



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

EL DISEÑO ESTRUCTURAL en las FORMAS
COMPLEJAS de la ARQUITECTURA RECIENTE

JUAN JOSÉ FONTANA CABEZAS



Tesis

Doctorales

www.eltallerdigital.com

UNIVERSIDAD de ALICANTE

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

TOMO I: TESIS DOCTORAL
EL DISEÑO ESTRUCTURAL en las FORMAS
COMPLEJAS de la ARQUITECTURA RECIENTE

AUTOR: JUAN JOSÉ FONTANA CABEZAS
DIRECTOR: DR. JUAN CALDUCH CERVERA

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2012

**El DISEÑO ESTRUCTURAL en las FORMAS
COMPLEJAS de la ARQUITECTURA RECIENTE**



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Agradecimientos:

Al director de la Tesis, Juan Calduch, por sus enseñanzas.

A mi familia: Julia, Leticia, mis padres, Gustavo, ..., por el apoyo.

A mis amigos: Marcos por los libros que siempre me trajo y por el interés, Santiago por las traducciones, Laura por el material y las conversaciones sobre biología, ...

A la cátedra de Estabilidad 1, por el apoyo.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Resumen

Esta tesis 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 las teorías científicas enmarcadas en la Teoría General de Sistemas, tales como complejidad, azar, autoorganización, emergencia, no-linealidad y fractalidad.

El trabajo ha sido 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.

En las investigaciones recientes sobre la eficacia de las estructuras arquitectónicas se observa una adopción recurrente de los conceptos de autoorganización y de fractalidad.

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 arquitectónica, se observa una tendencia al diseño integrado de dispositivos capaces de responder a múltiples funciones, a la coordinación espacial jerárquica de los programas arquitectónicos con los huecos que la estructura genera y al diseño algorítmico.

Palabras clave: diseño, estructuras arquitectónicas, complejidad, Teoría General de Sistemas, naturaleza.

Abstract

This thesis is basically a study of the history of recent developments in structural design.

It is based on the assumption that the search for efficiency and optimization of structures, undertaken in the seventeenth century at the beginning of the Modern Age, has continued until today and led, in the last 60 years, to the emergence of a new level of complexity in geometry, design, calculation and construction of architectural projects. It also implies that this search has as a main objective the building of beautiful, rational and economic structures.

Specifically, it intends to make an analysis of how the search for efficiency and optimization of structures has evolved over the second half of the twentieth and early twenty-first century under the influence of some new concepts arising from the development of scientific theories related to the General Systems Theory, such as complexity, random, self-organization, emergence, non-linearity and fractality.

The work was divided into three parts in order to analyze the recent evolution of three structural types that, even though they do not cover all the structural types used in architecture, they have been considered as representative of what happened in the recent evolution of the discipline. These types have been named as truss structures, surface structures and framed structures.

In recent research on the efficiency of architectural structures there is a recurring adoption of the concepts of self-organization and fractality. In recent research on the optimization of architectural structures, regarded as one of the many building components that need to be coordinated in an architectural work, there is a tendency to strongly consider the design of integrated devices capable of responding to multiple functions, to the hierarchical spatial coordination of the architectural programs with the gaps that the structure generates and to the algorithmic design.

Keywords: design, architectural structures, complexity, General Systems Theory, nature.

1 Índice



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

	página
1 Índice	5
2 Introducción	9
3 Contextualización	20
3.1 La Teoría Clásica	21
3.1.1 Relación entre forma y materia	22
3.1.1.1 Forma y belleza: la idea de <i>kalos</i> en el pensamiento griego	22
3.1.1.2 Forma y naturaleza: el concepto de la <i>mímesis</i>	24
3.1.2 La interpretación en los tratados	25
3.1.2.1 El tratado de Vitruvio: la venustas	25
3.1.2.2 El tratado de Alberti: concinnitas y lineamenta	28
3.1.2.3 Forma, materia y arquitectura en la Teoría Clásica	30
3.2 La forma en la naturaleza	32
3.2.1 Las teorías evolucionistas en el siglo XIX	33
3.2.2 La relación entre forma, función y leyes físicas en la primera mitad del siglo XX	36
3.2.2.1 Las proteínas	39
3.2.2.2 Los huesos	43
3.2.2.3 Las medusas	47
3.2.2.4 Los sistemas de empaquetamiento de espacios y el panal de abejas	50
3.2.2.5 Los radiolarios	53
3.2.2.6 Forma y leyes físicas en las Ciencias Naturales en la primera mitad del siglo XX	55
3.2.3 Bases conceptuales de la Teoría General de Sistemas en la segunda mitad del siglo XX	57
3.2.3.1 La Teoría del Caos y la No-linealidad	59
3.2.3.2 La Teoría de las Catástrofes	62
3.2.3.3 La Teoría de la Autoorganización	64
3.2.3.4 La Teoría de los Fractales	66
3.3 Los inicios de la modernidad en el siglo XVII	71
3.3.1 La relación entre forma y materia: el aporte de Galileo Galilei	72
3.3.1.1 Las máquinas	73
3.3.1.2 La idea de límite	76
3.3.2 Los conceptos de eficacia y optimización	79
3.3.3 El reflejo en la arquitectura: la construcción eficaz y optimizada	80
3.3.3.1 La máquina militar: la fortificación abaluartada	80
3.3.3.2 Evolución de los perímetros amurallados europeos en los inicios de la modernidad	86
3.3.3.3 Cálculo y experimentación	89
3.3.3.4 La escisión de los estudios de diseño y mecánica	94

