cuatro, es decir que una malla de 24x24 mm representaba la malla real finalmente construida de 75x75 cm (Eeckhout, 1972: 30). Fue posible simular carga simétrica, asimétrica y variable, cargando las intersecciones de los cables con pesos que representaban la carga muerta, la carga muerta más la sobrecarga de nieve y la carga muerta más la presión de viento en la cubierta.

Con fotografías de doble exposición se pudo registrar la geometría en estos distintos estados de carga. Por otra parte, las deformaciones de los cables se midieron con extensómetros desarrollados a tales efectos en el IL de Stuttgart.

Pero durante la construcción de estos modelos se descubrió que era imposible cumplir con las tolerancias requeridas para la definición en obra de la malla real, ya que un error de 5 cm en la longitud de un cable de 45 metros implicaba la pérdida del 50 % de la fuerza de pretensado introducida en la cubierta. Esto, en el modelo a escala 1:125, representaba un error de tan solo 0,007 mm. La geometría de la cubierta, por lo tanto, solo podía determinarse con la exactitud requerida a través de cálculos matemáticos hechos por ordenador.

En el Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, de la Universidad de Stuttgart (IFG, Instituto para la Geodesia Aplicada a la Ingeniería) y bajo la dirección de Klaus Linkwitz, se desarrolló a principios de 1970 un programa informático que podía determinar con exactitud las coordenadas de todos los nudos de la cubierta y todas las fuerzas actuantes en los cables, teniendo en cuenta los alargamientos: el Aquidistant. Los ingenieros Leonhardt y Andrä desarrollaron el modelo matemático con el que trabajaba este programa. Los datos de las coordenadas de los nudos interiores de la malla, que habían sido obtenidos fotogramétricamente a partir del modelo de cables, se ingresaron al Aquidistant para ser regularizados y ajustados. El programa también se encargó de la interpolación de la malla construida en el modelo, con un cable de cada cuatro, a la malla real de 75x75 cm. Los cables de borde, tal como fueron medidos en el modelo final de la cubierta, tampoco resultaban armónicos y se producían algunos saltos en su geometría. Estos problemas fueron corregidos con el programa Edge Cable Adjustment (Eeckhout, 1972: 38-39).

A mediados de 1969, el IFG de Stuttgart llegó a la conclusión de que este ajuste matemático de la geometría de la cubierta tampoco era suficiente para determinar una malla precisa que pudiera ser construida. La mejor alternativa era recurrir a cálculos estático-matemáticos hechos por ordenador. En cada nudo interior de la malla, por ejemplo, convergen cuatro tramos de cable y por lo tanto cuatro fuerzas, en los nudos de los bordes tres tramos y por lo tanto tres fuerzas. Todas estas fuerzas en la malla debían resultar en equilibrio. Las medidas realizadas en el modelo, tanto de las coordenadas de los nudos como de las fuerzas en los cables, debían entonces ajustarse de modo que la geometría computada, con los ajustes hechos por ordenador, resultara una geometría equilibrada. Este problema podía resolverse utilizando las reglas de la elastomecánica y el método de los mínimos cuadrados (Eeckhout, 1972: 39). La solución de un problema de este tipo resulta no lineal e implica la resolución simultánea de un gran número de ecuaciones. En cada nodo existen

tres condiciones de equilibrio que deben resolverse, es decir, tres ecuaciones de equilibrio, por lo que en la malla aparecen tres veces más ecuaciones de equilibrio que nodos.

Hacia finales de 1969, el IFG de Stuttgart comenzó a programar en lenguaje Fortran la solución de este problema para el ordenador CDC 6600 del Centro de Informática de la Universidad de Stuttgart y hacia finales de 1970 las cubiertas del estadio y de la zona intermedia ya habían sido calculadas con este nuevo método y se disponía, por lo tanto, de las coordenadas de todos los nudos de la malla equilibrada y de los esfuerzos en todos los cables. A partir de este sistema de puntos pudo luego deducirse directamente el patrón de la malla (Eeckhout, 1972: 39-43).

En síntesis, el diseño de las cubiertas del recinto olímpico de Múnich implicó un largo y paulatino proceso de aproximación a una geometría ajustada que pudiese ser fabricada y puesta en obra sin inconvenientes. La geometría de una tensoestructura es la principal determinante de sus características portantes, por lo que el grado de precisión en la determinación de las longitudes de todos los cables, tanto de los de la malla, como de los cables de borde o de los tensores principales, es fundamental.

Para que la forma de la cubierta fuera estable frente a las variaciones de carga era necesario pretensarla y existen infinitas soluciones posibles de formas pretensadas, pero todas ellas deben seguir las leyes de la estática para ser eficientes.

La primera aproximación a una cubierta óptima con tensiones idénticas en toda su superficie fue realizada a través de experimentos con películas de jabón, pero dado que en las cubiertas reales inciden otras cargas además del peso propio y que estas pueden ser variables, la geometría inicial debía ajustarse. Una segunda aproximación a la forma de la cubierta consistió en la confección de modelos materiales, primeramente con telas y posteriormente con cables de acero. En estos últimos era posible reproducir en pequeña escala, de forma eficiente, el funcionamiento de la cubierta real, pero la fabricación de la malla debía realizarse con una exactitud que asegurara que la fuerza de pretensado prevista fuera efectivamente alcanzada en obra y este grado de precisión geométrica, en una estructura de gran escala, no podía ser alcanzado en modelos reducidos.

La informática, que en los últimos años había hecho grandes avances, parecía entonces ser el único medio disponible a través del cual poder alcanzarse la exactitud requerida. El trabajo informático realizado por el IFG de Stuttgart, según Klaus Linkwitz, citado por Eeckhout (Eeckhout, 1972: 43-44), consistió fundamentalmente en el ingreso al programa Aquidistant de las

coordenadas de los nudos de la malla y de los cables de borde, previamente relevadas fotogramétricamente en el modelo con cables de acero, para un ajuste matemático-geométrico y para la interpolación de los cables que fueron simplificados en este modelo. Las coordenadas completas y ajustadas se ingresaron, a continuación, a programas matemático-estáticos especialmente desarrollados para el ajuste final en el que se generó una geometría exacta de la malla en equilibrio. Finalmente se dedujeron los patrones definitivos de la estructura y se graficaron en plantas y en tablas que fueron enviadas a los fabricantes.

Tal como ocurre en un experimento de *form finding* o en un proceso natural de autoorganización de la materia, la geometría de la estructura de la cubierta fue paulatinamente optimizada a través del trabajo con modelos cada vez más precisos y del posterior ajuste con programas informáticos. El trabajo en colaboración entre arquitectos, ingenieros, matemáticos, programadores y contratistas resulta indispensable para el desarrollo de un proceso de diseño con estas características.

3.4.2. Salón Multiusos para la Exposición Federal de Jardinería de Mannheim (1973-1975)

En 1973, los arquitectos Mutschler, Langner & Partners ganaron el concurso para el diseño del Multihalle, un edificio temporal que alojaría los pabellones para la Exposición Federal de Jardinería a realizarse en 1975, en Mannheim, Alemania. Para el desarrollo del proyecto de ejecución se decidió solicitar la colaboración de Frei Otto, quien había diseñado y construido para la Feria Alemana de la Construcción de 1962, en Essen, una cúpula comprimida de planta cuadrada con listones de madera (Otto el ál., 2006: 138), cuya forma había sido determinada a través de la inversión de modelos traccionados estudiados a través de ensayos de autoorganización o *form finding*.

Finalmente, la cubierta del edificio fue diseñada como una superficie geodésica continua y de gran complejidad geométrica, formada por una trama cruzada de listones de madera que cubre un espacio de 7.400 m² en planta y alcanza una altura máxima de 20 metros. En los dos espacios multiusos principales salva luces de 30x55 y 60x80 metros, respectivamente.

El procedimiento seguido para obtener la primera aproximación a la forma de la estructura fue similar al inventado por Gaudí para el diseño de la Colonia Güell. Un primer modelo suspendido fue desarrollado para el estudio general de la forma, siguiendo los lineamientos generales del proyecto original de Mutschler, Langner & Partners. Una vez alcanzada una forma general satisfactoria, se construyó un modelo a escala 1:100 con una malla de cables

suspendidos que tomaba, sometida a su peso propio, la forma de un arco catenario espacial que trabaja exclusivamente a tracción. Cada cable de la malla representaba, en este modelo, a tres listones de madera en el edificio real. La forma anticatenaria o inversa a la del modelo estaría, para ciertos estados de carga (sin presión de viento y sin sobrecarga de nieve), sometida exclusivamente a esfuerzos de compresión.

Este modelo permitió el control de la curvatura de la bóveda, ya que cuanto mayores fueran sus radios de curvatura menor sería su rigidez, pero radios de curvatura muy pequeños podrían implicar la rotura de los listones de madera durante el montaje. Las curvaturas fueron, entonces, aproximándose gradualmente a los valores óptimos, modificándose paulatinamente la geometría y las condiciones de apoyo de la cubierta, así como ajustándose progresivamente las longitudes de los distintos listones de madera.

En el IFG de la Universidad de Stuttgart y bajo la dirección de Klaus Linkwitz, se midió el modelo de cables con procedimientos estéreofotográficos y se extrapoló su geometría a las dimensiones reales de la obra (Hensel et ál., 2004b: 21). Como el modelo se había construido con un listón de cada tres, fue también necesario interpolar los listones faltantes. Esta extrapolación implicaba que cualquier error en el modelo o en la toma de medidas se amplificaría 100 veces en la geometría del edificio a escala real. Para definir la forma final que se ingresaría en los programas de cálculo, por lo tanto, se utilizó el *método de densidad de fuerzas*, inventado por Klaus Linkwitz, que resolvía matemáticamente las ecuaciones de una superficie mínima. El cálculo estático final lo realizó el grupo Estructuras 3 de la firma de ingenieros Ove Arup & Partners, dirigido por Edmund Happold.

Hasta el momento no había sido jamás construida una cáscara con listones de madera del tamaño del Multihalle, por lo que no existía experiencia previa sobre los problemas de pandeo y de deformaciones que se pudieran presentar (Happold et ál., 1976: 433). El trabajo analítico sugirió que, para que la bóveda fuera lo suficientemente rígida, debía construirse con una doble capa de listones de madera. Se decidió construir un modelo con cintas de plexiglás para estudiar con detenimiento el problema del pandeo, pero ensayos hechos con este material indicaban que el modelo no representaba adecuadamente el comportamiento de la estructura real. Por ello, se programó un modelo matemático de la cubierta utilizando un programa informático no lineal, del que se obtuvo la carga de rotura y las áreas que era necesario reforzar con una malla adicional (Happold et ál., 1976: 434).

Los listones de madera de la estructura se posicionaron planos en la obra y fueron luego lentamente levantados por torres de andamios para darles

la forma final curva (Otto el ál., 2006: 140). Para ello, se fijaron los apoyos y se permitió el giro en los nudos interiores de la malla, a través de pernos. Este proceso debió realizarse lenta y cuidadosamente, ya que la bóveda de doble capa no era demasiado flexible. En el proceso constructivo de la bóveda, por lo tanto, está también implícito el concepto de autoorganización de la materia. La malla de listones, sometida a su propio peso, es capaz de adquirir por sí misma la forma curva final. Una vez alcanzada esta forma, se fijaron todos los nudos de la malla y se agregaron cables diagonales para garantizar la estabilidad global. El revestimiento exterior se diseñó con una lona de tejido poliéster recubierto con PVC.

La mayoría de las construcciones realizadas por Frei Otto con posterioridad a 1970 fueron diseñadas y dibujadas en sus últimas etapas utilizando ordenadores. Ove Arup, Edmund Happold y Fritz Leonhardt, los tres ingenieros de mayor renombre internacional a finales del siglo XX, utilizaban para el cálculo de este tipo de estructuras, según Otto, una combinación de técnicas de diseño con modelos y con matemáticas iterativas (Hensel et ál., 2004b: 24). Las primeras aproximaciones a la forma y al funcionamiento de la estructura se realizaban, generalmente, con maquetas pequeñas y económicas. Si no se tenían antecedentes matemáticos en el uso de la forma que se estaba analizando, previo a un estudio informático, era necesaria la construcción de un modelo a escala que permitiera la aplicación de cargas y una primera aproximación a la geometría.

Para poder ensayar cargas en un modelo a escala, este debe estar hecho con la misma forma, vínculos y materiales que la estructura real. Si estas condiciones se cumplen y sobre el modelo actúa la misma carga por unidad de superficie que en la obra real, en las secciones de ambas estructuras aparecerán las mismas tensiones. Pero aunque idénticas solicitaciones aparecieran en todas las secciones de ambas estructuras, el comportamiento final dependerá también del material y rara vez este presente idénticas propiedades físicas a distintas escalas. Los resultados que se obtienen de un ensayo de carga en un modelo reducido, podrían considerarse válidos para edificios a escala real prácticamente en el caso exclusivo de las estructuras de cables de acero traccionados. El comportamiento de otros materiales estructurales usuales en la construcción es más difícil de modelizar con exactitud y depende de varios factores, algunos de los cuales están directamente relacionados con el tamaño de las secciones. En el comportamiento de la madera serán decisivas tanto la disposición y regularidad geométricas de las fibras como la presencia de nudos. En el hormigón armado, sería verdaderamente dificultosa la reducción a escala de las armaduras, de todos los áridos finos y gruesos y de las partículas

de cemento, de modo que el comportamiento de las interfaces entre los áridos y la pasta del hormigón y entre el hormigón y la superficie de las armaduras, nunca será idéntico en las distintas escalas.

El modelo a escala de una cubierta como la del Multihalle podría ser considerado, por lo tanto, como una de las primeras iteraciones en el proceso de definición paulatina de la forma final, tal como sucede en un experimento de *form finding*, pero modelos más exactos son indispensables para una aproximación adecuada a la geometría y al comportamiento de la estructura real.

La metodología de diseño que Frei Otto y sus colaboradores desarrollaron para la construcción de estructuras funiculares y antifuniculares livianas y de gran escala, en las décadas de los años 1960 y 1970, resultó un importantísimo impulso para el desarrollo de herramientas técnicas e informáticas que han posibilitado la posterior construcción de importantes estructuras, como el Pabellón de Japón para la Exposición Internacional de Hannover en el año 2000, diseñado por Shigeru Ban y Frei Otto con madera y tubos de cartón, la cubierta del Patio Reina Elizabeth II en el Museo Británico de Foster y cientos de cubiertas traccionadas en diversos estadios, centros deportivos, aeropuertos y otras infraestructuras de gran escala en todo el mundo.

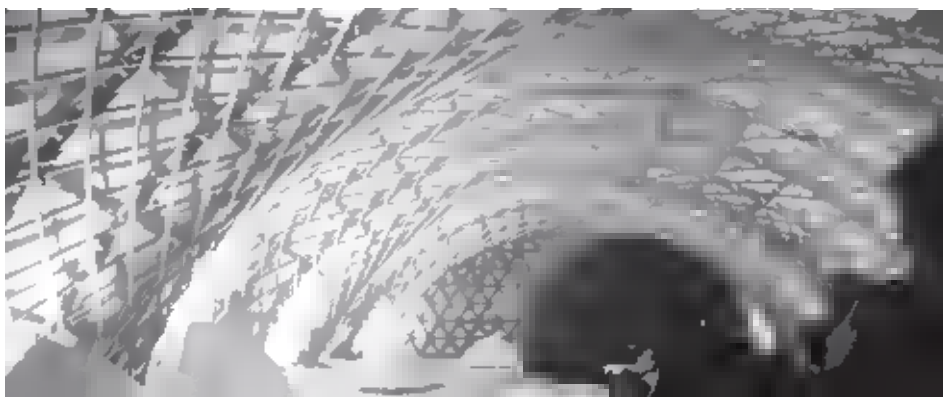


Figura 47. Vista interior del Pabellón de Japón para la Exposición Internacional de Hannover, 2000, diseñado por Shigeru Ban y Frei Otto. Fotografía del autor, 2000.

3.4.3. Nubes de La Défense (1982-1989)

En 1982 fue convocado un concurso internacional de arquitectura para la construcción del Arco de La Défense en París. El proyecto ganador, diseñado por el arquitecto danés Otto von Spreckelsen, preveía en el interior de un edificio con forma de cubo una gran plataforma peatonal cubierta con una

estructura textil que fue más tarde conocida como «la nube», que descendía por los laterales hacia la explanada de La Défense. Esta estructura liviana y de formas libres tenía por objetivo proveer al visitante abrigo contra el clima (Rice, 1988a: 117) y recrear una escala humana en el interior de la monumental plataforma, generando un contrapunto con la escala monumental del arco, con sus formas rectilíneas y con la solidez de su materialización. El proyecto de ejecución de la nube interior del arco fue realizado, tras la dimisión de von Spreckelsen, por el arquitecto Paul Andreu y por el ingeniero Peter Rice de la firma Ove Arup & Partners.

La resistencia a la tracción de la lona, la necesaria doble curvatura para asegurar los desagües pluviales y la estabilidad de la forma frente a las variaciones de carga, suelen ser las principales condicionantes de diseño en este tipo de tensoestructuras, y la complejidad geométrica resultante de estos factores invalida, a la hora de definir con precisión la estructura, las representaciones gráficas tradicionales. La firma de ingenieros Ove Arup & Partners, que en décadas anteriores ya había colaborado en numerosos proyectos con Frei Otto, contaba para el diseño de las nubes de La Défense con una amplia experiencia en este tipo de estructuras y con numerosos programas de cálculo específicos para la generación de modelos informáticos que permitían desarrollar, junto con el uso complementario de modelos materiales, un proceso de diseño iterativo para hallar la forma arquitectónica deseada.



Figura 48. Arco de La Défense, Otto von Spreckelsen. Fotografía: Arq. Marcos Dagnino Eirin, 2011.

La idea fundamental de las nubes de La Défense consistía en generar una forma compleja, pero económica de construir. Para que la forma del conjunto de las nubes no resultara finalmente dominada por la doble curvatura de la lona, Peter Rice propuso el diseño de una estructura compuesta, en la que la lona se subdividía en células de tamaño reducido y se unía a una red de cables de acero pretensados que colgaban, a través de bielas y tensores, de la estructura de hormigón armado del gran Arco (Suner, 1989: 200). De esta manera la estructura cobró un espesor que dio cuerpo, según Andreu, a la metáfora de nube.

Las células de lona se diseñaron como pequeños conos traccionados por una biela central comprimida, con un agujero circular en la cima, en la que se colocó un anillo para evitar la concentración de esfuerzos en la tela. Una sucesión de estas células, unidas por soldadura de la tela en dos de sus lados inferiores, genera una tira. La lona utilizada consistía en una malla de fibra de vidrio revestida con teflón, permeable al paso de la luz. La fibra de vidrio otorga resistencia a la tela y el teflón, impermeable e inalterable frente a la radiación solar, le otorga durabilidad. Los otros dos bordes de las células, reforzados con cintas de teflón, se perforaron con grapas para colgar la tira de los cables pretensados. La biela central de cada célula, a su vez, se apoya en cuatro tensores que descargan sobre la estructura principal de cables. La estructura traccionada de la cubierta, queda así materializada por la adición de múltiples estructuras traccionadas menores, de modo que el conjunto tiene una forma que podría considerarse como fractal, reforzando la metáfora de la nube. Al igual que los domos que formaban la piel del Pabellón de Estados Unidos en la Expo de Montreal hacían referencia al gran domo, aquí también las células de lona tensadas hacen referencia a la gran cubierta tensada.

Para el diseño de las nubes en los laterales del gran Arco, que finalmente no fueron construidas, se planteó la problemática de la reducción de costos (Rice, 1988a: 120). Los gastos en patrones y cortes representaron una parte considerable del costo global de la estructura de la nube interior del gran Arco. Por este motivo, Rice abordó el estudio de un módulo base de lona que se repitiera idéntico a continuación de sí mismo, de modo de evitar una forma diferente para cada una de las células de la cubierta, pero posibilitando la generación de una estructura final con una geometría libre y no rígida.



Figura 49. La nube interior del Arco de La Défense, Otto von Spreckelsen. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

Rice decidió diseñar, con la ayuda de programas informáticos, un módulo irregular concebido como un fragmento de una superficie alabeada y limitado por curvas sinusoidales, que podía ser repetido a continuación de sí mismo para formar una superficie continua de geometría libre, ya que su borde derecho se complementaba con su borde izquierdo (Rice, 1988a: 120).

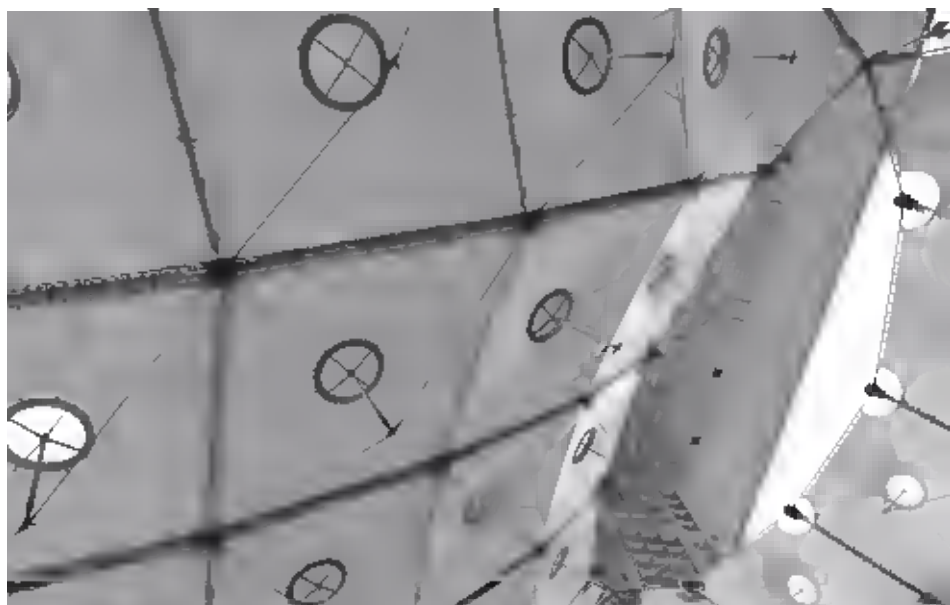


Figura 50. La nube interior del Arco de La Défense, Otto von Spreckelsen. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

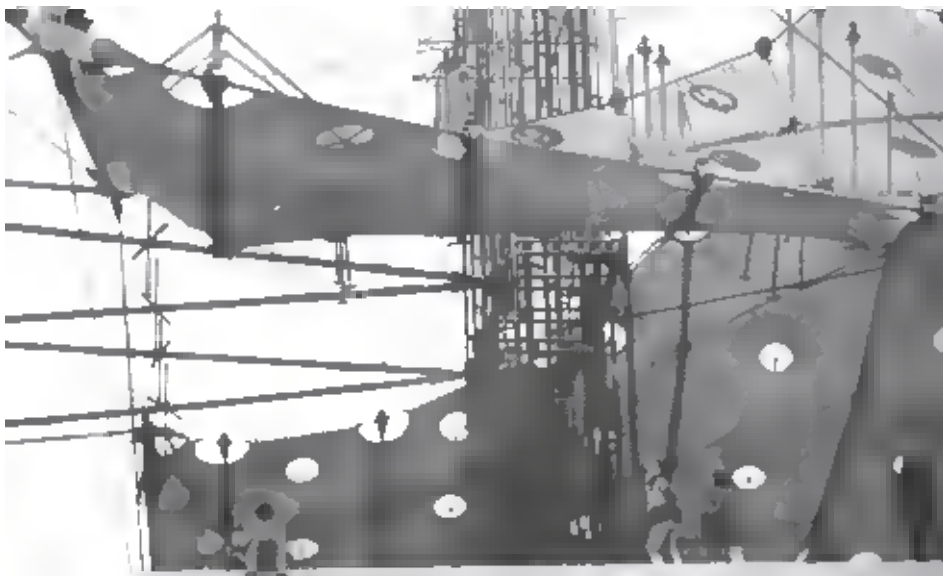


Figura 51. Detalle del Arco de La Défense. Fotografía del autor, 2000.

Las formas que pueden generarse con materiales textiles son totalmente distintas a las que pueden diseñarse con materiales rígidos, decía Peter Rice, poseen propiedades que permiten explorar formas libres y una vez establecido un panel tipo, capaz de ensamblarse según distintas configuraciones, no se puede prever el resultado final antes de experimentarlo con un ordenador (Rice, 1998a: 121). Es necesario definir, simplemente, el elemento y un camino a seguir.

El diseño de esta tensoestructura fue posible gracias al uso de programas informáticos basados en procesos análogos a los que permiten la construcción de imágenes fractales. En este ejemplo, el ordenador dejó de ser un simple sustituto del trabajo manual de cálculo, capaz de resolver con exactitud un gran número de operaciones en un tiempo reducido, para transformarse en una verdadera herramienta de diseño. El desarrollo preciso de un módulo con las características que Rice describe muy difícilmente podría haberse realizado con la planimetría tradicional o con modelos materiales.

El desarrollo de programas informáticos en el campo de las tensoestructuras, impulsado por la necesidad de diseñar, en plazos limitados, estructuras cada vez mayores, más complejas y económicas, tuvo un extraordinario auge entre los años 1960 y 1990. Este desarrollo ha posibilitado, en una primera instancia, el cálculo preciso de estructuras con geometrías

complejas desarrolladas manualmente o con modelos materiales y la eliminación de la probabilidad de error humano y, más tarde, el diseño de formas estructurales de un nuevo y desconocido nivel de complejidad, que requieren del manejo de una herramienta que asegure una alta precisión geométrica.

3.4.4. Los experimentos de NOX

El arquitecto holandés Lars Spuybroek, fundador y director del grupo Nox, se ha interesado también en los procesos a través de los cuales la materia se da forma a sí misma en la naturaleza y ha intentado reproducir, a través de experimentos, aquellos mecanismos naturales de autoorganización que conducen a formas eficaces para determinadas funciones.

El ordenador ha sido una herramienta fundamental en sus experimentos. En su libro *NOX: machining architecture*, publicado en el año 2004, describe algunas de las técnicas que utiliza para desarrollar sus proyectos y cómo estas se volvieron más sofisticadas luego de su encuentro con Frei Otto en el año 1998 (Spuybroek, 2004: 10-11), pasando del estudio de sistemas que frente a determinados agentes externos únicamente sufrían deformaciones a sistemas más complejos que, además de deformarse, pasan por un instante crítico en el que sufren algún cambio cualitativo trascendente, y finalmente a sistemas en los que interviene activamente un proceso de selección por parte del proyectista que permite una calibración más precisa de los resultados obtenidos desde el punto de vista formal, estructural y programático.

Entre 1993 y 1997, el equipo de Nox proyectó y construyó el Pabellón del Agua, conocido como H2Oexpo, en Waterland, Neetlje Jans, Holanda. Se trata de un edificio curvo e irregular que aloja en su interior una exposición permanente sobre el tema del agua, en la que los visitantes interactúan con una serie de sensores modificando luces, imágenes y sonidos. La geometría del edificio se generó a través de un proceso de transformación de un tubo de sección elíptica, similar al que ocurre durante un experimento de *form finding*, pero en lugar de optimizar su forma por la acción de fuerzas físicas exteriores, lo hace por influencias ejercidas por determinadas características del lugar de emplazamiento (Spuybroek, 2004: 18-19). Primeramente, la sección elíptica constante se ensancha en algunas zonas de acuerdo a las exigencias programáticas del Pabellón, luego se deforma y se torsiona según la influencia de factores externos del lugar, como las dunas de arena presentes en la zona, las circulaciones peatonales del recinto, los desniveles preexistentes en el terreno o los vientos predominantes. Por último, se reorganiza el nivel natural del terreno atendiendo tanto a la configuración preexistente como a necesidades del propio Pabellón (Spuybroek, 2004: 22).

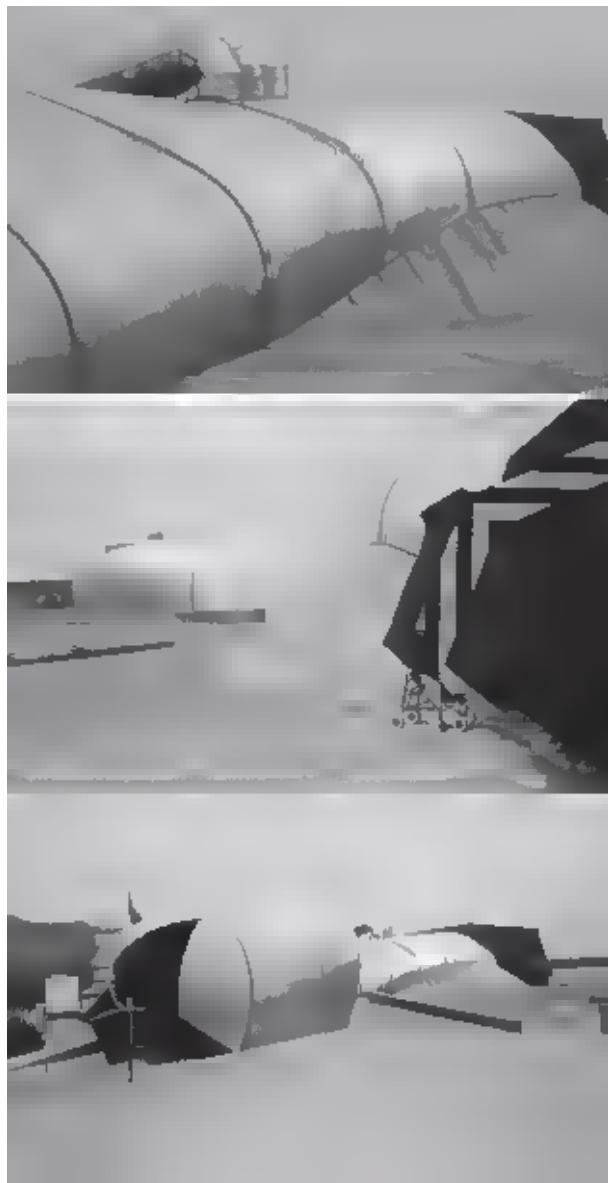


Figura 52. Pabellón del Agua, en Neeltje Jans, Holanda. Fotografías del autor, 2000.

La estructura consiste en una serie de costillas de perfilera de acero, dispuestas transversalmente al eje del edificio, sobre las que descargan vigas rectas que conforman una superficie reglada de doble curvatura. Las secciones transversales de estas vigas se diseñaron débiles para que pudieran ser fácilmente torsionadas en obra, ya que los planos de soldadura en los apoyos,

sobre las costillas principales, no son paralelos. Las secciones transversales elípticas se convirtieron, finalmente, en arcos de circunferencia conectados de modo de generar una curva suave e irregular, para facilitar el dibujo de la planimetría del edificio con el programa AutoCAD 11 que no trabajaba con elipses, y debido a que las máquinas plegadoras disponibles solo podían operar con perfiles de tramos rectos o circulares (Spuybroek, 2004: 22).

El proyecto D-Tower, desarrollado por Nox junto al artista Q. S. Serafijn entre los años 1998 y 2004, consiste en una torre interactiva de 12 metros de altura en la ciudad de Doetinchem, Holanda, que cambia de color según varían las emociones de los habitantes de la ciudad, expresadas a través de un cuestionario en un sitio web (Spuybroek, 2004: 158). La forma de la torre, consistente en una cúpula irregular sostenida por cuatro delgados pilares inclinados, surgió a partir de una serie de experimentos de autoorganización de la materia frente a la fuerza de la gravedad, similares a los que realizaba Gaudí, en los que se invirtió la forma que adoptaba una estructura traccionada.

Siguiendo la experiencia documentada por Frei Otto (Spuybroek, 2004: 160), el equipo de diseñadores experimentó primeramente con una bolsa de plástico que contenía en su interior una pelota. A continuación, ensayaron procedimientos para la construcción de una esfera con una geometría compleja que reemplazara a la pelota y probaron con una estructura de papel y alambre, que se colgaba de una superficie horizontal con cintas. Otra opción analizada fue la de modelizar la forma de la esfera a través del inflado iterativo de un globo: una vez inflado parcialmente, se envolvían algunas zonas con cinta adhesiva y se volvía a inflarlo un poco más. La cinta formaba un nervio resistente que no aumentaba de longitud en la siguiente etapa de inflado, de modo que la geometría del globo tomaba una forma irregular que podía moldearse a voluntad. A continuación se agregaban nuevamente cintas, se inflaba un poco más y así sucesivamente. Esta deformación por etapas de una estructura neumática resulta similar a ciertos procesos de crecimiento en la naturaleza (Spuybroek, 2004: 161). Al final, el globo era también colgado a través de cintas. Obviamente, la forma inversa de las obtenidas en estos ensayos resultaba, para las mismas cargas, sometida a esfuerzos de compresión exclusivamente. En un ajuste posterior de la geometría de la torre, se generó una estructura continua en la que los pilares se transformaban gradualmente en la superficie de la bóveda.

La construcción fue realizada con paneles de resina epoxi reforzados con fibra de vidrio laminada que se unían entre sí. Para la fabricación de estos paneles se adaptó la resina a la forma de moldes de espuma de poliestireno cortados por ordenador con la técnica conocida como Computer Numerical

Controlled (CNC)-milled styrofoam. Una fresadora tridimensional, siguiendo la información numérica de la superficie de doble curvatura de la torre almacenada en un programa informático, cortaba los moldes sobre los que se volcaba luego, manualmente, la resina epoxi con la tela de fibra de vidrio. El espesor de los paneles varía desde los 18 mm en la base hasta los 4,5 mm en la zona superior, según el valor de los esfuerzos que aparecen en la estructura, calculados con un programa basado en el método de los elementos finitos (Spuybroek, 2004: 162).

Los 19 paneles en que fue dividida la torre, en cuyos bordes se habían previsto aletas, se ensamblaron entre sí en fábrica para formar dos piezas mayores. Estas dos piezas principales se transportaron a continuación al lugar de emplazamiento de la obra, donde fueron finalmente acopladas. En las uniones entre los distintos paneles, a través de la soldadura de las aletas, se generaron nervios de mayor sección y resistencia.

Para el diseño del proyecto obliqueWTC, una propuesta de rascacielos para la reconstrucción del World Trade Center de Nueva York, en el año 2001, el equipo de Nox utilizó una variación de una técnica *form finding* que había sido desarrollada por Frei Otto empleando hilos de lana. En un principio se colgaron, de una base horizontal, una serie de hilos que representaban los ejes de los núcleos del rascacielos. Sometidos exclusivamente a la fuerza de la gravedad, los hilos tomaron la forma vertical. Pero luego se los sumergió en agua y a continuación se los retiró, de modo que los hilos se reorganizaron en una malla de mayor complejidad, sometidos a las fuerzas laterales de cohesión del agua que se añadieron a la fuerza de gravedad (Spuybroek, 2004: 260). El instante en que se agrega la fuerza de cohesión del agua al sistema puede ser entendido como una discontinuidad en el proceso de autoorganización de los hilos o 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 resistir tanto las fuerzas verticales gravitatorias como las horizontales de viento. Este proceso de *form finding* podría considerarse como no lineal, dado que pequeñas variaciones en determinadas condiciones iniciales, tales como el tipo de hilo empleado, el tiempo de inmersión, la dirección y la velocidad con la que el modelo es extraído del líquido, etc., pueden conducir a importantes variaciones en el resultado obtenido. La forma final del modelo, por lo tanto, no es única; podrían obtenerse tantas variaciones geométricas de la malla final como veces se repitiera el experimento. A continuación se digitalizó el esquema y se aumentó el espesor de los hilos, transformándolos en tubos (Spuybroek, 2004:

261). Se invirtió el modelo y surgió, de esta manera, la forma de una torre constituida por la yuxtaposición de múltiples torres más delgadas.

La piel estructural de los núcleos del rascacielos, que podrían prescindir de pilares en su interior que obstaculizaran la planta libre, se definió como una malla de círculos y elipses que recuerda las configuraciones geométricas de algunos esqueletos de radiolarios dibujados por Ernst Haeckel en su libro *Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*, de 1862. Gracias a la gran rigidez geométrica de esta malla y a la geometría irregular de los núcleos entrelazados, se prevé que el rascacielos presentaría un óptimo comportamiento estructural. Ambas características geométricas son el resultado de procesos de autoorganización de la materia: en el caso de la malla, de un proceso natural evolutivo, y en el caso de la configuración irregular de las torres, de un ensayo de *form finding*.

Soft Office es un proyecto desarrollado en el año 2001 para una empresa productora de televisión en el Reino Unido, en el que la mitad del espacio se destina a una sala de juegos para niños y la otra mitad a oficinas para adultos en las que nadie tiene un espacio fijo de trabajo. Para su diseño se retomó un tipo de experimento de *form finding* que Frei Otto había desarrollado para determinar sistemas porosos o mallas bidimensionales a partir de hilos de lana sumergidos en agua. El equipo de Nox desarrolló un experimento con laca líquida y una red de tubos de goma de 2 mm de diámetro, sujetos por sus extremos a dos aros de madera de 450 mm de diámetro, que permitía determinar mallas tridimensionales porosas, tanto en planta como en alzado, con espacios interiores cerrados y aislados o abiertos e intercomunicados. Los tubos de goma se sujetaban a cada aro en 11 posibles nudos: 7 del lado de la malla que representaba la sala de juegos para niños y 4 del lado que representaba las oficinas. En total se preveían 56 tubos que unían todos los nudos del lado de la sala de juegos de un aro con todos los nudos del lado de las oficinas del otro aro (Spuybroek, 2002: 96). Cada tubo tenía una longitud 8 % superior a la distancia recta entre los nudos de anclaje en sus extremos.

La primera etapa del experimento consistía en sumergir en laca la malla de tubos de goma con los dos aros de madera superpuestos. En esta etapa, mientras la laca se encontraba en estado líquido, los tubos se comportaban de modo similar a los hilos de lana del experimento de Otto. Luego de un tiempo, cuando la laca comenzaba a secarse y adquiría un comportamiento similar al de una superficie de goma, se separaban verticalmente los dos aros de madera. Este instante, al igual que aquel en el que se añadía la fuerza de cohesión del agua al experimento utilizado para el diseño del obliqueWTC,

marca una discontinuidad o una catástrofe en el proceso de autoorganización de la malla, de la cual emerge una estructura con un nuevo nivel de complejidad: la tercera dimensión.

La estructura porosa obtenida con este procedimiento, que recuerda la estructura interna de la masa ósea, no contenía necesariamente la posición exacta de los espacios del proyecto, sino que fue más bien considerada como un diagrama de espacios potenciales. Luego de digitalizarse la estructura emergente del experimento, los poros se rellenaron cuidadosamente en un programa informático de dibujo con volúmenes deformables y se hicieron las correcciones necesarias en la superficie envolvente. Finalmente, se reacomodó la superficie en los extremos para ajustarla a las tipologías espaciales habituales.

La estructura propuesta para este proyecto es similar a la del Pabellón del Agua (H20expo) construido en Neeltje Jans, Holanda. Consiste en una serie de costillas paralelas sobre las que se apoyan tabloncillos de madera con secciones transversales débiles que se torsionan en obra y van generando las superficies de doble curvatura proyectadas.

El ordenador es una herramienta fundamental en el diseño de estos proyectos. Cuando Nox estudia la optimización de la forma de un edificio a través de ensayos de autoorganización de la materia, lo hace con el objetivo de obtener una primera aproximación geométrica, que se ingresa a continuación a programas informáticos de dibujo para los ajustes finales. El diseño de proyectos como la D-Tower, el obliqueWTC, la Soft Office, la sala de exhibiciones wetGRID, la Son-O-House o el museo Pompidou Two han seguido procesos combinados de este tipo.

En otros casos, el proceso de diseño consiste en la transformación de una geometría inicial sencilla en otra más compleja y optimizada para el desempeño de determinadas funciones en determinados lugares, a través de la influencia de factores conceptuales y no físicos. Es el caso de ejemplos como el Pabellón del Agua, el núcleo de servicios Blowout para Waterland en Neeltje Jans, el complejo de oficinas Goes Goes, el centro Fedurok, las oficinas para el European Central Bank (ECB) en Frankfurt o el complejo de viviendas OffTheRoad_5Speed.

En estos casos, el proceso de deformación geométrica es realizado exclusivamente con herramientas informáticas de modelización en tres dimensiones.

El grupo Nox también se ha interesado en el desarrollo de mallas estructurales tridimensionales complejas y eficientes desde un punto de vista estático a través de experimentos físicos e informáticos, como en el caso de los proyectos Soft Office, el obliqueWTC, la sala de exposiciones The Future is Now, la exposición itinerante Flying Attic, el hotel Beachness, la vivienda Foam

Home o las oficinas y el laboratorio V2_LAB, y de pieles estructurales con altos valores de rigidez basadas en la observación de esqueletos de radiolarios, como en el caso del obliqueWTC o del European Central Bank.

El objetivo de estos métodos de *form finding* parece ser, muchas veces, el encontrar una forma novedosa más que racional o económica. Los conceptos estructurales básicos que manejan, por otra parte, parecen seguir los criterios ya establecidos a mediados del siglo XX en las más clásicas metodologías de investigación de Robert Le Ricolais y de Buckminster Fuller, o más recientemente en los experimentos de Frei Otto. Es novedoso en estas metodologías, no obstante, el diseño de experimentos de *form finding* complejos o con varias etapas, con el objetivo de encontrar formas optimizadas para más de una función y el intento de sacar el máximo provecho posible de la gran capacidad de procesamiento de datos que el desarrollo de los programas informáticos de cálculo estructural, de dibujo y de visualización de formas, ha alcanzado a finales del siglo XX.

3.4.5. El revestimiento del Centro Nacional de Natación de Pekín (2003-2008)

Los paneles de revestimiento del Centro Nacional de Natación de Pekín (CNNP), tanto de las fachadas exteriores como de las interiores y de la cubierta, se diseñaron con almohadillas formadas por láminas de etileno-tetrafluoroetileno (ETFE) infladas con aire a baja presión.

El ETFE es un material que posee una gran durabilidad, una gran resistencia y estabilidad frente a los cambios de temperatura y frente a la incidencia de los rayos ultravioletas, y un muy bajo nivel de flamabilidad. Por otra parte, es más transparente y mucho más liviano que el vidrio, es autolimpiante y reciclable. Además, en forma de almohadillas de dos o más capas infladas con aire a baja presión, tal como fue utilizado para el CNNP, presenta elevados niveles de aislación térmica.

Para el revestimiento de la cubierta se utilizaron 7 diferentes tipos de almohadillas y para el de los muros, 15 diferentes tipos. Considerando que en total son 4.000 almohadillas las que cubren todo el edificio, existe una alta repetición de formas; sin embargo, el giro realizado en la malla de la estructura principal de acero y sus características orgánicas, hacen que se perciba un patrón irregular de alta complejidad en el diseño de las fachadas y de la cubierta.

En el proyecto original se preveía que las almohadillas fueran operables, de modo que podía regularse el paso de la radiación solar, pero estas fueron finalmente diseñadas fijas. La forma de dichas almohadillas fue determinada a

través del uso de programas informáticos de *form finding* que, a principios del siglo XXI, permiten emular con gran precisión los procesos de autoorganización de las burbujas de jabón. Superficies de áreas mínimas que reparten las tensiones igualitariamente en todos sus puntos pueden ser actualmente determinadas sin necesidad de recurrir a la confección de modelos físicos.

Para la fabricación de las almohadillas más pequeñas se cortaron las películas de ETFE con las formas correspondientes a los huecos previstos en la malla de las fachadas y de la cubierta, se encajaron en los marcos de acero de la estructura y se inflaron hasta alcanzarse una presión superficial interna de 200 pa. Esta presión interna tracciona a las películas de ETFE, el material cede, se deforma plásticamente y toma naturalmente su forma final. No es posible, sin embargo, aplicar este método con las almohadillas grandes, ya que el ETFE debería ceder más allá de los límites admisibles antes de alcanzarse la presión de aire interna adecuada. El ETFE presenta, como casi todos los materiales utilizados para la construcción de membranas, un comportamiento marcadamente no lineal.

Pero si el borde de la lámina es cortado curvo, cuando esta es posicionada en un marco con bordes rectos, toma una curvatura que puede asemejarse a la de la forma final. Fue necesario, entonces, encontrar la geometría inicial de las láminas de las almohadillas mayores con métodos de *form finding*, a efectos de prevenir la aparición de presiones excesivas. La empresa inglesa David Dexter Associates fue la encargada de la optimización del diseño de las almohadillas utilizando el programa informático GSA Fabric de Oasys (Ove Arup Systems), basado en algoritmos de relajación dinámica. Primeramente se hizo un análisis de *form finding* para determinar la superficie de área mínima entre los bordes del marco de acero que, sometida a una presión interna de 200 pa, llevaba a la membrana de ETFE a su posición final. Para ello se utilizó el programa GSA's soap-film. Una vez completada esta etapa, se realizó un análisis no lineal para asegurarse que el material no quedara sometido a altas tensiones de servicio, teniendo en cuenta la presión interna de aire y la externa de viento y nieve. Para ello se trazó un gráfico de contorno con los coeficientes superficiales de presión de viento que se obtuvieron en un análisis del edificio en un túnel de viento, para determinar la presión específica actuante en cada almohadilla.