4 Las formas estructurales en la arquitectura reciente	95
4.1 El análisis estructural a principios del siglo XX	96
4.2 Las estructuras de barras	100
4.2.1 Surgimiento de las estructuras trianguladas	101
4.2.1.1 El desarrollo de las cometas celulares	101
4.2.1.2 Modelos de crecimiento: lineal, fractal y celular fractal	106
4.2.2 El traslado a la arquitectura a mediados del siglo XX	114
4.2.2.1 Robert Le Ricolais	114
4.2.2.2 Richard Buckminster Fuller	123
4.2.3 Desarrollo reciente de las estructuras de barras	132
4.2.3.1 Philadelphia City Tower (1952-1957)	132
4.2.3.2 Centro Georges Pompidou (1969-1977)	140
4.2.3.3 Cubierta sobre el Patio Reina Elizabeth II en el Museo Británico (1994-2000)	150
4.2.3.4 Centro Nacional de Natación de Pekín (2003-2008)	157
4.2.4 Evolución reciente en el diseño de las estructuras de barras	163
4.3 Las estructuras superficiales	167
4.3.1 Las estructuras superficiales a principios del siglo XX	168
4.3.1.1 Surgimiento de las superficies parabólicas e hiperbólicas a finales del siglo XIX	168
4.3.1.2 El sistema geodésico	173
4.3.1.3 El hormigón armado y las cáscaras estructurales a principios del siglo XX	175
4.3.2 Las cáscaras complejas a mediados del siglo XX	184
4.3.2.1 Las cubiertas de la Opera de Sydney	184
4.3.2.2 Las bóvedas gausas de Eladio Dieste	193
4.3.3 Las estructuras de membrana a mediados del siglo XX	203
4.3.3.1 El desarrollo del Método de los Elementos Finitos	203
4.3.3.2 El nuevo desarrollo de las tensoestructuras	206
4.3.3.3 Los métodos "form finding"	210
4.3.4 Desarrollo reciente de las estructuras superficiales	213
4.3.4.1 Cubiertas sobre los edificios para las Olimpiadas de 1972 en Munich	213
4.3.4.2 Salón Multiusos para la Exposición Federal de Jardinería de Mannheim (1973-1975)	223
4.3.4.3 Nubes de la Défense (1982-1989)	228
4.3.4.4 Los experimentos de Nox	232

4.3.4.5 El revestimiento del Centro Nacional de Natación de Pekín (2003-2008)	244
4.3.5 Evolución reciente en el diseño de las estructuras superficiales	249
4.4 Las estructuras aporticadas	255
4.4.1 Los puentes de Robert Maillart	256
4.4.2 Jean Prouvé y la industrialización de la construcción	261
4.4.3 Las estructuras aporticadas en la segunda mitad del siglo XX	269
4.4.3.1 Los espacios servidos y sirvientes de Louis Kahn	269
4.4.3.2 Los proyectos de Rinaldo Semino en la década de 1960	278
4.4.3.3 Los rascacielos de S.O.M.	284
4.4.3.4 Los "Umbrella buildings"	304
4.4.4 Desarrollo reciente de las estructuras aporticadas	314
4.4.4.1 El Commerzbank en Frankfurt (1991-1997)	314
4.4.4.2 La Mediateca de Sendai (1995-2002)	326
4.4.4.3 Cubierta del Estadio de Chemnitz (1996)	336
4.4.4.4 Cubierta del edificio Expo en el Congrexpo de Lille (1989-1994)	344
4.4.5 Evolución reciente en el diseño de las estructuras aporticadas	351
5 Conclusiones provisionales	359
6 Bibliografía y fuentes	372
6.1 Bibliografía	373
6.2 Fuentes	413

2 Introducción



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Antecedentes

Motivación del trabajo

La presente Tesis Doctoral se enmarca en el trabajo como docente e investigador en el ámbito del diseño y cálculo de estructuras edilicias que realizo en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de la República en Montevideo, Uruguay.

Desde el año 1997 y hasta la fecha de hoy he realizado tareas de docencia directa, en dicha institución, en las asignaturas Estabilidad de las Construcciones 1, Estabilidad de las Construcciones 4 y en los cursos de Proyecto Final de Carrera de dos Talleres como Asesor de Estructuras.

He participado igualmente en el desarrollo de algunos proyectos de investigación, financiados por la Universidad de la República, que tuvieron como objetivos el análisis de las posibles aplicaciones de los mampuestos cerámicos huecos producidos en Uruguay al diseño de estructuras de pequeña escala, el análisis de la posibilidad de reforzar muros antiguos de mampostería portante con fibras FRG (fibra de vidrio) y el estudio de las propiedades mecánicas de la caña tacuara uruguaya y de los tubos de cartón de deshecho en Montevideo y sus posibles aplicaciones para el diseño de estructuras livianas, temporales o itinerantes. Actualmente trabajo en un proyecto que investiga la posibilidad de crear un Sistema Nacional de Viviendas de Emergencia en Uruguay.

Entre octubre de 2005 y octubre de 2006 realicé la Tesis de Suficiencia Investigadora "El diseño estructural en la Era Moderna", en el marco del Programa de Doctorado "Arquitectura, ciudad, obra civil y su construcción" de la Universidad de Alicante. Este trabajo analizaba, a lo largo de la primera mitad del siglo XX, la influencia que en la concepción de las estructuras arquitectónicas tuvieron los cambios ocurridos en el siglo XVI en cuanto a la concepción de la relación entre forma y materia, el traslado a la arquitectura de los conceptos de eficacia y optimización en el siglo XVII, las bases conceptuales de las teorías evolucionistas del siglo XIX y la relación entre forma, función y leyes físicas en la concepción de las formas naturales a principios del siglo XX.

Dicha Tesis de Suficiencia Investigadora es el antecedente directo de la presente Tesis Doctoral.

Contexto disciplinar e investigador

Este trabajo se inserta en el contexto disciplinar de los estudios historiográficos sobre el diseño estructural en la arquitectura. Pretende analizar la evolución histórica reciente del diseño estructural en el contexto del pensamiento y las teorías científicas surgidas en la segunda mitad del siglo XX que lo sustentan.

Estado de la cuestión

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, ésta se encuentra en plena transformación debido a los aportes recientes de la ciencia.

En 1997 edita el número 9-10 de la revista Architectural Design titulado "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 dicha publicación el ingeniero Cecil Balmond de la firma Ove Arup, principal precursor de la aplicación en el mundo de las estructuras de conceptos tales como ambigüedad, dinamismo y no-linealidad, publicó el artículo "New Structure and the Informal" en el que analiza el papel que la estructura debiera cumplir en la arquitectura, inspirada en la nueva ciencia.

En 2002 Jencks 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 "postmoderno", que encuentra en los nuevos programas informáticos de diseño la herramienta adecuada para alcanzar sus objetivos: un nuevo nivel de heterogeneidad y de complejidad que reemplaza a los ideales de la modernidad. Arquitectos como Robert Venturi, Peter Eisenman, Frank Gehry, Rem Koolhaas o Daniel Libeskin, son identificados como los principales promotores de esta nueva arquitectura.

En el mismo año Balmond publicó su libro "Informal" en el que describe algunas de las estructuras que ha diseñado en los últimos años en colaboración con algunos de los arquitectos contemporáneos más prestigiosos, tales como Rem Koolhaas, Toyo Ito, Daniel Libeskind, Alvaro Siza o Ben van Berkel y describe el concepto de "informal" como las características no-lineales del diseño.

En su libro "Element" de 2007, una exploración sobre ciencia, arte y naturaleza, profundiza en el análisis de los procesos de diseño estructural apropiados para la nueva arquitectura.

En los últimos quince años, fruto principalmente de la publicación del primer libro de Jencks sobre la temática, 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.

Diversas tesis doctorales han analizado los procesos de diseño arquitectónico recientes bajo la luz de los nuevos modelos de la ciencia, la relación entre la arquitectura y los nuevos conceptos de naturaleza, la producción reciente de arquitectura sostenible, los nuevos procesos de diseño arquitectónico y estructural que utilizan herramientas digitales y las tipologías arquitectónicas que han surgido en la ciudad contemporánea.

Entre otras, podrían mencionarse:

"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, 2005. Autor: Juan María Songel.

"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, 2007. Autor: Alejandro Bernabeu.

- "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, 2004. Autor: Francisco Soria Lopez.
- "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, 2005. Autor: Antonio Grillo.
- "El nudo y la arquitectura. Aproximación crítica a los <proyectos complejos>". Tesis Doctoral presentada en el Departament de Projectes Arquitectònics, Universitat Politècnica de Catalunya, 2000. Autor: Boris Albornoz.
- "La razón de las estructuras". Tesis Doctoral presentada en el Departament de Projectes Arquitectònics, Universitat Politècnica de Catalunya, 1986. Autor: Jesús Godoi Puertas.
- "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, 2009. Autor: Mauro Costa Couceiro.
- "La dislocación como instrumento de orden en la Arquitectura Posmoderna". Tesis Doctoral presentada en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 1987. Autor: Miguel Martínez Garrido.
- "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, 2007. Autor: Alberto Peñin Llobell.
- "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, 2000. Autor: Francisco Muñoz Salinas.
- "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, 2004. Autor: Underlea Bruscató Portella.
- "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, 2004. Autor: Mauro Chiarella.