Como el ETFE es una membrana y puede soportar, por lo tanto, únicamente tensiones de tracción, la presión sobre las almohadillas será siempre resistida por la superficie que se encuentra en el lado opuesto al de la aplicación de la presión. Es decir que, cuando la presión de viento actúa sobre la membrana exterior, esta será transmitida a través de la presión interna de

aire a la membrana interior que se traccionará, reduciéndose el pretensado de la membrana exterior. Por este motivo, se calcularon las almohadillas para que la membrana exterior quedara floja únicamente bajo cargas extremas de viento, tal como ocurriría en el caso de presentarse un tifón. El resultado de este análisis determinó la forma final de las almohadillas, el espesor necesario de la membrana de ETFE y las cargas que se transmitirían al marco de acero de las fachadas.



Figura 53. Vista exterior del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

La mayoría de las almohadillas grandes se diseñaron con tres láminas de ETFE de 0,2 mm de espesor: una exterior, una media y una interior. La lámina intermedia oficia como medida de seguridad en caso de que se pinche alguna de las otras dos láminas. Sin embargo, aquellas localizadas en zonas sometidas a fuertes presiones de viento, especialmente en las esquinas del edificio, tienen hasta dos o tres capas adicionales (Gonchar, 2008: 156).

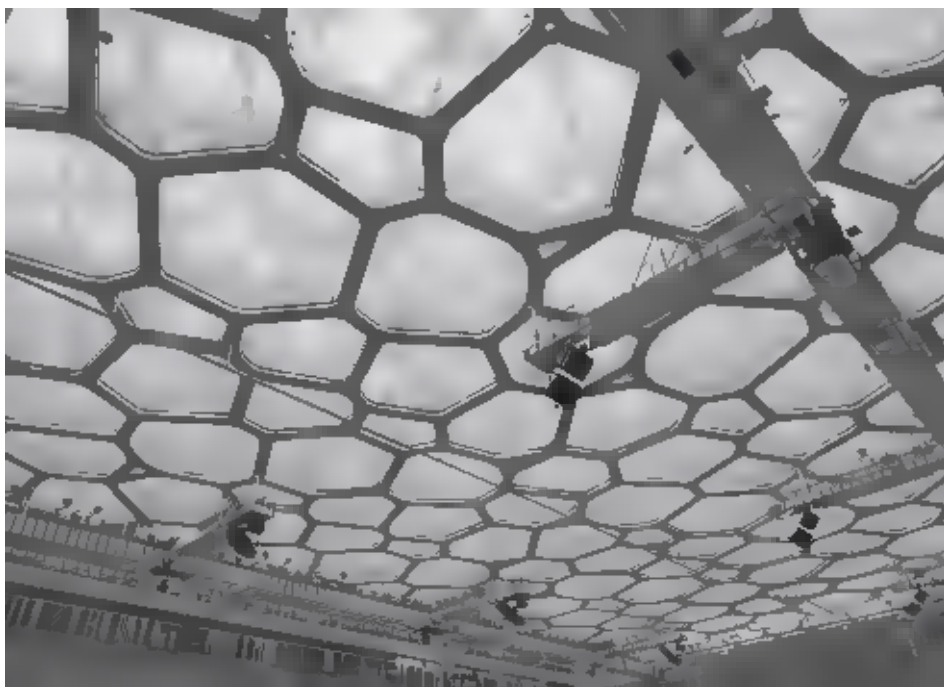


Figura 54. Vista interior de la cubierta del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

El proceso de fabricación del revestimiento fue realizado en Inglaterra por la empresa Vector Foiltec. La información digital de los patrones, proporcionada por David Dexter Associates, se transmitió directamente a las máquinas de corte que dividieron las láminas de ETFE en múltiples partes con formas que resultaron semejantes a las de una cáscara de banana. Estas partes fueron luego ensambladas por soldadura para generar las superficies curvas (Gonchar, 2008: 154-156). Una vez terminado el proceso de fabricación, todas las láminas fueron transportadas a Pekín, donde se fijaron a marcos de aluminio y, a continuación, a la estructura de acero. La presión interna de las almohadillas es continuamente monitoreada por un sistema informático de gestión que inyecta aire filtrado y deshumidificado en aquellas almohadillas en las que la presión desciende por debajo del nivel deseado.

El revestimiento diseñado con almohadillas de ETFE para recubrir la estructura del CNNP presenta una serie de características que lo convierten en idóneo para el tipo de edificio que se pretendía diseñar: es muy liviano, por lo que optimiza el comportamiento estructural del pórtico tridimensional de

acero de grandes luces; es muy transparente, por lo que serigrafiándole una malla de puntos con densidad variable se pueden obtener distintos grados de opacidad o transparencia frente a la luz y a la radiación solar; tiene un alto grado de aislación térmica, de modo que la doble piel encierra una cámara ventilada con un excelente comportamiento térmico a lo largo de todo el año; se derrite en contacto con el fuego pero es ignífugo, de modo que en caso de incendio se originaría un agujero en la zona de contacto del cerramiento con las llamas que permitiría la salida del humo pero no se propagaría al resto del edificio; es autolimpiante, por lo que las fachadas requieren bajo mantenimiento, y es completamente reciclable.

El proceso de diseño, cálculo y fabricación de este revestimiento involucró el trabajo de importantes fabricantes y firmas de arquitectos e ingenieros de diversos países. En los últimos años y cada vez con mayor frecuencia, los obradores de las grandes obras de arquitectura se han convertido en el lugar al que llega, desde distintas partes del mundo, una gran variedad de elementos constructivos prefabricados, diseñados y elaborados por grandes empresas internacionales, para ser simplemente montados y ensamblados.

3.5. Evolución reciente en el diseño de las estructuras superficiales

Las estructuras superficiales, cuyas principales características son la liviandad y la economía de material para cubrir espacios de grandes luces, tuvieron un importante desarrollo durante el siglo XX.

Shukhov, a finales del siglo XIX, fue el primero en construir una lámina estructural de doble curvatura utilizando elementos rectos y estandarizados. Descubrió así una nueva familia de formas que podían ser construidas con métodos muy sencillos y que poseían extraordinarias cualidades resistentes: los hiperboloides de revolución y los paraboloides hiperbólicos. En las configuraciones geométricas de la estructura cuaternaria de algunas proteínas se pueden encontrar similitudes morfológicas con esta familia de curvas.

Previo a la segunda guerra mundial, Barnes Wallis desarrolló el sistema geodésico. Se trata de un sistema estructural superficial que, al igual que las estructuras de las torres de Shukhov, estaba compuesto por una malla de barras cruzadas que conformaban una superficie curva resistente. Esta trama estructural podía adquirir cualquier forma y fue utilizada para la construcción de aeronaves, botes y finalmente construcciones de grandes luces, como los domos geodésicos de Buckminster Fuller.

Las cubiertas laminares de hormigón armado comenzaron a construirse en la década de 1920 y tuvieron un importante auge tras la segunda guerra mundial, gracias a sus sugestivas formas y a su probada eficiencia estructural. Hacia mediados del siglo XX comenzaron a surgir cáscaras con formas complejas. La terminal para la TWA en el Aeropuerto Kennedy de Nueva York, diseñada por Eero Saarinen, podría considerarse como una de las primeras bóvedas con una geometría libre y orgánica. En la década de 1960, sin embargo, el encarecimiento de la mano de obra y de la construcción de encofrados llevó al abandono de este tipo de estructuras. Por el contrario, la aparición de los materiales plásticos en este mismo período, produjo un renovado impulso a la construcción de estructuras de membrana y de redes de cables, que habían sido prácticamente abandonadas desde la época de Shukov. Frei Otto, junto a algunos de los ingenieros más reconocidos de la época, como Fritz Leonhardt, Ove Arup y Edmund Happold, desarrollaron en los años siguientes una nueva metodología de trabajo para el diseño de tensoestructuras y de bóvedas con forma de catenaria invertida, en la que el ordenador adquirió un rol fundamental.

La construcción de obras como la Ópera de Sydney o las cubiertas del recinto olímpico de Múnich, resultó un gran desafío debido a lo inédito de la escala.

Durante la etapa de diseño de la Ópera de Sydney se construyeron algunos modelos para la realización de ensayos, cuyos resultados se compararon con los que paralelamente se obtenían a través de métodos analíticos simplificados. Pero la complejidad geométrica del proyecto llevó a la búsqueda de una metodología de trabajo alternativa que permitiera optimizar los tiempos empleados en el cálculo estructural. Si bien el desarrollo de programas informáticos era aún muy incipiente y no existían antecedentes de aplicación de este tipo de herramientas para el diseño de obras de gran escala, se estimó que valía la pena incorporarlas y desarrollar programas específicos para el análisis de la estática de las cubiertas.

Para el diseño de las cubiertas del recinto olímpico de Múnich, Frei Otto previó utilizar la misma metodología que había desarrollado algunos años antes para el diseño del pabellón alemán en la Exposición Internacional de Montreal, 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. Pero debido a las dimensiones de la obra, la precisión

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, por lo tanto, el desarrollo de nuevos programas capaces de modelizar con exactitud el comportamiento de las cubiertas suspendidas pretensadas.

Para el diseño del Multihalle en Mannheim, Otto también 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 igualmente ingresadas a programas informáticos que analizaron, tanto la geometría como la estática de la cubierta, para la determinación de los ajustes finales.

La informática parecía brindar las herramientas más adecuadas para el diseño del proyecto de ejecución de estas obras, brindaba la precisión requerida y permitía disminuir los tiempos de trabajo. Pero su desarrollo era aún incipiente. Por este motivo, tanto la Ópera de Sydney como las cubiertas del recinto olímpico de Múnich, 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 tuvieron una enorme repercusión en el modo en que las estructuras superficiales fueron diseñadas en décadas posteriores.

En los últimos años, los programas informáticos han evolucionado asombrosamente. Proyectos como las nubes del atrio de La Défense, con formas variadas y complejas generadas a partir de un único módulo, no hubieran sido posibles sin la existencia de este tipo de herramientas. La prefabricación de elementos constructivos con robots alimentados directamente con la información numérica obtenida de ordenadores, por otra parte, ha hecho posible la construcción de proyectos de un nuevo nivel de complejidad. Estructuras con geometrías complejas como la cubierta sobre el patio del Museo Británico en Londres, con una enorme variedad de barras, la D-Tower en Doetinchen con sus curvas irregulares o el revestimiento del CNRP son novedosas aplicaciones de estas nuevas técnicas.

Los métodos *form finding*, basados en la autoorganización de la materia, son particularmente útiles para el diseño de estructuras traccionadas o de estructuras que trabajan comprimidas en sus principales estados de carga, por lo que Frei Otto los ha utilizado permanentemente. No hay evidencias de que Eladio Dieste utilizara este tipo de experimentos para el diseño de sus

estructuras laminares, sin embargo, las secciones transversales de sus bóvedas gausas son catenarias, que fácilmente podrían determinarse a través de experimentos con cables suspendidos, tal como los que realizaba Antoni Gaudí.

Hoy en día es posible llegar a resultados similares utilizando programas informáticos especializados. La ecuación de la catenaria, por ejemplo, es bien conocida y fácil de trabajar con ordenador.

Los ensayos de autoorganización de la materia que Nox ha realizado para la optimización de la forma de sus proyectos, han sido en general una primera aproximación geométrica, que es luego ajustada utilizando programas informáticos. Nox ha intentado sacar el máximo provecho posible a la gran capacidad de procesamiento de datos que los ordenadores han alcanzado a finales del siglo XX y ha desarrollado formas complejas e irregulares, que difícilmente podrían haber sido diseñadas sin el uso de programas informáticos de cálculo y de dibujo.

La forma de las almohadillas que recubren la estructura del CNNP fue determinada exclusivamente a través del uso de programas informáticos de *form finding*, capaces de emular los procesos de autoorganización de las películas de jabón. La determinación de los patrones de corte de las láminas de ETFE, para que las almohadillas adopten las formas curvas proyectadas y las líneas de soldadura entre las distintas piezas se vean como continuas en las fachadas, fue un trabajo de alta complejidad que no podría haberse realizado sin disponer de este tipo de herramientas.

El diseño con programas de dibujo y análisis estructural que emulan las leyes del universo conocido, basados en conocimientos adquiridos a través de la observación de la naturaleza, así como la fabricación con máquinas alimentadas con información geométrica desde un ordenador, parecen ser las metodologías de trabajo más eficaces para la producción de estructuras superficiales con formas complejas en el futuro próximo. Pero el comportamiento de la materia es mucho más complejo de lo que llegamos aún a comprender y a programar, de modo que existen innumerables fenómenos naturales de los que podremos seguir extrayendo conocimientos para el diseño de formas bellas y eficientes.

Capítulo 4. Las estructuras aporticadas

4.1. Los puentes de Robert Maillart

El hormigón armado se desarrolló, en sus inicios, fundamentalmente ligado a los sistemas aporticados y fue a través del estudio de las distintas tipologías estructurales de arcos, a principios del siglo XX, que los ingenieros encontraron un nuevo repertorio formal para este material.

En la obra del ingeniero suizo Robert Maillart aparecen por primera vez los conceptos de continuidad y de formas adaptadas a las solicitaciones físicas. Él es quien descubre que las distintas partes de una estructura de hormigón armado no tienen por qué trabajar independientemente frente a las solicitaciones y no tienen por qué ser necesariamente rectas o prismáticas, su forma puede deducirse de las tensiones actuantes en las sucesivas secciones, es decir, del comportamiento mecánico.

Las investigaciones de Maillart tenían por objetivo la búsqueda de la reducción de la cantidad de material con el fin de obtener estructuras más livianas y económicas. Eficiencia, economía y elegancia, los ideales del arte estructural (Pérez Latorre, 2002: 44) enunciados por el ingeniero Thomas Telford en 1812, acompañaron a Maillart a lo largo de toda su obra. Sin embargo, no creía que una estructura diseñada para ser eficiente fuera, por ello, automáticamente hermosa. La economía ha sido siempre un aliciente y no un obstáculo para la creatividad, pero obtener una mínima cantidad de materiales y un menor costo, aunque necesario, no creía que fuera suficiente para proyectar una gran obra. Es preciso elegir la más estética de todas las formas racionales posibles.

Uno de sus primeros trabajos fue el diseño y la construcción del puente Stauffacher en Zurich, en 1889, cuyo elemento portante principal consistía en

un arco de hormigón en masa con articulaciones de acero en la clave y en los apoyos. Ritter, profesor de Maillart, explicaba en sus clases que este tipo de arco es fácil de calcular, tiene una gran capacidad para resistir cargas y sus articulaciones le permiten absorber, sin que aparezcan fisuras, posibles asentamientos en los apoyos y variaciones de volumen provocadas por variaciones de temperatura.

El tablero de hormigón armado del puente trabajaba a flexión, transmitiendo sus cargas a una serie de muros verticales comprimidos; estos descargaban a su vez sobre un arco de hormigón y este sobre la cimentación. La estructura trabajaba, de esta manera, como un puente de mampostería similar a los que habitualmente se construían en la época: cada elemento transmitía sus cargas a aquel que se encontraba inmediatamente por debajo. Argumentando motivos estéticos, los arquitectos municipales de Zúrich decidieron revestir la estructura con una fachada decorativa de mampostería.

En 1900 proyectó el puente de Zuoz, de 30 metros de luz, sobre el río Inn, introduciendo un nuevo principio estructural: el arco portante diseñado como una viga de sección hueca (Billington, 2000: 86). Los tabiques verticales y el tablero de este puente formaban, por primera vez en la historia de la arquitectura y de la ingeniería, un único elemento estructural, aprovechando de esta manera todo el potencial de las características de puesta en obra del hormigón armado. La continuidad entre los elementos permitía definir un sistema estático claro y obtener un importante ahorro de material. La plataforma dejó de ser un peso que el arco debía sostener para convertirse en un elemento que también colaboraba con la resistencia mecánica del puente (Jordá et ál., 2002b: 44). Arco, tabiques verticales y plataforma conformaban, de esta manera, una única unidad resistente con una sección rectangular hueca de gran inercia. Gracias a este modelo estructural fue posible reducir las secciones del puente y lograr un importante ahorro de material.

En ese entonces era imposible realizar un análisis riguroso de las tensiones en un arco con una sección hueca de estas características. Cuando Ritter fue consultado sobre la viabilidad del proyecto dijo que, a pesar de que no era posible analizar matemáticamente con exactitud el puente, su diseño era razonable y recomendó construirlo. Luego de finalizada la obra, en 1901, se realizó una prueba de carga para verificar las deformaciones que se producían y la estructura demostró poseer una gran rigidez (Billington, 2000: 87). Si bien no era matemáticamente posible analizar el puente con exactitud, se comprobó así que su diseño era adecuado.

Maillart creía que el hormigón armado era el material más indicado para la construcción de puentes, ya que por su fluidez podía ser modelado a voluntad,

es decir, podía adoptar cualquier forma. La forma de una estructura de hormigón armado puede entonces acercarse a la de la línea de presiones del sistema de cargas actuante y sus distintos componentes pueden considerarse como un sólido continuo y solidario. Esto permite disminuir las dimensiones de las secciones y diseñar, por lo tanto, obras más esbeltas y económicas. Este nuevo sistema estructural representa un cambio radical en el diseño de estructuras.

A poco de construido el puente de Zuoz, llamaron la atención de Maillart una serie de fisuras que aparecieron en los tabiques verticales próximos a los extremos. Se trataba de fisuras ocasionadas por la exposición de las distintas partes de la estructura a diferentes condiciones climáticas, pero que no implicaban errores en su diseño o cálculo. Maillart demostró analíticamente que las tensiones eran muy bajas en las zonas donde se produjeron estas fisuras (Billington, 2000: 87). Para evitar que este fenómeno se repitiese y para probar que estas fisuras no eran peligrosas, decidió quitar estos tabiques de los extremos en su siguiente puente: el puente Tavanasa sobre el río Rhin, de 1905, que con una luz total de 51 metros era un 30 % más largo que el de Stauffacher.

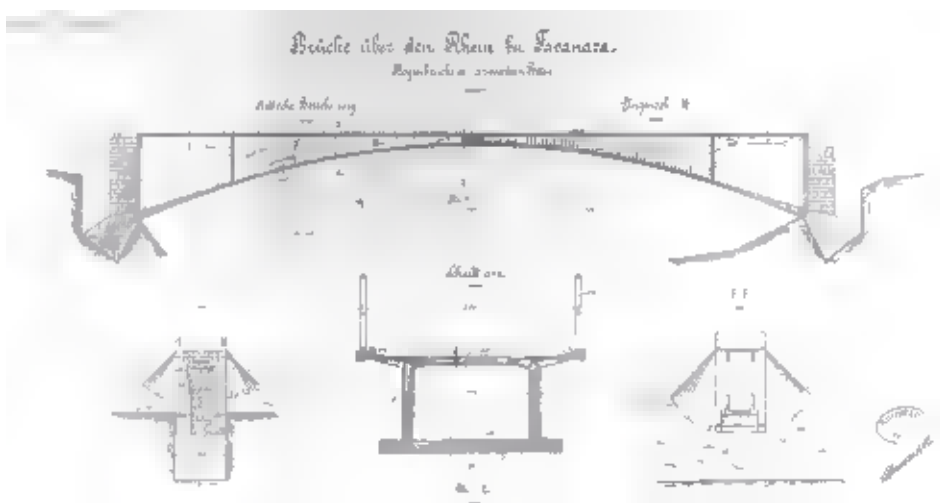


Figura 55. Planos del primer puente de Maillart en Tavanassa (1905).

Otro gran avance alcanzado en esta obra fue el rebaje triangular realizado en las paredes laterales de la viga en arco hueca, que reducía aún más el peso propio del puente. Las secciones de los arcos de Maillart son cada vez más complejas a medida que va adquiriendo experiencia en la

construcción de puentes. Además de variar la altura, en este nuevo ejemplo también varía el ancho, de modo que la materia que no resulta necesaria para la estabilidad de la estructura va progresivamente desapareciendo. Esta evolución del diseño de los puentes en arco parece seguir la idea de Le Ricolais de diseñar una estructura partiendo de un bloque y trabajar por medio de escisiones. Maillart define primeramente al puente como un gran bloque estructural y luego quita material allí donde está de más, estilizando su forma y logrando un uso cada vez más eficiente de la materia.



Figura 56. Puente Valterschielbrücke de Maillart en el Cantón de los Grisones (1925). Fotografía extraída de Internet (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valtschielbruecke_05_11.jpg), © Chriusha (Хрюша)/ CC-BY-SA-3.0.

Entre 1909 y 1919, se dedicó principalmente al diseño de estructuras edilicias, analizando la posibilidad de hacer continua la estructura tradicional de forjados, vigas y pilares, considerados como elementos independientes hasta el momento. En 1908 patentó el forjado fungiforme, que utilizó por primera vez en 1910 en un almacén de Zúrich.



Figura 57. Puente de Salginatobel de Maillart (1930). Fotografía extraída de Internet (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Salginatobelbruecke_02_11.jpg), © Chriusha (Хрюша)/ CC-BY-SA-3.0.

En 1930 proyectó una de sus obras más reconocidas, el puente de Salginatobel, que con una luz total de 132 metros y un arco de 90 metros de longitud (Billington, 2000: 90) fue el puente más largo construido por Maillart y, además, durante varios años, el arco triarticulado más grande del mundo. Fue también el primer puente construido íntegramente en hormigón armado, teniendo como característica distintiva el ser más ancho en sus extremos que en la clave. Maillart aplicó en este proyecto todos los avances que había logrado en sus puentes anteriores: toda la estructura es continua y solidaria, el diseño de las distintas secciones es complejo, tendiendo a ser un reflejo de las solicitaciones a las que quedan sometidas y la forma del arco, por ser triarticulado, se aproxima bastante a la forma de su línea de presiones.

En este puente las articulaciones debían ser más resistentes de lo habitual para poder soportar las importantes descargas, además de lo suficientemente flexibles como para permitir pequeñas rotaciones. La solución que Maillart adoptó fue la de una sección de hormigón reducida al mínimo, a través de la cual se cruzaban las armaduras. Este sistema, que ya había sido inventado por Mesnager y Freyssinet a comienzos del siglo XX y que recuerda los ligamentos cruzados que refuerzan la articulación entre el fémur y la tibia en una rodilla humana, es llevado a la práctica por primera vez en este puente.

4.2. Jean Prouvé y la industrialización de la construcción

La obra de Jean Prouvé puede entenderse como una profunda reflexión sobre las consecuencias que la industrialización de la construcción, a mediados del siglo XX, podía llegar a tener sobre la vida del hombre moderno.

Prouvé creía profundamente en el poder de la tecnología para resolver los problemas de la humanidad. Por este motivo adquirió un fuerte compromiso con la industrialización de la arquitectura y, en especial, con la producción masiva de viviendas. Los aviones y los automóviles representaban para Prouvé el verdadero progreso de la técnica y le sirvieron de inspiración para crear estructuras livianas, sencillas, económicas y prefabricadas en serie. Diseñaba sus obras como entendía que se diseñaba en ese entonces un automóvil: la forma de cada una de sus piezas debía tener una correspondencia directa con su función.

A menudo las críticas de mis ideas sobre la industrialización eran relativas a la uniformidad [...] se equivocan por completo, no hay nada tan cambiante como la industria [...] la industria permite la renovación y, gracias a ella, la evolución arquitectónica. (Jean Prouvé, citado por Lavalou, 2005: 40).

Prouvé concebía generalmente sus proyectos de manera efímera; sus viviendas debían servir a una sola generación de ocupantes, luego podrían ser desmontadas y sus piezas podrían reutilizarse en nuevos proyectos. Como estaban diseñadas para ser montadas en plazos breves de tiempo, el número de partes a ensamblar se reducía al mínimo y únicamente las piezas más pesadas podían llegar a requerir de dos personas para su puesta en obra.

Durante las décadas de 1940 y 1950 desarrolló numerosos proyectos de viviendas, refugios y barracas militares (Peters, 2006: 34-35), con algunas características comunes, como el hecho de ser livianos, fácilmente montables y desmontables, y capaces de ser transportados en camión en un solo viaje (ver patentes de Jean Prouvé números 849.762 de 1939, 865.235 de 1940, 922.364 de 1946, 943.352 de 1947, 1.022.385 de 1950 y 1.138.751 de 1955).

Para poder cumplir con estos requisitos, estableció que las piezas prefabricadas no debían superar los 4 metros de longitud ni los 100 kilogramos de peso y que el montaje debía ser posible sin el empleo de ningún tipo de ayuda técnica sofisticada (Lavalou, 2005: 46-47). En 1939 diseñó un prototipo de barraca militar desmontable (Peters, 2006: 34), cuya estructura consistía en un bastidor metálico exterior que se cerraba con paneles de madera y que podía ser montado íntegramente en 3 horas.

Tras la segunda guerra mundial comenzó a desarrollar sus *Maisons à portiques* (Peters, 2006: 35-37). El núcleo resistente de estos proyectos consistía en dos o más pórticos paralelos de chapa de acero plegada con forma

de V invertida, que aseguraban la estabilidad de la estructura frente a las cargas verticales y horizontales. Los muros consistían en paneles de 1 metro de ancho, revestidos con placas de madera que ya incluían puertas y ventanas. La estandarización de las dimensiones de estos paneles los volvía intercambiables y hacía viable construir con ellos edificios de distintos tamaños.

Entre 1949 y 1952 se dedicó al diseño y fabricación de sus *casas estándar*, por encargo del Ministerio de la Reconstrucción y Urbanismo de Francia. El objetivo de este proyecto era el desarrollo de una construcción liviana y económica que pudiera reducir la escasez de viviendas de la posguerra (Peters, 2006: 43).

La estructura principal de estas viviendas consistía en dos pórticos de chapa plegada de acero, en forma de U invertida, sobre los que descargaba una viga transversal dividida en segmentos para poder ser montada por dos operarios. Una vez montada esta estructura primaria, una sola persona podía concluir el resto de la vivienda (Peters, 2006: 44). Los muros exteriores estaban formados por paneles de chapa de aluminio unidos mediante perfiles de acero, con lana de vidrio en su interior.

Las casas que he construido son como son por razones muy precisas y muy sencillas [...] por ejemplo las de Meudon. En esa época el taller contaba con determinado tipo de maquinaria que permitía doblar la chapa o hacer soldaduras eléctricas de tal manera o tal otra, pero no según cualquier procedimiento. Todo ello fue determinante para la concepción: llegamos a una estructura ligera en la que cada pieza pesaba menos de cincuenta kilos. Una estructura muy particular en la que el revestimiento participaba de la construcción. Y eso dio como resultado una casa. (Jean Prouvé, citado por Lavalou, 2005: 93).

Prouvé fue un innovador en la manera de trabajar los nuevos materiales constructivos que surgieron a mediados del siglo XX, tales como el aluminio extruido y la chapa de acero. Los pórticos en forma de V o de U invertida, que constituían el principal elemento de soporte de estos proyectos, eran contruidos en chapa plegada de acero con secciones variables, de modo que se optimizaba al máximo la cantidad de material utilizado y su inercia. De esta manera, tal como ocurría en los puentes diseñados por Maillart, la materia empleada se reducía al mínimo y adquiría rigidez por la continuidad entre los distintos elementos.

Para Prouvé los formalismos eran una negación de la propia arquitectura. Sólo consideraciones de tipo técnico debían determinar la forma de una obra. La continua optimización y simplificación de los procesos de fabricación, transporte, montaje y desmontaje eran para Prouvé fundamentales en el

desarrollo de un producto. 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 una construcción.

Se rehusaba a diferenciar el proceso de diseño del proceso productivo. En el aspecto de un objeto, decía, debe reflejarse su proceso de creación (Peters, 2006: 10). Nada debiera diseñarse sin saberse previamente cómo será fabricado. Las cortadoras de chapa circulares de que disponía podían ajustarse con mayor precisión que las rectangulares, por este motivo, en la mayoría de sus paneles prefabricados realizaba ventanas circulares.

Estos principios los aplicó tanto para el diseño de edificios como para el de muebles.

Así, la sólida configuración de las patas de algunas de sus mesas y sillas respondía siempre a una concentración de solicitaciones, y la combinación de mesas y sillas en algunas de sus propuestas para equipamiento escolar reducía el número total de patas utilizadas. En la forma y materiales de los tableros, asientos, respaldos, patas o piezas de unión de los distintos elementos pueden observarse siempre una especial atención a los estados tensionales y una continua recurrencia al uso de componentes estandarizados.

Las patas traseras de una silla son las que reciben la mayor descarga, decía Prouvé (Peters, 2006: 23). Por este motivo, diseñó con perfiles de sección rectangular e inercia variable las patas traseras que soportan el respaldo de su *silla estándar* y con delgados perfiles tubulares las patas delanteras, sometidas exclusivamente a esfuerzos de compresión. En la unión con el asiento, donde el momento flector producido por la descarga del respaldo es mayor, las patas traseras tienen su mayor sección y luego se afinan hacia los extremos. Así como Maillart había descubierto que podía diseñar libremente la forma de las secciones de hormigón armado de sus puentes, Prouvé reconoció que podía experimentar distintas formas en los perfiles que fabricaba con sus máquinas de extrusión y doblado de planchas metálicas. Distintos elementos con distintas funciones podían diseñarse para ser fabricados con pequeños ajustes de las maquinarias.

Sus pupitres escolares con dos asientos descansan sobre cuatro soportes de chapa plegada de sección rectangular igualmente variable, con mayor inercia allí donde se concentran los esfuerzos de flexión. El mismo criterio de diseño puede observarse en las ménsulas que soportan el tablero de la mesa Compas, en las patas de la mesa Guéridon, en los soportes de los muebles de jardín que fabricó para el pabellón de la UAM (Unión de Arquitectos Modernos)

en la Exposition Internationale des Arts et Techniques de París, en 1937, y en los pórticos de las *Maisons à portiques*.

El elaborado diseño de la silla Antony, de 1954, demuestra un cuidadoso estudio del comportamiento estructural de todos sus componentes constructivos. El asiento consiste en una delgada membrana curva de madera laminada que cuelga de los extremos de dos planchuelas de acero, en forma de L, a través de cuatro puntos de anclaje. La forma orgánica de esta membrana, que parece adaptarse a la línea de presiones de la descarga de un cuerpo humano sentado, parece flotar tan solo algunos centímetros por encima de los delgados perfiles de acero, contrastando con su geometría regular. Dicha forma, que bien podría haber sido determinada mediante un ensayo de *form finding* con una lámina flexible, pone en evidencia un cuidadoso análisis estático de la función que el asiento cumple, de modo de resultar fundamentalmente sometida a esfuerzos de tracción.

Los perfiles de acero que soportan al asiento resultan sometidos a importantes esfuerzos de flexión y tienen inercia variable. Se empotran en su zona de mayor rigidez a un tubo cilíndrico de acero que resulta torsionado. Dicho cilindro descarga sobre cuatro delgadas patas tubulares que trabajan a compresión simple. Cada elemento está diseñado con una forma que, además de poder ser fácilmente fabricada por las maquinarias disponibles en los talleres de Prouvé en Maxéville, resultaba eficaz para resistir las solicitaciones estáticas a que estaba sometida.

En 1949, junto a los arquitectos Paul Herbé y Jean Le Couteur, diseñó la *Maison Tropicale* como un prototipo de vivienda económica, de rápido montaje y fácilmente transportable desde Francia hacia las colonias africanas. Esta obra es un ejemplo paradigmático de las viviendas con estructura aporticada diseñadas por Prouvé, con una sorprendente integración entre estructura y acondicionamiento climático natural. El prototipo montado en Brazzaville, Congo, medía unos 33 x 46 pies y fue equipado con paneles móviles para subdividir el espacio, un baño y una cocina.

Una estructura central aporticada en forma de U invertida, similar a la de algunas de las *Maisons à portiques*, aseguraba la estabilidad horizontal y vertical de la construcción.

Todas las piezas se diseñaron tan planas como fue posible, de manera que pudieran acomodarse eficazmente en la bodega de un avión y siguiendo la premisa de construir con el menor número posible de partes diferentes, para simplificar el proceso de montaje. Ninguna pieza medía más de 4 metros de largo, de acuerdo a la capacidad de las maquinarias, ni pesaba más de cien kilogramos para poder ser manipulada cómodamente por dos hombres.

Para adaptarse al clima tropical, la piel exterior, consistente en un sistema de parasoles que reflejan la luz y aíslan la estructura principal de los rayos solares, estaba separada de una piel interior aislante compuesta por puertas corredizas y paneles fijos (Rice, 1998a: 92).

Utilizando principios de ventilación natural, aislación y protección, la vivienda logra niveles óptimos de temperatura y humedad sin necesidad de recurrir al uso de equipamientos eléctricos (Rice, 1998a: 94). El piso se suspendía por encima de una base de hormigón fabricado in situ de modo de aumentar el aislamiento térmico y controlar el paso de la humedad del terreno. La chimenea central de ventilación, por otra parte, permitía controlar la salida de aire caliente interior hacia el exterior.

4.3. Las estructuras aporticadas en la segunda mitad del siglo XX

4.3.1. Los espacios servidos y sirvientes de Louis Kahn

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 este descubrió observando algunos monumentos clásicos de la arquitectura como la Villa Rotonda, de Andrea Palladio (Sabini, 1994b: 42). Según Kahn, la naturaleza de los grandes espacios está caracterizada por los espacios menores que los sirven. Las despensas, los cuartos de servicio y las alcobas no deberían ser áreas subdivididas de una estructura espacial única, sino que deberían tener su propia estructura. Esta idea de separar los espacios sirvientes de los espacios servidos puede verse con claridad en proyectos como la Casa de Baños para el Trenton Jewish Community Center (1954-1959), los Laboratorios de Biotecnología Richards de la Universidad de Pensilvania (1957-1965) o el Salk Institute, en La Jolla (1959-1966).

En el proyecto de Casa de Baños para el Trenton Jewish Community Center, proyectado por Louis Kahn y Anne Tyng en 1954, se plasma con claridad el concepto de espacios servidos y sirvientes. Pequeñas habitaciones de servicio se alojan en el interior de prismas de piedra de planta cuadrada que actúan como grandes pilares sobre los que se apoyan las cubiertas de los espacios principales: piscinas y áreas de reunión, también cuadrados. Una sección horizontal del edificio coincide, por lo tanto, con una sección estructural y con una sección de los muros de piedra, que en su interior hueco alojan los espacios sirvientes y en los huecos que definen entre ellos, generan

los espacios servidos. El conjunto resulta una estructura fractal de cuadrados de distintas escalas que se asemeja a la alfombra de Sierpinski.

Con figuras geométricas simples y dimensiones modulares, Kahn y Tyng crean una organización fractal de huecos que determina la relación entre los espacios servidos y los sirvientes, y que recuerda ciertos patrones de generación de forma en la naturaleza. Esta idea, que es explorada en paralelo por los mismos autores en el proyecto para la Philadelphia City Tower (1952 y 1957), ya aparecía expresada en el trabajo de Robert Le Ricolais y en algunas de las «casas de la pradera» de Frank Lloyd Wright, como la Darwin D. Martin House (1903-1905), en la que los grandes pilares que definen los grandes espacios de la vivienda, tales como la sala de estar, el comedor, la biblioteca o la sala de juegos, están compuestos por cuatro pilares menores agrupados que en su interior hueco alojan zonas de servicio e instalaciones.

En el rascacielos para Philadelphia, la relación entre los distintos espacios adquiere un sentido estructural profundo debido a la escala de la obra y a la magnitud de las cargas que los elementos estructurales debían soportar. Los pilares huecos de piedra de la Casa de Baños están conceptualmente vinculados a la *columna automórfica* de Le Ricolais, si bien en este proyecto de Kahn y Tyng la relación geométrica entre los elementos estructurales huecos y los espacios servidos es meramente compositiva y funcional, pero no estructural.

En el proyecto para los Laboratorios de Biotecnología Richards de la Universidad de Pensilvania (1957-1965), la distribución de espacios principales y de servicio, la volumetría, la estructura y las instalaciones, se integran en una única solución constructiva. Alrededor de un núcleo central de circulaciones verticales, horizontales y servicios, se agrupan los bloques principales de laboratorios. Alrededor de estos, a su vez, se ubican el resto de los espacios sirvientes generando torres de menor tamaño. La distribución de servicios resulta así centrífuga, desde el núcleo central hacia los satélites y desde estos hacia los servicios particulares de los laboratorios. Los espacios servidos resultan, finalmente, libres de cualquier obstrucción.

La estructura de los bloques de los laboratorios, diseñada por Kahn junto al ingeniero August Komendant, está basada en el uso de elementos de hormigón prefabricado que se montan y ensamblan en obra (Giurgola, 1992: 168), de modo de reducir los tiempos de construcción y de lograr una gran precisión formal. El entramado resistente de los forjados está formado por grandes vigas que se cruzan ortogonalmente formando un pórtico tipo Vierendeel, que soporta a otra serie de vigas secundarias de menor sección pero igual distribución en planta. Algunas de estas vigas son pretensadas y otras postensadas, salvando el entramado la luz total del bloque de

laboratorios, de modo que no se produzca ninguna interferencia entre los soportes verticales y los espacios principales del proyecto. Dos de las cuatro vigas principales fueron fabricadas en una sola pieza y se posicionaron en obra primeramente; las otras dos vigas, fabricadas en tres tramos, fueron posicionadas a continuación y se postensaron para asegurar su continuidad (Komendant, 1975: 11). En el interior de los huecos de las vigas Vierendeel se alojan los tramos horizontales de las distintas instalaciones (A&V Monografías, 1993c: 39). Los pilares con forma de H que soportan las vigas principales, al igual que los espacios satelitales de servicio, están ubicados en el perímetro de los laboratorios, liberando de la estructura a las esquinas acristaladas.

Una vez definido este sistema constructivo, como un organismo, el edificio puede crecer y extenderse, tanto en vertical como en horizontal, ya que cada torre de laboratorios es una unidad constructiva independiente.

En el Salk Institute de La Jolla (1959-1966), el orden y la flexibilidad de los espacios, la solución estructural y las instalaciones se integran igualmente en una única solución constructiva. Pero en esta obra, es la sección del edificio la que se divide alternativamente en zonas ocupadas por espacios sirvientes y espacios servidos.



Figura 58. Salk Institute de Louis Kahn (1959-1966). Fotografía extraída de Internet (<https://www.flickr.com/photos/dreamsjung/3040465712>), © Jason Taellious / CC-BY-SA-2.0.

Kahn y Komendant diseñaron una estructura en la que una serie de vigas Vierendeel, de 2,75 metros de altura y 18,9 metros de luz (Sabini, 1994b: 43), dejan entre sus huecos el espacio necesario para albergar a los espacios sirvientes. 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 dispuestas en forma paralela cada 6 metros y con la altura de un nivel completo, de modo que en

el interior de sus huecos, además de poder discurrir ductos y cañerías, 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. La relación geométrica entre las vigas, los espacios sirvientes y los espacios servidos está condicionada por motivos estructurales, además de compositivos y funcionales, ya que la altura de un nivel completo de las vigas es necesaria para salvar la luz menor del edificio.

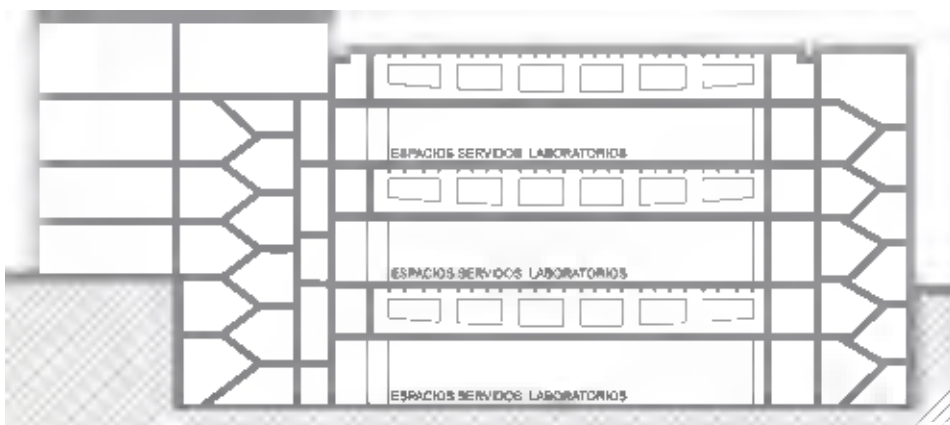


Figura 59. Sección estructural del Salk Institute de Louis Kahn. Esquema realizado por el autor.

Esta tipología estructural resultó muy exitosa y fue retomada en varios edificios recientes, como el Museo Kunsthall I de Rotterdam o el proyecto para el Zentrum für Kunst und Medien-technologie (ZKM) de Karlsruhe diseñados por Rem Koolhaas y Cecil Balmond. En el libro de Rem Koolhaas *S, M, L, XL*, de 1995, Cecil Balmond analiza la posibilidad de utilizar vigas Vierendeel para diseñar la estructura del proyecto para la Biblioteca de Francia (Koolhaas et ál., 1995: 671-673) presentado al concurso internacional de 1989. A continuación, en dicho libro, realiza un análisis estático de distintas configuraciones geométricas de este tipo de vigas (Koolhaas et ál., 1995: 674-685), planteando la pertinencia de su uso en la arquitectura contemporánea.

La idea no era novedosa, el propio Vierendeel la había sugerido a finales del siglo XIX y Komendant y Kahn la materializaron en el Salk Institute a principios de la década de 1960, pero sí es novedosa la aplicación arquitectónica de esta tipología estructural a edificios de gran escala, planteando el diseño

de la estructura en coordinación con el diseño del edificio, reforzando las vigas y agregándoles diagonales allí donde la estática lo reclama y donde estas no interfieren con el uso del espacio.

En el primer anteproyecto del Centro Pompidou, desarrollado luego de finalizado el concurso y presentado en diciembre de 1971, Piano, Rogers y el equipo de 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: 3 metros. Balmond analiza que el espacio que ocupan estas vigas reticuladas en el Pompidou es del orden del 43 % de la sección del edificio (Koolhaas et ál., 1995: 671). Si bien por el interior de sus huecos circulan ductos y cañerías de las distintas instalaciones mecánicas, este espacio podría 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*, atendiendo a los diferentes usos programáticos de un edificio y a la consecuente optimización del comportamiento estructural que podría lograrse y lo utiliza para diseñar las sucesivas secciones del proyecto ZKM de Karlsruhe, un gran contenedor de 43 x 43 x 58 metros que aloja en su interior un museo de arte mediático, un museo de arte contemporáneo, sala de teatro, salas de lectura, biblioteca, laboratorios de música y video, restaurantes, etc. En dos de sus fachadas se proyectan grandes muros de hormigón armado sobre los que descargan 7 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.

4.3.2. Los proyectos de Rinaldo Semino en la década de 1960

El arquitecto italiano Rinaldo Semino se dedicó, en la década de 1960, al estudio de sistemas constructivos aptos para la edificación de megaestructuras en las que pudiesen concentrarse actividades humanas. Particularmente, se enfocó en la idea de obtener un elemento estructural superficial de curvatura variable en el que los esfuerzos se distribuyan uniformemente y que,

yuxtapuesto adecuadamente a otros elementos semejantes, pudiera generar una macroestructura. En el año 1973 publicó en la revista *Zodiac* n.º 22 (Semino, 1973: 148-161) algunos proyectos presentados a concursos de arquitectura en los años 1960 en los que desarrolló esta idea, diseñando elementos estructurales prefabricados de tamaño y peso reducidos, en hormigón armado y en chapa de acero soldada, a partir de los cuales es posible generar módulos de mayor escala y complejidad. Definió, de este modo, macroestructuras a partir de un elemento base y un principio de organización jerárquico que resulta generalmente fractal, emulando principios de generación de formas naturales como los que describía D'Arcy Thompson en su libro *On Growth and form*, de 1917. Estos elementos prefabricados y livianos adquieren verdadero significado una vez se define cómo interactúan entre sí para crear una entidad de mayor tamaño y complejidad. Cada elemento es, así, un reflejo de la totalidad y define las características que poseerá el objeto arquitectónico acabado.

Para un concurso CECA de viviendas con estructura de acero, en 1965, propuso un prototipo en el que surge la idea de la repetición a distintas escalas de un mismo modelo geométrico. Este diseño parte de algunos pocos elementos de base que, yuxtapuestos, son capaces de formar un forjado de acero y una unidad vertical de doble curvatura de conexión entre dos forjados consecutivos. Definió, así, la estructura de la vivienda a una escala macro y a una escala micro.

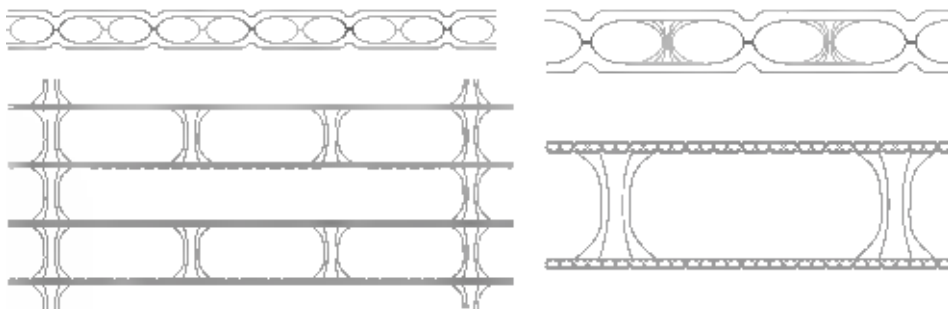


Figura 60. Detalle de losa y sección vertical del proyecto de vivienda en acero para el concurso CECA, Rinaldo Semino. Esquema realizado por el autor.