Interés y justificación

Si bien son varias las investigaciones realizadas sobre el traslado a la arquitectura de los nuevos conceptos sobre el universo y su evolución que han surgido en el

ámbito de la Teoría General de Sistemas, no existen trabajos historiográficos realizados sobre la influencia que estas ideas han tenido en el ámbito específico del diseño de estructuras en la arquitectura.

Limitaciones y alcance

El análisis realizado en la presente tesis es exclusivamente historiográfico. Se trata de un estudio histórico 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.

Hipótesis

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 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 ámbito de la Teoría General de Sistemas a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, tales como complejidad, azar, autoorganización, emergencia, no-linealidad y fractalidad, han sido adoptados en el ámbito del proyecto y cálculo de las estructuras arquitectónicas y son claves en el diseño de numerosas obras paradigmáticas de la arquitectura contemporánea.

Objetivos

El objetivo general de esta investigación es profundizar en el estudio de los vínculos entre cultura y ciencia, analizando correlaciones entre arquitectura y teorías científicas contemporáneas.

Particularmente se pretende realizar un análisis del modo en que la búsqueda de la eficacia y la optimización de las estructuras ha evolucionado a lo largo de la segunda mitad del siglo XX y principios del siglo XXI bajo la influencia de nuevos conceptos surgidos a partir del desarrollo de las teorías científicas enmarcadas en la Teoría General de Sistemas, tales como las teorías del Caos, de las Catástrofes, de la Autoorganización y de los Fractales, es decir el modo en que las bases conceptuales de estas teorías se trasladan al ámbito del diseño estructural en la arquitectura reciente.

Plan de trabajo y método

Plan de trabajo

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.

Método

Se procedió a la confección de un soporte teórico basado en la bibliografía analizada que permitiera explicitar las principales ideas y 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 Teoría General de Sistemas: las teorías del Caos, de la No linealidad, de las Catástrofes, de la Autoorganización y de los Fractales.

Se elaboró un soporte teórico, basado en la bibliografía analizada 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, 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 de la tesis

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 Teoría General de Sistemas 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 Teoría General de Sistemas 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 en general de obras construidas a partir de concursos internacionales de arquitectura o de grandes proyectos realizados por arquitectos renombrados con una gran difusión bibliográfica. Es habitualmente en estos proyectos excepcionales, en donde interviene un equipo multidisciplinar de diseño, que 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 de 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 Munich, 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 "formfinding" 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 de 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.

Tatarkiewicz, 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, 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 fundamentalmente a través de la lectura de algunas obras de Galileo Galilei, fundamentalmente *Le Meccaniche*, *El ensayador* y *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, del tratado de Cristóbal de Rojas, que recoge por primera vez en castellano, a finales del siglo XVI, 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 Teoría General de Sistemas: 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 Teoría General de Sistemas, 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 elaboró, por otra parte, un soporte teórico basado en bibliografía y en visitas de obra que permitiera visualizar las principales soluciones estructurales utilizadas en distintos momentos de la historia, fundamentalmente durante la Era Moderna, en obras arquitectónicas que podrían ser consideradas como paradigmáticas y representativas de su época. Se indagó en proyectos publicados en prestigiosos y reconocidos libros, escritos, tratados y revistas internacionales de Arquitectura 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.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3 Contextualización



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.1 La Teoría Clásica



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.1.1 Relación entre forma y materia

3.1.1.1 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, p.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, p.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 éstas 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 e intransigente, 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 sólo para las personas que las utilizaban, pues eran aptas para un determinado fin (Tatarkiewicz, 2001, p.165). La belleza, entonces, podía basarse también en la aptitud que un determinado objeto tenía para lograr un objetivo y no sólo 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, p.11).

Aristóteles acepta incluso que exista la forma sin materia, pero nunca la materia sin forma.

La forma en el pensamiento aristotélico es quien 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 éstas 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.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.1.1.2 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, p.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, p.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 éstas últimas.

Según Platón el arte imitaba a la realidad y se trataba de "*una copia pasiva y fidedigna del mundo exterior*" (Tatarkiewicz, 2001, p.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, p.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 lo que creían que determinaba sus propiedades esenciales y ésta era independiente de la materia (teoría del hilemorfismo), 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 volverán a convertirse en la base principal de la teoría artística y alcanzarán su apogeo (Tatarkiewicz, 2001, p.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, p.100), **reproduciendo sus proporciones, su armonía y su orden** a través del uso de los **órdenes arquitectónicos clásicos**.

3.1.2 La interpretación en los tratados

3.1.2.1 El tratado de Vitruvio: la venustas

En el capítulo III del libro I de su célebre tratado "*Los Diez Libros de Arquitectura*", Vitruvio estableció cuáles son los objetivos que un edificio debía lograr: "*seguridad, utilidad y belleza*" (Vitruvio, 1995, p.73) o en latín: firmitatis, utilitatis y venustatis. Estos tres objetivos serán retomados por numerosos autores, a partir del Renacimiento, que los elevarán 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, p.73).

Los seis elementos que constituyen la arquitectura según Vitruvio 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 Eurythmia, 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 Eurythmia 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, p.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 los mismos 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, p.233).