Los elementos que componen los forjados tienen 2,4 metros de ancho, 13,6 metros de largo y 30 cm de espesor. Cada uno de ellos se forma con dos placas de acero de 2 mm de espesor, con un diseño en relieve según un patrón hexagonal, que se colocan enfrentadas entre sí, de modo de poder soldarse los vértices coincidentes del relieve. Resulta, de esta manera, una

vigueta hueca con un espesor medio de 30 cm que, repetida en horizontal, forma una placa isotrópica que puede funcionar como entrepiso de la vivienda y alojar instalaciones en su interior.

Con los mismos elementos, es también posible construir un pilar o conector vertical que solidariza dos placas de entrepiso consecutivas, que a veces continúa hasta la cimentación y a veces se interrumpe, generando un gran pórtico tridimensional tipo Vierendeel que podría considerarse como un gigantesco forjado hueco de 3,6 metros de altura, que repite a mayor escala la forma del forjado de 30 cm de espesor. El peso propio de esta estructura resulta de 32 kg/m² en cada nivel, siendo capaz de salvar luces libres entre apoyos verticales de aproximadamente 7 metros y 20 metros en distintos niveles de forma alternada.

Esta organización estructural, que parece seguir la definición de Robert Le Ricolais de la ingeniería estructural como el arte de cómo y dónde disponer los huecos, es absolutamente novedosa. La estructura del edificio es pensada a distintas escalas repitiendo un mismo patrón formal según un modelo de crecimiento que podría considerarse como celular fractal y el espacio habitable surge de los huecos generados en el interior de las distintas unidades. Análogamente al diseño del Salk Institute, de Kahn, la sección de este edificio alterna espacios de diferentes tamaños y con distintos tipos de interferencias que se destinan a diferentes usos, pero aquí existen 3 escalas superpuestas: el espacio interior de las losas de 30 cm de espesor que se utiliza para albergar instalaciones y los espacios de 3,6 metros de altura con luces libres de 7 metros y 20 metros alternadamente, es decir, influidos en distinto grado por la presencia de los conectores verticales estructurales, que podrían destinarse a áreas de servicio y a salas de estar y de reuniones, respectivamente.

Para un concurso de ideas, organizado en 1969 por el Ministerio de Obras Públicas de Italia para la construcción de un puente que una la isla de Sicilia con el continente, Semino concibió una viga flotante sobre el estrecho de Messina apoyada rígidamente en sus extremos. El puente era recorrido en toda su longitud por un canal interno de aguas calmas y navegables y se formaba a partir de la yuxtaposición de elementos modulares de acero y de hormigón armado, siguiendo ciertos patrones de organización a distintas escalas.

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

Las células de base, de 2,5 metros de longitud, con huecos en su interior de aproximadamente 0,7 metros de diámetro, tenían forma tetraédrica y se encastraban generando vacíos en la estructura, según un diseño de malla triangular y hexagonal que permitía una notable simplificación constructiva, una gran liviandad y flexibilidad. Los elementos de hormigón armado se montaban dejando un vacío en las uniones que se llenarían in situ, generando una estructura de doble curvatura, mientras que los de acero se obtenían ensamblando por soldadura elementos menores, de 1,38 metros de longitud y 15 mm de espesor.

Algunos centenares de estos elementos se vinculaban entre sí para formar una unidad en forma de Y con huecos de unos 2 metros de diámetro en su interior. Miles de estas unidades en forma de Y se unían generando entre ellas huecos elípticos de una nueva escala: unos 10 metros de diámetro menor y unos 20 metros de diámetro mayor, para formar una pieza principal de 450 metros de longitud. El puente, con una longitud total de 3150 metros, resultaba de la unión de 7 de estas piezas principales que generaban entre ellas huecos elípticos de diámetros mayores de 200 metros y diámetros menores de 25 metros.

El modelo de crecimiento implícito en este sistema constructivo, que permite la creación de una gran estructura a partir de pocas células básicas de escasa complejidad, es análogo al modelo de crecimiento celular fractal inventado por Alexander Graham Bell y es muy utilizado en la naturaleza para la creación de diversas estructuras, como por ejemplo las caparazones de algunos virus, formadas a partir de la agrupación de subunidades proteicas de menor complejidad.

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 que los utilizados para las edificaciones pequeñas. La gran escala implicaba, en general, la repetición de modelos geométricos probados a escala pequeña, con menores esbelteces debido a la necesidad de aumentar las secciones resistentes. Las megaestructuras diseñadas por Rinaldo Semino en la década de 1960 son algunos de los primeros proyectos en la historia de la arquitectura que abandonaron claramente este modelo de crecimiento lineal e investigaron un modelo alternativo.

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

4.3.3. Los rascacielos de SOM

En la década de 1960, la tipología estructural de los rascacielos se transformó radicalmente gracias al trabajo del equipo de ingenieros de la firma estadounidense SOM (Skidmore, Owings & Merrill), integrado por Myron Goldsmith, Fazlur Kahn y Bruce Graham. La tipología estructural hasta entonces utilizada para la construcción de rascacielos, ligada a los ideales del Movimiento Moderno, era la retícula isótropa de pilares, losas y vigas, que se aplicaba indiferentemente a edificios de cualquier escala y proporción (Abalos et ál., 1995: 47).

Myron Goldsmith, en su artículo «Structure, scale and architecture», publicado en 1976, cita a D'Arcy Thompson respondiendo al planteo de Galileo Galilei de que la resistencia de toda estructura disminuye a medida que esta aumenta de tamaño (Goldsmith, 1976: 34). Si la acción preponderante sobre una estructura es la presión horizontal de viento, a medida que esta crece de tamaño, la superficie expuesta al viento aumentará según el cuadrado de sus dimensiones, mientras que el peso, con un efecto estabilizador frente al vuelco, aumentará según el cubo de sus dimensiones. D'Arcy Thompson concluye, entonces, que cuanto mayor sea el tamaño de una estructura, también será más estable frente al vuelco producido por la acción del viento.

En 1953, Goldsmith proyectó, como ilustración de su tesis «Los efectos de la escala. La construcción en altura», un prototipo teórico de rascacielos de 86 niveles de altura en el que definía una macroestructura perimetral encargada de resistir tanto las acciones gravitatorias como las horizontales, y una estructura secundaria interior que únicamente resistía cargas gravitatorias (Goldsmith, 1976: 41-42). Teniendo en cuenta que el comportamiento global del edificio frente a las acciones horizontales se asemeja al de una ménsula empotrada en el terreno, con esta disposición, la macroestructura adquiere una gran inercia al alejarse del centro de gravedad de la planta rectangular. Los ocho pilares y las seis plataformas exteriores, vinculados con continuidad, forman una retícula estructural espacial de gran rigidez: un tubo perforado. Entre las plataformas horizontales existen quince plantas intermedias, siete de las cuales están suspendidas por tensores de la plataforma superior y otras siete se apoyan a través de pilares en la plataforma inferior. Estos tensores y pilares interiores forman una malla estructural secundaria de unos 8,5 x 14 metros (Goldsmith, 1976: 42). El nivel central de cada serie de quince plantas queda libre de interferencias estructurales. De esta manera, disminuye el número y las dimensiones de los pilares interiores del edificio, que únicamente soportan siete niveles. El diseño de este rascacielos sigue las ideas de Robert Le Ricolais de que un modelo geométrico es el resultado de una determinada

acción mecánica y de que el momento de inercia de una estructura es proporcional a la resistencia a la deformación y está estrechamente ligado al concepto de isotropismo, es decir, que cuanto más se expanda una estructura en el espacio mayor será la rigidez que adquiera.

En la década de 1960, formando parte del equipo de SOM, Goldsmith, Kahn y Graham realizaron un análisis espacial del comportamiento mecánico del rascacielos a partir del cual optimizarán progresivamente la retícula isotropa de pilares, vigas y losas, definiendo nuevas tipologías eficaces desde un punto de vista geométrico y estático.

En el edificio Chestnut-Dewitt Apartments de Chicago (1961-1965), Goldsmith, Kahn y Graham construyen por primera vez una estructura en la que un tubo perforado exterior resiste las cargas horizontales (Abalos et ál., 1995: 62-63).

Para solucionar el problema que denominaron como «retraso» en la transmisión del cortante, que incrementaba las solicitaciones en los pilares de las esquinas debido a la flexibilidad de las vigas interiores que unen las caras opuestas del tubo, diseñaron la tipología de «tubo dentro de tubo», que aplicaron por primera vez en el diseño del Brunswick Building (1962-1966), en Chicago, alcanzando una altura de 144 metros. El núcleo interior de servicios de este rascacielos se convierte en un tubo estructural que, conectado al tubo exterior a través de los forjados, colabora para resistir las cargas horizontales. Esta tipología estructural sirvió de ejemplo para la construcción de una gran cantidad de edificios comerciales en Estados Unidos de entre 200 y 300 metros de altura (Abalos et ál., 1995: 65-66).

En la planta de un edificio con estructura de *tubo dentro de tubo* pueden verse expresadas las ideas de Louis Kahn sobre espacios servidos y espacios sirvientes. Dentro del núcleo interior, y análogamente a como 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 la Torre Sears de Chicago (1970-1974), realizado por Kahn y Graham, representa el último nivel de optimización de la tipología estructural del rascacielos alcanzado por el equipo de SOM en este período. Nueve tubos entrelazados que conforman una tipología conocida como «haz

de tubos», funcionan como un único tubo cruzado interiormente por pantallas trabajando como diafragmas rígidos (Abalos et ál., 1995: 71-72). El hecho de que los nueve tubos alcancen diferentes alturas, genera una volumetría de mayor dinamismo que aproxima el centro de gravedad del edificio al suelo, estabilizándolo frente al vuelco. El rascacielos alcanzó así las 110 plantas y los 442 metros de altura, convirtiéndose en el edificio más alto del mundo en el momento de su inauguración.

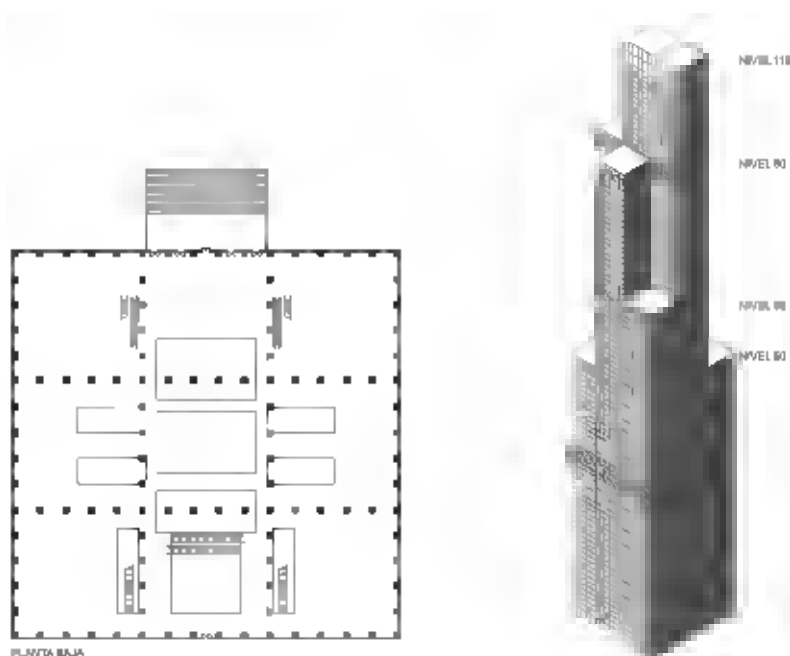


Figura 61. Planta baja y axonométrica estructural de la Torre Sears (1970-1974). Esquema realizado por el autor.

Grandes vigas reticuladas, a través de las que circulan los ductos y cañerías de las instalaciones del edificio, salvan los 22,8 metros de luz libre entre cada tubo. La dirección de estas vigas se alterna en cada planta para repartir las cargas verticales del modo más homogéneo posible a todos los pilares del edificio. Si bien no es posible identificar en la planta de esta tipología una diferenciación jerárquica de los espacios, en la sección de la Torre Sears puede reconocerse una alternancia entre espacios sirvientes: el espacio en el interior de las vigas que salvan la luz de 22,8 metros, y espacios servidos: el espacio de uso.

Actualmente se ha generalizado el empleo de la tipología estructural de «haces de tubos» para el diseño de edificios de más de 300 metros de altura. La geometría de la Torre Sears podría ser descrita como una volumetría compleja, generada a partir de la adición de pequeñas células prismáticas, siguiendo un proceso de crecimiento celular fractal. Observando una planta pueden reconocerse cuadrados de al menos tres escalas diferentes. Veinte pilares de sección cuadrada se agrupan para formar un tubo de sección cuadrada de 22,8 metros de lado. Nueve de estos tubos, finalmente, se agrupan para generar un haz de tubos de sección cuadrada de unos 68 metros de lado. Este procedimiento geométrico, al igual que el inventado por Alexander Graham Bell para la fabricación de cometas tetraédricas, permite la creación de una geometría estructural de alta complejidad a partir de la adición de células básicas de menor complejidad. Con cada cambio de escala aparece una nueva forma, más compleja que la precedente, que posee nuevas propiedades y que funciona como esquema en planta de una estructura que puede alcanzar alturas cada vez mayores, desde el pilar aislado (un obelisco), pasando por el tubo, hasta llegar al *tubo dentro de tubo o al haz de tubos*.

La particular forma de las plantas inferiores de la Torre Sears presenta grandes semejanzas con la forma que puede obtenerse iterando tres veces el conjunto fractal conocido como *alfombra de Sierpinski*. La construcción de esta figura comienza a partir de un cuadrado que se divide en nueve cuadrados idénticos, de los cuales se conservan ocho y se elimina uno: el central. Luego, cada uno de los ocho cuadrados que se conservaron vuelve a dividirse en nueve cuadrados de los cuales se elimina nuevamente el central, y así sucesivamente. Podría describirse, por lo tanto, como un procedimiento para la generación de plantas de haces de tubos fractales. La alfombra de Sierpinski es la figura que resta tras un número infinito de iteraciones.

Si a la figura que se obtiene en la tercera iteración se le quitan 8 de los 64 cuadrados más pequeños, generados en la última iteración (marcados en gris en la última imagen de la figura 62), se obtiene un esquema que se asemeja a las plantas inferiores de la Torre Sears con algunas de sus proporciones alteradas. El cuadrado central y los 8 cuadrados que lo rodean, generados en las dos primeras iteraciones, podrían representar los espacios libres en el interior de los 9 tubos y los 56 cuadrados pequeños que se conservaron, generados en la tercer iteración, podrían representar a los pilares.

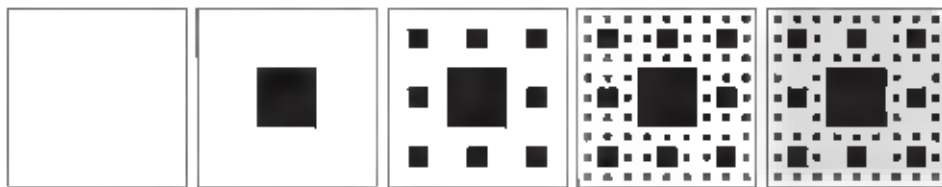


Figura 62. Alfombra de Sierpinski, Waclaw Sierpinski, 1916. Tres iteraciones y esquema modificado de la tercera iteración. Ilustración realizada por el autor.

Cabe destacar que las mayores dimensiones del tubo central del esquema resultante parecen aumentar la inercia del conjunto de pilares con respecto a la inercia que presenta la estructura de la Torre Sears, al alejar la masa estructural del centro de gravedad de la planta. El cambio en las proporciones de los nueve tubos que sugiere la tercera iteración del conjunto fractal, parecería propiciar un incremento en la rigidez de la torre.

Podría igualmente plantearse que, si la figura resultante de la segunda iteración del conjunto se asemeja al esquema de una estructura de tubo perforado y la figura resultante de la tercera iteración se asemeja al esquema de un haz de tubos, la figura que resulte de una cuarta iteración podría sugerir un tipo de geometría apto para la construcción de edificios en altura de una escala aún mayor a la de los rascacielos actuales, con mayores dimensiones en planta y mayores alturas, y cuya volumetría incluyera una nueva escala de huecos en su interior, es decir, que tuviera una organización espacial jerárquica de mayor complejidad.

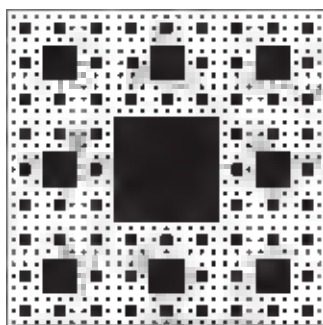


Figura 63. Cuarta iteración de la alfombra de Sierpinski, Waclaw Sierpinski, 1916. Ilustración realizada por el autor.

El ingeniero William J. LeMessurier comenzó a desarrollar, en la década de 1970, un particular interés por el diseño de formas innovadoras en el

ámbito estructural y desarrolló un nuevo paradigma de edificio en altura que aplicó a una serie de diseños, algunos de los cuales fueron finalmente llevados a la práctica.

Según LeMessurier, la forma ideal para resistir el vuelco, el desplazamiento y la vibración producidos por la carga de viento, es un sistema estructural que posea continuidad vertical y que se ubique lo más lejos posible del centro de gravedad del edificio. Una chimenea (un tubo macizo y hueco), por lo tanto, sería la forma perfecta para un rascacielos (Rastorfer, 1985a: 145). Siguiendo la premisa de Le Ricolais de diseñar una estructura comenzando con un bloque macizo y trabajando por medio de escisiones, LeMessurier traduce la forma ideal de la chimenea a una versión esquelética, conservando las líneas principales de esfuerzos y abriendo el rascacielos al exterior. De esta manera disuelve los muros de la chimenea convirtiéndolos en una malla de pilares, estabilizados por diagonales de refuerzo y por un marco que los conecta rígidamente con los forjados.

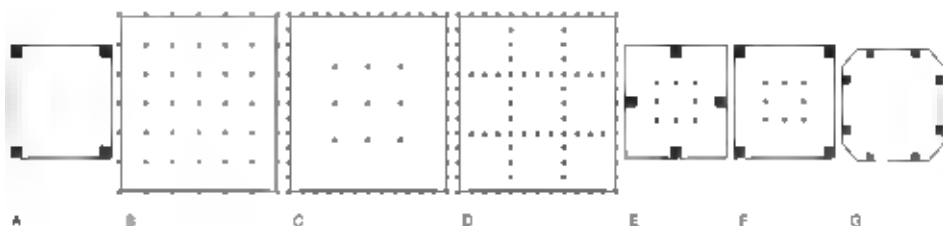


Figura 64. Distintas configuraciones geométricas de pilares en edificios de planta cuadrada, analizadas por William J. LeMessurier a través del índice BRI (Bending Rigidity Index). Esquema realizado por el autor.

La estructura, pensaba LeMessurier, debe estar relacionada con la planta del edificio para un correcto aprovechamiento del espacio interior. Debe, además, ser fácil de construir, ser económica en el uso de los recursos y su fortaleza debe provenir de su geometría, más que de la resistencia de los materiales con los que esté construida (Rastorfer, 1985a: 145).

La resistencia de un rascacielos depende fundamentalmente del modo en que los pilares y los muros estructurales se distribuyan en planta. Para un edificio de planta cuadrada, razonó, la ubicación ideal de los pilares es en las esquinas, allí donde más se alejan del centro de gravedad (Rastorfer, 1985a: 147). Análogamente al análisis comparativo de distintos volúmenes como redes capaces de ocupar el espacio en forma homogénea, que Le Ricolais

había realizado tomando como referencia el isotropismo ideal de la esfera, LeMessurier creó el BRI (*Bending Rigidity Index* o índice de rigidez a la flexión), definido como el momento total de inercia de todos los pilares conformando un único sistema resistente a la flexión, con el objetivo de evaluar la eficiencia estructural de distintas configuraciones geométricas de pilares en un edificio de planta cuadrada. A la planta que concentra toda la masa estructural del edificio en los cuatro vértices (figura A de la figura 64) le asignó el valor ideal de 100. Las figuras B a G representan distintas disposiciones de pilares, tomando como modelo distintos ejemplos o tipologías de rascacielos, con un área total de la masa estructural idéntica a la de la figura A. Las figuras B, C y D, basadas respectivamente en las plantas de un edificio con una retícula homogénea de pilares como el Empire State Building, un edificio con estructura de tubo perforado como las torres del World Trade Center y un edificio con estructura de haz de tubos como la Torre Sears, alcanzan un BRI de 33. La figura E, basada en la planta de la Torre Citicorp de Nueva York diseñada por el mismo LeMessurier, alcanza un BRI de 31. Los pilares principales de este rascacielos fueron ubicados en el centro de los lados de la planta cuadrada para no interferir con la construcción de una iglesia en el mismo terreno. Si dichos pilares hubieran sido ubicados en los vértices de la planta, tal como muestra la figura F, el BRI hubiera ascendido a 56. La figura G, basada en la planta del proyecto de LeMessurier junto al arquitecto Helmut Jahn para el banco Sothwest de Houston, alcanza un BRI de 63.

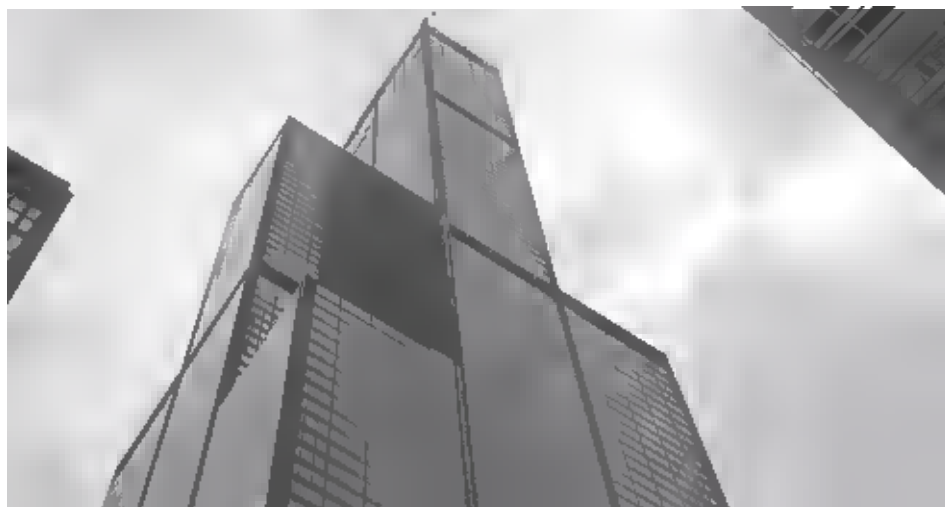


Figura 65. Torre Sears de Chicago. Fotografía extraída de Internet (<https://www.flickr.com/photos/matthewblack/526491691>), © Matthew Black / CC-BY-SA-2.0.

Estas ideas tienen un antecedente en los rascacielos que Theo van Doesburg diseñó para su propuesta utópica de Ciudad de la Circulación. A efectos de resolver el problema de la congestión del tránsito en las grandes ciudades modernas, van Doesburg presentó, en la conferencia «L'esprit fondamental de l'architecture contemporaine», de 1929, un proyecto en el que suelo urbano era liberado del tránsito de peatones a través de una serie de gigantescos soportes que contenían las circulaciones verticales y se conectaban con torres habitables de planta cuadrada a través de puentes. Cada uno de estos rascacielos quedaba rígidamente conectado a cuatro soportes ubicados más allá de su perímetro, de modo que si determinásemos su índice BRI, este sería superior a 100.

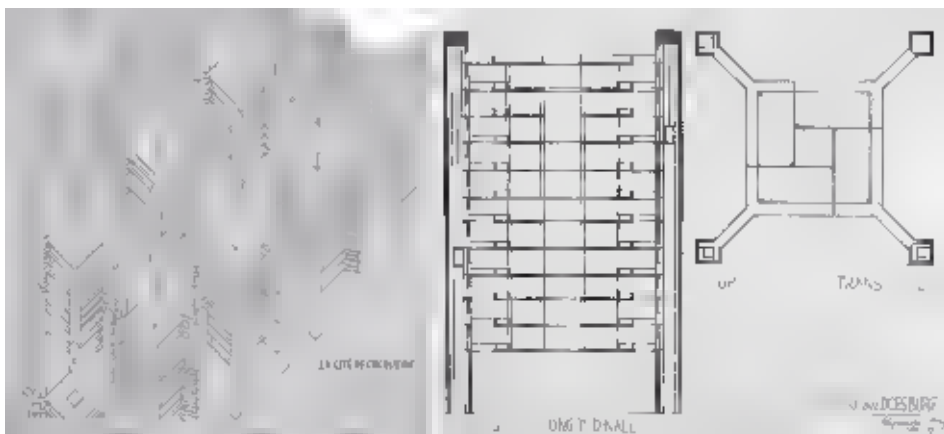


Figura 66. La “Ciudad de la circulación” de Theo van Doesburg (1929).

En el proyecto para el banco Sothwest de Houston, ganador de un concurso realizado en 1982 pero finalmente no construido, LeMessurier establecía la presencia de dos grandes pilares en cada esquina de modo de optimizar las vistas desde los espacios interiores. La estructura debía ser excepcionalmente rígida para poder soportar los huracanes que suelen presentarse en la zona de Houston (Rastorfer, 1985a: 148). La clave del diseño de este edificio es el sistema de refuerzos diagonales que traslada todo el peso del edificio a los pilares de las esquinas, de modo de evitar que estos entren en tracción en algún estado de cargas. Las diagonales de acero, organizadas en módulos de 9 niveles de altura, atraviesan los espacios de oficinas a lo largo de 4 pisos y quedan ocultas en las paredes del núcleo de servicios en otros 5 pisos. Una sección del edificio a través de dos pilares opuestos permite visualizar

el modo en que las cargas verticales se distribuyen hasta llegar a los pilares principales y cómo estos disminuyen de sección a medida que se elevan.

El Erawhon Center es un proyecto teórico de rascacielos que LeMessurier proyectó en 1980. Partiendo de una planta cuadrada de tamaño similar a la del World Trade Center o a la de la Torre Sears (con 60 metros de lado, aproximadamente), se planteó el diseño de una torre lo más alta posible que pudiera soportar, con un período de oscilación de 10 segundos, un huracán con vientos de hasta 225 km/hora (Rastorfer, 1985b: 152).

Diseñó, entonces, el sistema estructural que creyó más efectivo para resistir los esfuerzos de flexión, ubicando cuatro pilares cuadrados de hormigón armado de alta resistencia en los vértices de la planta cuadrada. Las dimensiones de dichos pilares varían desde unos 12 metros de lado en la base hasta unos 4 metros de lado en la cima y se conectan entre sí a través de la estructura más eficiente que LeMessurier podía diseñar: una malla de diagonales de acero dispuestas a 45°, tanto en el interior del edificio como en las fachadas, que trasladan toda la carga gravitatoria hacia las esquinas. De esta manera, el BRI del edificio podría considerarse como de 100 y alcanza una altura de unos 840 metros, con 207 niveles. Este proyecto teórico, que lleva al límite las ideas de LeMessurier, es una clara versión esquelética de una ménsula maciza empotrada en el terreno a la que se le quitó toda la materia no estructural de modo de ahuecarla y volverla habitable, conservando únicamente las principales líneas resistentes.

En el edificio para el Banco de China en Hong Kong (1985-1989), el arquitecto chino Ieoh Ming Pei y el ingeniero L. Robertson, de Robertson, Fowler & Associates, materializaron el esquema del Erawhon Center en condiciones de máxima adversidad, debido a los sismos y a los tifones que afectan a la zona (Suner, 1990: 122). A través de diagonales que recorren todo el edificio, desde el centro hacia los vértices y también en las caras exteriores, el rascacielos de 70 niveles y 315 metros de altura transfiere todo su peso a los pilares compuestos de hormigón armado y acero ubicados en las cuatro esquinas de la planta cuadrada. En las plantas bajas se suspenden las diagonales interiores y se reemplazan por núcleos para liberar al espacio de accesos de interferencias estructurales.

Las Torres Petronas de Kuala Lumpur (1994-1998), diseñadas por los arquitectos César Pelli & Associates y los ingenieros Thornton-Tomasetti Group, con 452 metros de altura y 97 plantas, se convirtieron en el momento de su inauguración en el edificio más alto del mundo, superando a la Torre Sears de Chicago. La estructura de cada una de las torres consiste en un tubo exterior de 16 pilares de hormigón armado, separados entre sí 7,9 y 10 metros alternadamente (Pearson, 1999: 99), conectados a un núcleo interior también de

hormigón armado, de unos 23 metros de lado. Desde el punto de vista tipológico no existe ninguna innovación en la estructura de estas torres, construidas con el sistema de tubo dentro de tubo. Pero la planta circular y las dimensiones del tubo interior, que optimizan la inercia de la masa resistente, junto con el empleo de hormigón de alta resistencia, hicieron posible alcanzar una altura inédita en su momento.



Figura 67. El World Trade Center de Nueva York, la Torre Sears de Chicago, la Torre Citicorp de Nueva York y el Banco de China de Hong Kong. Fotografías del autor, 1998.



Figura 68. Banco de China de Ieoh Ming Pei y Hong Kong and Shanghai Bank de Norman Foster, Hong Kong. Fotografía del autor, 1998.

La Torre Taipei 101 en Taipei, Taiwan (1997-2004), diseñada por los arquitectos C. Y. Lee & Partners y los ingenieros Thornton-Tomasetti Group, con 101 plantas sobre el nivel del terreno más 5 subsuelos y 508 metros de altura, superó a las Torres Petronas y se convirtió también en el edificio más alto del mundo en el momento de su inauguración (A+U, 2005d: 110). Pero al igual que las torres malayas, desde un punto de vista tipológico no hizo ningún aporte novedoso, basándose la proeza de su altura en el empleo de hormigones de alta resistencia y en la descomposición de la estructura en una macroestructura perimetral que soporta las cargas horizontales, y una estructura interior secundaria que se encuentra sometida únicamente a cargas gravitatorias, tal como la que Goldsmith había diseñado para su rascacielos con estructura de hormigón armado de 1953.

La Torre Burj Khalifa en Dubai (2004-2010), diseñada por Adrian Smith y George Efstathiou de SOM, con una planta en forma de Y que recuerda al rascacielos de Le Corbusier en Cap de la Marine, alcanzó los 828 metros de altura en enero de 2010, superando ampliamente al Taipei 101 y convirtiéndose en el edificio más alto del mundo hasta la fecha de hoy (Kamin, 2010: 78). La planta presenta una geometría triaxial; tres alas que forman entre sí ángulos de 120° se conectan a un núcleo central hexagonal y van reduciendo su longitud a medida que la torre se eleva según un patrón en espiral que remarca su esbeltez. Según Adrian Smith, la planta en forma de Y es la ideal desde un punto de vista estructural para un edificio de estas características, mejor que la cruciforme o que la lineal (Minutillo, 2010: 89) y permite optimizar las vistas desde el interior de las alas sin que existan interferencias con otros sectores del edificio.



Figura 69. Torre Burj Khalifa en Dubai (2004-2010), de SOM. Fotografía extraída de Internet (https://www.flickr.com/photos/will_spark/8604079928/), © Wilerson S Andrade / CC-BY-SA-2.0.

La estructura del Burj Khalifa es tipológicamente única. Se basa en sistemas convencionales (Minutillo, 2010: 89) tales como núcleos, pantallas y pilares, pero su organización geométrica le otorga la rigidez necesaria para oponerse a las deformaciones introducidas por el viento. En las tres alas se ubicaron pantallas estructurales de unos 60 cm de espesor, a ambos lados de los corredores centrales, que se extienden desde el núcleo hasta prácticamente los extremos, culminando en muros transversales más gruesos a modo de martillos (Baker, 2010: 75). Estas pantallas poseen una gran rigidez en su propio plano de modo que son capaces de controlar las deformaciones debidas a la flexión producida por el viento. En los extremos de las alas existen pilares circulares que se vinculan en los niveles técnicos a las pantallas estructurales. De esta manera, toda la estructura vertical (núcleo, pantallas y pilares circulares) colabora para resistir tanto las cargas gravitatorias como las horizontales.

Si bien no existen similitudes formales entre la estructura de este rascacielos y la de aquellos diseñados por William J. LeMessurier en las décadas de 1970 y 1980, puede reconocerse en su diseño algunas de las ideas de dicho ingeniero: la estructura está íntimamente relacionada con la planta del edificio, su resistencia depende fundamentalmente de su geometría y todos sus componentes colaboran para resistir todos los tipos de carga.

La Torre Illinois, de 528 niveles de altura, diseñada en 1956 por Frank Lloyd Wright, podría considerarse como un antecedente teórico de esta organización estructural. Un gigantesco núcleo de acero y hormigón, con forma de trípode, aseguraba que las presiones de viento ejercidas desde cualquier dirección sobre la torre de una milla de altura fueran siempre resistidas por las dos patas que se encontraban en el lado opuesto (Wright, 1961: 198-200). Este núcleo iba disminuyendo sus dimensiones a medida que se elevaba y se enterraba hasta encontrar el lecho rocoso, de modo de asegurar la estabilidad global del edificio frente al vuelco. Su gran inercia geométrica era la principal responsable de su gran rigidez mecánica.

En la primera década del siglo XXI aparecieron las macroestructuras consistentes en tubos con geometrías complejas. Estos tubos experimentaron formas novedosas y atractivas, a la vez que investigaron acerca de la rigidez de distintas configuraciones geométricas. Conceptualmente, estas propuestas continuaron las ideas de Le Ricolais sobre el diseño de estructuras esqueléticas y las de LeMessurier acerca de la inercia estructural de los edificios en altura.

Norman Foster ha experimentado con el diseño de tubos estructurales basados en el uso de mallas trianguladas, en proyectos como la Torre del Milenio en Tokio (1989), de 386 metros de altura, o en la Torre Swiss

Reinsurance Company de Londres (2001-2003), que con una piel exterior de tipo Diagrid alcanza los 180 metros.

Nox definió la piel estructural de algunos de sus proyectos de rascacielos, tales como el obliqueWTC en Nueva York (2001), el European Central Bank en Frankfurt (2003) o el complejo The Three Graces en Dubai (2008), como una malla con perforaciones circulares y elípticas que recuerda las configuraciones geométricas de algunos esqueletos de radiolarios dibujados por Ernst Haeckel en su libro *Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)* de 1862.

En 2002, Jean Nouvel diseñó una torre de unos 230 metros de altura en Doha, Qatar, con una estructura tubular exterior que sigue un patrón geométrico que evoca diseños orientales (A+U, 2005c: 86-87). Este patrón se repite a distintas escalas, tanto en la fachada vidriada como en la malla de protección solar, generando una imagen fractal como resultado de la superposición de las diferentes capas.

Zaha Hadid ha diseñado diversos rascacielos con núcleos estructurales exteriores geoméricamente complejas, tales como la torre Dorobanti de 200 metros de altura, en Bucarest, cuya piel está compuesta por la superposición de dos mallas de barras diagonales con geometrías variables, o la torre Marsa Dubai Residential, que presenta un revestimiento exterior portante con múltiples perforaciones irregulares (Bosse, 2007: 92).

El edificio para la China Central Television (CCTV) en Pekín, diseñado por Rem Koolhaas junto a Cecil Balmond (2005-2008), con 450.000 m² y 234 metros de altura, está compuesto por un basamento de 12 niveles, dos torres principales que se inclinan unos 6.º, y un remate suspendido a 36 niveles de altura con un espesor variable de 9 a 13 niveles, todos ellos combinados para formar un único tubo estructural continuo (Carroll et ál., 2005: 4-5). De este modo, la estructura adquiere la rigidez suficiente como para resistir el enorme momento de vuelco producido por la gran excentricidad que presentan las cargas gravitatorias, las cargas de viento y sismo.

El tubo está formado por una malla de barras en diagonal que fue analizada con el programa GSA de Oasys. Un intenso proceso de diseño fue llevado a cabo en colaboración, por los ingenieros de Arup y los proyectistas de OMA, para optimizar esta malla, densificándola allí donde quedaba sometida a mayores esfuerzos y abriéndola donde las solicitaciones eran menores, de modo que la imagen final del edificio refleje las tensiones a las que el volumen resulta sometido.

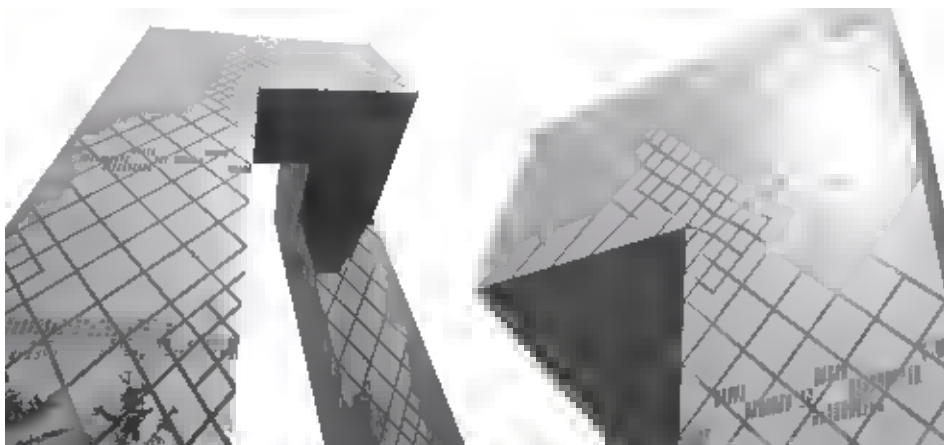


Figura 70. Edificio para la China Central Television (CCTV) en Pekín, Rem Koolhaas y Arup (2005-2008). Fotografías: Ignacio Valls, 2014.

4.3.4. Las naves de planta libre

A finales de la década de 1960, el desarrollo tecnológico condicionaba fuertemente el nivel de complejidad de la industria de la construcción europea con una enorme disponibilidad de materiales, sistemas estructurales, procesos de producción y sistemas de montaje en obra. Renzo Piano, Richard Rogers y Norman Foster son algunos de los arquitectos de una nueva generación que comenzó a experimentar con la integración a la arquitectura de esta nueva tecnología disponible, con el objetivo de satisfacer las nuevas exigencias de la sociedad de finales del siglo XX.

En 1967, el arquitecto Renzo Piano diseñó una fábrica en Génova para la cual desarrolló un sistema modular con una malla de pilares de 10 x 10 metros y una cubierta formada por una red de cables pretensados que transmitían su carga, a través de una serie de puntales verticales, a una membrana constituida por paneles cuadrados de 2,5 metros de lado en poliéster reforzado, unidos por soldadura química (Piano, 1973a: 129). Dos años más tarde, proyectó un Sistema Abierto para Laboratorios y Oficinas basado en cuatro elementos constructivos principales: vigas de fundación de hormigón precomprimido, paredes de hormigón aligerado y poliuretano expandido, y pirámides de acero en la cubierta, sobre las que se apoyaban paneles translúcidos de fibra de vidrio estampada (Piano, 1973a: 128). Cada uno de estos elementos consistía en un intento de optimización de la función constructiva y estructural que cumplía, con la tecnología disponible en ese

momento. Las vigas de fundación, por ejemplo, se dimensionaron con múltiples perforaciones en su alma de modo de reducir su peso y mantenerlo dentro de los límites de maniobrabilidad de un camión con grúa. Las perforaciones permitían, por otra parte, una ventilación eficaz y una sencilla puesta en obra de los ductos de instalaciones en su interior. Las pirámides de acero de la cubierta se encastraban fácilmente en la estructura portante de las paredes laterales, eran fácilmente transportables una vez armadas y en su interior podían alojar instalaciones de aire acondicionado, iluminación y sistemas de detección y apagado de incendios.

En 1970, junto al arquitecto Richard Rogers, proyectó otro Sistema Industrializado para una fábrica, basado en 5 componentes (Piano, 1973a:138-139): zapata de fundación prefabricada, pilar, viga principal, viga diagonal secundaria y placa de cubierta, con el objetivo de lograr la completa integración entre elementos estructurales, una red de distribución flexible de instalaciones y equipos internos de transporte: grúas, monorraíles, elevadores, etc.

Estas obras consisten en naves con espacios interiores libres de grandes dimensiones en las que, más que resolver un edificio concreto, se pretende proyectar un sistema constructivo que pueda generalizarse a un sinnúmero de situaciones. El principal objetivo es lograr la eficiencia, tanto en la etapa de producción, como en la de transporte, montaje y posterior desempeño arquitectónico, por lo que la obra de Jean Prouvé es un antecedente directo. Por este motivo, es fundamental la optimización de los distintos elementos atendiendo a los métodos de prefabricación, los medios disponibles de transporte, el sistema de ensamblaje en obra y la función final.

En 1957 se formó en Inglaterra el consorcio CLASP (Consortium of Local Authorities Special Programme) con el objetivo de desarrollar un sistema prefabricado de bajo costo aplicable a la construcción de escuelas. A finales de la década de 1950 y principios de la de 1960 se construyeron en el Reino Unido, a través de este programa, numerosos edificios educativos con estructura metálica basada en el uso de grillas con un módulo base que variaba entre las 3 pulgadas y los 100 mm (Ford, 1992: 256). El éxito del programa llevó, en 1962, a la formación de un segundo consorcio conocido como SCOLA (Second Consortium of Local Authorities) y al surgimiento en Estados Unidos del proyecto SCSD (School Construction Systems Development), a finales de los años 1960.

El proyecto SCSD consistió en un intento por optimizar las infraestructuras educativas de Estados Unidos y desarrollar un método para construir más rápidamente edificios escolares mejores y más económicos. El arquitecto Ezra Ehrenkratz desarrolló en el marco de este proyecto, entre los

años 1965 y 1967, un sistema integral de componentes con una novedosa solución de cubierta a la que llamó *sándwich integrado* (Mumford et ál., 1967: 59). Dicha cubierta contaba con unos 90 cm de profundidad entre el falso techo y el revestimiento superior de modo que en su interior las cañerías, los ductos y las instalaciones eléctricas podían circular libremente. La estructura del sistema, diseñada por el arquitecto Robertson Ward, enfatizaba temas ya estudiados por Jean Prouvé como la facilidad de transporte de los elementos estructurales prefabricados, la velocidad de montaje y su coordinación con el resto de los componentes constructivos (Mumford et ál., 1967: 60). Las conexiones entre la cubierta, las vigas reticuladas y los pilares, se preveían durante el proceso de montaje a través de bisagras que, una vez ensamblados todos los componentes, se soldaban en su posición definitiva. Todos los pilares y vigas reticuladas tenían secciones exteriores de dimensiones constantes de modo de facilitar la coordinación general, tal como en el Centro Pompidou. Los espesores de la perfilería, por lo tanto, variaban para adaptarse a las diferentes luces o cargas que pudieran presentarse y el revestimiento exterior de la cubierta de chapa de acero reemplazaba al cordón superior de las vigas reticuladas (Mumford et ál., 1967: 60).

El sistema se proyectó así como un medio para construir rápida y económicamente edificios con una planta libre de grandes dimensiones y una gran diversidad de servicios a su disposición. Como en un organismo, las funciones de los distintos elementos no son únicas ni simples y la coordinación espacial es fundamental para la optimización de los recursos. Las vigas reticuladas son idóneas para salvar grandes luces y el espacio libre generado en el interior de sus huecos servía para alojar las instalaciones. La chapa de acero superior era, a la vez, revestimiento y estructura. De hecho, el sistema optimizaba los materiales estructurales al punto de emplear menos cantidad de acero por metro cuadrado de construcción que cualquier otro sistema industrializado de su tiempo (Mumford et ál., 1967: 60).

Por la misma época, el arquitecto Norman Foster proyectaba sus primeras obras en el Reino Unido siguiendo algunas ideas de Buckminster Fuller, quien consideraba al acto proyectual como un instrumento para alcanzar un conocimiento más amplio y profundo del universo. La obra de Foster se basa en el desarrollo de un gran número de técnicas y sistemas constructivos, y puede considerarse como una investigación sobre la integración entre estructura, sistemas de instalaciones, métodos industrializados de construcción y eficacia en el uso de la energía.

En 1971 desarrolló el proyecto Climatroffice, junto al mismo Fuller, que consistía en una exploración sobre el equipamiento del espacio urbano a través

de una serie de plataformas en el interior de una cúpula geodésica (Fernandez-Galiano, 1999: 34). Temas como la flexibilidad de usos, la iluminación natural, el ahorro de energía, la búsqueda del máximo espacio contenido con la menor envolvente posible, la ligereza, etc., eran tratados en esta obra. La arquitectura, más que una práctica autónoma, comenzó a convertirse en el ámbito de convergencia de diversas disciplinas y las innovaciones llegaron de la mano de las nuevas tecnologías disponibles.