La materia queda así supeditada a la forma, tal como la concibe Aristóteles en su teoría del hilemorfismo y la belleza depende de las proporciones y armonía de las partes que componen al edificio. Ahora bien, a la hora de elegir las proporciones con las cuales diseñar y construir, algunas proporciones 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, p.131).

Es decir, un edificio no puede ser bello si las proporciones de sus partes y las de éstas 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 éstas a su vez, con respecto a la totalidad del cuerpo. El rostro, por ejemplo, determina que 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, 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 cuerpo.

Leonardo da Vinci se inspiraría en un pasaje de este mismo capítulo ¹ para realizar, en 1492, uno de sus más famosos estudios sobre las proporciones del cuerpo humano: *El Hombre de Vitruvio*.

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.

Finalmente, 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, p.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.

¹ *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, ésta 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, pp.132-133).*

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 sólo algunas **leyes o principios esenciales**, representando así al **orden cosmológico perfecto y supremo**.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.1.2.2 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, p.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, p.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 quien determina su belleza¹. 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, éste debía imitar sus leyes profundas y sus proporciones inmutables más que su apariencia (Tatarkiewicz, 2001, pp.305-306).

La belleza, como consentimiento y acuerdo de las partes, puede existir entonces tanto en la naturaleza como en la razón humana.

En el Renacimiento, por otra parte, se generalizó 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.

¹ A partir de lo dicho podemos establecer, para no proseguir con el resto de consideraciones excesivamente prolifas, que los tres elementos que vienen a continuación son los principales, los pilares en que se asienta todo el razonamiento que estamos desarrollando: el número, lo que nosotros llamaremos delimitación y la colocación. Pero existe un principio más amplio, fruto del ensamblamiento y unión de los elementos citados, gracias al cual resplandece admirablemente la belleza a la vista: tal principio recibirá en nuestra obra la denominación de armonía, ese mismo principio del que afirmamos que se nutre de absolutamente toda gracia y decoro. Y cometido y función de la armonía es ordenar según un determinado método las partes que, de otra forma, son distintas entre sí por naturaleza, de modo que exista una mutua correspondencia entre ellas en lo que al aspecto se refiere. (...) En efecto, todo lo que se halla en la naturaleza está regulado conforme a la ley de la armonía. Y no tiene la naturaleza un afán mayor que el que resulte absolutamente perfecto cuanto ella hubiere producido. Objetivo que estaría muy lejos de ser alcanzado sin la armonía: habría desaparecido, en efecto, el necesario acuerdo entre las partes. (...) la belleza es un cierto acuerdo y una cierta unión de las partes dentro del organismo del cual forman parte, conforme a una delimitación y una colocación de acuerdo con un número determinado, tal como lo exigiere la armonía, esto es, la ley perfecta y principal de la naturaleza. A este último concepto, a la armonía, se ciñe el arte de la construcción lo más posible; de ella obtiene la dignidad, el encanto, la autoridad y el valor que posee. (...) nuestros antepasados, al tratarse de nociones obtenidas de la propia naturaleza, y al no dudar que, si las dejaban de lado, no conseguirían nada que contribuyera al enaltecimiento y decoro de la obra, 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, pp.384-385).

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, p.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 agradable¹, es decir, hacerlos bellos.

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 (...) 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, p.61-62).

3.1.2.3 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, p.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, pp.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, pp.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 en los que se impuso, en la teoría artística y arquitectónica, la Gran Teoría clásica de la belleza, 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 dissociadas en el proceso de diseño arquitectónico clásico.

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 este proceso de búsqueda de la 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, p.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.¹ 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.

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 parezcan viables en modelos a escala reducida, podrían derrumbarse si se construyesen de tamaños mayores manteniendo las mismas proporciones.^{2 y 3}

A partir del siglo XVII comenzará a surgir un nuevo proceso de diseño que superará 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**.

¹ 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, p.302).

² (...) 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, p.396).

³ 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, pp.264-265).

3.2 La Forma en la Naturaleza



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.1 Las teorías evolucionistas en el siglo XIX

En el S XVIII **Jean Baptiste de Lamarck** define 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 al., 2003, p.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 al., 2001, pp.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, p.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, atrofas 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, p.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 explicando la historia de la Tierra y de la vida en forma conjunta.

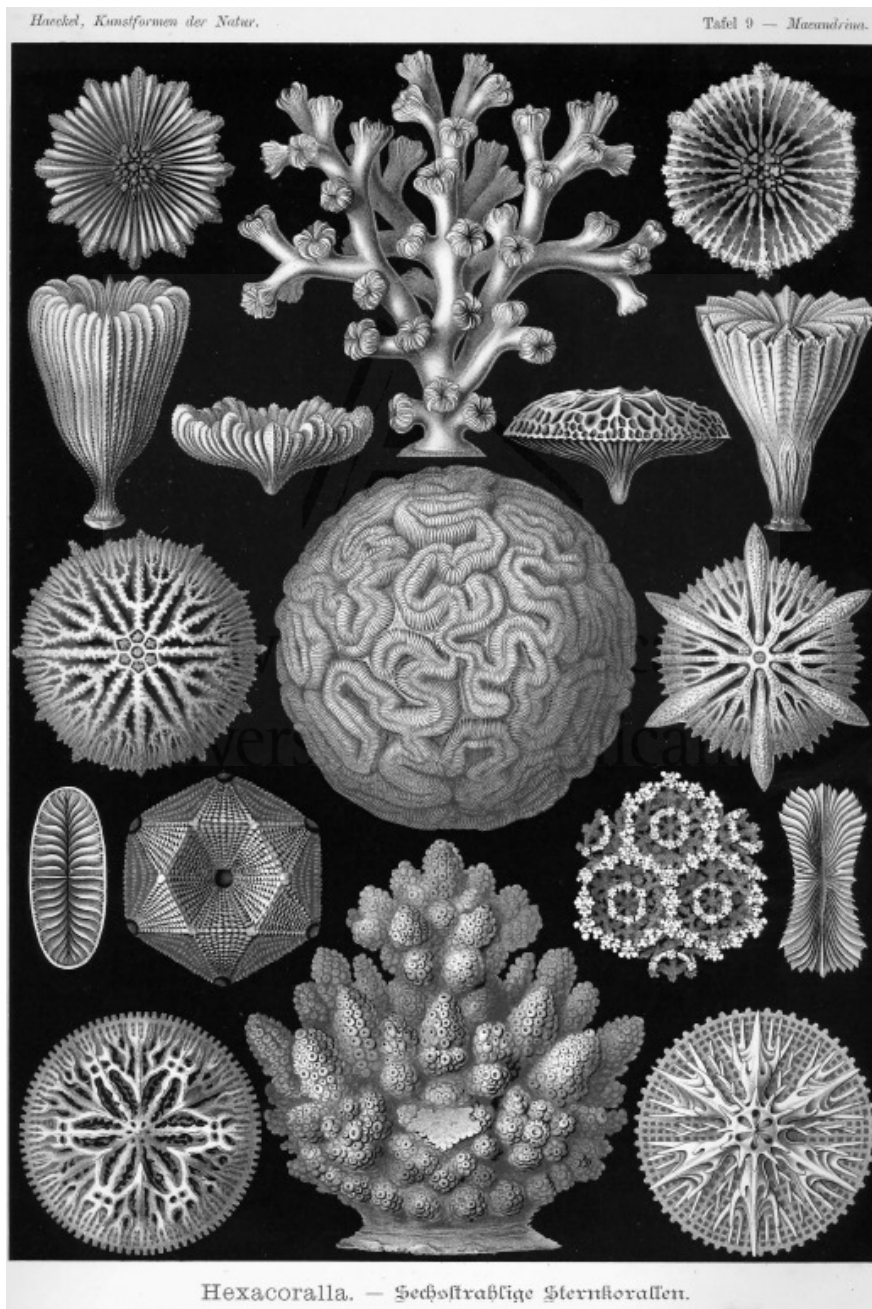


Imagen 1: Dibujos de Hexacorales.
Ilustración extraída de "*Kunstformen der Natur*", Lámina 9, (Haeckel, 1899).

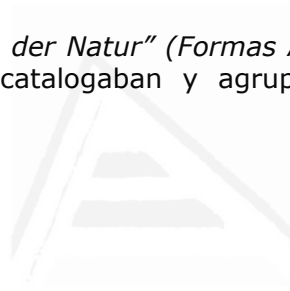
Ernst Haeckel, biólogo, filósofo y ferviente evolucionista, popularizó el trabajo de Charles Darwin defendiendo que **la evolución estaba dirigida hacia una complejización progresiva**, que tenía al ser humano como meta final.

Sus ideas fueron recogidas en 1866 en su libro "*Generelle Morphologie der Organismen*" (*Morfología general de los organismos*), cuyo segundo volumen dedicó a Charles Darwin, Wolfgang Goethe y Jean Baptiste de Lamarck.

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.

En 1904 publicó "*Kunstformen der Natur*" (*Formas Artísticas en la Naturaleza*), con cien láminas ilustradas que catalogaban y agrupaban las diversas morfologías orgánicas.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.2 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 simplemente 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 diversidad 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, pp.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, pp.989-993). Creía que el empleo de huesos y tendones en la naturaleza 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, p.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 ésta tuvo en diversos tiempos y edificios diversas 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.¹