Figura 71. El Sainsbury Centre en Norwich, de Norman Foster Associates (1974). Fotografía extraída de Internet (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sainsbury_Centre_for_Visual_Arts.jpg), © Oxyman / CC-BY-SA-1.2.

Los *Umbrella buildings* surgen como una investigación sobre construcciones de grandes luces libres, retomando la idea de sándwich integrado del sistema estadounidense SCSD. Se trata de 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. El proyecto para la Reliance Controls de 1965, del Team 4 (Norman Foster, Richard Rogers, Su Rogers y Wendy Cheesman), puede considerarse como el primero de los *Umbrella buildings*. Se trata de una nave ligera totalmente modulada, con estructura de acero, losa de piso con instalaciones en su interior y revestimiento de chapa corrugada, que se montaba completamente en seco.

Algunos de los proyectos desarrollados por Foster Associates a fines de la década de 1960, como una Escuela con Local de Usos Múltiples en Newport y un Centro Social para el naviero Fred Olsen en los muelles de Londres, desarrollaron el concepto de *Umbrella building* y se convirtieron en grandes

naves de planta libre con la capacidad de adaptarse rápidamente a los cambios programáticos y a los avances tecnológicos. La Escuela para Newport consiste en una gran cubierta con estructura reticulada de 137 x 80 metros en planta y 1,2 metros de altura, que se apoya sobre pilares de acero y sirve de abrigo a una multitud de espacios educativos flexibles. En su interior aloja y distribuye horizontalmente todas las instalaciones (Fernandez-Galiano, 1999: 30).

Estos proyectos definen claramente dos tipos de espacio: los espacios servidos donde cualquier actividad podría en principio desarrollarse y el espacio sirviente, 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 de 6200 m² que reúne dentro de la misma envolvente salas de exposición, de enseñanza de historia del arte y espacios públicos. Una serie de pórticos tridimensionales reticulados dispuestos en forma paralela generan un espacio interior servido de 35 x 132 metros, con una altura libre de 7,5 metros. El espesor del tramo vertical del pórtico: 2,4 metros, permite alojar en su interior todos los espacios sirvientes: baños, cocinas, depósitos, laboratorios, etc., que de esta manera no interrumpen la continuidad del gran espacio interior. Todas las instalaciones, conductos y pasarelas técnicas se alojan igualmente dentro del espesor de la estructura aporticada, tanto en los tramos verticales como en los horizontales.

La terminal de pasajeros para el Aeropuerto londinense de Stansted (1981-1991) podría considerarse como el último de los *Umbrella buildings* diseñado por Norman Foster. Flujos de pasajeros provenientes de distintos tipos de transporte: automóvil, ferrocarril y avión, confluyen bajo una misma cubierta formada por 121 cúpulas de planta cuadrada (de 18 metros de lado) con una estructura de barras trianguladas que parece seguir la idea de Le Ricolais de que a cada estructura superficial le corresponde una esquelética. Estas cúpulas descargan sobre una retícula cuadrada de pilares de 36 metros, compuestos cada uno de ellos por cuatro tubos de acero verticales, entre los que pueden alojarse instalaciones, unidades de señalización y servicios, y un capitel piramidal de bielas y tensores que se abre a modo de árbol. En la planta superior los servicios se concentran, entonces, al igual que en la Casa de Baños para el Trenton Jewish Community Center, de Louis Kahn, en los huecos generados en el interior de estos pilares que pasan a constituir una grilla uniforme de espacios sirvientes, distribuida en el gran espacio servido de recepción. Los servicios generales se vuelcan a la planta inferior con estructura de hormigón armado y los ductos de las instalaciones se alojan bajo la losa del entrepiso, de modo que la cubierta superior queda totalmente libre y puede permitir el paso de la luz natural.

4.4. Desarrollo reciente de las estructuras aporticadas

4.4.1. El Commerzbank en Frankfurt (1991-1997)

En la década de 1990 se generalizó la preocupación por la eficiencia energética y el diseño climático en la arquitectura, así como la preferencia por la iluminación y ventilación natural en los edificios públicos.

En las bases del concurso internacional convocado en 1991 para la construcción de la nueva sede del Commerzbank en Frankfurt, se estableció por primera vez una importancia de primer orden al diseño amigable con el medioambiente de un rascacielos (Bailey et ál., 1997: 3). La ingeniería estructural y la de sistemas ambientales estuvieron, por lo tanto, directamente involucradas en el diseño de la torre desde las primeras etapas de proyecto.

Sir Norman Foster & Partners, Ove Arup & Partners y HL-Technik resultaron el equipo ganador del concurso. La consultora británica Roger Preston & Partners fue posteriormente designada a cargo de la ingeniería medioambientalista (Bailey et ál., 1997: 3). El Commerzbank de Frankfurt fue, de este modo, el tercer rascacielos proyectado y construido por Norman Foster y la primera torre ecológica del mundo que, con 53 niveles y una altura total de 299 metros, se convirtió en el edificio más alto de Europa en el momento de su inauguración (Fernández-Galiano, 1999: 90).



Figura 72. Edificio Commerzbank en Frankfurt, de Norman Foster (1991-1997). Fotografía extraída de Internet (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d3/Frankfurt_Commerzbank-Turm.20130904.jpg), © Epizentrum / CC-BY-SA-3.0.

La planta de la torre consiste en un triángulo equilátero de unos 60 metros de lado, con su perímetro y sus vértices redondeados, que en el interior se ahueca para alojar un gran patio central, también triangular, que permite ventilar y acondicionar naturalmente a todo el edificio. En todos los niveles uno de los lados del triángulo se convierte en parte de un jardín de 4 niveles de altura, vinculado al patio central. Cada 4 niveles la planta rota 120°, de modo que existen jardines elevados en los tres lados de la planta triangular. La torre está subdividida en regiones de 8 niveles de altura. Unas 650 personas trabajan diariamente en cada una de estas regiones que comparten tres jardines y conforman una entidad medioambiental aislada del resto del edificio, con un sistema propio de control del aire (Bailey et ál., 1997: 4).

Los jardines elevados se cierran al exterior con fachadas vidriadas de 4 niveles de altura que poseen entradas de aire a través de rejillas ubicadas en la parte inferior y salidas de aire por su parte superior, reguladas por un Sistema de Gestión del Edificio (BMS: Building Management System). Una estación meteorológica propia del rascacielos dirige al BMS (Bailey et ál., 1997: 4). Los jardines y las oficinas se vinculan a través del patio central, generándose un circuito de ventilación cruzada en cada región del rascacielos.

En las fachadas de las oficinas existe, por otra parte, un diseño de múltiples capas con ventanas practicables que pueden ser operadas por los usuarios, permitiendo la salida y entrada de aire a una escala menor. Entre las distintas capas de la fachada se interponen persianas motorizadas de aluminio, controladas por el BMS, que evitan la entrada de los rayos solares en verano y los reflejan al interior en invierno. Los cerramientos de las oficinas interiores no necesitan de esta múltiple piel, por lo que directamente ventilan al patio central que, a su vez, se ventila a través de las ventanas pivotantes en la zona superior de los cerramientos vidriados de los jardines. En invierno, cuando estos se encuentran cerrados, las plantas ayudan a oxigenar y humidificar el aire que es calentado por el sol que penetra al interior.

Para evitar la formación de fuertes corrientes de aire verticales, debido a la gran altura del patio central, este fue dividido en 4 segmentos de 12 pisos de altura a través de 3 diafragmas de vidrio intermedios. De esta manera, gracias a las ventanas practicables en las fachadas exteriores de las oficinas, en el patio central y en las fachadas de los jardines, todos los espacios de trabajo pueden acondicionarse naturalmente durante las épocas de clima moderado. Dado que los jardines elevados van rotando en espiral alrededor del patio central, los espacios de oficinas que se vuelcan hacia las fachadas interiores tienen iluminación natural cuando el sol se encuentra bajo y cuando está alto, la luz natural entra por la claraboya que cubre al patio. Se asegura,

así, una buena iluminación natural en todas las oficinas durante una buena parte del día.



Figura 73. Esquema estructural del Commerzbank: principales puntos de apoyo y líneas directrices. Esquema realizado por el autor.

El principal objetivo del diseño estructural fue lograr una fuerte integración con los conceptos arquitectónicos y medioambientales que rigen el diseño global. La estructura debía, además, ser rápida y económica de construir, por lo que se optó desde los inicios por la prefabricación de la mayor cantidad posible de componentes a efectos de minimizar los tiempos y los costos de producción (Bailey et ál., 1997: 4). Las diferentes plantas del edificio, por otra parte, tanto en la zona de oficinas como en los jardines elevados, en el patio o en la planta baja, debían ser abiertas y libres de cualquier interferencia estructural.

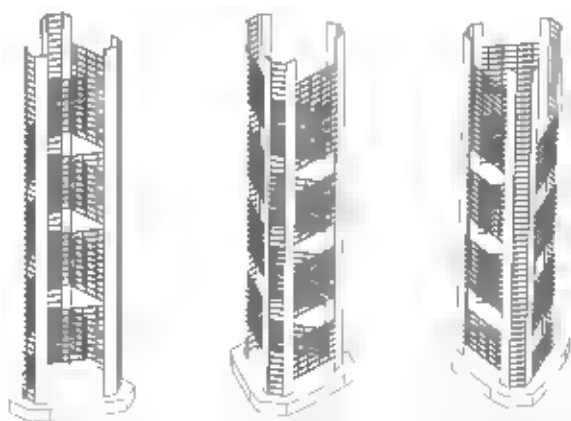


Figura 74. Esquema del tubo perimetral del Commerzbank, formado por pantallas y dos tipos de vigas Vierendeel. Esquema realizado por el autor.

La superestructura se diseñó como un gran tubo exterior perforado, que se abre para alojar a los jardines elevados. Dicho tubo está formado por tres pares de pantallas compuestas (en acero y hormigón armado) en cada uno de los tres vértices de la planta triangular, vinculadas por vigas Vierendeel de 8 niveles de altura coincidentes con cada una de las regiones en que se descompone el edificio, que salvan 34 metros de luz (Bailey et ál., 1997: 5). La elección de la tipología Vierendeel para estas vigas tuvo como objetivo la simplificación de la modulación del revestimiento exterior de la fachada y la prevención de interferencias con las ventanas practicables. Debido a la incidencia de las cargas gravitatorias, los parantes verticales de estas vigas se ensanchan y se juntan a medida que se acercan a los apoyos. Los huecos de 4 niveles de altura que se generan entre las vigas Vierendeel son aprovechados para alojar los jardines elevados. Las dos pantallas en cada vértice de la planta se conectan entre sí por vigas que generan otros pórticos tipo Vierendeel secundarios. El tubo perforado, así definido, posee una rigidez a la torsión y a la flexión suficiente como para garantizar la estabilidad del edificio frente al vuelco (Bailey et ál., 1997: 5).

En cada una de las esquinas del edificio, el par de pantallas compuestas se vincula con tres núcleos triangulares y con cuatro pilares para formar un gran núcleo rígido en el que se alojan los servicios y circulaciones verticales de la torre. El esquema con un patio central, oficinas agrupadas en regiones independientes y núcleos de servicios perimetrales, es similar al que Foster había empleado algunos años antes para el Hong Kong and Shanghai Bank, de Hong Kong.

Toda la estructura fue optimizada a efectos de lograr la mayor rigidez posible con el mínimo uso de material, para lo cual se utilizaron programas ya desarrollados por Arup y programas especialmente diseñados para este proyecto. Para el análisis estático tridimensional del tubo perimetral se utilizó el programa GSA de Arup y mediante un análisis con programas por elementos finitos se determinó la rigidez óptima de la conexión entre las vigas y las pantallas.

Todas las vigas Vierendeel principales se encuentran sometidas a solicitaciones similares, por lo que se diseñaron idénticas con el objetivo de simplificar el proceso de producción. Fueron subdivididas en componentes con forma de cruz que se soldaron en fábrica y se ensamblaron en obra. Las juntas fueron ubicadas en las secciones con menores momentos flectores, que prácticamente coincidían en los distintos estados de carga (Bailey et ál., 1997: 6-7). Los parantes verticales se fabricaron con placas de acero St52 de 65 mm de espesor, con 1 metro de altura y 47,5 cm de ancho. Los cordones

horizontales, con 1,1 metros de altura y 47,5 cm de ancho, fueron fabricados con placas de acero St52 de hasta 85 mm de espesor.

Las pantallas conectadas de a pares por pórticos tipo Vierendeel miden 7,5 metros de largo y 1,2 metros de ancho. Se componen de dos secciones interiores con forma de H fabricadas con placas de acero, conectadas y rodeadas por hormigón armado. Sus dimensiones fueron también estandarizadas y mantienen la misma sección en toda su altura, disminuyendo la resistencia del hormigón y la cuantía de los refuerzos de acero a medida que el edificio se eleva. Los pilares interiores en la zona de los grandes núcleos de servicio, con secciones en I, colaboran con la estabilidad de los entrepisos en las zonas ahuecadas debido a las circulaciones verticales. Los pilares triangulares en los vértices del patio central fueron construidos con placas de acero de espesores de hasta 150 mm y sus dimensiones varían desde 1,4 metros hasta 0,6 metros de lado, desde la base hasta la cima (Bailey et ál., 1997: 7-8).

Los entrepisos de los jardines y las oficinas están formados por vigas de acero de 56 cm de altura dispuestas cada 3 metros, salvando luces de 15,65 metros, sobre las que desacargan losas de hormigón armado de 13 cm de espesor. En las vigas se practicaron rebajes para reducir la altura hasta 26 cm en las zonas próximas a los apoyos, de modo de facilitar el paso de conductos y cañerías de las distintas instalaciones. Además de soportar cargas gravitatorias, los entrepisos actúan como diafragmas rígidos que evitan el desplazamiento horizontal relativo entre los distintos pilares y pantallas. Cada 4 niveles, existe un entrepiso completo que vincula los 3 lados del tubo, mientras que el resto resulta abierto por uno de sus lados. Este comportamiento fue evaluado con el programa GSA de elementos finitos de Arup. Las vigas de acero fueron diseñadas con el programa COMPOS modificado para cumplir con la normativa alemana y verificadas con el programa GSA.

Todas las grandes decisiones que definieron el partido arquitectónico del Commerzbank fueron tomadas en conjunto y tuvieron como objetivo la optimización del edificio, tanto desde el punto de vista del uso como del resistente o del energético. El diseño de esta torre puede describirse como orgánico en función de sus objetivos primarios de optimización de los recursos materiales y energéticos. 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. El todo, por lo tanto, resulta siempre más que la suma de sus partes individuales.

La ventilación e iluminación natural de todas las oficinas es posible gracias a la configuración del edificio como un tubo perforado, formado por

3 núcleos verticales de servicios con un hueco central y a los jardines de 4 niveles de altura generados por la alternancia de las distintas regiones del edificio. Las vigas Vierendeel de 8 niveles de altura, salvando la luz de 34 metros entre las pantallas, hacen posible la existencia de dichos jardines elevados. La disposición en espiral de las vigas Vierendeel y de las regiones en los tres lados de la planta triangular permite la apertura del tubo perimetral sin disminuir excesivamente la rigidez global de la estructura a la flexión y a la torsión, y posibilita tanto la ventilación natural cruzada como la iluminación y las vistas desde múltiples direcciones. Las áreas de servicios y circulaciones, en donde es posible ubicar grandes pantallas y núcleos sin interferir con las áreas servidas de oficinas, se trasladan a los vértices de la planta triangular, de modo que la superestructura adquiera la mayor inercia posible frente a las deformaciones por carga horizontal, tal como recomendaba LeMessurier. La distribución espacial y la solución estructural resultan, por lo tanto, íntimamente relacionadas.

Tanto la distribución interior de espacios, como la estructura y el sistema de ventilación natural siguen un patrón formal con características fractales. La estructura puede interpretarse como un tubo de sección triangular macizo al que se le sustraen progresivamente, a través de un proceso iterativo, volúmenes de escala cada vez menor para ahuecarlo y volverlo habitable, permaneciendo una malla resistente con un alto grado de inercia y rigidez. El diseño de este rascacielos podría también considerarse como orgánico por recurrir al mecanismo de la fractalidad, muy común en la naturaleza, para la generación de su volumetría, de su estructura resistente y de sus principales sistemas de acondicionamiento natural. Observando la planta del Commerzbank podría definirse un procedimiento fractal para determinar la geometría de un sistema de haces de tubos de planta triangular conectados por vigas perforadas de gran altura que formen, en conjunto, un gran tubo triangular perforado y ahuecado internamente. Si en el interior de un triángulo equilátero se trazan, centrados sobre cada uno de sus lados, copias de él mismo reducidas a la mitad de su tamaño original, se extrae luego el triángulo central que surge de la intersección de las tres copias y, a continuación, se repite el mismo procedimiento de forma iterativa en los tres triángulos que quedan definidos por los tres vértices del triángulo original y los seis vértices perimetrales de sus copias reducidas, se obtendrá finalmente una figura fractal (ver figura 75) que, en su segunda iteración, presenta una gran similitud con el esquema estructural del Commerzbank. Partiendo de un cuadrado, un pentágono, un hexágono o cualquier otro polígono, a través de procedimientos análogos al anteriormente descrito es posible generar figuras fractales (ver

figura 76) que podrían utilizarse como base para el diseño de tubos perforados y ahuecados con distintas configuraciones geométricas.

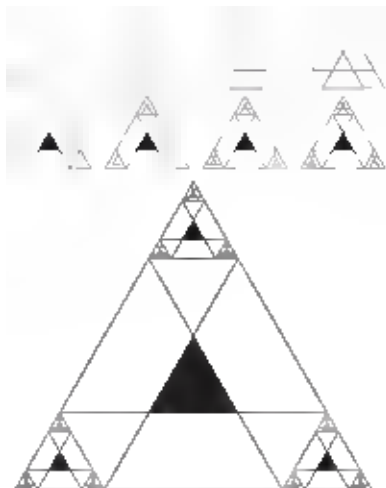


Figura 75. Triángulo fractal inspirado en la geometría de la estructura del Commerzbank, que podría ser utilizado como base para el diseño de un sistema estructural de haces de tubos triangulares. Esquema creado y dibujado por el autor.

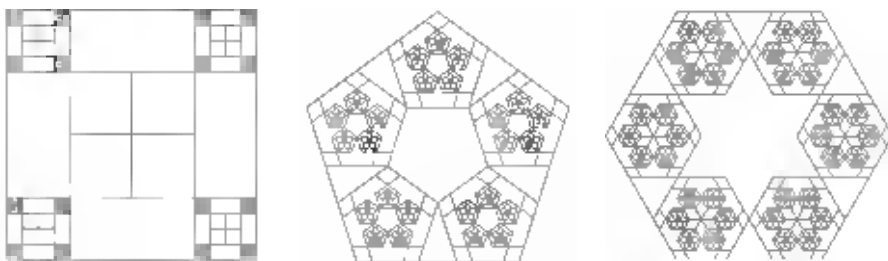


Figura 76. Cuadrado, pentágono y hexágonos fractales que podrían ser utilizados como bases para el diseño de sistemas estructurales de haces de tubos con huecos a distintas escalas. Esquemas creados y dibujados por el autor.

4.4.2. La Mediateca de Sendai (1995-2002)

En 1995, la ciudad de Sendai realizó un concurso internacional para el diseño de una Mediateca en uno de sus principales bulevares. El jurado, bajo la dirección de Arata Isozaki, eligió como ganador el proyecto presentado por Toyo Ito que, desde su inauguración en el año 2000, se ha convertido en un icono de la cultura contemporánea y de la sociedad de la información.

La Mediateca alberga en su interior cuatro programas: la nueva construcción de la Galería para los Ciudadanos de Sendai, la reconstrucción de la Biblioteca Municipal del Distrito de Aoba, la ampliación del Centro Municipal de Material Audiovisual y un nuevo servicio para los discapacitados audiovisuales (Ito, 2000: 222-223).

En los niveles inferiores del edificio se aloja el depósito de la biblioteca y un estacionamiento para vehículos. La planta baja, denominada Plaza Abierta, fue concebida como un gran espacio público que contiene la recepción, un café y una tienda de libros. Los niveles superiores alojan la biblioteca y la galería de exhibiciones de dos pisos, una sala de Internet, la administración, un cine y salas de conferencias.

La propuesta arquitectónica de Toyo Ito consiste en un prototipo con una gran flexibilidad espacial, capaz de adaptarse a diferentes situaciones y de admitir diferentes programas (Ito, 2000: 228-236), gracias a la indeterminación de sus espacios, tal como el proyecto para el Centro Pompidou había pretendido lograr 25 años antes. La idea de un espacio interior único, fluido y transparente, en el que la luz se filtrase a través de los distintos niveles, está en la base del diseño de este prisma acristalado de planta cuadrada de 50 metros de lado y 37 metros de altura.

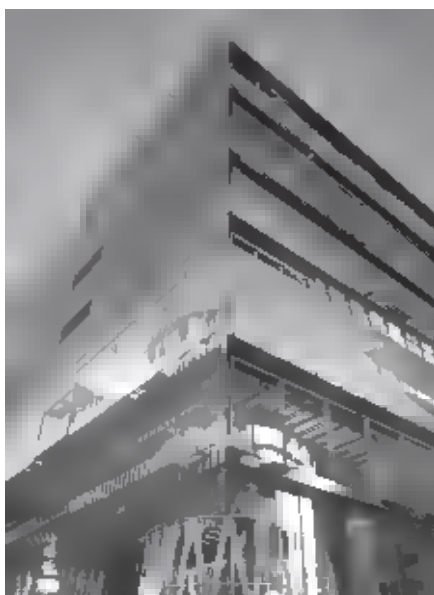


Figura 77. Mediateca de Sendai, de Toyo Ito (1995-2002). Fotografía extraída de Internet (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sendai_Mediatheque_2009.jpg), © Scarletgreen / CC-BY-SA-2.0.

Toyo Ito explica su idea de prototipo basándose en los dos prototipos paradigmáticos que surgieron en el marco del Movimiento Moderno: el *espacio universal* de Mies van der Rohe y el *sistema Dominó* de Le Corbusier. El primero consiste en una retícula resuelta con estructura metálica que puede extenderse vertical y horizontalmente hasta el infinito, y el segundo en un forjado plano de hormigón armado, sin vigas y sustentado por pilares, que permite una libre subdivisión del espacio interior. Según Ito la Mediateca se parece más al sistema Dominó, al estar constituida por un forjado plano y pilares, pero su estructura se resuelve en acero, tal como ocurre en el sistema del espacio universal de Mies (Ito, 2000: 229-230).



Figura 78. Mediateca de Sendai, de Toyo Ito (1995-2002). Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

La arquitectura de la Mediateca se compone por tres elementos principales: los pilares, los forjados y la piel de la fachada. La estructura del edificio, que en esquema resulta muy simple, fue diseñada por el equipo de Sasaki Structural Consultants con un sistema extraordinariamente complejo e inusual para una obra civil. Trece pilares tubulares, con diámetros que varían desde los 2 hasta los 9 metros y compuestos por tubos de acero libres de soldaduras con diámetros exteriores de entre 139,8 y 240 mm y paredes de espesores que oscilan entre los 9 y los 40 mm (Sasaki, 2001: 58), fueron diseñados para sustentar el edificio. En planta, estos pilares se distribuyen según una composición aparentemente aleatoria que varía en los distintos niveles acentuando el carácter espontáneo del diseño arquitectónico y evitando

la uniformidad del espacio (Ito, 2001b: 7). Poseen un carácter escultórico que da fluidez al interior homogéneo y flexible, componiendo distintos lugares con distintas características en donde los usuarios pueden libremente instalarse (Ito, 2000: 232-236). En sección adquieren una expresión orgánica al inclinarse según diferentes ángulos. La altura libre entre los forjados, reforzando esta idea, es diferente en los distintos niveles. Geométricamente son hiperboloides de revolución, de modo que presentan un excelente comportamiento frente a las cargas horizontales, tanto sísmicas como de viento. Pero, además, de cumplir con un rol estructural, estos tubos desempeñan otro tipo de funciones en la Mediateca: algunos se convierten en patios verticales a través de los cuales la luz natural llega a todos los niveles, otros alojan en su interior escaleras o ascensores, y otros permiten la circulación de los distintos conductos de las instalaciones mecánicas del edificio, materializando la idea de Le Ricolais de la columna automórfica hueca como elemento principal a compresión en una superestructura.

En el proyecto presentado a concurso existen doce pilares distribuidos en planta de forma totalmente aleatoria. En la etapa de definición del proyecto de ejecución se agrega un nuevo pilar y la distribución en planta es regularizada: si bien no es uniforme y varía en las distintas plantas, se conforman claramente tres líneas de apoyo. Los cuatro pilares mayores se ubican en las esquinas de la planta cuadrada y son distribuidos en los distintos niveles del modo más simétrico posible para evitar excentricidades en la rigidez torsional del edificio. Funcionan como ménsulas verticales con una elevada rigidez para resistir las cargas horizontales y proteger a los forjados de ocasionales esfuerzos de torsión. El aporte de los pilares centrales, con menores dimensiones, es prácticamente despreciable para resistir las cargas horizontales y se consideran sometidos exclusivamente a cargas verticales.

Los pilares mayores son proyectados con una malla triangulada de tubos que tiende a comportarse como una superficie estructural, es decir, podrían definirse como la versión esquelética de un hiperboloide. Sus geometrías recuerdan a las torres construidas con perfiles metálicos por Vladimir Shukhov un siglo antes. Los nueve pilares centrales, con menores diámetros, son diseñados como haces de tubos paralelos, rigidizados por anillos horizontales para evitar problemas localizados de pandeo (Sasaki, 2001: 58).

A principios de 2011 se comprobó el acierto del diseño antisísmico de la Mediateca, que soportó las cargas producidas por un terremoto de 9 grados en la escala de Richter sin sufrir daño estructural alguno.

[...] que la mediateca de Sendai siga en pie después del terremoto de 9 grados y un tsunami constituye un pequeño triunfo, y convierte

al edificio, [...], en un bastión de resistencia antisísmica [...] el movimiento de tierra genera una tremenda oscilación del edificio que, sin embargo, no llega a provocar su colapso. [...] el terremoto agita con fuerza el edificio, cuyo techo cimbreaba como lo harían los árboles azotados por el viento. Pero apenas caen pequeñas partículas de yeso y otros materiales. [...] el falso techo se mueve casi a discreción mientras las paredes permanecen inmóviles. «[...] la estructura no se mueve, lo que demuestra la capacidad del edificio para soportar las sacudidas», añade el arquitecto [Carlos Rubio Carvajal, del estudio Rubio & Álvarez Sala], autor de la Torre Sacyr. [...] la estabilidad de la Mediateca de Sendai es únicamente «una mínima victoria» que pone el contrapunto a las noticias de muerte y destrucción que recorren los medios, televisiones e Internet estos días. (Leal, 2011).

[...] This video appears to have been shot by someone taking shelter from the quake under a desk inside the building. Two things are extraordinary here: The sheer length of the shaking and the way the building seems to sway violently without buckling. This picture appears to show another interior view of the post-quake Mediatheque, and like the video suggests that the building remains largely intact. (Hawthorne, 2011).



Figura 79. Fotografía interior luego del terremoto de 2011, expuesta en la Mediateca de Sendai. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

Los forjados de acero, de planta cuadrada de 50 metros de lado, conforman siete planos neutros y homogéneos que se superponen garantizando la fluidez del espacio. Se apoyan directamente sobre los trece pilares tubulares. La presencia de vigas, según Ito (Ito, 2001b: 5-6), hubiera afectado a la homogeneidad del espacio; una viga supone marcar una dirección en el plano y subdividirlo finalmente en una grilla. Tras las vigas llegan los muros y tras los muros llega la compartimentación del espacio en habitaciones.



Figura 80. Vista interior de la Mediateca de Sendai, de Toyo Ito. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

La estructura de los forjados es similar a una tipología estructural comúnmente utilizada en las construcciones navales: una red de celdillas formadas por placas de acero de entre 6 y 25 mm de espesor soldadas entre dos planchas, que forman una losa con un espesor total de 40 cm. Por encima de dicho forjado se construyó una losa de hormigón armado de bajo peso, de 7 cm de espesor, con conectores a la estructura de acero (Sasaki, 2001: 59). Este forjado mixto es capaz de salvar luces mayores que un sistema de forjados de hormigón armado apoyados en pilares. Inicialmente se había

previsto materializar las celdillas estructurales a través de una rejilla uniforme de un metro de lado (Ito, 2000: 231). Sin embargo, conforme avanzó el diseño, se observó la existencia de grandes contrastes tensionales en distintas zonas de los forjados, por lo que se decidió diferenciar la rigidez de las placas de refuerzo.



Figura 81. Vista interior de la Mediateca de Sendai, de Toyo Ito. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

Se reconocen en los forjados tres zonas con esfuerzos cuantitativamente distintos: las zonas alrededor de los tubos, en las que se dispusieron refuerzos radiales con celdillas triangulares formadas por placas con espesores de entre 16 y 25 mm; tres fajas de refuerzo entre los tubos, paralelas a las fachadas principales, en las que se dispusieron celdillas cuadradas con placas de espesores de entre 6 y 12 mm y las zonas de tramo entre las fajas de refuerzo, con celdillas rectangulares más abiertas, también construidas con placas de espesores que varían entre 6 y 12 mm (Sasaki, 2001: 59).

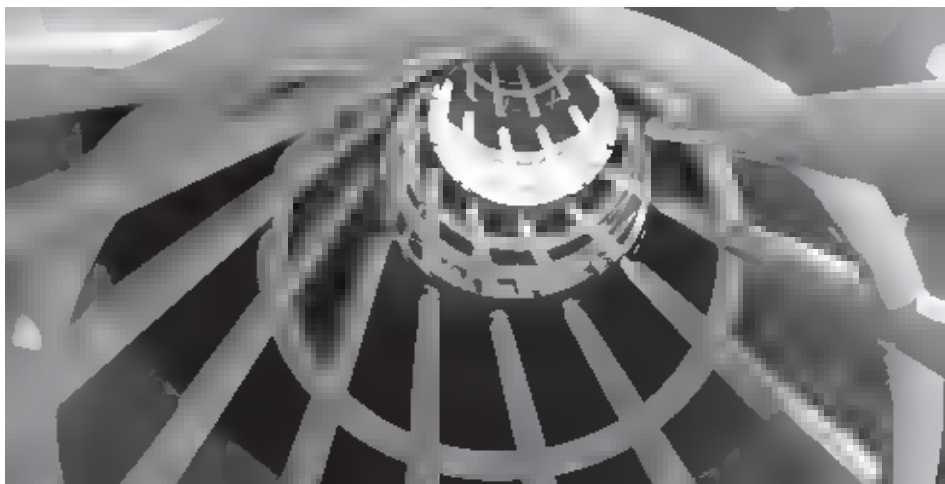


Figura 82. Vista de un pilar de la Mediateca de Sendai, de Toyo Ito. Fotografía: Ignacio Valls, 2014.

En todo el perímetro se dispusieron, por último, bandas con celdillas cuadradas similares a aquellas de las fajas de refuerzo. Esta configuración formal recuerda a la subdivisión en elementos que realizaría un programa de cálculo por elementos finitos para la modelización geométrica de una estructura. La densidad y rigidez de las celdillas obedece a los esfuerzos que aparecen en las distintas zonas, de modo que finalmente todo el acero queda sometido a tensiones similares. El diseño de este tipo de forjados, podría decirse, sigue un proceso similar al descrito por Le Ricolais de partir de un bloque macizo y por medio de escisiones quitar aquella materia que no es estrictamente necesaria para el equilibrio, aliviando el peso del conjunto.

Gran parte de la estructura de la Mediateca fue prefabricada, trasladada, montada y soldada finalmente en obra. Los forjados fueron descompuestos en subunidades de 3 x 10 metros que se fabricaron paralelamente en unos 40 astilleros navales de modo de reducir los trabajos de soldadura en obra. De este modo se redujeron los costos y se logró una mayor precisión en los detalles. La estructura de los pilares se descompuso, igualmente, en subunidades prefabricadas que se premontaron en fábrica para verificar la exactitud de las conexiones con los módulos adyacentes y con los forjados, dada la imposibilidad de efectuarse correcciones en obra (Maffei, 2000-2001: 147).

El diseño de la superestructura de la Mediateca tuvo como principal objetivo el lograr una alta rigidez, debido al alto grado de sismicidad de la zona de emplazamiento, con elementos estructurales de gran ligereza que

utilizaran la menor cantidad posible de materia. Por este motivo fue construida, en su mayor parte, con delgadas placas de acero y perfiles tubulares que, adecuadamente dispuestos, alcanzaron altos valores de inercia.

Soy demasiado consciente de la distancia entre, por ejemplo, la Mediateca de Sendai en su estado acabado y el dibujo por ordenador de la imagen del bosque que hicimos en su momento. (Ito, 2005: 76).

La imagen final de la Mediateca seguramente dista bastante del espacio líquido y fluido que Ito pretendía inicialmente materializar, pero uno de los mayores logros de su proyecto de estructura fue la desintegración del conjunto en múltiples elementos menores que cumplen, muchas veces, diversos roles arquitectónicos. Los pilares están formados por pequeños perfiles tubulares que se organizan para formar tubos de mayor diámetro y las losas se componen por celdillas huecas en las que la cantidad de materia y el tamaño y forma de los huecos se regulan según la magnitud de las solicitaciones estáticas. La estructura se convierte en una compleja secuencia de elementos huecos de distintas escalas que, a la vez que adquieren una gran inercia, van definiendo espacios con distintas características aptos para alojar distintas funciones. El principal problema, siguiendo las enseñanzas de Le Ricolais, se convierte en dónde y cómo disponer los huecos o, como decía Louis Kahn, cómo construir con piedras huecas.

4.4.3. Cubierta del Estadio de Chemnitz (1996)

A finales del siglo XX algunos ingenieros estructuralistas como Cecil Balmond, director ejecutivo de la firma Arup & Partners y profesor en varias prestigiosas escuelas de arquitectura de Europa y Estados Unidos, volvieron a participar de forma activa en el proceso de diseño arquitectónico (Bernabeu, 2007: 34-36), entablando intensas relaciones de colaboración con arquitectos que resultaron indispensables para el desarrollo de proyectos complejos. Las primeras colaboraciones de Balmond se remontan a sus trabajos con Rem Koolhaas en la Terminal de Zeebrugge, el Kunsthal y la Biblioteca de Jussieu, y han continuado con algunos de los arquitectos más reconocidos en el mundo como Toyo Ito, Daniel Libeskind, Shigeru Ban, Alvaro Siza o Ben Van Berkel.

Los procedimientos tradicionales de proyecto y construcción edilicia no son aptos para trabajar en obras con geometrías complejas, por lo que la colaboración entre técnicos de distintos ámbitos y el diseño de estrategias constructivas junto a los contratistas es fundamental. En este tipo de proyectos no es posible la existencia de un único diseñador capaz de abarcar todas las áreas de trabajo, sino que es indispensable la creación de equipos

interdisciplinarios, es decir, la desaparición de barreras entre las distintas disciplinas y el surgimiento de prácticas de diseño abiertas e integradoras.

La postura de Balmond es la continua exploración de nuevas configuraciones geométricas. Sus estructuras, según expresa Rem Koolhaas en el prefacio del libro *Informal*, de 2002, más que solidez y seguridad expresan duda y arbitrariedad, basadas en una voluntad de comprensión profunda de la naturaleza que modeliza como un conjunto de patrones en constante cambio (Balmond et ál., 2002: 11). Plantea, así, un enfoque dinámico de las organizaciones estructurales basado en conceptos como *emergencia* y *no linealidad*, combinando arte con ciencia.

En su libro *Informal* Balmond defiende una postura frente al diseño estructural desprendida de conceptos tradicionales tales como mallas ortogonales o subdivisión igualitaria del espacio, apostando por la intuición racional. Las estructuras deben ser ambiguas, dinámicas y complejas (Balmond et ál., 2002: 114-123). El concepto de *informal* es definido en dicho libro como las características no lineales del diseño arquitectónico (Balmond et ál., 2002: 113). Balmond pretende convertir al diseño estructural en una disciplina que analice el espacio, buscando dotar de un orden interno propio a las formas libres y complejas de la arquitectura contemporánea.

En lo informal no hay reglas establecidas ni patrones fijados que puedan ser copiados ciegamente. Si hay un ritmo, éste está en las conexiones escondidas, inferidas e implicadas, pero que no pueden ser advertidas con evidencia. (Balmond, 2000: 40).

Una traducción literal de la nueva ciencia a la nueva arquitectura no parece demasiado realista: sólo conduciría a una mimesis. Copiar la naturaleza o el caos acabaría pareciendo forzado. Es más interesante buscar las bases del paradigma que abarca el «riesgo», y construir procesos internos que generen conflictos y choques. [...]. Hay que interpretar, en vez de asumir un concepto preestablecido. (Balmond, 2000: 48).

Balmond estudia mecanismos que le permiten modificar los sistemas clásicos de mallas y tipologías estructurales, tales como la yuxtaposición, hibridación y puesta en valor de las características locales, y utiliza algoritmos matemáticos como herramientas para definir formas no lineales.

En el Kunsthall de Rotterdam, diseñado en colaboración con Rem Koolhaas, aparecen ritmos insólitos y elementos estructurales de diversos materiales y secciones que rompen con la idea tradicional de uniformidad en las estructuras. En el diseño de la Maison en Burdeos, también en colaboración

con Koolhaas, se busca el planteo de un equilibrio estructural con una configuración insólita, de comprensión no inmediata y simulando un equilibrio precario, falseando el soporte superior colgado y generando la impresión de que la caja de la planta superior de la vivienda vuela.

Para el proyecto de ampliación del Victoria & Albert Museum de Londres, junto a Daniel Libeskind, diseña un edificio a partir de una geometría en espiral caótica. El centro y el radio van cambiando de posición y de longitud a medida que la espiral asciende, definiendo los ejes de un sistema de muros portantes de hormigón armado que se apoyan unos en otros con distintas inclinaciones.

En su libro *Element*, de 2007, realiza un registro fotográfico de imágenes de la naturaleza que utiliza como base para un estudio de reconocimiento de patrones. El patrón, dice, conecta al ojo con la mente (Balmond, 2007: 6). Elige entonces una serie de paisajes que fotografía para luego realizar sobre ellos bosquejos y trazar diagramas, buscando el concepto de la forma más que la realidad visible. De esta manera estudia morfologías de campos, plantas, hojas, fuego, olas, nubes, formaciones minerales, desiertos, etc., concibiendo a la naturaleza como un gran libro o catálogo de patrones. A partir de algunas pocas propiedades y elementos básicos, observa Balmond, surge en la naturaleza una variedad formal extraordinaria (Balmond, 2007: 155). Estas formas, por otra parte, no son nunca una respuesta cerrada a una determinada problemática, sino que se encuentran en continua transformación, siempre hay más por experimentar.

Para poder alcanzar una gama de morfologías de tal entidad, analiza Balmond, la estrategia debiera ser el comenzar por la forma más simple posible. Cuanto más elaborado sea el inicio, menores son las opciones que pueden surgir en el desarrollo de la forma. Si comenzamos con un punto, las posibilidades de desarrollo son infinitas. Los números, dice, son la abstracción perfecta (Balmond, 2007: 194), definen magnitudes y orientaciones, son parte de las construcciones proporcionales y generan geometrías. Son capaces de estructurar el continuo con algoritmos. Por ello, resultan ideales para componer formas, ordenar y generar secuencias y conducen a estructuras formales que no podrían pensarse de otra manera. La forma de una hoja, según este razonamiento, podría reducirse a un conjunto de puntos y líneas siguiendo un determinado patrón codificable a través de números, por lo que las matemáticas serían las que mejor la describirían.

El procedimiento que la naturaleza ha utilizado para la optimización de sus estructuras podría ser descrito como la acumulación y repetición, incluso a distintas escalas, de determinados patrones formales eficaces para distintos propósitos y de sencilla codificación.

La ciudad alemana de Chemnitz convocó en el año 1995 a un concurso internacional restringido para el diseño de un nuevo estadio, aspirando a ser sede del Campeonato Europeo de Atletismo de 2002. El diseño presentado al concurso por los arquitectos Peter Kulka y Ulrich Königs, en colaboración con Cecil Balmond, resultó ganador, aunque no fue finalmente construido por problemas presupuestales.

Este proyecto pretendía definir una nueva tipología de estadio generando un lugar abierto, un entorno natural en el que una construcción se insertara borrando los límites entre interior y exterior, entre la naturaleza y lo construido. Las dos tribunas y la cubierta se proyectaron, entonces, como objetos independientes. La tribuna baja consistía en un óvalo de tierra, la tribuna alta en un óvalo flotante y la cubierta en una nube (Balmond et ál., 2002: 130). Entre estos objetos, una serie de pilares se distribuirían en forma aleatoria, como un bosque.

El diseño de la cubierta, que recuerda una nube ondulante sobre el terreno, fue realizado 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 que generara una forma con una complejidad semejante (Balmond et ál., 2002: 134). En su libro *Informal*, recrea el proceso de diseño llevado a cabo para la definición de dicha cubierta y sus soportes (Balmond et ál., 2002: 125-172).

Un esquema típico de cubierta en ménsula hubiera generado una estructura demasiado concéntrica, contraria a la imagen de espacio libre y abierto que se pretendía generar. Para que este esquema funcionara, por otra parte, debería existir una adecuada contraménsula, lo cual era imposible de lograr en tres zonas en particular a lo largo de la órbita de la cubierta en los que la espalda de la tribuna alta y el techo coincidían. En esos tres puntos se definió un arco. Pero estos tres arcos quedarían, de soportar el peso de toda la cubierta, sometidos a esfuerzos de flexión y torsión excesivos, por lo que se dispusieron progresivamente otros arcos contiguos para colaborar a distribuir la carga de la cubierta. A medida que los arcos comenzaron a multiplicarse, a partir de los tres arcos originales, una malla homogénea que cubría la totalidad de la cubierta comenzó a emerger. Cada arco de esta malla se apoyaba en los arcos colindantes (Balmond et ál., 2002: 138-143). Como parte de la cubierta se extendía más allá de la zona de las gradas, algunos de los arcos se prolongaron trabajando como vigas de tramos continuos.

La elección del patrón se convierte, entonces, en la idea generatriz del proyecto de estructura y define un tipo determinado de funcionamiento

estructural, de interacción de tensiones. La solución particular de la malla diseñada, bien podría haber sido otra cualquiera y se podría decir que es una de las infinitas soluciones posibles que dan respuesta al problema de cómo definir la estructura de la cubierta, con el patrón elegido o con una determinada tipología estructural. Al igual que en la naturaleza, una forma determinada es solo una de las tantas representaciones posibles de un determinado patrón; existen, por lo tanto, infinitas soluciones posibles para este problema.

Balmond se planteó, a continuación, cómo determinar este tipo de patrones a través de algoritmos, de modo que luego del concurso continuó investigando sobre soluciones o reglas matemáticas que pudieran generar una red de arcos similar a la propuesta para la cubierta del estadio. Propuso la alternativa de un disco con dos puntos marcados en su superficie, que se desplaza entre dos bordes fijos, los bordes exterior e interior de la cubierta, expandiéndose y contrayéndose a medida que gira (Balmond et ál., 2002: 154-166). Los puntos marcados en el disco generan, a lo largo de este proceso, una malla de arcos aparentemente aleatoria. Una vez definida esta malla es posible determinar las deformaciones y las máximas tensiones actuantes en sus barras para ajustar los bordes o los puntos en la superficie del disco y definir otra malla más eficiente, con el mismo patrón. Los parámetros iniciales pueden manipularse iterativamente para optimizar el resultado final.

La cubierta, con su forma en apariencia libre o caótica, se convierte en un posible resultado formal de una estrategia interna. Como se genera a partir de una regla matemática o algoritmo, a pesar de su apariencia aleatoria puede percibirse en su diseño cierto sentido de orden, tal como sucede en las formas naturales.

La naturaleza ha generado en el planeta una variedad casi infinita de formas complejas a través de procesos iterativos que tienen por objetivo la optimización de la resistencia de una estructura o del consumo energético de un organismo, el aumento de las probabilidades de supervivencia de una especie, la adaptación a un cambio en el entorno, etc. Las soluciones alcanzadas de este modo siempre son solo una de las infinitas soluciones posibles a un problema.

Esta aproximación a través de números o algoritmos que permite crear, a través de múltiples iteraciones, geometrías con altos grados de complejidad, puede entenderse, entonces, como un intento de emulación del modo de operar de la naturaleza.

Según Whitehead el proceso, más que la sustancia, es el constituyente fundamental de la naturaleza (Whitehead, 2007: 53-54). La autoorganización es la principal causa de la emergencia de la complejidad (Fromm, 2004: 21), propiedad que permite a los organismos adaptarse a su entorno, sobrevivir y

evolucionar. El orden, en el sentido de organización y coherencia, emerge del caos y de lo imprevisible, como fruto de procesos de autoorganización que son generalmente no lineales.

Una vez definido un algoritmo y determinadas condiciones de partida, la forma de la cubierta emerge como resultado de la propia evolución del sistema. Pequeños cambios en las condiciones iniciales del disco que rota y se traslada o de la ubicación de los puntos en él marcados pueden conducir a grandes variaciones en la forma final que se obtiene. La habilidad del diseñador para generar una malla que optimice la materia empleada con el sistema estructural elegido, atendiendo a las solicitudes estáticas de la cubierta, emularía a la selección natural que favorece la supervivencia de las formas mejor adaptadas, entre aquellas generadas con un mismo patrón.

La disposición de los pilares en la maqueta presentada al concurso fue también realizada aleatoriamente, simulando un bosque. Balmond se interesó, del mismo modo, en desarrollar una estrategia geométrica que pudiera generar un efecto similar.

Como investigación del concepto de *informal* ya había analizado algunos procedimientos para generar disposiciones de apariencia aleatoria a partir de reglas simples (Balmond et ál., 2002: 147). Por ejemplo, si partimos de una grilla superpuesta a otra grilla idéntica a sí misma pero rotada un determinado ángulo, las intersecciones entre ambas grillas generan una serie de puntos de apariencia dispersa. Superponiendo la malla de la cubierta sobre este mapa de puntos, los ejes de los pilares podrían definirse como los segmentos que unen ciertos nodos particulares que es necesario apoyar en el nivel de la cubierta con algunos puntos convenientemente elegidos de la malla a nivel del terreno. Surge así un conjunto de pilares con una gran variedad de inclinaciones y posiciones que conforma un diseño de apariencia aleatoria y recuerda a un bosque, sin ser la copia literal de una organización natural. En las zonas de mayores cargas se dispone una mayor densidad de pilares, en las zonas en que los esfuerzos de la cubierta son menores, aparecen pilares más dispersos. La inclinación de los pilares ayuda, por otra parte, a equilibrar a la cubierta frente a las cargas horizontales de viento.

La forma de la cubierta y la disposición de los pilares que la sostienen, que en un principio se proyectaron libremente como metáforas de una nube y un bosque, se convirtieron en el resultado de un proceso algorítmico guiado por la intuición estructural de los proyectistas. Este proceso podría calificarse como no lineal en el sentido de que la observación del resultado final no permite determinar la situación de partida, ya que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales conducen a resultados finales muy diferentes. Debido

al proceso algorítmico seguido para el diseño, que emula a algunos procesos naturales de generación de formas, según Balmond, es posible percibir un cierto sentido de orden en la aparente aleatoriedad.

Lo que parecía tan libre, en realidad, se mantiene unido por medio de estrategias internas. Hay una curiosa «subestructura» en el conjunto, y aunque lo leamos como una «forma libre», se puede sentir algo más: una sensación de «naturaleza» y de «orden». Chemnitz incorpora todos los elementos de lo informal. (Balmond, 1999: 46).

La belleza de este proyecto puede entenderse como aristotélica. La estructura de la cubierta es una representación personal del universo, no por imitar formas o proporciones observadas en la realidad, tal como operaba la arquitectura clásica, sino por haber sido generada a través de procedimientos análogos a los que su diseñador entiende que la naturaleza emplea a la hora de crear. En este sentido, los métodos de diseño de Balmond siguen también las ideas de Alberti.

[...] nuestros antepasados, con toda justicia determinaron que había que imitar el proceder de la naturaleza, la mejor hacedora de formas. Por esa razón, hasta donde alcanzaron sus fuerzas, indagaron las leyes de que ella se servía para crear las cosas y las trasladaron a sus principios constructivos. (Alberti, 1991: 385).

4.4.4. Cubierta del edificio Expo en el Congrexpo de Lille (1989-1994)

El proyecto Euralille, desarrollado por Rem Koolhaas y Ove Arup & Partners entre los años 1989 y 1994, consistió en el desarrollo de un nuevo centro comercial para la ciudad de Lille que, con un área de 250.000 m², pretendía funcionar a escala de toda la región del norte europeo conectando el TGV con el Canal de la Mancha y con otros medios de transporte locales. El mismo equipo de diseñadores desarrolló, en el marco de este proyecto, el diseño del principal edificio público propuesto: el Congrexpo (también conocido como el Lille Grand Palais) de 50.000 m², un centro de conferencias, exhibiciones y entretenimientos (Mc Gowan et ál., 1995: 18).

Esta megaestructura está compuesta por tres construcciones denominadas respectivamente Zenith (un centro de convenciones y espectáculos con capacidad para unas 7.000 personas), Congreso (un centro de conferencias con unos 20.000 m² organizados en 5 niveles) y Expo (un centro de exhibiciones de 18.000 m² con múltiples servicios, capaz de subdividirse en tres salones independientes de 48 x 150 metros cada uno y

separados por dos paneles móviles). Estos tres edificios son independientes, pero se encuentran contiguos unos de otros y sus cubiertas componen un gran óvalo de acero de 245 metros de longitud por 150 metros de ancho, de modo de generar un fuerte sentido de unidad en el conjunto.

Dadas las funciones que albergan, el principal problema que estos edificios plantearon fue el de generar espacios de grandes luces libres con una gran diversidad de instalaciones disponibles en toda la planta. La compleja geometría, la integración con los servicios y consideraciones para cumplir con las reglamentaciones de seguridad en casos de incendio, fueron los principales temas que condicionaron el diseño de la cubierta del edificio Expo, el mayor de los tres.

En una primera instancia se evaluó la posibilidad de salvar la luz total de la cubierta sin apoyos intermedios, recurriendo al empleo de estructuras traccionadas (Balmond et ál., 2002: 282). Una idea manejada inicialmente fue la de construir un gran anillo perimetral comprimido y torsionado que definiera, junto con sus soportes verticales, una zona de borde en la que se ubicaran los distintos servicios y del que colgara una cubierta traccionada. Dicha cubierta podría materializarse como una red de ductos que abasteciera de aire tratado y de luz al interior del edificio, tal como ocurría en los *Umbrella buildings*. Pero por motivos fundamentalmente económicos se decidió colocar una grilla interior de pilares de 15,6 x 24 metros que, adecuadamente organizada, no afectaba la funcionalidad del espacio interior y modulaba la subdivisión del edificio en tres salones.



Figura 83. Vista interior del Congrexpo de Lille, Rem Koolhaas (1989-1994). Fotografía extraída de Internet (<https://www.flickr.com/photos/roryrory/2554344868>), © Rory Hyde / CC-BY-SA-2.0.

Dada la forma de plato con la que se pretendía proyectar la cubierta, si la grilla de pilares interiores fuera ortogonal, todos los elementos de cubierta resultarían con distintas longitudes. Esto llevó a la necesidad de encontrar una viga con una geometría sencilla que, salvando las luces entre los pilares, pudiera generar una geometría toroidal (Mc Gowan et ál., 1995: 22). Este problema se resolvió inclinando los pilares según ángulos variables de modo que los más cortos, con 9 metros de altura, resultaran verticales y los más largos, con 19 metros de altura, se desplazaran hasta 50 cm en su extremo superior. Así las luces de las vigas de la cubierta pudieron mantenerse constantes.

Otro problema estrechamente vinculado al diseño de la cubierta fue la resolución del acondicionamiento térmico del espacio interior del edificio y una de las grandes decisiones adoptadas al respecto fue la de colocar unidades individuales de tratamiento de aire sobre cada uno de los pilares. Estas impulsan el aire tratado hacia abajo por el interior de los estos, que se difunde finalmente en la zona inferior del edificio, donde se encuentran los usuarios (Balmond et ál., 2002: 294). De este modo se pudo ahorrar el espacio en la cubierta que suelen ocupar los ductos de distribución. Los pilares de acero fueron diseñados como tubos huecos de 90 cm de diámetro para adaptarse a estos requerimientos de suministro de aire acondicionado. En la base, para adaptarse a la forma de las rejillas difusoras con cuatro cuadrantes, la sección se transforma en cruciforme.

Dado el enorme volumen de espacio interior del edificio Expo, la reglamentación francesa de seguridad en casos de incendio requería la existencia de cortinas en la cubierta formando depósitos estancos de 1.000 m² con al menos 50 cm de profundidad para controlar la difusión del humo. Pero la presencia de estas cortinas interrumpiría la percepción interna de la cubierta como una gran superficie curva uniforme y continua (Mc Gowan et ál., 1995: 22). De ocultarse las cortinas con un falso techo, la reglamentación establecía que este debía tener al menos un 50 % de huecos, pero por motivos estéticos y económicos se pretendía evitar su presencia. Una estructura de al menos 50 cm de profundidad que conformara una superficie al interior de hasta un 50 % del área total de la cubierta fue entonces lo más cercano a una curva continua que pudo proyectarse.

Se consideraron varias combinaciones de materiales y componentes para el diseño de la estructura de la cubierta, incluyendo placas de acero, chapas metálicas y madera laminada. Los ingenieros de Arup propusieron el diseño de vigas formadas por placas de madera que conformaran una cubierta de listones discontinuos. Finalmente esta idea evolucionó hacia el diseño

de vigas trianguladas compuestas, con cordones superiores y diagonales diseñados en acero y cordones inferiores en madera laminada. La solución consistió en una viga reticulada con un cordón superior comprimido diseñado con un perfil de acero en forma de T, un cordón inferior traccionado diseñado con una placa de madera laminada y una serie de varillas de acero dobladas que conformaron las diagonales interiores. Los cordones inferiores de 75 cm de ancho, dispuestos cada 1,5 metros, generaron una superficie un 50 % opaca y un 50 % permeable al humo.

Dado que no existía experiencia previa en la construcción de vigas compuestas con perfilería de acero, varillas de acero y placas de madera laminada, fue necesario la realización de prototipos para ensayos (Mc Gowan et ál., 1995: 23). Las placas de madera fueron finalmente diseñadas en pino sueco de 15 metros de longitud y 35 mm de espesor. Este diseño de cubierta resultó más económico que las soluciones tradicionalmente utilizadas (Mc Gowan et ál., 1995: 22-23).

Las vigas compuestas salvan las luces de 15,6 metros existentes entre las vigas principales, mientras que estas salvan las luces de 24 metros existentes entre los pilares. La altura de 75 cm resultante en las vigas compuestas satisface los requerimientos de los depósitos de humo y mantiene el espesor de la cubierta relativamente bajo, pero la altura de las vigas principales resulta mucho mayor, de modo que fueron diseñadas con perfiles normales I de acero de 50 cm de altura que conforman las cortinas de los depósitos de humo, atirantados por debajo del nivel de la cubierta de madera a modo de vigas Queen Post.

La complejidad del diseño de la cubierta del edificio Expo es producto de la optimización formal de sus distintos elementos estructurales, diseñados para cumplir con una multiplicidad de funciones. Las vigas compuestas cumplen simultáneamente una función estructural, de falso techo y de depósito estanco de humos en caso de incendios. Los pilares transmiten la carga a la cimentación, garantizan la uniformidad geométrica de las vigas de la cubierta y funcionan como conductos de circulación del sistema de acondicionamiento de aire. Esta coordinación entre estructura y difusión de servicios al espacio principal a través de una grilla de puntos distribuida uniformemente en planta, recuerda a la Casa de Baños para el Trenton Jewish Community Center, de Louis Khan, o al Aeropuerto de Stansted en Londres, de Norman Foster.

4.5. Evolución reciente en el diseño de las estructuras aporticadas

En la segunda mitad del siglo XX, en el ámbito arquitectónico apareció una gran variedad de estructuras aporticadas con organizaciones alternativas a la tradicional grilla uniforme de pilares, vigas y losas, como respuesta a la creciente demanda de espacios flexibles de grandes luces, de megaestructuras aptas para usos múltiples, y de torres de gran altura.

En la obra del ingeniero Robert Maillart aparecieron reflejados, por primera vez, los conceptos de continuidad y de formas ajustadas a las sollicitaciones físicas. Las características del hormigón armado le indujeron a imaginar y diseñar estructuras cuyos componentes podían considerarse como un todo continuo, cuyas formas podían acercarse a la línea de presiones del sistema de cargas que sobre ellas actuaban y cuyas secciones podían deducirse de las tensiones actuantes, es decir, del comportamiento mecánico. La evolución formal de sus puentes en arco parecía seguir, a principios del siglo XX, el proceso de diseño que Le Ricolais definió algunos años más tarde consistente en partir de un bloque y trabajar por medio de escisiones. Podría decirse que Maillart definió sus puentes como bloques macizos a los que luego fue quitando el material que no cumplía una función estructural relevante, estilizando la forma y logrando un uso cada vez más eficiente de la materia.

Así como Maillart descubrió que podía diseñar libremente las secciones de hormigón armado de sus puentes, algunas décadas más tarde Jean Prouvé reconoció que podía experimentar distintas formas en los perfiles de chapa plegada de acero que fabricaba en sus talleres de Maxéville. Los pórticos en forma de V o de U invertida, que constituían el principal elemento de soporte en la mayoría de sus proyectos de viviendas prefabricadas, eran construidos con secciones variables de modo de alcanzar una gran rigidez con la menor cantidad de material posible. 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, el proceso de montaje y desmontaje de las distintas piezas, y consideraciones estáticas, fueron los principales factores que determinaban la forma de sus estructuras.

Las costillas de hormigón prefabricado diseñadas para las cubiertas de la Ópera de Sydney y las vigas Gerber de acero fundido del Centro Pompidou son otros ejemplos paradigmáticos de modelado de la forma de un elemento estructural de acuerdo a las variaciones de las sollicitaciones físicas, en busca de la eficacia y la economía.

A partir de mediados del siglo XX, las estructuras aporticadas dejaron de ser concebidas como sistemas independientes cuya única función era la

de garantizar la estabilidad y la durabilidad de la forma de los edificios en el tiempo, y comenzaron a pensarse como uno más de los tantos componentes que necesitaban ser coordinados, a efectos de una optimización constructiva. La integración de sistemas, es decir, el diseño de componentes que cumplieran múltiples funciones, redundaba siempre en un importante ahorro de energía y de materiales.

El sistema constructivo que Jean Prouvé desarrolló para su *Maison Tropicale* logró una sorprendente integración entre estructura y acondicionamiento climático natural. La chapa de acero del sándwich integrado del sistema constructivo estadounidense SCSD era, a la vez, revestimiento y estructura. Este sistema, cuyo objetivo era la máxima optimización de los materiales, lograba emplear menos cantidad de acero por metro cuadrado que cualquier otro sistema industrializado de su época.

En la década de 1980 comenzó a generalizarse la idea de diseñar a los edificios en forma integral, es decir, atendiendo desde las primeras etapas a todos los aspectos trascendentes en forma conjunta, con el objetivo de lograr la máxima economía de materiales y de optimizar el consumo energético. Los distintos componentes resultantes de un proceso de este tipo no tenían una función simple y única, sino compleja, estaban siempre estrechamente vinculados a múltiples sistemas y su diseño estaba pautado por la optimización de sus múltiples funciones. El todo, por lo tanto, era más que la suma de sus partes individuales. El Commerzbank de Frankfurt, el nuevo Ayuntamiento de la ciudad de Londres, la cubierta sobre el Patio Reina Elizabeth II del Museo Británico, la Mediateca de Sendai y el Congrexpo de Lille, son algunas de las obras más representativas de este nuevo modo de concebir las estructuras.

En el Commerzbank de Frankfurt, aspectos múltiples como la estructura, los acondicionamientos naturales, los cerramientos y la distribución espacial fueron pensados integralmente. Todas las grandes decisiones que definieron el partido arquitectónico de la torre fueron tomadas en conjunto y tuvieron como objetivo la optimización del edificio, tanto desde el punto de vista del uso, como del resistente o del energético.

La forma esférica y escalonada de la envolvente del nuevo Ayuntamiento de la ciudad de Londres, diseñado por Foster, deriva de criterios de optimización de la iluminación natural interior y del consumo de energía para el acondicionamiento térmico. La estructura de tipo Diagrid que soporta la fachada vidriada norte de la Cámara de la Asamblea, abierta hacia el Támesis, consiste en una malla de perfiles tubulares en tres direcciones formando ángulos de 60°. El interior hueco de algunos de estos tubos se aprovecha como conductos de circulación de agua caliente del sistema central de calefacción, por lo que

además de cumplir con un rol estructural, esta estructura Diagrid juega un papel de primer orden en el sistema de acondicionamiento del aire del edificio.¹

En la cubierta de doble curvatura sobre el Patio Reina Elizabeth II del Museo Británico, se diseñó una malla triangulada de acero para resolver tanto la estructura como la perfilería del cerramiento vidriado.

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, alojan en su interior escaleras o ascensores y permiten la circulación de conductos y cañerías de las distintas instalaciones.

Las vigas compuestas construidas en la cubierta del edificio Expo, en el Congrexpo de Lille, cumplen simultáneamente una función estructural, de falso techo y de depósito estanco de humos en caso de incendios, y los pilares funcionan a la vez como soportes y como conductos de circulación del sistema de acondicionamiento de aire. Esta integración entre estructura y difusión de servicios al espacio principal a través de elementos mixtos, distribuidos en planta según una grilla uniforme, puede igualmente observarse en proyectos anteriores como la Casa de Baños para el Trenton Jewish Community Center de Louis Khan o el Aeropuerto de Stansted en Londres, de Norman Foster.

Cuanto más se expanda una estructura en el espacio, más eficaz será desde un punto de vista resistente, tal como decía Robert Le Ricolais, ya que mayores serán su inercia y su rigidez, y los huecos de distintas escalas que se generan en su interior podrán utilizarse como espacios con usos diferenciados: para la circulación de instalaciones, para alojar funciones de servicio o para conformar los espacios principales. Es decir que las distintas funciones programáticas de un edificio pueden organizarse según una determinada *jerarquía espacial*, definida a partir del diseño de la estructura. Esta idea se encuentra en la base del concepto de Louis Kahn de separación entre espacios sirvientes y espacios servidos, y es explorada en proyectos como la Philadelphia City Tower, la Casa de Baños para el Trenton Jewish Community Center, los Laboratorios de Biotecnología Richards o el Salk Institute. El orden y la flexibilidad de los espacios, la solución estructural y la distribución de las instalaciones, se integran en estos proyectos en una única solución constructiva. Esta idea es retomada en el diseño de proyectos recientes, como el ZKM de Karlsruhe, el CNRP de Pekín, diversos rascacielos con estructura de tubo dentro de tubo y grandes naves de planta libre.

1 Ver *Stadtverwaltungsgebäude in London. City Hall in London* (Foster, 2002: 1086-1112) y *Along the Thames, Foster and Partners puts a new twist on government and gives green a different shape with the highly accesible London City Hall* (Merkel, 2003: 11-123).

En el proyecto ZKM de Karlsruhe, diseñado por Rem Koolhaas, una serie de vigas Vierendeel con distintas configuraciones geométricas salvan luces libres de más de 40 metros y se adaptan a los distintos usos del edificio, definiendo alternadamente niveles libres o condicionados por la interferencia estructural de las barras verticales. La geometría de dichas vigas, por lo tanto, determina el tipo de aprovechamiento que puede hacerse del espacio.

En la planta de un rascacielos con estructura de tubo dentro de tubo se define claramente una jerarquía espacial. Dentro del núcleo interior se disponen generalmente las áreas sirvientes y dentro del gran espacio libre que resta entre ambos tubos, las áreas servidas.

La cubierta sándwich integrado diseñada por Ezra Ehrenkratz preveía ocupar la altura libre de las cerchas, entre el falso techo y el revestimiento superior, con cañerías y ductos de las distintas instalaciones mecánicas, de modo que cualquier sector de la planta libre de la nave tuviera total acceso a servicios. Los *Umbrella buildings*, desarrollados en el Reino Unido a partir de mediados de la década de 1960, retoman y profundizan esta idea. Estos proyectos definen claramente dos tipos de espacio: los espacios servidos en donde cualquier actividad podría desarrollarse y los espacios sirvientes en el interior del espesor de la estructura.

El espacio entre las fachadas exteriores e interiores del CNRP en Pekín, en el interior de la malla estructural de acero, se utiliza como una gran cámara de aire ventilada. La estructura de este edificio se integra con el diseño de los sistemas de acondicionamiento natural, y los huecos de distinta escala que se generan definen una separación entre espacios servidos y espacios sirvientes.

Las megaestructuras diseñadas por Rinaldo Semino en la década de 1960 podrían considerarse entre los primeros proyectos en la historia de la arquitectura que investigaron un modelo de organización espacial con características fractales. Algunos de sus diseños surgen de la idea de repetir a distintas escalas un mismo modelo geométrico, definiendo la estructura a una escala macro y a una escala micro. En otras ocasiones, proyecta megaestructuras a partir de un elemento base y un principio de organización jerárquico según distintas escalas, que resulta fractal. El espacio habitable surge, en estos proyectos, de los huecos generados en el interior de las distintas unidades estructurales. Este modelo de organización de la materia, que sigue la definición de Robert Le Ricolais de la ingeniería estructural como el arte de cómo y dónde disponer los huecos, es análogo al modelo de crecimiento celular inventado a principios del siglo XX por Alexander Graham Bell.

Con figuras geométricas simples y dimensiones modulares, Louis Kahn y Anne Tyng crearon, por la misma época, tanto en el proyecto de la Philadelphia

City Tower como en la Casa de Baños para el Trenton Jewish Community Center, una organización de huecos fractal que determinaba la relación entre los espacios servidos y los espacios sirvientes.

La organización estructural de las tipologías de rascacielos conocidas como *tubo dentro de tubo* y *haz de tubos*, desarrolladas por SOM en la década de 1960, podrían igualmente considerarse como fractales. La figura conocida como *alfombra de Sierpinski* presenta, en su segunda y tercera iteración, grandes semejanzas con la geometría en planta de los rascacielos diseñados con estos dos sistemas estructurales.

Tanto la distribución de espacios como la estructura y el sistema de ventilación natural del Commerzbank de Frankfurt, presentan características fractales. La estructura puede describirse como un tubo de sección triangular macizo al que se le sustraen iterativamente volúmenes de escala cada vez menor para ahuecarlo y volverlo habitable. Partiendo de un triángulo, un cuadrado o cualquier otro polígono, es posible generar figuras fractales que podrían utilizarse como base para el diseño de estructuras de tubos perforados y ahuecados.

Los pilares de la Mediateca de Sendai están formados por pequeños perfiles tubulares que se organizan para formar tubos de mayor diámetro, y las losas se componen por celdillas huecas en las que la cantidad de materia y el tamaño y forma de los huecos se determinan según la magnitud de las solicitaciones estáticas. La estructura de este edificio se convierte en una compleja secuencia de vacíos de distintas escalas que definen espacios con distintas características, aptos para alojar distintas funciones.

La acumulación y repetición a distintas escalas de determinados patrones formales es uno de los procedimientos que la naturaleza utiliza para diseñar estructuras. La naturaleza, para Cecil Balmond, es un conjunto de patrones en continua evolución que interactúan, y es precisamente esa interacción la que dirige los caminos evolutivos en un proceso no lineal y caótico. Nuevas configuraciones materiales con geometrías cada vez más complejas emergen continuamente. Balmond se plantea, entonces, la posibilidad de utilizar procedimientos algorítmicos no lineales como herramienta para diseñar formas que emulen la complejidad de las formas naturales.

En el año 2000 creó la Unidad de Geometría Avanzada (AGU, Advanced Geometry Unit) en Arup & Partners, con el objetivo de investigar sobre el diseño de estructuras geométricamente complejas y con un interés específico en el desarrollo de algoritmos y herramientas matemáticas fractales y no lineales. En el año 2005 creó el Instituto de Investigación No Lineal (NLSO) en la Universidad de Pensilvania con objetivos similares: investigar el potencial

de las ciencias y las matemáticas en el diseño arquitectónico y estructural, trabajando fundamentalmente con algoritmos y patrones.

La estructura de la cubierta proyectada por Peter Kulka y Ulrich Königs para el nuevo Estadio de Chemnitz y la disposición de los pilares que la sostienen, que en un principio se proyectaron libremente como metáforas de una nube y un bosque, fueron finalmente ajustadas por Balmond a través de un proceso algorítmico que emula a procesos naturales de generación de formas. Por este motivo, es posible percibir un cierto sentido de orden en la aparente aleatoriedad de estos diseños.

En el pabellón para la Serpentine Gallery del año 2002,² Balmond y Toyo Ito definen una construcción prismática con una piel estructural que se extiende de manera continua por las fachadas y la cubierta. La geometría de esta piel se define a partir de un cuadrado al que se le aplica un algoritmo geométrico: se trazan segmentos de rectas desde la mitad de un lado hasta un tercio del lado adyacente, de modo de obtener un cuadrado menor girado y se prolongan a continuación dichos segmentos. Al nuevo cuadrado obtenido en el interior del cuadrado original se le aplica el mismo procedimiento iterativamente. Este proceso de diseño resulta no lineal, ya que pequeños cambios en las condiciones iniciales conducen a grandes diferencias en el resultado último y observando la geometría finalmente obtenida, por lo tanto, no es posible reconocer el cuadrado original.

En el S-Project en Glasgow, Escocia,³ Balmond determina la geometría y posición de los pilares utilizando un algoritmo matemático basado en el diagrama conocido como la Rosa de Ulam, y tanto en el diseño de la Central de Arnhem⁴ como en el del Parque Chavasse de Liverpool⁵ utiliza un procedimiento que denomina como *la línea generativa* para definir una superficie continua que se ajuste a las particularidades del proyecto con un comportamiento estructural óptimo.

La belleza de estos proyectos podría entenderse como aristotélica, ya que se trata de representaciones personales del universo, generadas a través de procedimientos análogos a los que sus diseñadores entienden que la naturaleza utiliza para la generación de formas.

2 Ver *Grid* (Balmond, 2006c: 26-33).

3 Ver *Numbers* (Balmond, 2006f: 124-135).

4 Ver *The generative line* (Balmond, 2006d: 72-75) e *Informal* (Balmond et ál., 2002: 345-368).

5 Ver *The generative line* (Balmond, 2006d: 76-81).

Parte III. Conclusiones provisionales

1. Resumen

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 ocurrió 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 TGS como marco teórico interdisciplinario, el inicio de un desarrollo explosivo de la informática que facilitó 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 trabajaron en colaboración. Esta confluencia posibilitó la sistemática aplicación a las distintas tipologías constructivas de nuevos conceptos surgidos en el ámbito de las ciencias naturales, que buscaban 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 solicitaciones 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.

2. Antecedentes

Algunos de estos conceptos pueden reconocerse en estructuras construidas con anterioridad a este período, diseñadas como resultado de una búsqueda de la eficacia o la optimización formal de una determinada tipología constructiva.

En la evolución de los perímetros amurallados europeos, como respuesta a la repentina aparición del cañón, puede percibirse la emergencia de geometrías con características fractales. Formas más complejas emergen como resultado de la búsqueda de optimización de la relación entre costos de construcción de la muralla y beneficios de protección para el ejército sitiado. Este cambio repentino en la evolución de una tipología constructiva puede ser interpretado como un hecho extraordinario o catástrofe.

A finales del siglo XIX, Alexander Graham Bell inventó un método con características fractales para la creación de cometas de grandes dimensiones que pudieran utilizarse como máquinas voladoras. A partir de la adición de pequeñas células tetraédricas, Graham Bell fue capaz de construir grandes estructuras con un procedimiento que denominado en este trabajo como *modelo de crecimiento celular fractal*. Este procedimiento tenía como objetivo la optimización de la relación entre el peso y la superficie de vela expuesta al viento, de modo que la cometa fuera capaz de soportar el peso de la tripulación y tener un vuelo estable.

La geometría de las cubiertas suspendidas y las torres que Vladimir Shukhov construyó en Rusia, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, se definía a través de la autoorganización de sus componentes. A partir de la puesta en obra de elementos 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.

A fines del siglo XIX, Antoni Gaudí comenzó a diseñar sus construcciones utilizando procedimientos empíricos, basados en la autoorganización de la materia, que le permitían encontrar formas optimizadas frente a las cargas gravitatorias. La iglesia de la Colonia Güell fue el primer proyecto diseñado y calculado a partir de una malla suspendida de alambres que, sometida a su propio peso, adoptaba la forma de un arco catenariforme tridimensional.

En los puentes diseñados por Robert Maillart, a principios del siglo XX, apareció por primera vez el concepto de *formas adaptadas a las solicitaciones físicas*. Las características del hormigón armado indujeron a Maillart a diseñar estructuras cuyos componentes pudieran considerarse como un todo continuo, cuyas formas se acercaran a la línea de presiones del sistema de cargas actuantes y cuyas secciones se dedujeran de las solicitaciones físicas. En la medida en que el comportamiento de la materia es el que 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 disminuir la cantidad de material en las estructuras.

Hacia mediados del siglo XX comenzaron a diversificarse los materiales empleados en la industria de la construcción y se inició 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 la construcción de cáscaras de hormigón armado, de hormigón prefabricado y de cerámica armada se exploró el potencial de las

estructuras laminares para cubrir espacios de grandes luces. Diseñadores como Torroja, Nervi, Candela, Saarinen o Dieste, asumieron la complejidad inherente al diseño de este tipo de estructuras que, previo al desarrollo de los programas informáticos de cálculo, no era posible analizar con precisión.

Jean Prouvé abordó el problema de la optimización de las formas 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.

El libro *On growth and form*, de D'Arcy Thompson, tuvo una gran influencia en la arquitectura de este período. En él es posible descubrir que las fuerzas mecánicas actúan sobre las estructuras naturales volviéndolas más eficientes, y este principio puede aplicarse a las estructuras diseñadas por el hombre. Si bien D'Arcy Thompson no utiliza explícitamente el concepto de fractalidad, en varios de sus análisis sobre organismos y procesos naturales, como en los estudios de movimiento de líquidos, de la formación de esqueletos 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 los caparzones de las amonitas triásicas, aparece dicho concepto.

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 viviente, como resultado de las acciones físicas y mecánicas que sobre ellas 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. Inspirado en la observación de una forma viviente, recurre al concepto de fractalidad para mejorar el comportamiento a la flexión de una estructura de barras varios años antes de que dicho concepto fuera definido y desarrollado por Benoît Mandelbrot.

Buckminster Fuller fue uno de los principales precursores de la optimización energética de los edificios. La forma esférica de sus domos geodésicos surgía

de la optimización de la relación entre la superficie envolvente y el volumen del espacio interior. Para investigar la forma de una malla estructural que se adapte a las superficies esféricas de sus domos se inspira en el sistema geodésico, inventado por Barnes Wallis y en las configuraciones geométricas de los esqueletos de los radiolarios, analizadas 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.

3. La época reciente

A partir de la segunda mitad del siglo XX, conceptos como complejidad, azar, autoorganización, emergencia, no linealidad y fractalidad, rápidamente se trasladaron al ámbito del diseño de las estructuras arquitectónicas. Si bien algunos de estos conceptos ya habían sido aplicados de un modo intuitivo, con el objetivo de mejorar la eficacia o de optimizar el diseño de algunas construcciones, en los últimos 60 años fue cuando se aplicaron sistemáticamente a las distintas tipologías estructurales promoviendo el desarrollo de formas complejas.

3.1. La eficacia en las estructuras

En las investigaciones recientes sobre la eficacia de las estructuras se observa la adopción de conceptos como autoorganización, fractalidad y no linealidad, aplicados a las distintas tipologías estructurales a través de ideas arquitectónicas como métodos de *form finding*, formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas y modelos de crecimiento fractal.

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. 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 fabricadas 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 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, son necesarios, 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.

Lars Spuybroek, director del grupo Nox, desarrolló una serie de procesos de *form finding* para diseñar algunos de sus proyectos, reproduciendo mecanismos naturales de autoorganización que conducen a formas eficaces para determinadas funciones. 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 la deformación de los sistemas materiales pasan por un instante crítico en el que sufren algún cambio cualitativo trascendente. En los experimentos llevados a cabo para el diseño de proyectos como el obliqueWTC o el Soft Office, existe un instante en el cual el sistema sufre una discontinuidad abrupta en su proceso de autoorganización, que puede ser entendida como una catástrofe, según la teoría de René Thom. La forma del sistema se reorganiza y emerge una 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.

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 *form finding*. Las leyes naturales que actúan en la definición de una superficie de área mínima, sometida a esfuerzos exclusivos de tracción, son bien conocidas y fáciles 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, icosaédricas, etc., desarrolladas por Le Ricolais y Buckminster Fuller para la estructura de cúpulas y domos geodésicos, están inspiradas en la observación de esqueletos de radiolarios. Estas formas aparecen, 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 Reina Elizabeth II en el Museo Británico de Norman Foster, el Proyecto Edén de Nicholas Grimshaw, la piel estructural del obliqueWTC de Nox o la malla del Centro Nacional de Natación de Pekín de PTW Architects y Ove Arup.

La espuma de Weaire-Phelan es, al día de hoy, la forma conocida más eficiente de subdividir el espacio y, por este motivo, fue elegida como base para el diseño de la malla estructural del Centro Nacional de Natación de Pekín. 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 geometría de esta malla le otorga a la estructura del CCNP la rigidez necesaria para resistir las cargas sísmicas y los tifones que pueden presentarse en Pekín.

El concepto de formas ajustadas a las solicitaciones físicas, que tiene su primer antecedente en los puentes de hormigón armado de Robert Maillart, es utilizado para ajustar las secciones de los arcos de hormigón prefabricado en la Ópera de Sydney, de las vigas Gerber de acero fundido del Centro Pompidou, y de los pórticos y muebles de chapa plegada de acero de Jean Prouvé.

Las bóvedas gausas de cerámica armada que Eladio Dieste construyó, entre las décadas de 1960 y 1990, son un ejemplo paradigmático de aplicación de este concepto al diseño de estructuras. Si bien no hay registros de que Dieste realizara experimentos de *form finding* para determinar la forma de estas bóvedas, el empleo de la catenaria y de la doble curvatura implica un diseño ajustado a las leyes de autoorganización de la materia.

El concepto de fractalidad se ha manifestado en el arte desde tiempos antiguos y en las últimas décadas la arquitectura lo ha empleado sistemáticamente en la búsqueda de estructuras eficaces.

La Philadelphia City Tower, diseñada por Louis Kahn y Anne Tyng en la década de 1950, exploraba la rigidez de una estructura tetraédrica trabajando como ménsula. En este proyecto es posible reconocer tetraedros semejantes de al menos cinco escalas diferentes, entre la del módulo principal de la estructura y la de los huecos interiores de los forjados. Estos huecos generados en el interior de la malla tridimensional, rígidamente triangulada, están dispuestos según una jerarquía de escalas que resulta fractal y que define los distintos usos para los que pueden ser aprovechados, según el principio de Louis Kahn de separación entre espacios servidos y espacios sirvientes. Siguiendo este principio, Kahn diseñó diversos proyectos cuya solución espacial y estructural resulta fractal, como la Casa de Baños para el Trenton Jewish Community Center o los Laboratorios de Biotecnología Richards, de la Universidad de Pensilvania.

El modelo de crecimiento implícito en los sistemas constructivos proyectados por Rinaldo Semino en los años 1960, que permiten la creación de grandes estructuras a partir del acoplamiento de unidades sencillas, es análogo al modelo de crecimiento celular fractal inventado por Graham Bell a finales del siglo XIX. Este procedimiento es muy utilizado en la naturaleza para la creación de estructuras complejas, como los caparazones de algunos virus, formadas a partir de la agrupación de subunidades más simples. En estas estructuras, que definen varios niveles jerárquicos de organización, los espacios habitables y utilizables surgen de los vacíos de distintas escalas que se generan dentro de las unidades estructurales, siguiendo las ideas de Robert Le Ricolais, quien definió a la ingeniería estructural como el arte de cómo y dónde disponer los huecos.

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 SOM, durante la década de 1960, podrían considerarse igualmente como fractales. Dichas investigaciones tenían como objetivo la búsqueda de la eficiencia 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, 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.

Existen también ejemplos en los 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 que, una al lado de la otra, buscan materializar la metáfora de una nube.

3.2. La optimización de las estructuras

En las búsquedas recientes sobre la optimización de las estructuras, consideradas como uno de los tantos componentes constructivos que necesitan ser coordinados en una obra arquitectónica, se observa la adopción recurrente de los conceptos de complejidad, azar, emergencia y no linealidad, aplicados a las distintas tipologías estructurales a través de ideas arquitectónicas, tales como el diseño de dispositivos capaces de responder a múltiples funciones, la coordinación espacial jerárquica de los programas arquitectónicos con los huecos que la estructura genera y el diseño algorítmico.

El diseño 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.

Los procedimientos tradicionales de proyecto, cálculo y construcción edilicia, a finales del siglo XX, ya no resultan aptos para el diseño de obras con geometrías complejas. Es imprescindible, para llevar a cabo esta tarea, el trabajo en colaboración de equipos multidisciplinarios y el diseño de estrategias constructivas junto con contratistas. A la tarea de diseñar un edificio van integrándose, paulatinamente, especialistas en múltiples disciplinas. La tendencia hacia un diseño integral ha convertido al proyecto arquitectónico en una labor compleja, en la que es necesario que converja un volumen cada vez mayor de información; las barreras entre las distintas disciplinas han comenzado a disolverse y los roles de los distintos especialistas a mezclarse, emergiendo prácticas de diseño integradoras.

Aparecen, en este período, las primeras grandes empresas de ingeniería multidisciplinaria que trabajan a escala mundial. El ingeniero Ove Arup, en su discurso del 9 de julio de 1970 conocido como *The Key Speech* (Arup, 1970), estableció la denominación de *arquitectura total* para el proceso de diseño en el cual todas las decisiones relevantes han sido consideradas en conjunto e integradas en un todo por un equipo bien organizado. Un proceso de trabajo con

estas características, planteaba Arup, podía llevarse a cabo con profesionales de su propia oficina, o también trabajando en colaboración con otras firmas o empresas. Este desafío implicaba expandir los campos de actividad de la firma y aventurarse en disciplinas como la arquitectura, la planificación, la ingeniería de suelos, la ingeniería medioambientalista, la programación informática o la planificación de obra. Esta tendencia a la expansión obedecía a una búsqueda de optimización del trabajo, Arup reconoció que la íntima integración de varias disciplinas era el único camino hacia el diseño de buenas obras de arquitectura. La sede de Arup & Partners de Escocia fue la primera empresa en ofrecer servicios de ingeniería multidisciplinaria para la edificación, a partir del año 1970.

El diseño de las cubiertas de la Ópera 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 de cubierta que integrara los elementos estructurales con los soportes y las fijaciones de los paneles de vidrio. Estructura, cerramiento vidriado y protección solar se resuelven en un único sistema, de modo que se optimiza el peso de la cubierta y se resaltan 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 fueron tomadas en conjunto y 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, 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 adquiera 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 triangular, 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.

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 del 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 funcionan a la vez como soportes y como conductos de circulación del sistema de acondicionamiento de aire.

Los pilares de la Mediateca de Sendai, diseñados por Toyo Ito en colaboración con un equipo de Sasaki Structural Consultants, 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, conductos y cañerías 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, 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 para lograr un uso eficiente de la energía.

La malla del Centro Nacional de Natación de Pekín, diseñada por PTW Architects junto a técnicos de Arup, 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 Robert Le Ricolais de las formas naturales y de sus investigaciones acerca de la isotropía y la inercia de las estructuras. A partir del estudio de la materia ósea, Le Ricolais 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 un sistema de vacíos a distintas escalas que determine la organización espacial del edificio. Louis Kahn retomó esta idea y la convirtió en el principio de separación entre espacios servidos y espacios sirvientes. El diseño estructural de numerosos proyectos recientes, tales como el Centro Pompidou, los *Umbrella buildings*, los rascacielos con estructuras de tubos dentro de tubos, haces de tubos y tubos perforados o el Centro Nacional de Natación de Pekín, pueden 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 utilizar procedimientos algorítmicos no lineales para el diseño de estructuras, 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 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 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 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 y 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 (CCTV), 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 los huesos. Como resultado de este proceso 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 se determinan a través 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. El paradigma de la naturaleza

Las ideas de Sócrates y de Aristóteles sobre la belleza se entremezclan si se asume que la evolución de las formas en la naturaleza tiene como objetivo la adaptación de los organismos a su medio. El concepto aristotélico de belleza en el arte como la capacidad de reproducción del orden del cosmos y el socrático, como la aptitud de un objeto para lograr su objetivo (la eficacia para garantizar la estabilidad de un edificio y la coordinación con los demás componentes constructivos, en el caso de las estructuras arquitectónicas en la Era Moderna), tiende a coincidir si es a través de la adopción de conceptos surgidos del análisis de las formas naturales y de las leyes del universo, que se logran dicha eficacia y dicha coordinación. Los diseños dymaxion de Fuller

y los diseños algorítmicos de Balmond, por ejemplo, son bellos en el sentido aristotélico del término por tratarse de representaciones personales de las leyes del universo, creadas a través de procesos de morfogénesis que emulan a aquellos empleados por la naturaleza. Pero también lo son en el sentido socrático, ya que el objetivo de emular estos procesos naturales es el de crear estructuras idóneas para cumplir con su función.

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

Al menos tres de las propiedades que actualmente se considera que caracterizan a los seres vivos (Hickman et ál., 2001: 3-10): singularidad química, organización compleja y jerárquica, e interacción con el medio ambiente, son hoy por hoy investigadas por el diseño estructural arquitectónico. Nuevos materiales, nuevas organizaciones espaciales y una cierta capacidad de interacción con el entorno inmediato, son temas de los que hoy día se ocupan numerosos diseñadores e investigadores.

Personalidades como Robert Le Ricolais, Frei Otto o Cecil Balmond, se han dedicado a descubrir configuraciones geométricas en la naturaleza que puedan tener aplicaciones novedosas en el ámbito de las estructuras arquitectónicas; pero la complejidad de las formas naturales es todavía asombrosa para nuestras mentes. Si la diferencia entre dos átomos cualesquiera es el número y la disposición de sus partículas, y la diferencia fundamental entre nuestros propios cuerpos y un puñado de barro es el número y la organización geométrica de esos átomos, es evidente lo ínfimos que aún son nuestros conocimientos acerca de la *forma*. La teoría aristotélica del *hilemorfismo* parece adquirir un nuevo significado: la organización geométrica de las partículas atómicas, a distintas escalas, es la responsable de las propiedades de la materia. La *forma* es la que determina las propiedades esenciales de las cosas.

La materia viva emplea muy pocos materiales para resistir esfuerzos (la celulosa, el colágeno, la quitina y la seda) y todos ellos están formados

por fibras con densidades muy inferiores a las de los materiales utilizados en la industria de la construcción. Las fuerzas físicas fundamentales que los organismos experimentan a lo largo de sus vidas, en las distintas escalas, provocan un depósito selectivo de material allí donde es necesario, y es a través de este proceso de autoorganización de la materia que emergen formas optimizadas. Dichas fuerzas son cuatro: la gravedad y el electromagnetismo, que operan a gran escala, y las dos fuerzas nucleares, que actúan sobre la materia a nivel atómico.

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

Es necesario abordar con rigor el diseño estructural a distintas escalas, la morfología parece ser la disciplina capaz de brindarnos la información necesaria para alcanzar un nuevo nivel de eficacia y de optimización en nuestras construcciones. Debemos considerar las solicitaciones provocadas por las cuatro 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 esta 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.

Referencias bibliográficas

ABALOS, Iñaki y HERREROS, Juan (1989): "La técnica contenida. En torno a Myron Goldsmith", en revista *Arquitectura Viva* n.º 4, pp. 34-35, Arquitectura Viva S.L., Madrid, enero 1989. ISSN: 0214-1256.

— (1995): *Técnica y arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-1990*, Editorial Nerea, Madrid. Segunda edición. Versión original: 1992. ISBN: 84-86763-74-6.

ADAM, Andreas (1976a): "Skyline", en revista *Casabella* n.º 418, pp. 3-9, Electa, Milán, octubre 1976. ISSN: 0008-7181.

— (1976b): “Chicago Story”, en revista *Casabella* n.º 418, pp. 10-14, Electa, Milán, octubre 1976. ISSN: 0008-7181.

ADDISON, Paul (2001): *Fractal and chaos. An illustrated course*, Institute of Physics Publishing, Bristol y Filadelfia. Versión original: Institute of Physics Publishing, 1997. ISBN: 0750304006.

AHM, Povl (1968): “Arups and the computer”, en revista *The Arup Journal*, vol. 3 n.º 1, p. 3, Ove Arup Partnership, Londres, enero 1968. ISSN: 0951-0850.

ALBERT, Marie-Douce (2010): “Une nomade aux Tuileries; Architects: Jean Prouvé”, en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui* n.º 380, p. 205, Jean-Michel Place, Paris, noviembre/diciembre 2010. ISSN: 0003-8695.

ALBERTS, Bruce; BRAY, Dennis; LEWIS, Julian; RAFF, Martin; ROBERTS, Keith y WATSON, James (1992): *Biología molecular de la célula*, Ediciones Omega, Barcelona. Segunda Edición. Versión original: *Molecular biology of the cell*, Garland Science, Nueva York, 1983. Traducción al castellano de Mercé Durfort i Coll, Miquel Llobera i Sande y Senén Vilaró Coma. ISBN: 8428208964.

ALBORNOZ VINTIMILLA, Boris (2000): *El nudo y la arquitectura. Aproximación crítica a los <proyectos complejos>*, tesis doctoral presentada en el Departament de Projectes Arquitectònics, Universitat Politècnica de Catalunya. Director: Antonio Armesto Aria. ISBN: 8469956515.