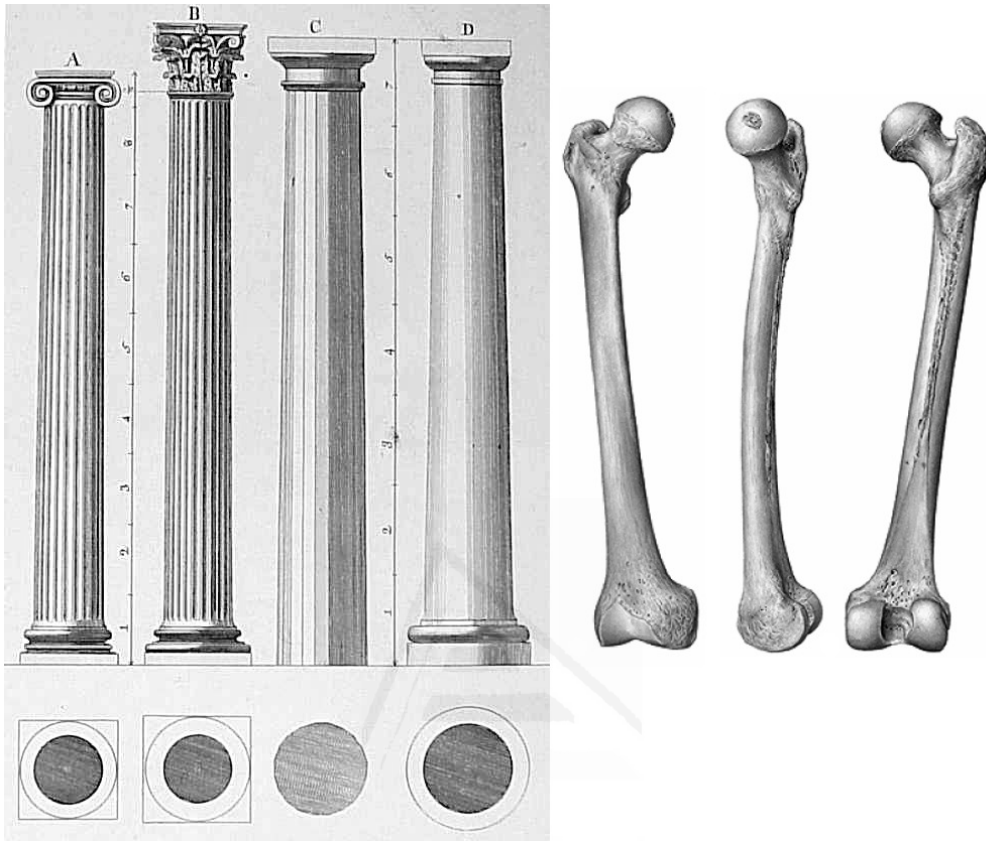


Imagen 2: Sinopsis de órdenes de columnas clásicas extraída de "Los diez libros de *architectura*" de M. Vitruvio Polión, (Vitruvio, 1992, lámina XXIX) y fémur humano extraído de "Sobotta - Atlas de anatomía humana", figuras 973, 974 y 979 (Reinhard et al., 2006).

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, pp.985-986).

¹ (...) 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, pp.160-161).

La **tensión** es en las formas naturales un **estímulo directo para el crecimiento** y éste 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 una concha, 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 de Fibonacci interdependientes, 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 del siglo XX.

3.2.2.1 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 al., 2001, p.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 sólo polipéptido.
- 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 al., 1992, p.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 7 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 múltimero 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.

La estructura de una gran proteína posee entonces **varios niveles de organización**, construyéndose cada nivel a partir del anterior en una **organización jerárquica** que va creciendo en **complejidad** (Alberts et al., 1992, p.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.