ALEXANDER, Christopher (1986): *Ensayo sobre la síntesis de la forma*, Editorial Infinito, Buenos Aires. Quinta edición. Versión en castellano: Enrique L. Revol. Versión original: *Notes on the Synthesis of Form*, Harvard University Press, 1966. Primera edición en castellano de 1969. ISBN 987-9393-28-8.

ALEXANDER, Christopher, ISHIKAWA, S. y SILVERSTEIN, M. (1977): *A pattern language: towns, buildings, construction*, Oxford University Press, Nueva York. ISBN: 0195019199.

ALLSOP, Andrew (1991). “Design for hazard: wind”, en revista *The Arup Journal*, vol. 26, n.º 1, pp. 18-19, Ove Arup Partnership, Londres, enero 1968. ISSN: 0951-0850.

AMORÓS PORTOLES, José Luis (1990): *El cristal: morfología, estructura y propiedades físicas*, Editorial Atlas, Madrid. Cuarta edición ampliada. ISBN: 84-363-1079-9.

ANDERSON, Stanford (ed.) (2004): *Eladio Dieste: innovation in structural art*, Princeton Architectural Press, Nueva York. ISBN: 1568983719.

— (2006): “Dieci idee su Dieste”, en revista *Domus* n.º 894, pp. 102-111, Editoriale Domus, Milán, julio/agosto 2006. ISSN: 0012-5377.

ANTHONY, Ken (1975): “Wind engineering: the personal view of a practising engineer”, en revista *Arup Journal*, vol. 10, n.º 4, pp. 9-11, Ove Arup Partnership, Londres, diciembre 1975. ISSN: 0951-0850.

ARANDA, Benjamin y LASCH, Chris (2006): *Pamphlet Architecture 27. Tooling*, Princeton Architectural Press, Nueva York. ISBN: 1-56898-547-9.

ARAUJO, Ramón (2004): “Geometría, técnica y arquitectura” en revista *Tectónica* n.º 17, pp. 4-17, ATC Ediciones, Madrid. ISSN: 1136-0062.

ARGYRIS, J.H.; AICHER, W. y ANGELOPOULOS, T. (1972): “On the Static Analysis of the Olympic Cable Roofs in Munich”, en revista *Zodiac* n.º 21, pp. 74-75, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

ARNAU AMO, Joaquín (1988): *La teoría de la arquitectura en los tratados. Volumen I: Vitruvio, Volumen II: Alberti, Volumen III: Filarete, Di Giorgio, Serlio, Palladio*, Tebar Flores Editorial, Madrid. ISBN: 8473600886.

ARNETT, Tim (2004): “Estructura y remodelado del hueso”, en *Manual Práctico de Osteoporosis y Enfermedades del Metabolismo Mineral*, de José Riancho Moral y Jesús Gonzalez Macías, pp. 1-6, Jarpyo Editores S.A., Madrid. ISBN: 84-88992-91-2.

ARNOLD, Christopher; BERNET, James; KING, Jonathan y ROBERTSON, James (1967): *SCSD: the project and the schools. A report from Educational Facilities Laboratories*, Educational Facilities Laboratories Inc., Nueva York.

AROCA, Ricardo (1984): “El diseño estructural de los seres vivos”, en *Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad*, pp. 147-154, Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid. ISBN: 84-7433-312-1.

ARUP, Ove (1970): *The Key Speech*, 9 de julio de 1970. Disponible en Internet <http://www.arup.com/Publications/The_Key_Speech.aspx>. [Acceso: 19 de julio de 2010].

ARUP, Ove y JENKINS, Ronald (1973a): “The evolution and design of the Concourse at the Sydney Opera House”, en *The Arup Journal*, vol. 8, n.º 3, pp. 22-29, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1973. ISSN: 0951-0850.

ARUP, Ove y ZUNZ, Jack (1973b): “Sydney Opera House”, en *The Arup Journal*, vol. 8, n.º 3, pp. 4-21, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1973. ISSN: 0951-0850.

AYAD, Irene (1997): "Louis Kahn and space frames", en *Beyond the cube: The architecture of space frames and polyhedra*, de François Gabriel, pp. 127-146, Wiley & Sons Inc., Nueva York. ISBN-10: 0471122610.

BAILEY, Peter; BRIDGES, Harry; CROSS, Paul; DEL MESE, Gabriele; SMITH, Chris; WALSH, Seán y WISE, Chris (1997): "Commerzbank, Frankfurt; Architects: Foster & Partners", en revista *The Arup Journal*, vol. 32, n.º 2, pp. 3-12, Ove Arup Partnership, Londres, febrero 1997. ISSN: 0951-0850.

BAKER, A. R. (1968): "Our present computer system", en revista *The Arup Journal*, vol. 3, n.º 1, pp. 3-8, Londres, enero 1968. ISSN: 0951-0850.

BAKER, William F. (2010): "Utilizing concrete in Highrise Buildings: A case study of the Burj Dubai, Trump Tower and Infinity Tower", en revista *Detail 1/2 2010 "Concrete construction"*, pp. 72-79, Reed Business Information, Munich, enero/febrero 2010. ISSN: 1578-5769.

BALMOND, Cecil (1997): "New Structure and the Informal", en revista *Architectural Design*, vol. 67, n.º 9/10, pp. 88-96, VCH Publishers, Chichester, Inglaterra, septiembre/octubre 1997. ISSN: 0003-8504.

— (1998a): *Number 9: The Search for the Sigma Code*, Editorial Prestel, Berlín. ISBN: 978-3-7913-4067-8.

— (1998b): "Informale e nuove strutture" en revista *Lotus* n.º 98, Elemond S.p.A., pp. 70-83, Milán, setiembre 1998. ISSN: 1124-9064.

— (1999): "La nueva estructura y lo informal", en revista *Quaderns* n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 38-49, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

BALMOND, Cecil y JANUZZI, Smith (2002): *Informal*, Editorial Prestel, Munich. ISBN: 3-7913-2400-4.

BALMOND, Cecil (2004): "Desafío", en revista *Tectónica* n.º 17, p. 2, ATC Ediciones, Madrid. ISSN: 1136-0062.

— (2006a): "Deep Structure", en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 16-21, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006b): "Structure as music", en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 22-23, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006c): “Grid”, en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 24-59, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006d): “The generative line”, en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 60-115, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006e): “Chemnitz Stadium. Chemnitz, Germany, 1995”, en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 62-67, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006f): “Numbers”, en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 116-135, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006g): “Definition”, en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 130-135, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006h): “AGU. Advanced Geometry Unit”, en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 136-137, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006i): “Span”, en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 240-245, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006j): “Congrexpo (Lille Grand Palais). Lille, France, 1994”, en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 254-255, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2006k): “CCTV New Headquarters, Beijing, China, 2003-2008”, en revista *A+U* n.º 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp. 274-279, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

— (2007): *Element*, Editorial Prestel, Berlín. ISBN: 978-37913-3778-4.

BANHAM, Reyner (1962): “On trial. 3, Jean Prouve; the thin, bent detail”, en revista *Architectural Review*, pp. 249-252, Emap Construct, Londres, abril 1962. ISSN: 0003-861X.

— (1985): *Teoría y diseño en la primera era de la máquina*, Ediciones Paidós, Barcelona. Versión original: *Theory and Design in the First Machine Age*, The Architectural Press, Londres, 1960. ISBN: 978-84-7509-347-5.

— (2001): *Megaestructuras: Futuro urbano del pasado reciente*, Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona. Segunda edición. Versión original: *Megastructure. Urban*

futures of the recent past, Thames and Hudson, 1976. Traducción: Ramón Font. Primera edición en castellano: 1978. ISBN: 84-252-1851-9.

BARBA, José Juan (1999): "Aproximaciones al espacio-tiempo", en revista *Quaderns* n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 106-109, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

BARCLAY, M. J. (1967): "Wind on tall buildings: design procedure", en revista *The Arup Journal*, pp. 19-23, Ove Arup Partnership, Londres, marzo 1967. ISSN: 0951-0850.

BARNES, Robert (1989): *Zoología de los invertebrados*, Editorial Interamericana Mc Graw-Hill, México D.F. Quinta edición. Versión original: *Invertebrate zoology*, W.B. Saunders, Philadelphia, 1968. Traducción al castellano de Ramón Elizondo Mata. ISBN: 9682514460.

BASSEGODA NONELL, Juan y GARCÍA GABARRÓ, Gustavo (1998): *La cátedra de Antoni Gaudí: estudio analítico de su obra*, Edicions de la UPC, S.L., Barcelona. ISBN: 9788483012833.

BECKMANN, Poul (1968a): "The future of our computer", en revista *The Arup Journal*, vol. 3, n.º 1, p. 19, Ove Arup Partnership, Londres, enero 1968. ISSN: 0951-0850.

— (1968b): "The use of model analysis in structural design", en revista *The Arup Journal*, p. 59, Ove Arup Partnership, Londres, mayo 1968. ISSN: 0951-0850.

BEN-ELI, Mike (1972): "Richard Buckminster Fuller Retrospective", en revista *Architectural Design*, vol. XLII, pp. 746-773, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres, diciembre 1972. ISSN: 0003-8504.

BENEDETTI, Aldo (1995): *Norman Foster*, Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona. Traducción al castellano: Carmen Artal y Graham Thomson. Versión original: *Norman Foster*, Nicola Zamichelli Editore, SpA, Bologna, 1988. ISBN: 84-252-1624-9.

BENÉVOLO, Leonardo (1987): *Historia de la Arquitectura Moderna*, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona. Sexta edición ampliada. Versión original: *Storia dell'architettura moderna*, Laterza, Bari, 1960. Traducción al castellano de Mariuccia Galfetti, Juan Díaz, Anna Pujol i Puigvehí y Joan Giner. Primera edición en castellano: Gustavo Gili, 1974. ISBN: 84-252-0797-5.

BERGER, Horst (1985): "The evolving design vocabulary of fabric structures", en revista *Architectural Record*, pp. 152-156, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, marzo 1985. ISSN: 0003-858X.

BERNABEU, Alejandro (2007): *Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. El trabajo de Cecil Balmond*, tesis doctoral presentada en el Departamento de Estructuras de Edificación, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid. Director: Ricardo Aroca Hernández-Ros.

BERTALANFFY, Ludwig von (1989): *Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*, Fondo de Cultura Económica, México. Séptima reimpresión de la Primera Edición en español de 1976. Versión original: *General System Theory. Foundations, development, applications*, George Braziller, Nueva York, 1968. Traducción al castellano: Juan Almela. ISBN: 968-16-0627-2.

BERTALANFFY, Ludwig von; ASHBY, William y WEINBERG G.M. (1978): *Tendencias en la teoría general de sistemas*, Editorial Alianza, Madrid. Versión original: *Trends in General Systems Theory*, Wiley Interscience, Nueva York, 1972 Traducción al castellano: Alvaro Delgado y Andrés Ortega. ISBN: 84-206-2208-7.

BILLINGTON, David (2000): "The Revolutionary Bridges of Robert Maillart", en revista *Scientific American*, vol. 283, n.º1, pp. 84-91, Nueva York, julio 2000. ISSN: 0036-8733.

BLANCHARD, J. C. (1968): "The available programs", en revista *The Arup Journal*, vol. 3, n.º 1, pp. 9-13, Ove Arup Partnership, Londres, enero 1968. ISSN: 0951-0850.

BLUMER, Riccardo y DANUSER, Ladina (2009): "Frei Otto interview", en revista *Domus* n.º 923, pp. 95-98, Editoriale Domus, Milán, marzo 2009. ISSN: 0012-5377.

BORCHA VILA, Boro (2002): "Las estructuras laminares de Eduardo Torroja", en *La vigencia de un legado. Eduardo Torroja*, pp. 119-150, Editorial SPUPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. ISBN: 84-7721-97-12.

BOSONI, Giampiero y PICCHI, Francesca (1999): "La nature, leçon permanente", en revista *Domus* n.º 818, pp. 54-63, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1999. ISSN: 0012-5377.

BOSSE, Chris (2007): "The injection of Building Culture into the Construction Boom - New Architecture in Dubai", en revista *A+U* n.º 440 "Recent Projects", pp. 86-95, A+U Publishing, Tokyo, mayo 2007. ISSN: 0389-9160.

BOTTERO, María (1969): "Astrazione scientifica e ricerca del concreto nell'utopia di Buckminster Fuller", en revista *Zodiac* Nº19, pp.20-57, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

— (1972). “Ricerca tecnologica e architettura”, en revista *Zodiac* Nº 21, pp.6-11, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

BOYD, Robin (1963). “Under tension”, en revista *Architectural Review*, pp. 324-334, Emap Construct, Londres, noviembre 1963. ISSN: 0003-861X.

BOZAL, VALERIANO (ed.) (1999). *Historia de las ideas estéticas y de las teorías artísticas contemporáneas. Volumen II*, Visor Dis. S.A., Madrid. Segunda edición. Primera edición de 1996. ISBN: 84-7774-581-1.

BRANDOLINI, Sebastiano (1995). “Il progetto del grattacielo della Commerzbank a Francoforte [Project for a skyscraper for the Commerzbank in Frankfurt]; Architects: Sir Norman Foster & Partners”, en revista *Casabella*, vol. 59, n.º 626, pp. 4-17, Electa, Milán, septiembre 1995. ISSN: 0008-7181.

BRENSING, Christian (1996): “Chemnitz Stadium, Germany (Peter Kulka, and Ulrich Konigs)”, en revista *Architectural Review*, vol. 199, n.º 1189, Special issue: Structural expression, pp. 78-79, Emap Construct, Londres, marzo 1996. ISSN: 0003-861X.

BROOKS, Bruce; GÖSSEL, Peter (ed.) y LEUTHÄUSER, Gabriele (1991): *Frank Lloyd Wright*, Benedikt Taschen Verlag GmbH, Hamburgo, Alemania. ISBN: 3-8228-9754-X.

BROWN, André (2001): *The engineer's Contribution to Contemporary Architecture*. Peter Rice, Thomas Telford Publishing, Londres. ISBN: 0 7277 2770 2.

BROWNLIE, David y DE LONG, David (1998): *Louis I. Kahn: en el reino de la arquitectura*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona. Versión original: *Louis I. Kahn: In the Realm of Architecture*, Rizzoli, Nueva York, 1991. Traducción al castellano: Lara Sacco, Carme Muntané y Luis Martínez. ISBN: 84-252-1760-1.

BRUFAU, Robert (2009): “El principio de la inversión. A propósito de la Sala Polivalente de Mannheim”, en revista *Quaderns* n.º 258, pp. 72-77, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona, primavera 2009. ISSN: 1886-1989.

BRUSCATO PORTELLA, Underlea (2004): *De lo digital en arquitectura. Comunicación visual en arquitectura y diseño*, tesis doctoral presentada en el Departament d'Expressió Gràfica Arquitectònica I, Universitat Politècnica de Catalunya. Director: Joan Puebla Pons. ISBN: 8469024930.

BUCHANAN, Peter (1997): *Renzo Piano Building Workshop: complete works*, Phaidon Press, Londres. ISBN: 0714835439.

— (1998): “Reinventing the Sky-Scraper - Commerzbank Headquarters, Frankfurt, by Foster and Partners”, en Revista *A+U* n.º 329, pp. 28-67, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

BUNTROK, Dana (2002): *Japanese Architecture as a Collaborative Process. Opportunities in a flexible construction culture*, Spon Press, Londres. Primera edición: 2001. ISBN: 0-419-25140-5.

BURKHARDT, Berthold (2000a): “History of tent construction”, en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 960-964, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

— (2000b): “There’s still plenty of scope - an interview with Frei Otto on the future of tent construction”, en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 965-970, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

— (2000c). “The Eden project, Cornwall (Nicholas Grimshaw & Partners)”, en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 987-989, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

— (2000d): “Japanese Pavilion at the Expo in Hannover (Shigeru Ban)”, en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 1012-1017, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

CAILLE, Jean-François (1998): “Détails. La cellule de bureaux”, en revista *Moniteur Architecture AMC*, n.º 92, pp. 71-87, Publications du Moniteur, Paris, octubre 1998. ISSN: 0998-4194.

CALDUCH, Juan (2001): *Temas de composición arquitectónica nº4: Materia y técnica: de la firmitas a la tecnología*, Editorial Club Universitario, San Vicente, Alicante. ISBN: 9788484541165.

CÁMARA, Alicia (coord.) (2005): *Los ingenieros militares de la monarquía hispánica en los siglos XVII y XVIII*, Ministerio de Defensa, Asociación Española de Amigos de los Castillos, Centro de Estudios Europa Hispánica, Madrid. ISBN: 84-9781-205-0.

CAMINO DE BROADBENT, Gloria (1992): “Johan Otto von Spreckelsen. La Grande Arche, La Défense”, en revista *Architectural Design*, vol. 62, n.º 1/2, pp. 66-71, Academy Group, Londres, enero/febrero 1992. ISSN: 0003-8504.

CAMPBELL, John (1980): “Environmental considerations of lightweight structures”, en revista *The Arup Journal*, vol. 15, n.º 3, pp. 22-26, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1980. ISSN: 0951-0850.

CARDWELL, Simon; CATHER, Bob y GROÁK, Steven (1997): "New materials for construction", en revista *The Arup Journal*, vol. 32, n.º 3, pp. 18-20, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

CARFRAE, Tristram (2008): "National Aquatic Center Beijing - The Water Cube", en revista *A+U*, n.º 454, pp. 130-135, A+U Publishing, Tokyo, julio 2008. ISSN: 0389-9160.

CARROLL, Chris; CROSS, Paul; DUAN, Xiaonian; GIBBONS, Craig; HO, Goman; KWOK, Michael; LAWSON, Richard; LEE, Alexis; LUONG, Andrew; MC GOWAN, Rory y POPE, Chas (2005): "CCTV Headquarters, Beijing, China; Architects: Office for Metropolitan Architecture", en revista *The Arup Journal*, vol. 40, n.º 2, pp. 3-9, Corporate Communications Group, Londres. ISSN: 0951-0850.

CARROLL, Chris; GIBBONS, Craig; HO, Goman; KWOK, Michael; LAWSON, Richard; LEE, Alexis; LI, Ronald; Luong, Andrew; Mc Gowan, Rory y Pope, Chas (2008): "CCTV headquarters, Beijing, China: building the structure; Architects: OMA", en revista *The Arup Journal*, vol. 43, n.º 2, pp. 40-51, Corporate Communications Group, Londres. ISSN: 0951-0850.

CARVAJAL, Angel (1985): "La ciudad militar en dos tratados de fortificación del SXVI", en revista *En la España Medieval*, n.º 6, pp. 51-63, Servicio de publicaciones de la Universidad Complutense, Madrid. ISSN: 0214-3038.

CASTLE, Helen (2002): "The Buro Happold Tapes", en revista *Architectural Design*, vol. 72, n.º 5, pp. 67-78, Wiley, Chichester, Inglaterra, setiembre/octubre 2002. ISSN: 0003-8504.

CHASLIN, François y PICON-LEFEBVRE, Virginie (1989): *La Grande Arche de La Defense*, Electa Moniteur, Paris. ISBN: 2866530624.

CHIARELLA, Mauro (2004): *Unfolding Architecture: laboratorio de representación e ideación (medios análogos y digitales)*, tesis doctoral presentada en el Departament d'Expressió Gràfica Arquitectònica I, Universitat Politècnica de Catalunya. Director: Ernest Redondo Domínguez. ISBN: 9788469370551.

CLARK, Ed y GILPIN, David (2005): "Selfridges, Birmingham; Architects: Future Systems", en revista *The Arup Journal*, vol. 40, n.º 1, pp. 3-10, Corporate Communications Group, Londres. ISSN: 0951-0850.

COBBERS, Arnt; JAHN, Oliver y GÖSELL, Peter (ed.) (2010): *Prefab Houses*, Editorial Taschen, Colonia, Alemania. Versión original: *Prefab Houses*, Taschen GmbH, Colonia, 2010. Traducción al castellano: Amparo Conde Pérez. ISBN: 978-3-8365-2184-0.

COHEN, Jean-Louis (1984): "Jean Prouve (1901-1984): a dazzling builder", en revista *Casabella*, n.º 504, vol. 48, pp. 34-35, Electa, Milán, julio/agosto 1984. ISSN: 0008-7181.

COLLINS, Peter (1998): *Los ideales de la arquitectura moderna; su evolución (1750-1950)*, Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona. Versión original: *Changing Ideals in Modern Architecture (1750-1950)*, Faber & Faber, Londres y McGill-Queen's University Press, Montéal, 1965. Primera edición en castellano: Gustavo Gili S.A., Barcelona, 1970. Traducción: Ignasi de Solà-Morales Rubió. ISBN: 84-252-1757-1.

COLOMINA, Beatriz (2006): *La Domesticidad en Guerra*, Actar, Barcelona. ISBN: 84-965-4010-3.

CONDIT, Carl (1976): "The technological triumph and architectural failure of the contemporary skyscraper", en revista *Casabella*, n.º 418, pp. 15-23, Electa, Milán, octubre 1976. ISSN: 0008-7181.

CORRADINI, Antonella (ed.) y O'CONNOR, Timothy (ed.) (2010): *Emergence in Science and Philosophy*, Routledge Taylor & Francis Group, Nueva York. ISBN: 0-203-84940-X.

COSTA COUCEIRO, Mauro (2009): *Analogías biológicas en la arquitectura. Del acercamiento biónico a los paradigmas de lo biodigital*, tesis doctoral presentada en el Departament d'Arquitectura, Universitat Internacional de Catalunya. Director: Alberto Estévez. ISBN: 9788469189610.

CUADRA, Manuel (1997): "Sede centrale di una banca, Francoforte [Headquarters of a bank in Frankfurt]; Architects: Foster & Partners", en revista *Domus*, n.º 798, pp. 20-26, Editoriale Domus, Milán, noviembre 1997. ISSN: 0012-5377.

CURTIL, Sophie (1996): *Le Centre Georges Pompidou. Piano-Rogers*, Editions du Centre Pompidou, Paris. ISBN: 2858509123.

CZARNECKI, John E. (2003): "SOM designs world's tallest tower for Dubai developer", en revista *Architectural Record*, vol. 191, n.º 7, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, julio 2003. ISSN: 0003-858X.

DANZ, Ernst (1963): *Architecture of Skidmore, Owings & Merrill, 1950-1962*, The Architectural Press, Londres. Versión original: Verlag Gerd Hatje, Stuttgart, 1962. Traducción al inglés: Ernst van Haagen.

DARLING, Elizabeth (2001): *Le Corbusier*, Kliczkowski Publisher, Dubai. Primera edición: 2000. Traducción al castellano: Verónica Alvarez. ISBN: 987-97781-3-8.

DAVEY, Peter (1997a): "High expectations", en revista *Architectural Review*, vol. 202, n.º 1205, pp. 26-35, Emap Construct, Londres, julio 1997. ISSN: 0003-861X.

— (1997b). "Commerzbank environmental control", en revista *Architectural Review*, vol. 202, n.º 1205, pp. 36-39, Emap Construct, Londres, julio 1997. ISSN: 0003-861X.

DAVID, Brigitte (2001): "Jean Prouve, un homme moderne", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 335, pp. 28-29, Jean-Michel Place, Paris, julio/agosto 2001. ISSN: 0003-8695.

DAVOINE, Gilles (2001): "Jean Prouve et la mediterrane", en revista *Moniteur Architecture AMC*, n.º 114, p.25, Publications du Moniteur, Paris, marzo 2001. ISSN: 0998-4194.

DAY, Alistair (1980): "Form finding, control and modification for tension structures", en revista *Arup Journal*, vol. 15, n.º 3, pp. 19-20, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1980. ISSN: 0951-0850.

DEMORIANE, Hélène y BARRÉ, François (1977): "Beaubourg", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 189, pp. 41-81, Groupe Expansion, Paris, enero 1977. ISSN: 0003-8695.

DEVILLERS, Christian (1994): "The Indian Institute of Management de Ahmedabard", en *Louis I. Kahn*, pp. 153-195, Ediciones del Serbal, Barcelona. Traducción: María Cristina Romanini. ISBN: 84-7628-123-4.

DI BARTOLO, Carmelo (1999): "Bionics: natural development in design", en revista *Domus*, n.º 818, pp. 49-53, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1999. ISSN: 0012-5377.

DICKSON, Michael (1975): "The Lightweight Structures Laboratory", en revista *Arup Journal*, vol. 10, n.º 1, pp. 11-15, Ove Arup Partnership, Londres, marzo 1975. ISSN: 0951-0850.

DIESTE, Eladio (2000-2001): "Dieste: la plasticità della struttura", en revista *Casabella*, vol. 64, n.º 684/685, pp. 69-87, Electa, Milán, diciembre 2000/enero 2001. ISSN: 0008-7181.

— (2001a): "Arquitectura y Construcción", en *Eladio Dieste. 1943-1996*, pp. 221-242, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Departamento de Publicaciones de la Junta de Andalucía, Sevilla-Montevideo. Primera edición de 1996. ISBN: 84-8095-136-2.

— (2001b): “La invención inevitable”, en *Eladio Dieste. 1943-1996*, pp. 243-258, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Departamento de Publicaciones de la Junta de Andalucía, Sevilla-Montevideo. Primera edición de 1996. ISBN: 84-8095-136-2.

— (2001c): “Técnica y subdesarrollo”, en *Eladio Dieste. 1943-1996*, pp. 259-266, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Departamento de Publicaciones de la Junta de Andalucía, Sevilla-Montevideo. Primera edición de 1996. ISBN: 84-8095-136-2.

— (2001d): “La conciencia de la forma”, en *Eladio Dieste. 1943-1996*, pp. 267-274, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Departamento de Publicaciones de la Junta de Andalucía, Sevilla-Montevideo. Primera edición de 1996. ISBN: 84-8095-136-2.

— (2001e): “Arte, pueblo, tecnocracia”, en *Eladio Dieste. 1943-1996*, pp. 275-286, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Departamento de Publicaciones de la Junta de Andalucía, Sevilla-Montevideo. Primera edición de 1996. ISBN: 84-8095-136-2.

DONKERVOET, Daralice (1984): “The legacy of Louis Kahn”, en revista *Architecture*, n.º 12, vol. 65, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, diciembre 1984. ISSN: 0033-0752.

DORFLES, Gillo (1971): “Eero Saarinen: Recent Work”, en revista *Zodiac*, n.º 8, pp. 85-90, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

DOUTRIAUX, Emmanuel (1992): “Special issue. Euralille; Masterplanners: Rem Koolhaas, and Office for Metropolitan Architecture”, en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 280, pp. 93-169, Jean-Michel Place, Paris, abril 1992. ISSN: 0003-8695.

— (2004): “Informatique. La modelisation 3d et le projet. Entretien avec Jean Angelini, Cellule 3D, Agence AJN”, en revista *Moniteur Architecture AMC*, n.º 146, pp. 137-139, Publications du Moniteur, Paris, octubre 2004. ISSN: 0998-4194.

DOWSON, Philip (1992): “Arups' office evolution”, en revista *Architectural Review*, vol. 190, n.º 1143, pp. 54-55, Emap Construct, Londres, mayo 1992. ISSN: 0003-861X.

DREW, Philip (2000): *Utzon and the Sydney Opera House*, Annandale, NSW: InSPIRE Press, Sydney, 2000. ISBN: 064640556X.

EEKHOUT, Mick (1972): "Frei Otto and the Munich Olympic Games (from the measuring experimental models to the computer determination of the pattern)", en revista *Zodiac*, n.º 21, pp. 12-73, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

EKELAND, Ivar (1999): "El caos existe, lo podemos descubrir", en revista *Quaderns*, n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 30-35, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

EMERGENCE AND DESIGN GROUP (2004): "Emergence: Morphogenetic Design Strategies", en revista *Architectural Design*, Wiley, Chichester, Inglaterra, junio 2004. ISSN: 0003-8504.

EMMERICH, David (1968): "Les structures", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 141, pp. 4-14, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

FALCONER, Kenneth (2003): *Fractal geometry. Mathematical Foundations and Applications*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, West Sussex, Inglaterra. Segunda edición. Versión original de 1990. ISBN: 0-470-84862-6.

FERNÁNDEZ-GALIANO, Luis (ed.) (1984a): *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. ISBN: 84-7433-312-1.

— (1984b): "Organismos y mecanismos como metáforas de la arquitectura", en *Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad*, pp. 57-80, Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid. ISBN: 84-7433-312-1.

— (1999): "Norman Foster", revista *AV Monografías*, n.º 78, Arquitectura Viva SL, Madrid, julio/agosto 1999. ISSN: 0215-487X.

FERNANDEZ-GALIANO, Luis y MONEO, Rafael (2012): *Arquitectura y vida. El arte en mutación*, discurso leído por el Académico electo EXCMO. SR. D. Luis Fernández Galiano Ruiz y contestación del Académico EXCMO. SR. D. José Rafael Moneo Vallés, el día 22 de enero de 2012 con motivo de su ingreso, publicado por Artes Gráficas Palermo, Madrid, enero de 2012.

FIELL, Peter (1999): "New nature", en revista *Domus*, n.º 818, pp. 70-79, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1999. ISSN: 0012-5377.

FILLER, Martin (1993): "El emperador de la luz. La obra de Kahn veinte años después", en revista *AV Monografías*, n.º 44 "Louis I. Kahn", pp. 22-31, noviembre/diciembre 1993, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

FISHER, Thomas (1992): "Landmarks: TWA Terminal", en revista *Progressive Architecture*, vol. 73, n.º 5, pp. 96-101, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, mayo 1992. ISSN: 0033-0752.

FORD, Boris (1992): *Modern Britain. The Cambridge Cultural History*, The Press Syndicate of the University of Cambridge, Nueva York. Versión original: *The Cambridge Guide to the Arts in Britain: since the Second World War*, 1988. ISBN: 0-521-42889-0.

FORSTER, Brian (1980): "A brief history of cable and membrane roofs", en *The Arup Journal*, vol. 15, n.º 3, pp. 6-10, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1980. ISSN: 0951-0850.

— (1985): "The engineered use of coated fabrics in long span roofs", en revista *The Arup Journal*, vol. 20, n.º 3, pp. 7-12, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

FOSTER, Norman (1972): "Foster Associates. Recent Work", en revista *Architectural Design*, vol. XLII, pp. 686-701, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres, noviembre 1972. ISSN: 0003-8504.

FOSTER, Norman e INGENHOVEN, Christoph (1992): "Two towers in Frankfurt", en revista *Architectural Review*, vol. 190, n.º 1143, pp. 56-61, Emap Construct, Londres, mayo 1992. ISSN: 0003-861X.

FOSTER, Norman; SUDJIC, Devan y DE GREY, Spencer (2001): *Norman Foster and The British Museum*, Editorial Prestel Verlag, Munich-Londres-Nueva York, 2001. ISBN: 3-7913-2541-8.

FOSTER, Norman (2002): "Stadtverwaltungsgebäude in London. City Hall in London", en revista *Detail*, vol. 42, n.º 9, Konzept, pp. 1086-1112, Reed Business Information, Munich, septiembre 2002. ISSN: 1578-5769.

FRAMPTON, Kenneth (1994): "Louis I. Kahn y Filadelfia. Notas sobre la modernización y la ciudad transhistórica", en *Louis I. Kahn*, pp. 69-80, Ediciones del Serbal, Barcelona. Traducción: María Cristina Romanini. ISBN: 84-7628-123-4.

FRAMPTON, Kenneth (2005): *Historia crítica de la arquitectura moderna*, Gustavo Gili S.A., Barcelona. Tercera edición ampliada, séptima tirada. Versión original: *Modern Architecture: A Critical History*, Thames and Hudson, Londres, 1980. Primera edición en castellano: 1981. Traducción: Jorge Sainz. ISBN: 84-252-1665-6.

FRATEILI, Enzo (1971): "Louis Kahn", en revista *Zodiac*, n.º 8, pp. 15-25, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

FREYSSINET, Eugène (2003): "Mi vida: nacimiento del hormigón pretensado", en *Eugène Freyssinet, un ingeniero revolucionario*, pp. 17-98, Fundación Esteyco, Madrid. Traducción al castellano: Màxim Serranos Soler. ISBN: 84-921092-9-7.

FROMM, Jochen (2004): *The emergence of complexity*, Kassel University Press GmbH, Kassel, Alemania. ISBN 3-89958-069-9.

FROMNOT, Françoise (1998): "Jorn Utzon, la forme raisonnée", en revista *Moniteur Architecture AMC*, n.º 93, pp. 66-73, Publications du Moniteur, Paris, noviembre 1998. ISSN: 0998-4194.

FULLER, Buckminster (1969a): "Design Science, an Economical Success of All Humanity", en revista *Zodiac*, n.º 19, pp. 58-74, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

— (1969b): "R. Buckminster Fuller: recent works", en revista *Zodiac*, n.º 19, pp. 75-89, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

FULLER, Buckminster y APPLEWHITE, E. J. (1975): *Synergetics. Explorations in the geometry of thinking*, Macmillan Publishing Co. Inc., Nueva York. ISBN: 0-02-541870-X.

GALINDO, Jorge (2000): "La ciencia de los ingenieros... en la primera mitad del siglo", en revista *Informes de la construcción*, vol. 52, n.º 467, pp. 47-54, CSIC, Instituto Eduardo Torroja, Madrid. ISSN: 0020-0883.

GALLAGHER, R.H. (1985): "Diseño estructural óptimo - una reseña", en *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería* (RIMNI), vol. 1, 1, pp. 3-20, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0213-1315.

GARCÍA GARCÍA, Rafael (2010): *Arquitectura Moderna en los Países Bajos, 1920-1945*, Ediciones Akal S.A., Madrid. ISBN: 978-84-460-2807-9.

GARCÍA MELERO, José Enrique (1990): "Los tratados de arquitectura militar publicados en España durante el reinado de Carlos III", en revista *Espacio, Tiempo y forma*, pp. 181-223, Facultad de Geografía e Historia de la UNED, Madrid. ISSN 1130-4715.

GARDNER, Ian (1992-1993): "The intelligent structure", en revista *The Arup Journal* vol. 27, n.º 4, pp. 14-15, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

GARDNER, James (1985): "The nature of architectural fabrics", en revista *Architectural Record*, p. 157, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, marzo 1985. ISSN: 0003-858X.

GARIN, Eugenio (1988): "Estudios sobre L. B. Alberti", en *León Battista Alberti*, pp. 33-80, Editorial Stylos S.A., Barcelona. Recopilación y traducción: Josep M. Rovira y Anna Muntada. ISBN: 84-7616-009-7.

GAUSA, Manuel (1999): "Tiempo dinámico-Orden <in>formal", en revista *Quaderns*, n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 6-11, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

GERE, James (2007): *Mecánica de materiales*, Thomson Editores, México. Sexta edición. Versión original: *Mechanics of Materials*, Thomson/Brooks/Cole, 2004. Traducción: Raúl Arrioja y José de la Cera Alonso. ISBN: 970-686-482-2.

GIEDION, Sigfried (1947): "On the force of esthetic values", en revista *Architectural Record*, vol. 101, n.º 6, pp. 84-87, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, junio 1947. ISSN: 0003-858X.

GIOVANNARDI, Fausto (2007a): "*Vladimir G. Shukhov e la leggerezza dell'acciaio*", Borgo San Lorenzo. Disponible en Internet <<http://www.giovannardierontini.it/Pubblicazioni.htm>>, [Acceso: 15 de marzo de 2011].

— (2007b): "*Robert Maillart e l'emancipazione del C.A.*", Borgo San Lorenzo. Disponible en Internet <[http://www.costruzioni.net/articoli/ROBERT %20MAILLART.pdf](http://www.costruzioni.net/articoli/ROBERT_%20MAILLART.pdf)>, [Acceso: 15 de marzo de 2011].

GIRALT-MIRACLE, Daniel (Dir.) (2002): *Gaudí. La búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción*, Lunwerg editores, Barcelona. ISBN: 84-7782-724-9.

GIURGOLA, Ronaldo (1992): *Louis I. Kahn*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona. Traducción al castellano: Carola Kappelmacher y Graham Thomson. Tercera edición en castellano e inglés. Versión original: *Louis I. Kahn*, Verlag für Architektur Artemis, Zurich/Gustavo Gili S.A., Barcelona, 1979. ISBN: 84-252-1399-1.

GODOI PUERTAS, Jesús (1986): *La razón de las estructuras*, tesis doctoral presentada en el Departament de Projectes Arquitectònics, Universitat Politècnica de Catalunya. Director: Fructuoso Mañá i Reixach. ISBN: 9788469048788.

GOLDSMITH, Myron (1976): "Structure, scale and architecture", en revista *Casabella*, n.º418, pp. 34-43, Electa, Milán, octubre 1976. ISSN: 0008-7181.

GOMEZ JAUREGUI, Valentin (2007): *Tensegridad: estructuras tensegríticas en ciencia y arte*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, Santander. ISBN 978-84-8102-437-1.

GONCHAR, Joann (2008): "Inside Beijing's big box of blue bubbles", en revista *Architectural Record*, vol. 196, n.º 7, pp. 150-158, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, Julio de 2008. ISSN: 0003-858X.

GONZALEZ MORENO-NAVARRO, José Luis (1993): *El legado oculto de Vitruvio*, Alianza Editorial, Madrid. ISBN: 9788420671161.

GOODCHILD, Helen; BROWN, Hanna y SINDBAEK, Soren (2011): *Geophysical survey at Aggersborg, North Jutland*, Dept. of Archaeology, University of York, York, 2011.

GORDON, J. E. (2004): *Estructura o por qué las cosas no se caen*, Calamar Ediciones, Madrid, 2004. Segunda edición Versión en castellano de Valentín Quintas. Versión original de 1978. ISBN: 84-96235-06-8.

GOULET, Patrice (1985): "La nature des matériaux. De l'acier moulé au polycarbonate. Entretien avec Peter Rice", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 237, pp. 10-27, Groupe Expansion, Paris, febrero 1985. ISSN: 0003-8695.

GRAEFE, Rainer y PERTSCHI, Ottmar (1990): "Un ingegnere rivoluzionario: Vladimir Grigor`evic Suchov 1853-1939", en revista *Casabella*, n.º 573, pp. 38-58, Electa, Milán, noviembre 1990. ISSN: 0008-7181.

GRAYSON, Cecil (1988): "L. B. Alberti, arquitecto", en *León Battista Alberti*, pp. 11-32, Editorial Stylos S.A., Barcelona. Recopilación y traducción: Josep M. Rovira y Anna Muntada. ISBN: 84-7616-009-7.

GREEN, Dane; LAU, Bob; LYALL, Iain; PRITCHARD, David; PULLEN, John y RYAN, Clodagh (2005): "2005 CCTV Headquarters, Beijing, China; Architects: Office for Metropolitan Architecture", en revista *The Arup Journal*, vol. 40, n.º 3, pp. 22-29, Corporate Communications Group, Londres. ISSN: 0951-0850.

GREGOTTI, Vittorio (1988). "L'architettura della nuova ingegneria", en revista *Casabella*, n.º 542-543, pp. 2-4, Electa, Milán. ISSN: 0008-7181.

GRIFFITH, Paddy y DENNIS, Peter (il.) (2006): *The Vauban fortifications of France*, Osprey Publishing, Nueva York. ISBN: 1-84176-875-8.

GRILLO, Antonio Carlos (2005): *La arquitectura y la naturaleza compleja. Arquitectura, ciencia y mimesis a finales del siglo XX*, tesis doctoral presentada en el Departament de Composició Arquitectònica, Universitat Politècnica de Catalunya. Director: Dra. Marta Llorente Díaz. Barcelona.

GRIMSHAW, Nicholas (1998): "Eden Centre, Cornwall, Grande-Bretagne, Grimshaw & Partners", en revista *Techniques & Architecture*, n.º 437, pp. 80-82, Jean-Michel Place, Paris, abril 1998. ISSN: 0373-0719.

GRINO, Sylvia y PERSON, Bruno (2000): "Eladio Dieste: 34 degrees de latitude sud", en revista *Moniteur architecture AMC*, n.º 107, pp. 70-81, Publications du Moniteur, Paris, mayo 2000. ISSN: 0998-4194.

GUBLER, Jacques (1994): "¿La crujía es un tipo?", en *Louis I. Kahn*, pp. 81-92, Ediciones del Serbal, Barcelona. Traducción: María Cristina Romanini. ISBN: 84-7628-123-4.

HANSON, Donald (1966): "Structuring the loop: A discussion of SOM's Brunswick building in the context of redevelopment of the Chicago Loop area", en revista *Progressive Architecture*, pp. 194-197, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, agosto 1966. ISSN: 0033-0752.

HAPPOLD, E.; RICE, P. (1973): "Centre Beaubourg", en revista *The Arup Journal*, vol. 8, n.º 2, pp. 2-10, Ove Arup Partnership, Londres, junio 1973. ISSN: 0951-0850.

HAPPOLD, E.; LIDDELL, I. y DICKSON, M. (1976): "Design Towards Convergence", en revista *Architectural Design*, vol. XLVI, n.º 7, pp. 430-435, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres, julio 1976. ISSN: 0003-8504.

HAPPOLD, Ted (1977): "Beaubourg: Architecture or Engineering" en revista *Architectural Design*, vol 47, n.º 2, pp. 128-133, febrero 1977, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres. ISSN: 0003-8504.

HAWTHORNE, Christopher (2011): "Video: Violent shaking but no real destruction at Toyo Ito's Mediatheque in Sendai", Los Angeles Times [Internet] 14 de marzo de 2011. Disponible en <<http://latimesblogs.latimes.com/culturemonster/2011/03/video-violent-shaking-but-no-real-destruction-at-toyo-itos-mediatheque-in-sendai.html>> [Acceso: 8 de junio de 2011].

HELMCKE, J.G. y OTTO, Frei (1963): "Structures vivantes et structures techniques. Remarques sur les coques et structures spatiales dans la nature et la technique", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 108, pp. 78-84, Groupe Expansion, Paris, junio/julio 1963. ISSN: 0003-8695.

HENSEL, Michael; MENGES, Achim y WEINSTOCK, Michael (2004a): "Emergence in Architecture", en revista *Architectural Design*, vol. 74, n.º 3, pp. 6-9, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

— (2004b): “Frei Otto in Conversation with the Emergence and Design Group”, en revista *Architectural Design*, vol. 74, n.º 3, pp. 18-25, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

HENSEL, Michael (2004c): “Finding Exotic Form: An Evolution of Form Finding as a Design Method”, en revista *Architectural Design*, vol. 74, n.º 3, pp. 26-32, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

HENSEL, Michael; MENGES, Achim y WEINSTOCK, Michael (2004d): “Engineering Design: Working with Advanced Geometries: Charles Walker in Conversation with the Emergence and Design Group”, en revista *Architectural Design*, vol. 74, n.º 3, pp. 65-71, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

— (2004e): “Manufacturing Complexity: Johann Sischka in Conversation with the Emergence and Design Group”, en revista *Architectural Design*, vol. 74, n.º 3, pp. 72-79, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

HEYLIGHEN, Francis (1989): “Self-organisation, Emergence and the Architecture of Complexity”, en *Proceedings of the First European Conference on System Science*, Paris, 1989.

HICKMAN, Cleveland; ROBERTS, Larry y LARSON, Allan (2001): *Integrated Principles of Zoology*, Mc Graw Hill, Boston. Decimoprimer edición. ISBN 0-07-290961-7.

HICKMAN, Cleveland; ROBERTS, Larry y LARSON, Allan (2003): *Animal diversity*, Mc Graw Hill, Boston. Tercera edición. Versión original: McGraw-Hill, 2002. ISBN: 0-07-234903-4.

HILDEBRAND, S.; TROMBA, A. (1990): *Matemáticas y formas óptimas*, Prensa Científica, Barcelona. Versión original: *Mathematics and optimal form*, Scientific American Library, Nueva York, 1984. ISBN: 8475930387.

HO, Mae-Wan (1997): “The New Age of the Organism”, en *Architectural Design*, vol. 67, n.º 9/10, pp. 44-51, VCH Publishers, Chichester, Inglaterra, septiembre/octubre 1997. ISSN: 0003-8504.

— (1999): “La nueva era del organicismo”, en revista *Quaderns* n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 150-155, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

HOFSTADTER, Douglas (1999): “Bucles. Jerarquías enredadas”, en revista *Quaderns*, n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 62-65, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

HOSCH, William (ed.) (2007): "Sir Barnes Wallis", en Encyclopædia Britannica Online, Encyclopædia Britannica Inc. Disponible en Internet <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/634920/Sir-Barnes-Neville-Wallis>>. [Acceso: 18 de marzo de 2011].

HUMANES, Alberto (1997): "Robert Le Ricolais", en *Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*, pp. 9-10, Fundación Cultural COAM, Madrid, 1997. Traducción: Isabel Larrauri. ISBN: 84-88496-20-6.

HUMPHESON, Chris; FITZPATRICK, Tony y ANDERSON, John (1985): "Special issue. The Hongkong Bank: the new headquarters; Architects: Foster Associates. The basements and substructure", en revista *The Arup Journal*, vol. 20, n.º 4, pp. 27-36, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

IBELINGS, Hans (1998): *Supermodernismo. Arquitectura en la era de la globalización*, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona. Versión original: *Supermodernism. Architecture in the Age of Globalization*, NAI Publishers, Rotterdam, 1998. ISBN: 8425217512.

IGLESIAS, Helena y Mc CLEARY, Peter (1997): *Robert Le Ricolais, Visiones y Paradojas*, Fundación Cultural COAM, Madrid. Traducción: Isabel Larrauri y Asocoados Translator, S.L. ISBN: 84-88496-20-6.

ITO, Toyo (1997): "Tarzanes en el bosque de los medios", en revista 2G, n.º 2 Toyo Ito Sección 1997, pp. 121-144, Gustavo Gili, Barcelona. ISSN: 1136-9647.

— (2000): "La Mediateca de Sendai. Informe sobre su proceso de construcción", en *Toyo Ito. Escritos*, pp. 217-238, Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, Murcia. Traducción al castellano de Maite Shigeko Suzuki. Revisión de Joaquín Alvado y Enrique Nieto. ISBN: 84-89882-12-6.

ITO, Toyo y SASAKI, Mutsuro (2001a): "Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000", en *Global Architecture Detail*, GA International ADA Edita, Tokyo. Traducción al inglés de Hiroshi Watanabe. ISBN 4871402525.

ITO, Toyo (2001b): "Dividing Versus making Continuous", en *Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000*, Global Architecture Detail, pp. 4-7, GA International ADA Edita, Tokyo. Traducción al inglés de Hiroshi Watanabe. ISBN 4871402525.

JENCKS, Charles (1975): *Nuevos caminos de la arquitectura. Arquitectura 2000. Predicciones y métodos*, Editorial Blume, Barcelona. Versión original: *Architecture 2000*, Studio Vista, Londres, 1971. Primera edición en castellano: 1975. ISBN: 84-7031-231-6.

— (1997a): “Nonlinear Architecture. New science=New architecture?”, en revista *Architectural Design* vol. 67, n.º 9/10, p. 7, VCH Publishers, Chichester, Inglaterra, septiembre/octubre 1997. ISSN: 0003-8504.

— (1997b): “Complexity definition and nature’s complexity”, en revista *Architectural Design*, vol. 67, n.º 9/10, pp. 8-9, VCH Publishers, Chichester, Inglaterra, septiembre/octubre 1997. ISSN: 0003-8504.

— (1997c): *The Architecture of the Jumping Universe. A polemic: how complexity science is changing architecture and culture*, Academy Editions, Londres. Edición revisada. Versión original: Academy Editions, Londres, 1995. ISBN: 0-471-97748-9.

— (2002): *The New Paradigm in Architecture: The language of Post-Modernism*, Yale University Press, Londres. ISBN: 0300095139.

JIMENEZ, Antonio (dir.) y DE PORRES RAMIREZ, Martín (dir.) (2001): *Eladio Dieste. 1943-1996*, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Departamento de Publicaciones de la Junta de Andalucía, Sevilla-Montevideo. Cuarta edición. Primera edición de 1996. ISBN: 84-8095-136-2.

JODIDIO, Philip (1980): “Frei Otto: towards a humane architecture”, en revista *Connaissance des arts*, n.º 336, pp. 38-43, Info Prese, Paris, febrero 1980. ISSN: 0293-9274.

— (1997): *Sir Norman Foster*, Editorial Benedikt Taschen Verlag GmbH, Colonia, Alemania, 1997. Traducción al castellano: Gonzalo Zubiaga. ISBN: 3-8228-8061-2.

— (2007): *Architecture Now! Vol.2*, Editorial Taschen, Colonia, Alemania. Edición original de 2002. ISBN: 978 3 8228 3792 4.

JORDÁ, Carmen (ed.) (2002a): *La vigencia de un legado. Eduardo Torroja*, Editorial SPUPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. ISBN: 84-7721-97-12.

— (2002b): “Texto introductorio: Historias próximas a Eduardo Torroja”, en *La vigencia de un legado. Eduardo Torroja*, pp. 19-58, Editorial SPUPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. ISBN: 84-7721-97-12.

JUAREZ, Antonio (2000): “Topology and organicism in the work of Louis I. Kahn”, en *Perspecta*, The Mit Press n.º 31, pp. 70-80, MIT Press, Massachussetts. ISSN: 0079-0958.

KAHN, Fazlur R. (1976): “Tall buildings”, en revista *Casabella* n.º 418, pp. 44-53, Electa, Milán, octubre 1976. ISSN: 0008-7181.

KAHN, Louis (1953): "Toward a Plan for Midtown Philadelphia", en revista *Perspecta: The Yale Architectural Press*, n.º 2, pp. 10-27, MIT Press, agosto 1953. ISSN: 0079-0958.

— (1962): "Community and sports centre, Trenton, New Jersey; Architect: L. Kahn", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 105, pp. 8-9, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

KAHN, Yasmin Sabina (2004a): *Engineering Architecture: The vision of Fazlur R. Kahn*, WW Norton & Company, Nueva York. ISSN: 0393731073.

— (2004b): "DR. Fazlur R. Kahn (1929-1982)", en revista *Structural Engineering International*, pp. 245-247, International Association for Bridge and Structural Engineering, Suiza, marzo de 2004. ISSN: 1016-8664.

KAMIN, Blair (2010): "The completion of the world's tallest skyscraper raises intriguing questions about the significance of this gleaming, spiraling form", en revista *Architectural Record*, pp. 78-85, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, agosto 2010. ISSN: 0003-858X.

KAPLICKI, Jan (1985): "La ténuité. Des avions aux stations spatiales", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 237, Groupe Expansion, Paris, febrero 1985. ISSN: 0003-8695.

— (2002): *Confessions: Principles, Architecture, Process, Life*, Wiley-Academy Press, West Sussex, Inglaterra. ISBN: 0471495417.

KAPPLINGER, Claus (1996): "Kulka & Königs: stade de Chemnitz [Chemnitz Stadium]; Winning architects: Peter Kulka, and Ulrich Königs", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 306, pp. 38-39, Jean-Michel Place, Paris, septiembre 1996. ISSN: 0003-8695.

KATAN, Elleda y KATAN, Roger (1962-1963): "Le fondamentalisme dans l'oeuvre de Louis Kahn", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui* n.º 105, pp. 1-3, Paris, Groupe Expansion, diciembre 1962/enero 1963. ISSN: 0003-8695.

KIKUTAKE, Kigonori y OTTO, Frei (1982): "Frei Otto", en revista *A+U* n.º 6 (141), pp. 17-42, A+U Publishing, Tokyo, junio 1982. ISSN: 0389-9160.

KLEIN, Richard (2007): "Vue(s) sur le patrimoine Exhibition of Jean Prouvé's 'maisons tropicales' at the Pompidou centre in Paris", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 370, pp. 40-42, Jean-Michel Place, Paris, mayo/junio 2007. ISSN: 0003-8695.

KOMENDANT, August (1975): *18 years with Architect Louis I. Kahn*, Aloray Publisher, Englewood, Nueva Jersey. ISBN: 0-913690-06-6.

KOOLHAAS, Rem (1994): *Delirious New York: a retroactive manifesto for Manhattan*, The Monacelli Press, Nueva York/010 Publishers, Rotterdam. Versión original: Academy Editions, Londres, 1978. ISBN: 1885254008.

— (1995a): “Koolhaas: Congrexpo a Lille [Euralille Congrexpo, or Grand Palais]”, en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 298, pp. 83-107, Jean-Michel Place, Paris, abril 1995. ISSN: 0003-8695.

KOOLHAAS, Rem y LUCAN, Jacques (1995b): “Congrexpo a Lille [Congrexpo at Lille]; Architects: Rem Koolhaas, of Office for Metropolitan Architecture”, en revista *Domus*, n.º 774, pp. 7-26, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1995. ISSN: 0012-5377.

KOOLHAAS, Rem y MAU, Bruce (1997): *S, M, L, XL*, Benedict Taschen Verlag GmbH, Colonia, Alemania. Primera publicación: The Monacelli Press, Nueva York, 1995. ISBN: 3-8228-7743-3.

KOOLMAN, Jan y ROEHM, Klaus-Heinrich (2005): *Color Atlas of Biochemistry*, Editorial Thieme, Stuttgart. Segunda edición revisada y ampliada. Traducción al inglés: Michael Robertson. Primera edición en alemán: *Taschenatlas der Biochemie*, Georg Thieme Verlag, 1994. ISBN 3-13-100372-3.

KOYRÉ, Alexandre (1990): *Estudios Galileanos*, Siglo veintiuno editores S.A., México D.F. Quinta edición. Primera edición en castellano de 1980. Versión original: *Études galiléennes*, Hermann éditeurs des sciences et des arts, Paris, 1966. Traducción al castellano de Mariano González Ambóu. ISBN: 84-323-0388-7.

KROLL, Lucien (1982): “Ordinateurs et systèmes constructifs”, en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 223, pp. 10-15, Groupe Expansion, Paris, octubre 1982. ISSN: 0003-8695.

KUEHNEL, Wolfgang (2003): *Color Atlas of Cytology, Histology, and Microscopic Anatomy*, Editorial Thieme, Stuttgart - New York. Cuarta edición revisada y ampliada. Primera edición en alemán: *Taschenatlas der Zytologie, Histologie und mikroskopischen Anatomie*, 1950. ISBN 3-13-562404-8.

KUMA, Kengo (1999): “El período del caos. Paisaje digital”, en revista *Quaderns*, n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 126-131, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

KWINTER, Sanford (ed.) (2002): *Rem Koolhaas. Conversaciones con estudiantes*, Gustavo Gili S.A., Barcelona. Versión original: *Rem Koolhaas. Conversations with students*, Architecture at Rice Publications y Princeton University Press, Nueva York, 1996. Traducción al castellano: Víctor Ténez. ISBN: 84-252-1890-X.

LAVALOU, Armelle (ed.) (2005): *Conversaciones con Jean Prouvé*, Editorial Gustavo Gili SA, Barcelona. Versión original: *Jean Prouvé par lui-même*, Editions du Linteau, 2001. Traducción al castellano de Núria Pujol i Valls. ISBN: 84-252-1995-7.

LE RICOLAIS, Robert (1963): "Trente ans de recherches sur les structures", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 108, pp. 85-101, Groupe Expansion, Paris, junio/julio 1963. ISSN: 0003-8695.

— (1968): "La nature des choses", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 141, pp. 58-61, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

LE RICOLAIS, Robert y GIURGOLA, Aldo (1969): "La nature des choses", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 142, pp. 4-5, Groupe Expansion, Paris, febrero/marzo 1969. ISSN: 0003-8695.

LE RICOLAIS, Robert (1973): "Survey of works; Structural Research 1935-1971", en revista *Zodiac*, n.º 22, pp. 1-56, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

LEAL, José F. (2011): "La mediateca de Sendai, bastión arquitectónico en medio del desastre", *El Mundo.es* [Internet] 15 de marzo de 2011. Disponible en <<http://www.elmundo.es/elmundo/2011/03/15/suvienda/1300217897.html>> [Acceso: 8 de junio de 2011].

LEHN, Jean-Marie (2011): "La química, ciencia y arte de la materia", en revista *El Correo de la Unesco*, pp. 7-9, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Paris, enero/marzo 2011. ISSN: 2220-2307.

LEPIK, Andres (2005): "Searching for the Limits: The Buiding Type Skyscraper at the beginning of the 21st Century", en revista *A+U*, n.º 421 "Tall buildings", pp. 16-25, A+U Publishing, Tokyo, octubre 2005. ISSN: 0389-9160.

LEUBKEMAN, Christopher (1992): "Form Swallows Function", en revista *Progressive Architecture*, vol. 73, n.º 5, pp. 106-109, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, mayo 1992. ISSN: 0033-0752.

LIANG, Binyong y TAMM, Lukas (2007): "Structure of outer membrane protein G by solution NMR spectroscopy", Department of Molecular Physiology and Biological Physics, University of Virginia. Editado por Adriaan Bax, National Institutes of Health.

PNAS (Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America), vol. 104, n.º 41, pp. 16140-16145, Octubre 2007. Disponible en Internet <<http://www.pnas.org/content/104/41/16140.full.pdf+html>>. [Acceso: 12 de junio de 2011].

LICATA, Ignazio (ed.) y SAKAJI, Ammar (ed.) (2008): *Physics of Emergence and Organization*, World Scientific Co. Pte. Ltd., Singapur. ISBN: 981-277-994-9.

LIDDELL, Ian (2000): "The construction of the Millennium Dome, London", en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 1040-1043, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

LINKWITZ, K. (1972): "Photogrametric and Computational Work for the Olympic Roofs, Munich", en revista *Zodiac*, n.º 21, pp. 76-81, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

LIVIO, Mario (2006): *La proporción áurea. La historia de PHI, el número más sorprendente del mundo*, editorial Ariel, Barcelona. Versión original: *The golden ratio. The story of PHI, the world's most astonishing number*, Broadway Books, Nueva York, 2002. Traducción al castellano: Daniel Aldea Rosell e Irene Muzas Calpe. ISBN: 978-84-344-4495-X.

LLEDO, Emilio (1984): "La máquina de la ciudad", en *Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad*, pp. 13-24, Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid. ISBN: 84-7433-312-1.

LOMBARD, François (1971): "Concours international du Plateau Beaubourg", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 157, pp. VI-X, Groupe Expansion, Paris, agosto/setiembre 1971. ISSN: 0003-8695.

LOPEZ ANTUNEZ, Luis y AMENDOLLA GASPARO, Luis (il.) (1970): *Atlas de anatomía humana*, Editorial Interamericana, México D.F. ISBN: 9788472421684.

LOPEZ, Rafael (2002): "Don Eduardo Torroja, tal como yo lo conocí", en *La vigencia de un legado. Eduardo Torroja*, pp. 95-118, Editorial SPUPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. ISBN: 84-7721-97-12.

LOWES, D. J. (1967): "Wind pressures on buildings", en revista *The Arup Journal*, pp. 14-16, Ove Arup Partnership, Londres, marzo 1967. ISSN: 0951-0850.

LU, Yung-Chen (1976): *Singularity Theory and an introduction to Catastrophe Theory*, Springer-Verlag, Nueva York. ISBN: 0-387-90221-X.

LUBELL, Sam (2003): "Taipei 101 tower aims for height, but also safety; Architects: C Y Lee & Partners", en revista *Architectural Record*, vol. 191, n.º 11, p. 36, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, noviembre 2003. ISSN: 0003-858X.

LUCAN, Jacques (1994): "De Guadet a Kahn: el tema de la sala", en *Louis I. Kahn*, pp. 93-102, Ediciones del Serbal, Barcelona. Traducción: María Cristina Romanini. ISBN: 84-7628-123-4.

LYALL, Sutherland (2002): *Maestros de la estructura. La ingeniería en las construcciones innovadoras*, Editorial Blume, Barcelona. Versión original: *Masters of Structure*, Laurence King Publishing Ltd, Londres, 2002. Traducción al castellano: Rosa Cano Camarassa. ISBN: 84-95939-12-6.

MAFFEI, Andrea (2000-2001): "Toyo Ito. La mediateca di Sendai: un organismo scomposto [Toyo Ito. The mediatheque in Sendai: an unseemly organism]", en revista *Casabella*, vol. 64, n.º 684/685, pp. 144-165, Electa, Milán, diciembre 2000/enero 2001. ISSN: 0008-7181.

MAKOWSKI, Z.S. (1972): "Three-Dimensional Structures. A survey of buildings completed in recent years", en revista *Zodiac*, n.º 21, pp. 100-131, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

MALO, Alvaro (1994): "La tectónica de las formas", en *Louis I. Kahn*, pp. 57-68, Ediciones del Serbal, Barcelona. Traducción: María Cristina Romanini. ISBN: 84-7628-123-4.

MANDELBROT, Benoît (1983): *The fractal geometry of nature*, W. H. Freeman & Co., San Francisco. ISBN: 0716711869.

— (1996): *Los objetos fractales: forma, azar y dimensión*, Círculo de lectores, Barcelona. Versión original: *Fractals: Form, Chance and Dimension*, W.H.Freeman & Co., 1977. Traducción al castellano: Joseph Llosa. ISBN: 842265640X.

MANGIN, David (1987): "La Grande Arche de la Défense", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 252, pp. 66-79, Groupe Expansion, Paris, septiembre 1987. ISSN: 0003-8695.

MANNING, Martin (1983): "Renault parts distribution centre, Swindon: the civil and structural engineering; Architects : Foster Associates", en revista *The Arup Journal*, vol. 18, n.º 3, pp. 2-5, Ove Arup Partnership, Londres, septiembre 1983. ISSN: 0951-0850.

MANRUBIA, Susanna; MIKHAILOV, Alexander y ZANETTE, Damián (2004): *Emergence of Dynamical Order*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapur. ISBN: 981-238-803-6.

MARTINEZ GARRIDO, Miguel (1987): *La dislocación como instrumento de orden en la Arquitectura Posmoderna*, tesis doctoral presentada en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid. Director: Francisco Javier Saenz de Oiza.

MATURANA, Humberto y VARELA, Francisco (1998): *De Máquinas y Seres Vivos: Autopoiesis: la organización de lo vivo*, Editorial Universitaria S.A., Santiago de Chile. Quinta edición. Primera edición: 1973. ISBN: 956-11-1211-6.

Mc CLEARY, Peter (1973): "Some Structural Principles Exemplified in the Work of Le Ricolais", en *Zodiac*, n.º 22, pp. 57-69, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

Mc CLEARY, Peter; IGLESIAS, Helena; DEL REY, Luis y HUMANES, Alberto (1997a): *Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*, Fundación Cultural COAM, Madrid. Traducción: Isabel Larrauri y Asocoados Translator, S.L. ISBN: 84-88496-20-6.

Mc CLEARY, Peter (1997b): "Robert Le Ricolais, la búsqueda de la idea indestructible", en: *Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*, pp. 21-30, Fundación Cultural COAM, Madrid. Traducción: Isabel Larrauri y Asocoados Translator, S.L. ISBN: 84-88496-20-6.

— (1997c): "Robert Le Ricolais", en *Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*, pp. 39-41, Fundación Cultural COAM, Madrid. Traducción: Isabel Larrauri y Asocoados Translator, S.L. ISBN: 84-88496-20-6.

Mc Gowan, Rory y Pugh, Robert (1995): "Lille Grand Palais: Zenith/Congres/Expo; Architects: Rem Koolhaas", en revista *The Arup Journal*, vol. 30, n.º 4, pp. 18-23, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

MELVIN, Jeremy (2001): "Building profile: Sendai Mediatheque; Architects: Toyo Ito Architect & Associates", en revista *Architectural Design*, vol. 71, n.º 5, pp. 104-108, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

— (2008a). "Height: Between possibility and responsibility", en revista *Architectural Review*, n.º 1340, pp. 38-41, Emap Construct, Londres, octubre 2008. ISSN: 0003-861X.

— (2008b): "Burj Dubai, Dubai, United Arab Emirates. Skidmore, Owings and Merrill", en revista *Architectural Review*, n.º 1340, pp. 80-83, Emap Construct, Londres, octubre 2008. ISSN: 0003-861X.

— (2010): “On a clear day, you can see Iran from the Burj Khalifa [originally Burj Dubai]; Architects: Skidmore Owings & Merrill”, en revista *Architectural Review*, vol. 227, n.º 1356, pp. 19-20, Emap Construct, Londres, febrero 2010. ISSN: 0003-861X.

MENARD, Jean-Pierre (2004) “Details. Structures dynamiques [Details. Dynamic structures]”, en revista *Moniteur Architecture AMC*, n.º 146, pp. 114-134, Publications du Moniteur, Paris, octubre 2004. ISSN: 0998-4194.

MERKEL, Jayne (2003): “Along the Thames, Foster and Partners puts a new twist on government and gives green a different shape with the highly accesible London City Hall”, en revista *Architectural Record*, vol. 191, n.º 2, pp. 111-123, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, febrero 2003. ISSN: 0003-858X.

— (2008): “Practice Profile - Pelli Clarke Pelli”, en revista *Architectural Design*, n.º 6 “Neoplastic design”, pp. 106-113, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

MIDDLETON, Robin (1972): “Munich and Olympic Games”, en revista *Architectural Design*, vol. XLII, pp. 477-489, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres, agosto 1972. ISSN: 0003-8504.

MILLIKEN, Barry (1982): “Le defi de la conception assistée par ordinateur”, en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 223, pp. 6-9, Groupe Expansion, Paris, octubre 1982. ISSN: 0003-8695.

MINKE, Gernot (1968): “Montréal 67”, en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 141, pp. 36-41, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

— (1972): “Tensegrity-Tragwerke. Ulm 1970-71”, en revista *Zodiac*, n.º 21, pp. 132-145, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

MINUTILLO, Josephine (2010): “Beyond limits. The Burj Khalifa's designers tackle extreme height and extreme climate to create a landmark for the 21st century”, en revista *Architectural Record*, pp. 89-92, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, agosto 2010. ISSN: 0003-858X.

MOISSET, Inés (1999): “Complejidad, fractales, arquitectura”, en revista *Quaderns*, n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 132-135, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

MOLITOR, Joseph (1960): “Alfred Newton Richards Medical Research Building. University of Pennsylvania, Philadelphia, Pa. Louis I. Kahn, F.A.I.A.”, en revista *Architectural Record*, n.º 8, pp. 149-156, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, agosto 1960. ISSN: 0003-858X.

MONEO, Rafael (1968): "Un viejo tema", en revista *Nueva forma, arquitectura, urbanismo, diseño, ambiente, arte*, n.º 32, Nueva Forma, Madrid, septiembre de 1968. ISSN: 0029-5825.

— (1993): "Geometría como única morada", en revista *AV monografías*, n.º 44 "Louis I. Kahn", pp. 2-3, noviembre/diciembre 1993, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

MONOD-HERZEN, E. (1927) : *Principes de Morphologie Générale*, Editions Gauthier-Villars, Paris.

MONTANER, Josep Maria (1999): *Después del movimiento moderno: Arquitectura de la segunda mitad del siglo XX*, Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona. Cuarta edición. Primera edición: 1993. ISBN: 8425217822.

— (2002): *Las formas del siglo XX*, Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona. ISBN: 8425218217.

MORITA, Kazutoshi (2002): "Japanese scene: 11. Sendai Mediatheque; Architects: Toyo Ito Architect & Associates", en revista *A+U*, n.º 4 (379), pp. 110-111, A+U Publishing, Tokyo, abril 2002. ISSN: 0389-9160.

MORITZ, Karsten (2000): "Membrane materials in building", en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 1050-1058, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

MORTEO, Enrico y ROMANELLI, Marco (1998): "The modern chair: project, production, and reproduction", en revista *Domus*, n.º 697, pp. 76-110, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1988. ISSN: 0012-5377.

MUÑOZ SALINAS, Francisco (2000): *Una contribución a la modelización y virtualización numérica de estructuras arquitectónicas. (Una aplicación práctica a la estructura del Sagrario de la Catedral de Ciudad de México)*, tesis doctoral presentada en el Departament d'Estructures a l'Arquitectura, Universitat Politècnica de Catalunya. Director: Javier López-Rey Laurens. ISBN: 9788469256176.

MUMFORD, Milton (Dir.); EURICH, Alvin (Dir.); BEDFORD, Clay (Dir.); DOWNS, James (Dir.) (1967): *SCSD: the Project and the Schools. A report from Educational Facilities Laboratories*, Educational Facilities Laboratories Inc., Nueva York, mayo 1967.

NAVARRO, José Ramón (2002): "Eduardo Torroja, la arquitectura y los arquitectos", en *La vigencia de un legado. Eduardo Torroja*, pp. 183-206, Editorial SPUPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. ISBN: 84-7721-97-12.

NAVARRO BALDEWEG, Juan (1993): "Del silencio a la luz", en revista *AV monografías*, n.º 44 Louis I. Kahn, pp. 4-5, Madrid, noviembre/diciembre 1993, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

NETTER, Frank (2001): *Atlas de Anatomía Humana*, Masson S.A., Barcelona. Segunda edición, segunda impresión. Versión original: *Atlas of Human Anatomy*, Icon Learning Systems, Nueva Jersey, 1989. ISBN: 0-914168-86-X.

NIETO, Justo; AGUILAR, José; MARTINEZ, Arturo y JORDÁ, Carmen (2002): "Eduardo Torroja, la vigencia de un legado. Apertura institucional", en *La vigencia de un legado. Eduardo Torroja*, pp. 69-76, Editorial SPUPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. ISBN: 84-7721-97-12.

NOURRIGAT, Elodie (2001): "Le Mythe de la colonne. Médiathèque Municipale de Sendai (Japon)", en revista *Techniques & Architecture*, n.º 454, Mediatheques [Multi-media libraries], pp. 56-63, Jean-Michel Place, Paris, junio/julio 2001. ISSN: 0373-0719.

OBRIST, Hans Ulrich (2009): *Rem Koolhaas, conversaciones con Hans Ulrich Obrist*, Gustavo Gili, Barcelona. Versión original: *Rem Koolhaas. Hans Ulrich Obrist. The conversation*, Verlag der Buchhandlung Walther König, Colonia, 2006. Traducción al castellano: Jorge García de la Cámara. ISBN: 9788425222078.

OGILVY, Stanley (1990): *Excursions in geometry*, Dover Publications Inc., Nueva York. Versión original: Oxford University Press, Nueva York, 1969. ISBN: 0-486-26530-7.

OTTO, Frei y CANDELA, Felix (1956): "Structures: whole issue on the latest techniques, especially roofs -hanging, shell, parabolic, etc.- and space frames and other methods of steel construction", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui* n.º 64, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

OTTO, Frei (1958): *Cubiertas colgantes*, Editorial Labor S.A., Barcelona. Traducción al castellano: Francisco Folguera.

— (1962): "Imagination and architecture", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui* n.º 102, pp. 89-93, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

— (1963): "Pavilions for international garden exhibition, Hamburg", en revista *Architectural Design*, pp. 539-542, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres. ISSN: 0003-8504.

— (1968): "Tensile structure, a development project carried out at the Technical University, Stuttgart", en revista *Architectural Design*, pp. 179-182, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres. ISSN: 0003-8504.

OTTO, Frei; HAPPOLD, Edmund; RICE, Peter; GRUT, Lennard; CROSBY, Theo; BURKHARDT, Berthold; KENDEL, Hermann y KAMIYA, Koji (1971). "Special issue: Frei Otto at work", en revista *Architectural Design*, vol. XLI, pp.137-167, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres. ISSN: 0003-8504.

OTTO, Frei y BUBNER, Ewald (1973): "Introduction to the principles of lightweight construction", en revista *Techniques & Architecture*, n.º 291, pp. 29-39, Jean-Michel Place, Paris, febrero 1973. ISSN: 0373-0719.

OTTO, Frei (1982): "Frei Otto - recent projects", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 223, pp. 48-59, Groupe Expansion, Paris, octubre 1982. ISSN: 0003-8695.

— (1988): "Une recherche experimentale", en revista *Techniques & Architecture*, n.º 379, pp. 35-37, Jean-Michel Place, Paris, agosto/septiembre 1988. ISSN: 0373-0719.

— (1999): "On nature, the model", en revista *Domus* n.º 818, pp. 45-48, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1999. ISSN: 0012-5377.

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. Traducción al inglés: Michael Robinson. ISBN: 3-930698-66-8.

PAGES, Yves (2001): "Eladio Dieste: innovation et materiaux traditionnels", en revista *Moniteur Architecture AMC*, n.º 115, pp. 28-32, Publications du Moniteur, Paris, abril 2001. ISSN: 0998-4194.

PAOLINI, Margherita (1972): "Tensostrutture in cavi di acciaio", en revista *Zodiac*, n.º 21, pp. 146-164, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

PAPADAKIS, Andreas (Publisher), CAMPBELL COLE, Barbie (Ed.) y ELIAS ROGERS, Ruth (Ed.) (1985): *Richard Rogers and Architects*, Architectural Monographs, Nueva York. ISBN: 0-312-68207-7.

PAPADEMETRIOU, Peter (1992): "TWA's Influence", en revista *Progressive Architecture*, vol. 73, n.º 5, pp. 102-105, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, mayo 1992. ISSN: 0033-0752.

— (2001): "Eero Saarinen. TWA Terminal. Il calcolo e l'invenzione", en revista *Casabella*, vol. 65, n.º 695-696, pp. 21-33, Electa, Milán. ISSN: 0008-7181.

PARK, Jonathan (1976a): "Lightweight heavies", en revista *Architectural Design*, vol. XLVI, n.º 9, pp. 518-521, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres. ISSN: 0003-8504.

— (1976b): “Lightweight and tensile”, en revista *Architectural Design*, vol. XLVI, n.º 12, pp. 745-748, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres. ISSN: 0003-8504.

PEARSON, Clifford (1999): “Other than their status as the world’s tallest buildings, what else do Cesar Pelli’s Petrona Towers have going for them?”, en revista *Architectural Record*, vol. 187, n.º 7, pp. 92-102, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, enero 1999. ISSN: 0003-858X.

— (2008): “National Swimming Center. PTW Architects, CSCEC+Design and Arup”, en revista *Architectural Record*, vol. 196, n.º 1, pp. 100-103, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, julio 2008. ISSN: 0003-858X.

PEÑIN LLOBELL, Alberto (2007): *La transformación del proyecto arquitectónico durante el Proceso Constructivo. La Opera de Sydney y el Centro Pompidou de Paris*, tesis doctoral presentada en el Departament de Projectes Arquitectònics, Universitat Politècnica de Catalunya. Director: Moisés Gallego Olmos. ISBN: 9788469107638.

PEPCHINSKI, Mary (1998): “With its naturally ventilated skin and gardens in the sky, Foster and Partners’ Commerzbank reinvents the skyscraper”, en revista *Architectural Record*, vol. 186, n.º 1, pp. 68-79, McGraw-Hill Companies Inc., Londres, enero 1998. ISSN: 0003-858X.

PÉREZ ESCOLANO, Victor (1998): “Rigore e autenticità nell’opera di Eladio Dieste”, en revista *Lotus*, n.º 98, Elemond S.p.A., pp. 84-110, Milán, setiembre 1998. ISSN: 1124-9064.

PEREZ LATORRE, José Manuel (2002): “De la disolución de la estructura a la construcción del paisaje”, en revista *Ingeniería y territorio*, n.º 58, pp. 44-53, tercera época, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona. ISSN: 1695-9647.

PEREZ PIÑERO, Emilio (1968): “Structures réticulées”, en revista *L’Architecture d’Aujourd’hui*, n.º 141, pp. 76-81, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

PERLES, Pedro (2003): *Temas de estructuras especiales*, Nobuko, Buenos Aires. ISBN: 987-9474-15-5.

PETERS, Nils (2006): *Jean Prouvé*, Taschen GmbH, Colonia, Alemania. Traducción al castellano: Amparo Conde. ISBN: 3-8228-4877-8.

PIANO, Renzo (1973a): “Survey of Works” en revista *Zodiac*, n.º 22, pp. 126-147, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

PIANO, Renzo; ROGERS, Richard y asociados (1973b): "Centre Culturel du plateau Beaubourg, Paris. Interview de R. Rogers et R. Piano par la Rédaction de l'A.A.", en revista *L'Architecture d'aujourd'hui*, n.º 168, pp. 34-43, Groupe Expansion, Paris, julio/agosto 1973. ISSN: 0003-8695.

PIANO, R. y ROGERS, R. (1977): "Centre Pompidou", en revista *The Arup Journal*, vol. 12, n.º 2, pp. 32-35, Ove Arup Partnership, Londres, junio 1977. ISSN: 0951-0850.

PIANO, Renzo y PICCHI, Francesca (1998): "Prouve, the inventor: 32 patents. Renzo Piano: memories of Prouve", en revista *Domus*, n.º 807, pp. 52-66, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1998. ISSN: 0012-5377.

PICCHI, Francesca (2001): "Jean Prouve, the anti-aesthete", en revista *Domus*, n.º 839, pp. 21-24, Editoriale Domus, Milán, julio/agosto 2001. ISSN: 0012-5377.

PICON, Antoine; PIANO, Renzo y ROGERS, Richards (1987): *Du plateau Beaubourg au Centre Georges Pompidou. Renzo Piano, Richard Rogers, Entretien avec Antoine Picon*, Editions du Centre Pompidou, Paris. ISBN: 285850377X.

POLLOCK, Naomi (2001): "Toyo Ito imagines what the future of information and digital technologies might be, then builds it in Sendai, Japan, at Mediatheque", en revista *Architectural Record*, vol. 189, n.º 5, pp. 191-201, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, mayo 2001. ISSN: 0003-858X.

— (2005): "Toyo Ito fuses structure and wrapper in a network of concrete trees at the new Tod's Omotesando Building in Tokyo", en revista *Architectural Record*, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, junio 2005. ISSN: 0003-858X.

PORTOGHESI, Paolo (1999). "Learning from nature", en revista *Domus*, n.º 818, pp. 3-16, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1999. ISSN: 0012-5377.

POUSSE, J. F. (1987): "SOM. La prodigalité moderne", en revista *Techniques & Architecture*, n.º 372, pp. 62-69, Jean-Michel Place, Paris, junio/julio 1987. ISSN: 0373-0719.

POWELL, Kenneth (2006): *Richard Rogers: Architecture of the Future*, Birkhauser Verlag AG, Basilea. ISBN: 3-7643-7049-7.

— (2008): *Richard Rogers Complete Works*, Phaidon Press, Londres. ISBN: 0714848662.

POZO, Florencio del (1968): *Eduardo Torroja visto por uno de sus discípulos*, en revista *Nueva forma, arquitectura, urbanismo, diseño, ambiente, arte*, n.º 32, Nueva Forma, Madrid, septiembre de 1968. ISSN: 0029-5825.

PRIGOGINE, Ilya y NICOLIS, G. (1977): *Self-Organization in Nonequilibrium System: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*, John Wiley & Sons Inc., Nueva York. ISBN: 0-471-02401-5.

PRIGOGINE, Ilya (1995): “¿Qué es lo que no sabemos?”, Conferencia pronunciada en el Forum Filosófico de la UNESCO. Traducción al castellano de Rosa María Cascón. Disponible en Internet <www.unesco.org/phiweb/uk/1rpu/nobel/presnobel.html>. [Acceso: 02 de junio de 2007].

— (1997): *El fin de las certidumbres*, Andres Bello, Santiago de Chile. Quinta edición. Primera edición en castellano: 1996. Versión original: *La fin des certitudes*, Editions Odile Jacob, 1996. Versión en castellano: Pierre Jacomet. ISBN: 956-13-1430-4.

PRIGOGINE, Ilya; STENGERS, Isabelle (2004): *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Alianza Editorial, Madrid. Primera edición: 1979. Versión original: *La Nouvelle Alliance*, 1978. Versión en castellano de Manuel García Velarde. ISBN: 8420623687.

PRIGOGINE, Ilya (2009): *Las leyes del caos*, Drakontos Bolsillo, Barcelona. Segunda edición. Primera edición en castellano: 1999. Versión original: *Les lois du chaos*, 1993. Traducción al castellano: Crítica S.L. ISBN: 978-84-8432-239-9.

PTW ARCHITECTS (2004): “Centro nacional de natación, Pekín”, en revista *AV Monografías*, n.º 109-110, pp. 98-101, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

— (2008): “Beijing National Aquatics Center. PTW Architects + CSCEC + Arup”, en revista *A+U*, n.º 454, pp. 112-129, A+U Publishing, Tokyo, julio 2008. ISSN: 0389-9160.

— (2010): “Water Cube, Pekin, Chine”, en revista *Le Moniteur Architecture AMC*, Suplemento, pp. 32-35, Publications du Moniteur, Paris, diciembre 2010. ISSN: 0998-4194.

PUENTE, Moisés (ed.) (2010): *Utzon, Jørn. Conversaciones y otros escritos*, Gustavo Gili S.A., Barcelona. ISBN: 978-84-252-2206-1.

QUINTON, Maryse (2010): “Le renouveau prometteur des métiers plastiques”, en revista *Le Moniteur Architecture AMC*, Suplemento, pp. 6-11, Publications du Moniteur, Paris, diciembre 2010. ISSN: 0998-4194.

RABENECK, A. (1971): “Jean Prouve”, en revista *Architectural Design*, pp. 431-432, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres. ISSN: 0003-8504.

RASTORFER, Darl (1985a): “William J. LeMessurier’s super-tall structures: A search for the ideal”, en revista *Architectural Record*, pp. 144-151, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, enero 1985. ISSN: 0003-858X.

— (1985b): “William J. LeMessurier’s super-tall structures: architecture/engineering”, en revista *Architectural Record*, pp. 150-157, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, febrero 1985. ISSN: 0003-858X.

RAWSTORNE, Peter (1972): “Piano+Rogers. Centre Beaubourg”, en revista *Architectural Design*, vol. XLII, pp. 407-412, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres, julio 1972. ISSN: 0003-8504.

READ, Tony y O`BRIEN, Turlogh (1980): “Coated fabrics for lightweight structures”, en revista *The Arup Journal*, vol. 15, n.º 3, pp. 14-18, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

REI, Dario (1978): *La revolución científica. Ciencia y sociedad en Europa entre los siglos XV y XVII*, Icaria Editorial, Barcelona. Versión original: *La rivoluzione scientifica: Scienza e società in Europa tra il XV e il XVII secolo*, Società Editrice Internazionale, Turin, 1973. Traducción al castellano de Rossend Arqués. ISBN: 84-7426-038-8.

REIN, Alfred y WILHELM, Viktor (2000): “Membrane construction”, en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 1044-1049, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

REINER, Saul; SVENSSON, Holger y ANDRÄ, Hans-Peter (2007): “Eminent Structural Engineer: Dr. Fritz Leonhardt (1909-1999)”, en revista *Structural Engineering International*, pp. 94-96, International Association for Bridge and Structural Engineering, Suiza, enero de 2007. ISSN: 1016-8664.

RICE, Peter (1971): “Notes on the design of cable roofs”, en revista *The Arup Journal*, vol. 6, n.º 4, pp. 6-10, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

— (1977): “La structure metallique” en “Beaubourg” de Hélène Demoriane y François Barré, en revista *L`Architecture d`Aujourd`hui*, n.º 189, pp. 60-65, Groupe Expansion, Paris, enero 1977. ISSN: 0003-8695.

— (1980): “Lightweight structures”, en revista *Arup Journal*, vol.15, n.º 3, pp. 2-5, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1980. ISSN: 0951-0850.

— (1998a) : *Mémoires d`un ingénieur*, Editorial Le Moniteur, Paris, 1998. Versión original: *An Engineer Imagines*, Ellipsis London Limited, Londres, 1994. Traducción al francés: Luc Baboulet. ISBN: 2-281-19105-2.

— (1998b) : “Le rôle de l`ingénieur”, en revista *Moniteur Architecture AMC*, n.º. 93, pp. 54-55, Publications du Moniteur, Paris, noviembre 1998. ISSN: 0998-4194.

RILEY, Terence (1996): *Light construction. Transparencia y ligereza en la arquitectura de los 90*, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona. Versión original: *Light construction*, The Museum of Modern Art, Nueva York, 1995. Traducción al castellano: Anadelia García. ISBN: 8425217121.

ROCCA, Alessandro (1993): "Peter Rice, poeta del brutalismo", en revista *Lotus*, n.º 78, pp. 6-39, Elemond S.p.A., Milán. ISSN: 1124-9064.

ROGERS, Richard (1998): *Cities for a small planet*, Basic Books, Colorado. Versión original 1997. ISBN: 0-8133-3553-1.

ROHAN, Timothy (2003): "From Microcosm to Macrocosm: The surface of Fuller and Sado's U.S. Pavillon at Montreal Expo'67", en revista *Architectural Design*, Surface Consciousness, n.º 2, pp. 50-56, Wiley, Chichester, Inglaterra, abril 2003. ISSN: 0003-8504.

ROSA, Joseph (2006): *Louis I. Kahn. 1901-1974. Espacio iluminado*, Taschen GmbH, Colonia, Alemania. Versión original: *Louis I. Kahn. 1901-1974. Enlightened space*, Taschen, 2006. Traducción al castellano: Manners Traduccions, Barcelona. ISBN: 978-3-8228-2875-5.

ROVIRA, Josep M. (Recop.) y MUNTADA, Anna (Recop.) (1988): *León Battista Alberti*, Editorial Stylos S.A., Barcelona. Recopilación y traducción: Josep M. Rovira y Anna Muntada. ISBN: 84-7616-009-7.

RUI-WAMBA, Javier (ed.) (2003a): *Eugène Freyssinet, un ingeniero revolucionario*, Fundación Esteyco, Madrid. Traducción al castellano: Màxim Serranos Soler. ISBN: 84-921092-9-7.

RUI-WAMBA, Javier (2003b): "El hormigón armado", en *Eugène Freyssinet, un ingeniero revolucionario*, pp. 99-146, Fundación Esteyco, Madrid. Traducción al castellano: Màxim Serranos Soler. ISBN: 84-921092-9-7.

SABINI, Maurizio (ed.) (1994a): *Louis I. Kahn*, Ediciones del Serbal, Barcelona. Traducción: María Cristina Romanini. ISBN: 84-7628-123-4.

— (1994b): "Louis I. Kahn y el Libro Cero de la Arquitectura", en *Louis I. Kahn*, pp. 15-56, Ediciones del Serbal, Barcelona. Traducción: María Cristina Romanini. ISBN: 84-7628-123-4.

SALVADORI, Mario (1968): *Torroja, pionero de la moderna arquitectura*, en revista *Nueva Forma*, Arquitectura, urbanismo, diseño, ambiente, arte, Nº32, Nueva Forma, Madrid, septiembre de 1968. ISSN: 0029-5825.

SALVADORI, Mario y HELLER, Robert (1997): *Estructuras para Arquitectos*, CP67 Editorial, Buenos Aires. Tercera edición. Versión original: *Structure in Architecture*, Prentice-Hall, Nueva Jersey, 1963. Traducción al castellano: Silvia Cristina Milicay. ISBN: 950-9575-14-3.

SANTOMAURO, Roberto (2008): *Tensoestructuras desde Uruguay*, Mastergraf, Montevideo.

SANZ BOTEY, José Luis (1998): *Arquitectura en el siglo XX. La construcción de la metáfora*, Montesinos, Barcelona. ISBN: 84-89354-65-0.

SARRABLO, Vicente (2004): "La construcción de formas complejas" en revista *Tectónica*, n.º 17, pp. 18-29, ATC Ediciones, Madrid. ISSN: 1136-0062.

SASAKI, Mutsuro (2001): "Structure of Sendai Mediatheque", en: *Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000*, Global Architecture Detail, GA International A.D.A. Edita, pp. 58-62, Tokyo. Traducción al inglés de Hiroshi Watanabe. ISBN 4871402525.

— (2002): "Structures légères: histoire d'une filiation", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 338, pp. 46-49, Jean-Michel Place, Paris, enero/febrero 2002. ISSN: 0003-8695.

SAUNDERS, Peter (1997): "Nonlinearity. What it is and why it matters", en revista *Architectural Design*, vol. 67, n.º 9/10, p. 52-57, VCH Publishers, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

SCULLY, Vincent (1962): *Louis I. Kahn*, George Braziller, Nueva York. LC 62-16265. NA737. K32S38.

— (1993): "Jehová en el Olimpo. Louis Kahn y el final del Movimiento Moderno", en revista *AV monografías*, n.º 44, Louis I. Kahn, pp. 6-15, Madrid, noviembre/diciembre 1993, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

SEMINO, Rinaldo (1973): "Survey of Works", en revista *Zodiac*, n.º 22, pp. 148-161, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

SERON-PIERRE, Catherine (2001): "Jean Prouve, 1901-1984", en revista *Moniteur Architecture AMC*, n.º 118, pp. 44-46, Publications du Moniteur, Paris, septiembre 2001. ISSN: 0998-4194.

SERRAINO, Pierluigi (2006): *Eero Saarinen, 1910-1961: un expresionista estructural*, Benedikt Taschen Verlag GmbH, Colonia, Alemania. Versión original:

Saarinen, 1910-1961: *a Structural Expressionist*, Taschen, Colonia, 2006. Traducción al castellano: Ana Típa Lizarraga. ISBN: 3-8228-2866-1.

SHAND, P. Morton (1940): "Robert Maillart, 1872-1940", en revista *Architectural Review*, vol. 88, n.º 526, pp. 81-86, Emap Construct, Londres, septiembre 1940. ISSN: 0003-861X.

SILVER, Nathan (1994): *The Making of Beaubourg. A Building Biography of the Centre Pompidou, Paris*, The MIT Press, Cambridge, Massachussets. ISBN: 0262193485.

SILVESTRI, Graciela (2000-2001): "Dieste: modernità senza conflitti?", en revista *Casabella*, vol. 64, n.º 684/685, pp. 60-68, Electa, Milán, diciembre 2000/enero 2001. ISSN: 0008-7181.

SKIDMORE; OWINGS y MERRILL (1971): "John Hancock Center, Chicago", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 157, pp. 18-19, Groupe Expansion, Paris, agosto/setiembre 1971. ISSN: 0003-8695.

SNOONIAN, Deborah (2003): "Good design no longer needs the 'green' modifier", en revista *Architectural Record*, vol. 191, n.º 2, p. 109, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, febrero 2003. ISSN: 0003-858X.

SOLA-MORALES, Ignasi (1984): "Teoría de la forma de la arquitectura en el Movimiento Moderno", en *Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad*, pp. 99-114, Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid. ISBN: 84-7433-312-1.

— (1993): "High tech. Funcionalismo o retorica?", en revista *Lotus*, n.º 78, Elemond S.p.A., Milán. ISSN: 1124-9064.

— (1995): *Diferencias. Topología de la arquitectura contemporánea*, Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona. ISBN: 84-252-1663-X.

SOLOMON, Susan (1984): "Beginnings [Trenton Bath House, Trenton (N.J.)]", en revista *Progressive Architecture*, n.º 12, vol. 65, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, diciembre 1984. ISSN: 0033-0752.

SONGEL, Juan María (2005): *Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*, tesis doctoral presentada en el Departamento de Composición Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Valencia. Director: Cecilio Sánchez-Robles Beltrán.

— (2008): *Frei Otto: conversacion con Juan Maria Songel*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2008. ISBN: 9788425222054.

— (2010): “Frei Otto y el debate sobre la génesis de la forma arquitectónica”, en revista *EGA: Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica* n.º 16, pp. 176-183, Valencia, España. ISSN: 1133-6137.

SORIA LOPEZ, Francisco Javier (2004): *Arquitectura y Naturaleza a finales del siglo XX (1980-2000). Una aproximación dialógica para el diseño sostenible en arquitectura*, tesis doctoral presentada en el Departament de Projectes Arquitectònics, Universitat Politècnica de Catalunya. Director: Luis Ángel Domínguez. ISBN: 846892542X.

SOWA, Axel (2002): “En quête d’une seconde nature. Rencontre avec Toyo Ito”, en revista *L’Architecture d’Aujourd’hui*, n.º 338, pp. 38-45, Jean-Michel Place, Paris, enero/febrero 2002. ISSN: 0003-8695.

SPUYBROEK, Lars y LOOTSMA, Bart (1997): “Nox/Aquatic Pavillion”, en revista *Domus*, n.º 796, pp. 28-33, Editoriale Domus, Milán. ISSN: 0012-5377.

SPUYBROEK, Lars (1998a): “Pabellón de Agua Dulce”, en revista *Quaderns* n.º 218: Rethinking Mobility, pp. 4-14, Col·legi d’Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

— (1998b): “Delta Expo, Haamstede, Pays Bas, Nox et K. Oosterhuis”, en revista *Techniques & Architecture*, n.º 437, pp. 76-79, Jean-Michel Place, Paris, abril 1998. ISSN: 0373-0719.

— (1998c): “Beachness”, en revista *Architectural Design*, vol. 68, n.º 11/12, pp. 35-39, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

— (2000): “Off the Road - 5speed”, en revista *L*, vol. 70, n.º 3, pp. 56-61, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

— (2001): “wetGRID/D-Tower”, en revista *A+U: Architecture and Urbanism*, n.º 370, pp. 27-33, A+U Publishing, Tokyo, julio 2001. ISSN: 0389-9160.

— (2002): “SoftOffice”, en revista *A+U: Architecture and Urbanism*, n.º 385, pp. 96-101, A+U Publishing, Tokyo, octubre 2002. ISSN: 0389-9160.

— (2004): *NOX: machining architecture*, Editorial Thames & Hudson, Londres. ISBN: 0 500 28519 5.

— (2008): *The Architecture of Continuity*, V2_/NAi Publishing, Rotterdam. ISBN: 978 90 5662 637 2.

— (2009): *Research and Design: The Architecture of Variation*, Editorial Thames & Hudson, Londres. ISBN: 978 0 500 34257 2.

STEADMAN, Philip (1984): “El mito del darwinismo arquitectónico”, en *Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad*, pp. 83-98, Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid. ISBN: 84-7433-312-1.

SUAY BELENGUER, Juan Miguel (2000a): “Principios geométricos en el diseño de las cometas tetraédricas”, en Revista *Al final del Hilo. Boletín de historia de la cometa*, n.º 1, pp. 20-32, Alicante. Disponible en Internet <[http://www.gerky.net/modules/Static_Docs/data/JuanMiguelSuayBelenguer/Al %20Final %20del %20Hilo/Boletin01.PDF](http://www.gerky.net/modules/Static_Docs/data/JuanMiguelSuayBelenguer/Al%20Final%20del%20Hilo/Boletin01.PDF)>. [Acceso: 06 de abril de 2009].

— (2000b): “Construcción de cometas tetraédricas con materiales sencillos”, en Revista *Al final del Hilo. Boletín de historia de la cometa*, n.º 1, pp. 33-41, Alicante. Disponible en Internet <[http://www.gerky.net/modules/Static_Docs/data/JuanMiguelSuayBelenguer/Al %20Final %20del %20Hilo/Boletin01.PDF](http://www.gerky.net/modules/Static_Docs/data/JuanMiguelSuayBelenguer/Al%20Final%20del%20Hilo/Boletin01.PDF)>. [Acceso: 06 de abril de 2009].

SUAY BELENGUER, Juan Miguel (2003): *Los precursores: de la cometa al aeroplano*. Disponible en Internet <[http://www.gerky.net/modules/Static_Docs/data/JuanMiguelSuayBelenguer/Precursores/Los %20precursores_de %20la %20cometa %20 al %20eroplano.pdf](http://www.gerky.net/modules/Static_Docs/data/JuanMiguelSuayBelenguer/Precursores/Los%20precursores_de%20la%20cometa%20al%20eroplano.pdf)>, [Acceso: 06 de abril de 2009].

SUDJIC, Deyan (2001): “Il vortice dell’informazione [The information vortex]; Architects: Toyo Ito”, en revista *Domus* n.º 835, pp. 36-59, Editoriale Domus, Milán, marzo 2001. ISSN: 0012-5377.

SUNER, Bruno (1989): “Ossature des nuages”, en revista *L’Architecture d’Aujourd’hui*, n.º 265, pp. 198-211, Groupe Expansion, Paris, octubre 1989. ISSN: 0003-8695.

— (1990): “Banque de Chine à Hong Kong”, en revista *L’Architecture d’Aujourd’hui*, n.º 270, pp. 120-126, Groupe Expansion, Paris, septiembre 1990. ISSN: 0003-8695.

SUZUKI, Akira (ed.) (2005): *Toyo Ito: Conversaciones con estudiantes*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona. Traducción al castellano: Moisés Puente Rodríguez. ISBN: 84-252-1997-9.

SUZUKI, Yuichi (1997): “De lo ecléctico a la fusión”, en revista *2G*, n.º 2 “Toyo Ito Sección 1997”, pp. 18-23, Gustavo Gili, Barcelona. ISSN: 1136-9647.

TALANQUER, Vicente (1996): *Fractus, fracta, fractal. Fractales, de laberintos y espejos*, Ed. Fondo de Cultura Económica Ltda., México D.F. ISBN 968-16-4372-0.

TANGE, Kenzo; SONE, Koichi; KAWAZOE, Noburu; SUZUKI, Ken; TAKEMURA, Shinichiro (1970): "Osaka 70", en revista *L'Architecture d'aujourd'hui*, n.º 152, pp. 97-112, Groupe Expansion, Paris, octubre/noviembre 1970. ISSN: 0003-8695.

TARRAGÓ, Salvador (1977): "Entre la estructura y la forma" en revista *A+U*, n.º 86, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

TATARKIEWICZ, Wladislaw (2001): *Historia de seis ideas*, Editorial Tecnos, Madrid. Sexta edición. Primera edición en castellano de 1987. Versión original: *Dzieje szeicin pojec*, 1976. Traducción: Francisco Rodríguez Martín. ISBN: 84-309-1518-4.

— (2004): *Historia de la estética III, la estética moderna 1400-1700*, Akal Ediciones S.A., Madrid. Versión original: 1962-67. Traducción: Danuta Kurzyca. ISBN: 8476006691.

— (2006): *Historia de la estética I, la estética antigua*, Akal Ediciones S.A., Madrid. Versión original: 1962-67. Traducción: Danuta Kurzyca y Rosa Mariño. ISBN: 8476002408.

TAYLOR, Jennifer (1997): "Transferencia internacional: Toyo Ito y la tectónica metafórica", en revista *2G*, n.º 2 "Toyo Ito Sección 1997", pp. 7-17, Gustavo Gili, Barcelona. ISSN: 1136-9647.

THOM, René (1987): *Estabilidad estructural y morfogénesis. Ensayo de una teoría general de los modelos*, Editorial Gedisa, Barcelona. Versión original: *Stabilité structurelle et morphogenèse*, Interéditions, Paris, 1972. Traducción al castellano: Alberto Bixio. ISBN: 9788474322651.

TIMOSHENKO, Stephen (1957a): *Resistencia de Materiales. Primera parte: Teoría Elemental y Problemas*, Espasa Calpe S.A., Madrid. Traducción al castellano: Tomás Delgado Pérez de Alba. Versión original: 1930.

TIMOSHENKO, Stephen (1957b): *Resistencia de Materiales. Segunda parte: Teoría y Problemas más Complejos*, Espasa Calpe S.A., Madrid. Traducción al castellano: Tomás Delgado Pérez de Alba. Versión original: 1930.

TIMOSHENKO, Stephen y GOODIER, J. N. (1951): *Theory of Elasticity*, Mc Graw-Hill, Nueva York. Segunda edición. Versión original de 1934.

TIMOSHENKO, Stephen (1983): *History of strength of materials*, Dover Publications Inc., Nueva York. Versión original: Mc Graw-Hill, Nueva York, 1953. ISBN: 0-486-61187-6.

TOFFLER, Alvin y TOFFLER, Heidi (1980): *La Tercera Ola*, Editorial Plaza y Janés, Barcelona. Versión original: *The Third Wave*, William Morrow, Nueva York, 1980. Traducción al castellano de Adolfo Martín. ISBN: 84-01-37066-3

TORNÉ, Lluís (2008): "Tensegriedad", en *Revista IPP*, n.º 1, febrero de 2008, Instituto de posturología y podoposturología, Barcelona. ISSN: 1988-8198. Disponible en Internet <http://www.ub.edu/revistaipp/l_torne.html> [Acceso: 01 de enero de 2008].

TORROJA, Eduardo (1960): *Razón y ser de los tipos estructurales*, Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, CSIC, Madrid.

TORROJA, José Antonio (2002): "El genio y el ingenio en la obra de Eduardo Torroja", en *La vigencia de un legado. Eduardo Torroja*, pp. 77-94, Editorial SPUPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. ISBN: 84-7721-97-12.

TODHUNTER, Isaac (1893): *A history of the Theory of Elasticity and of the Strength of materials. From Galilei to the present time*, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra. Editado y completado por Karl Pearson.

TRAMONTIN, Ludovica (2006): *NOX*, EDILStampa, Roma. ISBN: 88 7864 020 4.

TREIBER, Daniel (1998): *Norman Foster*, Ediciones Akal S.A., Madrid. Traducción al castellano: Juan Calatrava. Versión original: *Norman Foster*, Birkhäuser Verlag AG, 1992. ISBN: 84-460-0844-0.

TYNG, Anne Griswold (1969): "Geometric Extensions of Consciousness", en revista *Zodiac*, n.º 19, pp. 130-162, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

TZONIS, Alexander y LEFAIVRE, Liane (1984): "La mecanización de la arquitectura y la doctrina funcionalista", en *Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad*, pp. 27-56, Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid. ISBN: 84-7433-312-1.

VAN DOESBURG, Theo (1970): "La ciudad de la circulación (1929)", en revista *Nueva forma, arquitectura, urbanismo, diseño, ambiente, arte*, n.º 52, pp. 22-25, Nueva Forma, Madrid, mayo de 1970. ISSN: 0029-5825.

VASCONI, Claude (2003): "Vauban le magnifique", en *Revue Technique Luxembourgeoise*, n.º 1, pp. 20-31, enero de 2003, ALIAI, Luxemburgo. ISSN: 035-4260.

VERNES, Michel (1983): "Jean Prouve: architect-mechanic", en revista *Architectural Review* n.º 1037, vol. 174, pp. 38-42, Emap Construct, Londres, julio 1983. ISSN: 0003-861X.

WAGENSBERG, Jorge (1999): "Complejidad e incertidumbre. Nuevas ideas para la inteligibilidad de las formas vivas", en *Mundo científico*, n.º 201, pp. 42-60, Fontalba, Barcelona. ISSN: 0211-3058.

— (2004): *La rebelión de las formas: o cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta*, Editorial Tusquets, Barcelona. ISBN 978-84-8310-975-5.

WAISMAN, Marina (2001): "Eladio Dieste en el eje de la Historia", en *Eladio Dieste. 1943-1996*, pp. 21-26, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Departamento de Publicaciones de la Junta de Andalucía, Sevilla-Montevideo. Primera edición de 1996. ISBN: 84-8095-136-2.

WEINSTOCK, Michael (2004): "Morphogenesis and the Mathematics of Emergence", en revista *Architectural Design*, vol. 74, n.º 3, pp. 10-17, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

WENDLAND, David (2000): "Model-based formfinding processes: free forms in structural and architectural design", Universidad de Stuttgart. En: *Proceedings of "Eduardo Torroja - From the philosophy of structures to the art and science of building. International Seminar, Politecnico di Torino"*, Turin, 25 de noviembre de 2000.

WIEBENSON, Dora (1988): *Los tratados de arquitectura. De Alberti a Ledoux, Hermann Blume*, Madrid. Textos: Ackerman, James et ál. Versión original: *Architectural theory from Alberti to Ledoux*, Architectural Publications Institute, 1982. Traducción: Pilar Vázquez Alvarez. ISBN: 9788472143975.

WIEGELMANN, Andrea (2001): "Die Mediothek in Sendai-ein Gespräch mit Toyo Ito [The Media Centre in Sendai - an interview with Toyo Ito]", en revista *Detail*, vol. 41, n.º 7, pp. 1202-1212, Reed Business Information, Munich, octubre/noviembre 2001. ISSN: 1578-5769.

WILLFORD, Michael (1985): "The derivation of overall design loads from the wind tunnel test results", en revista *The Arup Journal*, vol. 20, n.º 4, p. 37, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

WILLIAMS, Chris (2007): "Leonard de Vinci, Gustave Eiffel, Le Corbusier et l'hydrodynamique de particules lissées", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui* n.º 369, pp. 88-95, Jean-Michel Place, Paris, marzo/abril 2007. ISSN: 0003-8695.

WRIGHT, Frank Lloyd (1961): *Testamento*, Compañía General Fabril Editora, Buenos Aires. Versión original: *A testament*, Horizon Press, 1957. Traducción al castellano: Delfina Gálvez de Williams.

WYMER, C. (1968): "Using the machine", en revista *The Arup Journal*, vol. 3, n.º 1, pp. 14-15, Ove Arup Partnership, Londres, enero 1968. ISSN: 0951-0850.

YOKOCHI, Chihiro; ROHEN, Johannes y WEINREB, Eva (1991): Atlas fotográfico de anatomía del cuerpo humano, Editorial Interamericana - Mac Graw-Hill, México D.F. Versión original: 1989. Tercera edición. Traducción y adaptación: Departamento de Anatomía Macroscópica de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México. ISBN: 968-25-1677-3.

ZAERA, Alejandro (1994a): "Encontrando libertades: Conversaciones con Rem Koolhaas", en revista *El croquis*, n.º 53, Special issue. OMA/Rem Koolhaas, 1987-1993, pp. 6-31, El Croquis Editorial, Madrid. ISSN: 0212-5683.

— (1994b): "OMA 1986-1991. Notas para un levantamiento topográfico", en revista *El croquis*, n.º 53, Special issue. OMA/Rem Koolhaas, 1987-1993, pp. 32-51, El Croquis Editorial, Madrid. ISSN: 0212-5683.

ZIENKIEWICZ, O.C. y TAYLOR, R.L. (2000): *The Finite Element Method*, Butterworth-Heinemann, Oxford. Quinta edición. Primera edición: McGraw-Hill, Nueva York, 1967. ISBN: 0-7506-5055-9.

— (2004): *El método de los elementos finitos*, **CIMNE**, McGraw-Hill/Interamericana de España S.A., Madrid. Versión en castellano de Miguel Cervera Ruiz y Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra. Primera edición de 1967. ISBN 84-481- 0178-2.

ZUNZ, Jack; GLOVER, Mike y FITZPATRICK, Tony (1985): "Special issue. The Hongkong Bank: the new headquarters; Architects: Foster Associates. The structure", en revista *The Arup Journal*, vol. 20, n.º 4, pp. 2-26, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

ZUNZ, Jack (1988a): "Sydney revisited", en revista *The Arup Journal*, vol. 23, n.º 1, pp. 2-11, spring 1988, Ove Arup Partnership, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

ZUNZ, Jack y GLOVER, Mike (1988b): "The Hongkong and Shanghai Bank; Architects: Foster Associates", en revista *The Arup Journal*, vol. 17, n.º 4, pp. 2-10, Ove Arup Partnership, Londres, diciembre 1982. ISSN: 0951-0850.

ZUNZ, Jack; MANNING, Martin; KAYE, David y JOFEH, Chris (1990): "Stansted Airport terminal; Architects: Foster Associates", en revista *The Arup Journal*, vol. 25, n.º 1, pp. 7-15, Ove Arup Partnership, Londres, spring 1990. ISSN: 0951-0850.

Artículos de revistas sin mención de autoría

2G (1997). "Mediateca en Sendai", en revista 2G, n.º 2 "Toyo Ito. Sección 1997", pp. 26-33, Gustavo Gili, Barcelona. ISSN: 1136-9647.

A+U (1988): "1964-1987. Norman Foster", Edición especial, mayo 1988, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

— (2003): "PTW Architects + CSCEC Design + Arup Group. National Swimming Center", en revista A+U, n.º 399, pp. 26-33, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

— (2005a): "PTW Architects + CSCEC Design + Arup. National Swimming Center, Beijing, China 2003-2007", en revista A+U, n.º 412, pp. 124-129, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

— (2005b): "Nox/Lars Spuybroek. Son-O-House y D-tower", en revista A+U, n.º 412, pp. 76-87, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

— (2005c): "Jean Nouvel. Tower in Doha. Doha, Qatar, 2002", en revista A+U, n.º 421 "Tall buildings", pp. 86-87, A+U Publishing, Tokyo, octubre 2005. ISSN: 0389-9160.

— (2005d): "C.Y.Lee & Partners/Architects & Planners. Taipei 101", en revista A+U, n.º 421 "Tall buildings", pp. 110-113, A+U Publishing, Tokyo, octubre 2005. ISSN: 0389-9160.

— (2007a): "Unibail: Phare Tower Competition in Paris (Morphosis, Manuelle Gautrand, Jean Nouvel, Herzog & de Meuron, Dominique Perrault, OMA, Massimiliano Fuksas, Foster and Partners, Jacques Ferrier, Nicolas Michelin", en revista A+U, n.º 440 "Recent Projects", pp. 110-119, A+U Publishing, Tokyo, mayo 2007. ISSN: 0389-9160.

— (2007b): "China Central Television (CCTV) Headquarters. Rem Koolhaas and Ole Scheeren/OMA", en revista A+U, n.º 454, pp. 90-111, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

ARQUITECTURA VIVA (2000): "Eladio Dieste, 1917-2000", en revista *Arquitectura Viva*, n.º 72, pp. 7-83, Arquitectura Viva S.L., Madrid, mayo/junio 2000. ISSN: 0214-1256.

— (2008a): “Nido de pasiones. Estadio nacional Olímpico”, en revista *Arquitectura Viva*, n.º 118-119, pp. 82-101, *Arquitectura Viva S.L.*, Madrid. ISSN: 0214-1256.

— (2008b): “Calado de espuma. Centro Nacional de Natación”, en revista *Arquitectura Viva*, n.º 118-119, pp. 102-117, *Arquitectura Viva S.L.*, Madrid. ISSN: 0214-1256.

— (2008c): “Bucle mediático. Sede de la CCTV”, en revista *Arquitectura Viva*, n.º 118-119, pp. 118-135, *Arquitectura Viva S.L.*, Madrid. ISSN: 0214-1256.

AV MONOGRAFÍAS (1989): “Ventana hacia el futuro. El gran arco de La Défense. Arquitectos: Johan Otto von Spreckelsen, con Paul Andreu”, en revista *AV monografías*, n.º 17 “Paris, Francia”, pp. 42-47, *Arquitectura Viva S.L.*, Madrid. ISSN: 0215-487X.

— (1993a): “Galería de Arte de la Universidad de Yale”, en revista *AV monografías*, n.º 44 “Louis I. Kahn”, pp. 32-35, noviembre/diciembre 1993, *Arquitectura Viva S.L.*, Madrid. ISSN: 0215-487X.

— (1993b): “Centro para la Comunidad Judía”, en revista *AV monografías*, n.º 44 “Louis I. Kahn”, pp. 36-38, noviembre/diciembre 1993, *Arquitectura Viva S.L.*, Madrid. ISSN: 0215-487X.

— (1993c): “Laboratorios Médicos Richards”, en revista *AV monografías*, n.º 44 “Louis I. Kahn”, pp. 39-43, noviembre/diciembre 1993, *Arquitectura Viva S.L.*, Madrid. ISSN: 0215-487X.

— (1993d): “Instituto Salk de Estudios Biológicos”, en revista *AV monografías*, n.º 44 “Louis I. Kahn”, pp. 44-51, noviembre/diciembre 1993, *Arquitectura Viva S.L.*, Madrid. ISSN: 0215-487X.

DETAIL (2000a): “The Eden Project, Cornwall”, en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 987-989, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

— (2000b): “Japanese Pavilion at the EXPO in Hanover”, en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 1012-1017, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

— (2000c): “Millennium Dome in London”, en revista *Detail*, vol. 40, n.º 6, pp. 1018-1023, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

— (2002): “Temporärer Pavilion in London. Temporary Pavilion in London. Arch. Toyo Ito & Associates”, en revista *Detail*, vol. 42, n.º 9, Konzept, pp. 1028-1029, Reed Business Information, Munich, septiembre 2002. ISSN: 1578-5769.

EL CROQUIS (1994a): "ZKM. Centro de Arte y Tecnología de los Medios. Karlsruhe, Alemania, 1989", en revista El Croquis, n.º 53, Special issue. OMA/Rem Koolhaas, 1987-1993, pp. 126-143, El Croquis Editorial, Madrid. ISSN: 0212-5683.

— (1994b): "Centre International D`Affaires - Congrexpo. Proyecto de Ordenación Urbana y Palacio de Congresos y Exposiciones. Lille, Francia, 1988/1991", en revista El Croquis, n.º 53, Special issue. OMA/Rem Koolhaas, 1987-1993, pp. 166-189, El Croquis Editorial, Madrid. ISSN: 0212-5683.

— (1996): "Congrexpo [Lille Grand Palais], Lille", en revista El Croquis, n.º 79, Special issue. OMA/Rem Koolhaas, 1992-1996, pp. 38-73, El Croquis Editorial, Madrid. ISSN: 0212-5683.

INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN (1971): "Teatro de la Opera - Sydney (Australia)", en revista Informes de la Construcción, n.º 231, año XXIV, pp. 22-32, CSIC, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, junio 1971. ISSN: 0020-0883.

L`ARCHITECTURE D`AUJOURD`HUI (1962-1963a): "Galerie d`Art à Yale. 1951-1953", en revista L`Architecture d`Aujourd`hui, n.º 105, pp. 4-5, Groupe Expansion, Paris, diciembre 1962/enero 1963. ISSN: 0003-8695.

— (1962-1963b): "Centre social et sportif à Trenton. 1955-1956", en revista L`Architecture d`Aujourd`hui, n.º 105, pp. 8-9, Groupe Expansion, Paris, diciembre 1962/enero 1963. ISSN: 0003-8695.

— (1962-1963c): "Laboratoires Richards, Philadelphie. 1957-1961", en revista L`Architecture d`Aujourd`hui, n.º 105, pp. 10-11, Groupe Expansion, Paris, diciembre 1962/enero 1963. ISSN: 0003-8695.

L`ARCHITECTURE D`AUJOURD`HUI (1962-1963d): "Institut Salk à San Diego. 1959-1962", en revista L`Architecture d`Aujourd`hui, n.º 105, pp. 29-34, Groupe Expansion, Paris, diciembre 1962/enero 1963. ISSN: 0003-8695.

— (1963): "Pavillon pour les Floralies Internationales de Hambourg, Allemagne. Frei otto, Architecte", en revista L`Architecture d`Aujourd`hui, n.º 108, p. 103, Groupe Expansion, Paris, junio/julio 1963. ISSN: 0003-8695.

— (1971): "Concours International du Plateau Beaubourg", en revista L`Architecture d`Aujourd`hui, n.º 157, pp.VI-X, Groupe Expansion, Paris, agosto/setiembre 1971. ISSN: 0003-8695.

— (1982): “Siège social de la Hongkong and Shanghai Banking Corporation”, en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 223, pp. 30-39, Groupe Expansion, Paris, octubre 1982. ISSN: 0003-8695.

— (2007): “WaterCube, Centre national olympique de natation, Beijing, Chine. PTW Architects avec CSCEC+Design ey Arup”, en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n.º 369, pp. 96-99, Jean-Michel Place, Paris, marzo/abril 2007. ISSN: 0003-8695.

NUEVA FORMA (1968): *Eduardo Torroja*, en revista *Nueva Forma*, Arquitectura, urbanismo, diseño, ambiente, arte, n.º 32, pp. 2-60, Nueva Forma, Madrid, septiembre de 1968. ISSN: 0029-5825.

PROGRESSIVE ARCHITECTURE (1980a): “Thinking Tall”, en revista *Progressive Architecture*, p. 45, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, diciembre 1980. ISSN: 0033-0752.

— (1980b): “Form and circumstance”, en revista *Progressive Architecture*, p. 46-49, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, diciembre 1980. ISSN: 0033-0752.

— (1980c): “Technoques: Structure and circumstance”, en revista *Progressive Architecture*, p. 50-57, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, diciembre 1980. ISSN: 0033-0752.

QUADERNS (1999a): “Chemnitz 2002. Kulka-Königs”, en revista *Quaderns*, n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 50-53, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

— (1999b): “Victoria & Albert Museum. Libeskind”, en revista *Quaderns*, n.º 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp. 54-61, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

TECHNIQUES & ARCHITECTURE (1987): “leoh Ming Pei. megastructure, symbol of the Chinese challenge”, en revista *Techniques & Architecture* n.º 372, pp. 80-85, Jean-Michel Place, Paris, junio/julio 1987. ISSN: 0373-0719.

THE ARUP JOURNAL (1971): “Special issue. Twenty-five years of work by the Ove Arup engineering and architectural firms”, en revista *The Arup Journal*, Ove Arup Partnership, Londres, abril 1971. ISSN: 0951-0850.

Bibliografía

ALBERTI, Leon Battista (1991): *De Re Aedificatoria*, Editorial Akal S.A., Madrid. Prólogo de Javier Rivera. Traducción al castellano de Javier Fresnillo Núñez. Versión original: *De Re Aedificatoria*, 1450. Editado por primera vez en 1485. ISBN: 84-7600-924-0.

ARUP, Ove (1970): *The Key Speech*, 9 de julio de 1970. Disponible en Internet <http://www.arup.com/Publications/The_Key_Speech.aspx>. [Acceso: 19 de noviembre de 2010].

BELL, Alexander Graham (1903): "The Tetrahedral Principle In Kite Structure" en revista *National Geographic Magazine*, vol.14, parte 6, pp. 219-251, Washington. Disponible en Internet <http://www.fang-den-wind.de/bell_eng.htm>. [Acceso: 18 de junio de 2011].

CARDELLACH, Félix (1970): *Filosofía de las estructuras*, Editores Técnicos asociados, S.A., Barcelona. Versión original de 1910.

CHOISY, Auguste (1980): *Historia de la arquitectura*, Editorial Victor Leru, Buenos Aires. Versión original: *Histoire de l'Architecture*, Gauthier-Villars, Paris, 1899. Traducción: S. Gallo y B. Iribarren.

COLMAN, Jan y ROEHM, K. H. (2005): *Color Atlas of Biochemistry*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart. Segunda edición revisada y ampliada. Versión original: *Taschenatlas der Biochemie*, 1994. Traducción al inglés: Michael Robertson. ISBN: 3-13-100372-3.

GALILEI, Galileo (1960): "Le Meccaniche", en: *On Motion and on Mechanics*. Comprising *De Motu* (ca. 1590) and *Le Meccaniche* (ca. 1600), Univ. of Wisconsin Pr., Wisconsin, 1960. Traducción: Stillman Drake. Versión original de 1600.

— (1976): *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Editora Nacional, Madrid. Traducción: Javier Sábada Garay. Versión original: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638. ISBN: 84-276-1316-4.

— (1984): *El ensayador*, Editorial Aguilar, Buenos Aires. Traducción: José Manuel Revuelta. Versión original: *Il Saggiatore*, 1623. ISBN: 848204012X.

— (1999): *Opere/Galileo Galilei*, Editorial: Unione Tipografico-Editrice Torinese, Turín. Versión original de 1593.

HAECKEL, Ernst (1862): *Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*, Druck und Verlag von Georg Reimer, Berlín.

— (1914): *The History of creation: or the development of the earth and its inhabitants by the action of natural causes*, D. Appelton and Company, Nueva York. Traducción: Profesor E. Ray Lankester. Versión original de 1876.

— (1899): *Kunstformen der Natur*, Leipzig und Wien, Bibliographisches Institut.

LÓPEZ PLANA, Carlos; MAYOR APARICIO, Pedro; NAVARRO BELTRÁN, Marc; CARRETERO ROMAY, Ana; NACHER GARCÍA, Víctor; AIGE GIL, Vicente; LÓPEZ BÉJAR, Manel y RUBERTE PARÍS, Jesús (2008): *Atlas de Osteología de los Mamíferos Domésticos*, Unitat d'Anatomia i Embriologia, Departament de Sanitat i d'Anatomia Animals, Facultat de Veterinària, Universitat Autònoma de Barcelona. Disponible en Internet <<http://minnie.uab.es/~veteri/21197/osteo/ficheros/Untitled2 .html>>. [Acceso: 14 de marzo de 2011].

NEWCOMB, Simon (1901): "Is the airship coming?", en McClure's Magazine, n.º 17, septiembre 1901, pp. 432-435. Disponible en Internet <http://invention.psychology.msstate.edu/library/Magazines/Airship_Coming.html>. [Acceso: 08 de marzo de 2009].

REINHARD, Putz (ed.) y REINHARD, Pabst (ed.) (2006): Sobotta: *Atlas de anatomía humana*, Editorial Médica Panamericana, Madrid. Vigésimosegunda edición. Versión original: *Atlas der Anatomie des Menschen*, J.F. Lehmanns Verlag, Munich, 1904-1907. ISBN: 978-84-7903-533-4.

ROJAS, Cristobal de (1985): "Teoría y práctica de la fortificación, conforme las medidas y defensas destos tiempos, repartida en tres partes", en: *Tres tratados sobre fortificación y milicia*, Luis Sanchez, pp. 21-242, Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, DL. Versión original de 1598.

THOMPSON, D'Arcy (1945): *On growth and form*, Cambridge University Press, Cambridge. Versión original de 1917.

VITRUVIO POLLINO, Marco (1992): *Los Diez Libros de Arquitectura*, Ediciones Akal, S.A., Madrid. Traducción de José Ortiz y Sanz, 1787. Prólogo: Delfín Rodríguez Ruiz. Versión original: "*De Architectura Libri Decem*", 35 dC. ISBN: 84-460-0150-0.

— (1995): *Los Diez Libros de Arquitectura*, Editorial Alianza Forma, Madrid. Traducción de José Luis Oliver Domingo. Versión original: "*De Architectura Libri Decem*", 35 dC. ISBN: 84-206-7133-9.

WHITEHEAD, Alfred North (2007): *The concept of Nature*, Cosimo Classics, Nueva York. Versión original de 1920. ISBN: 978-1-60206-213-9.

Documentos en sitios web

An International Competition for a National Opera House at Bennelong Point, Sydney, New South Wales, Australia: Conditions and Programme (Brown Book) (1955), NRS 12702, Department of Public Works [II], Archives Office of New South Wales, A. H. Pettifer, Government Printer, Sydney. Disponible en Internet <<http://gallery.records.nsw.gov.au/index.php/galleries/sydney-opera-house/>>. [Acceso: 12 de noviembre de 2010].

Competition drawings submitted by Jørn Utzon to the Opera House Committee (1956), NRS 12825, Western Sydney Records Centre, Department of Public Works [II], Sydney. Disponible en Internet <<http://gallery.records.nsw.gov.au/index.php/galleries/sydney-opera-house/>>. [Acceso: 12 de noviembre de 2010].

Public Works, Sydney Opera House, Gold Book (1959), Archives Office of New South Wales, Bennelong Point, Sydney, 2 de marzo de 1959, V.C.N. Blight, Government Printer. Disponible en Internet <<http://gallery.records.nsw.gov.au/index.php/galleries/sydney-opera-house/>>. [Acceso: 12 de noviembre de 2010].

Sydney National Opera House (Red Book) (1958), NRS 12707, Department of Public Works [II], State records of New South Wales, Sydney, marzo de 1958. Disponible en Internet <<http://gallery.records.nsw.gov.au/index.php/galleries/sydney-opera-house/>>. [Acceso: 12 de noviembre de 2010].

Sydney Opera House (Yellow Book) (1962), NRS 12708, State records of New South Wales, Department of Public Works [II], Sydney, enero de 1962. Disponible en Internet <<http://gallery.records.nsw.gov.au/index.php/galleries/sydney-opera-house/>>. [Acceso: 12 de noviembre de 2010].

Sitios web

Arup: <<http://www.arup.com>>.

Biblioteca del Congreso (Library of Congress), Estados Unidos: <<http://www.loc.gov>>.

Buckminster Fuller Institute: <<http://www.bfi.org>>.

Buro Happold: <<http://www.burohappold.com/>>.

Centro Pompidou: <<http://www.centrepompidou.fr>>.

David Dexter Associates: <<http://www.daviddexter.co.uk>>.

Departament de Composició Arquitectònica de la Universitat Politècnica de Catalunya:
<<http://descartes.upc.es/historiaenobres>>.

Enciclopedia Británica: <Encyclopædia Britannica <http://www.britannica.com>>.

Frei Otto: <<http://www.freiotto.com/>>.

Grands Travaux de Marseille: <<http://www.gtm-batiment.fr>>.

Museo Británico: <<http://www.britishmuseum.org/>>.

Norman Foster & Partners: <<http://www.fosterandpartners.com>>.

NOX: <<http://www.nox-art-architecture.com/>>.

Oasys (Ove Arup Systems) Software: <<http://www.oasys-software.com/>>.

Office for Metropolitan Architecture (OMA): <<http://oma.eu/>>.

PTW Architects: <<http://www.ptw.com.au>>.

Royal Air Force Museum de Londres: <http://www.aviadores.eu/rafmuseo_bombarderos.html>.

SOM, Skidmore, Owings & Merrill: < <http://www.som.com/>>.

Toyo Ito & Associates, Architects: <<http://www.toyo-ito.co.jp/>>.

Waagner Biro: <<http://www.waagner-biro.at/>>.

Yale University Art Gallery: <<http://artgallery.yale.edu>>.

Zaha Hadid Architects: <<http://www.zaha-hadid.com>>.

Índice de figuras y tablas

Figura 1. Estructuras primaria, secundaria y terciaria de las proteínas. Estructura cuaternaria	47
Figura 2. Virus del simio 40 y detalle de la proteína de su envoltente	49
Figura 3. Esqueletos de radiolarios	55
Figura 4. Curva de von Koch y copo de nieve de von Koch	65
Figura 5. El triángulo de Sierpinski	67
Figura 6. Mecanismos estudiados por Galileo Galilei	71
Figura 7. Dos huesos de distinto tamaño y similar resistencia	72
Figura 8. Algunos perímetros amurallados europeos ordenados cronológicamente	80
Figura 9. Iglesia Santa Genoveva de París, diseñada por Jacques Soufflot (1764-1790)	84
Figura 10. Evolución del modelo de cometa de Lawrence Hargrave	94
Figura 11. Modelo del Mabel 2, construida con células tetraédricas	95
Figura 12. Modelo de una cometa flotante, construida con células tetraédricas	96
Figura 13. Modelo de crecimiento celular fractal según el principio tetraédrico inventado por Alexander Graham Bell	100
Figura 14. Especies de radiolarios con esqueletos automórficos (fractales) estudiados por Le Ricolais y esquema de la viga automórfica Polyten ...	103
Figura 15. Esqueleto de radiolario y detalle de la malla del Domo Geodésico de Buckminster Fuller	107
Figura 16. Domo Geodésico de Buckminster Fuller montado en el Campus de Vitra, Basilea	108
Figura 17. Pabellón de Estados Unidos para la Exposición Universal de Montreal (1969)	109
Figura 18. Vivienda DDU: Dymaxion Deployment Unit	110

Figura 19. Plantas de forjados de la Philadelphia City Tower con superposición de trazados reguladores del diseño	115
Figura 20. Centro Georges Pompidou	116
Figura 21. Escalera mecánica suspendida de los extremos de las vigas Gerber del Centro Pompidou, sobre la plaza	119
Figura 22. Vigas Gerber del Centro Pompidou, sobre la fachada lateral	120
Figura 23. Detalle de fachada lateral del Centro Pompidou.....	123
Figura 24. Vista interior del patio Reina Elizabeth II, en el Museo Británico	125
Figura 25. Vista interior de la cubierta del patio Reina Elizabeth II, en el Museo Británico.....	127
Figura 26. Vista panorámica interior del patio Reina Elizabeth II, en el Museo Británico.....	128
Figura 27. Vista exterior del Centro Nacional de Natación de Pekín	129
Figura 28. Vista interior del Centro Nacional de Natación de Pekín	131
Figura 29. Vista interior del Centro Nacional de Natación de Pekín	132
Figura 30. Estructura «barril beta» de proteínas porinas.....	138
Figura 31. Tres torres diseñadas por Shukhov	138
Figura 32. Cubiertas suspendidas para la Exposición Industrial y Artística de toda Rusia, de 1896	139
Figura 33. Aro central de pilares de una de las cubiertas suspendidas para la Exposición Industrial y Artística de toda Rusia, de 1896.....	139
Figura 34. Cubiertas reticuladas comprimidas para la Exposición Industrial y Artística de toda Rusia, de 1896.....	140
Figura 35. El bombardero Wellington, diseñado por el ingeniero Barnes Wallis (1936)	142
Figura 36. Fachadas de la terminal de pasajeros de la TWA del Aeropuerto Kennedy, en Nueva York (1956-1962)	147
Figura 37. Evolución del diseño de la fachada oeste de la Ópera de Sydney	154
Figura 38. Bóvedas gausas del gimnasio municipal de Durazno (1973-1975), Uruguay, de Eladio Dieste.....	156
Figura 39. Iglesia de Atlántida de Eladio Dieste (1960), Uruguay.....	159

Figura 40. Vistas interiores de la Iglesia de Atlántida, de Eladio Dieste	161
Figura 41. Vistas parciales de la Iglesia de Atlántida, de Eladio Dieste	162
Figura 42. Estadio Olímpico de Tokyo diseñado por Tange, Tsuboi e Inoue para los Juegos Olímpicos de 1964	166
Figura 43. Vista interior del estadio Olímpico de Tokyo	166
Figura 44. Dibujo de vista exterior de la Iglesia de la Colonia Güell en Barcelona, Antoni Gaudí.....	169
Figura 45. Cubiertas para los edificios de las Olimpíadas de 1972 en Múnich.....	174
Figura 46. Cubiertas para los edificios de las Olimpíadas de 1972 en Múnich.....	175
Figura 47. Vista interior del Pabellón de Japón para la Exposición Internacional de Hannover, 2000, diseñado por Shigeru Ban y Frei Otto	181
Figura 48. Arco de La Défense, Otto von Spreckelsen	182
Figura 49. La nube interior del Arco de La Défense, Otto von Spreckelsen	184
Figura 50. La nube interior del Arco de La Défense, Otto von Spreckelsen	184
Figura 51. Detalle del Arco de La Défense.....	185
Figura 52. Pabellón del Agua, en Neeltje Jans, Holanda.....	187
Figura 53. Vista exterior del Centro Nacional de Natación de Pekín	194
Figura 54. Vista interior de la cubierta del Centro Nacional de Natación de Pekín	195
Figura 55. Planos del primer puente de Maillart en Tavanassa (1905).....	203
Figura 56. Puente Valtschielbrücke de Maillart en el Cantón de los Grisones (1925)	204
Figura 57. Puente de Salginatobel de Maillart (1930).....	205
Figura 58. Salk Institute de Louis Kahn (1959-1966)	212
Figura 59. Sección estructural del Salk Institute de Louis Kahn.....	213
Figura 60. Detalle de losa y sección vertical del proyecto de vivienda en acero para el concurso CECA, Rinaldo Semino	215
Figura 61. Planta baja y axonométrica estructural de la Torre Sears (1970-1974).....	220
Figura 62. Alfombra de Sierpinski, Waclaw Sierpinski, 1916.....	222
Figura 63. Cuarta iteración de la alfombra de Sierpinski, Waclaw Sierpinski, 1916	222

Figura 64. Distintas configuraciones geométricas de pilares en edificios de planta cuadrada, analizadas por William J. LeMesurrier a través del índice BRI (Bending Rigidity Index).....	223
Figura 65. Torre Sears de Chicago	224
Figura 66. La “Ciudad de la circulación” de Theo van Doesburg (1929)	225
Figura 67. El World Trade Center de Nueva York, la Torre Sears de Chicago, la Torre Citicorp de Nueva York y el Banco de China de Hong Kong	227
Figura 68. Banco de China de Ieoh Ming Pei y Hong Kong and Shanghai Bank de Norman Foster, Hong Kong.....	227
Figura 69. Torre Burj Khalifa en Dubai (2004-2010), de SOM.....	228
Figura 70. Edificio para la China Central Television (CCTV) en Pekín, Rem Koolhaas y Arup (2005-2008).....	231
Figura 71. El Sainsbury Centre en Norwich, de Norman Foster Associates (1974).....	234
Figura 72. Edificio Commerzbank en Frankfurt, de Norman Foster (1991-1997)	236
Figura 73. Esquema estructural del Commerzbank: principales puntos de apoyo y líneas directrices.....	238
Figura 74. Esquema del tubo perimetral del Commerzbank, formado por pantallas y dos tipos de vigas Vierendeel	238
Figura 75. Triángulo fractal inspirado en la geometría de la estructura del Commerzbank, que podría ser utilizado como base para el diseño de un sistema estructural de haces de tubos triangulares.....	242
Figura 76. Cuadrado, pentágono y hexágonos fractales que podrían ser utilizados como bases para el diseño de sistemas estructurales de haces de tubos con huecos a distintas escalas	242
Figura 77. Mediateca de Sendai, de Toyo Ito (1995-2002).....	243
Figura 78. Mediateca de Sendai, de Toyo Ito (1995-2002).....	244
Figura 79. Fotografía interior luego del terremoto de 2011, expuesta en la Mediateca de Sendai.....	246
Figura 80. Vista interior de la Mediateca de Sendai, de Toyo Ito	247
Figura 81. Vista interior de la Mediateca de Sendai, de Toyo Ito	248
Figura 82. Vista de un pilar de la Mediateca de Sendai, de Toyo Ito	249

Figura 83. Vista interior del Congrexpo de Lille, Rem Koolhaas (1989-1994)	257
---	-----

Tabla 1. Esbelteces geométricas de algunos huesos de animales.....	99
---	----

Sobre el autor

Juan José Fontana Cabezas: Es Arquitecto por la Universidad de la República, Uruguay (2001) y Doctor por la Universidad de Alicante, España (2012). Es Profesor Agregado de la Cátedra de Estabilidad de las Construcciones 4, Profesor Adjunto de la Cátedra de Estabilidad de las Construcciones 1, y Asesor de Estructuras (Asistente) en los talleres Danza y Articardi, en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de la República. Está categorizado actualmente como Investigador Activo Nivel Candidato, Área Humanidades, en el Sistema Nacional de Investigadores de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación de Uruguay.

Este trabajo consiste en un estudio histórico sobre la evolución reciente del diseño estructural. Parte de la hipótesis de que la búsqueda de la eficacia y la optimización de las estructuras, emprendida en el siglo XVII con el nacimiento de la Era Moderna, continúa hasta nuestros días y ha provocado en los últimos 60 años el surgimiento de un nuevo nivel de complejidad en la geometría, el diseño, el cálculo y la fabricación de los proyectos arquitectónicos. Supone, además, que esta búsqueda tiene como principal objetivo la producción de estructuras bellas, racionales y económicas.

Específicamente, 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 la teoría general de sistemas (TGS), tales como complejidad, azar, autoorganización, indeterminismo, emergencia, no linealidad y fractalidad.

En las investigaciones recientes sobre la eficacia de las estructuras arquitectónicas se observa el surgimiento y desarrollo de ideas como formas complejas ajustadas a las solicitudes físicas, métodos de *form finding*, modelos de crecimiento fractal, y separación entre espacios sirvientes y espacios servidos.

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

ISBN: 978-9974-0-1178-6



9 789974 011786



Espacio Interdisciplinario
Universidad de la República
Uruguay