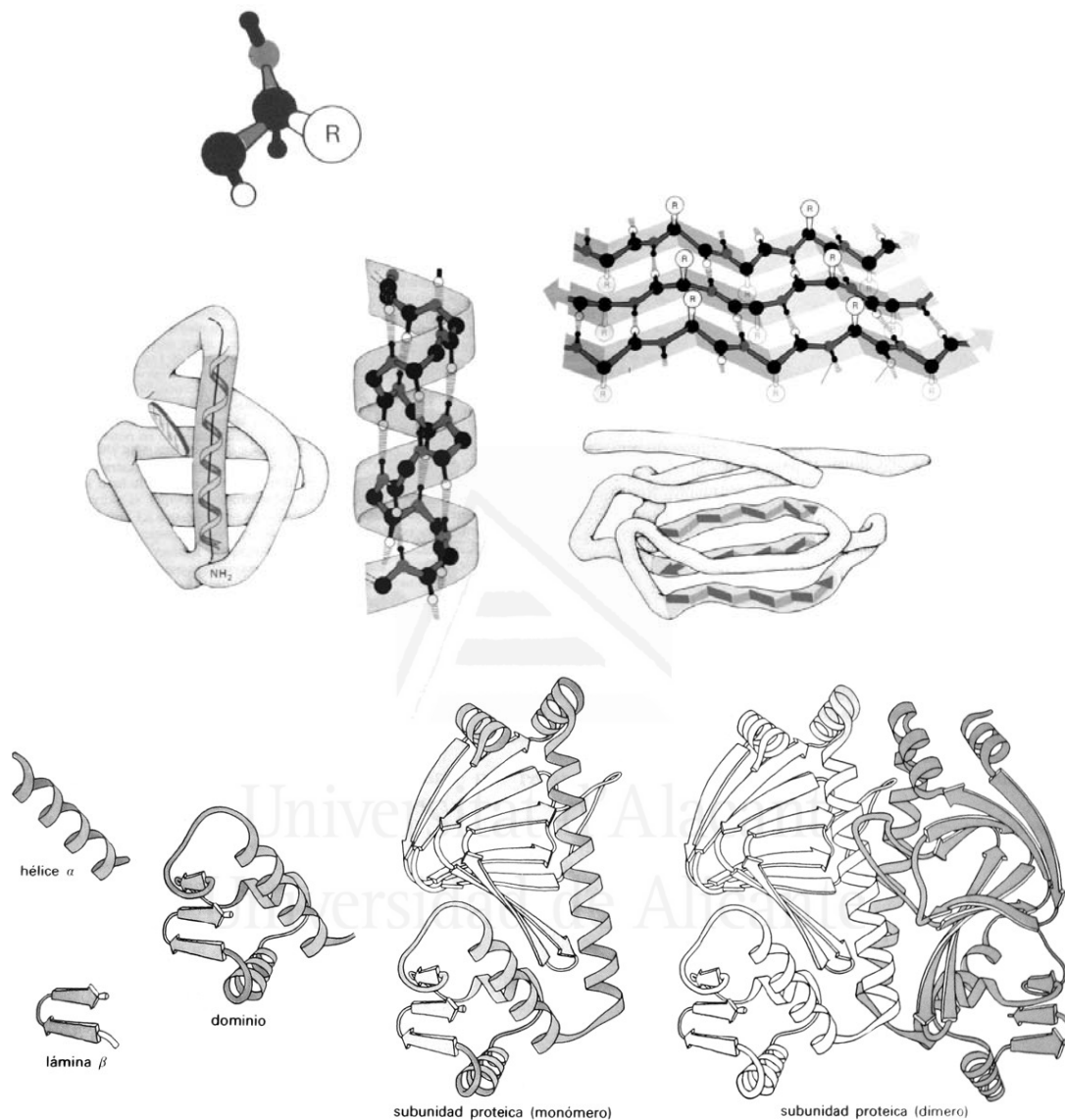


Imagen 3: Estructura primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria de las proteínas.
Ilustraciones extraídas de "*Biología molecular de la célula*",
(Alberts et al., 1992, pp.114, 115 y 119).

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 súper hélice denominada protofibrilla (Koolman et al., 2005, p.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 esta constituida por un polipéptido, formado por una repetición en grupo de tres aminoácidos (Koolman et al., 2005, p.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.

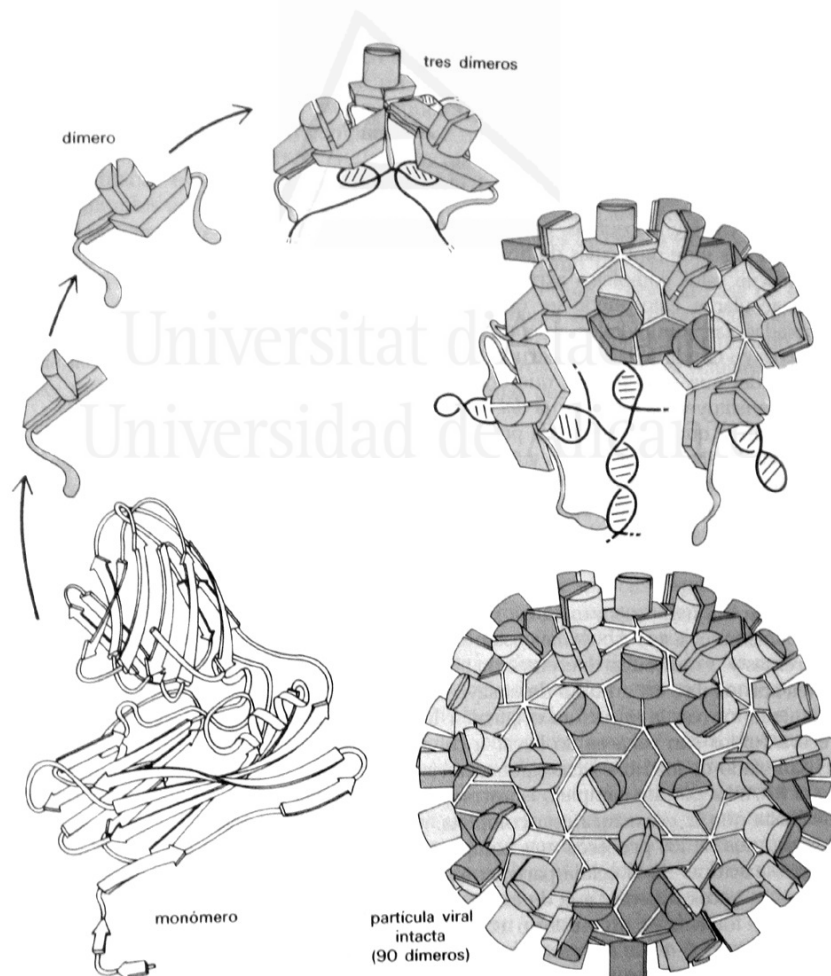


Imagen 4: Proceso de ensamblado de la estructura esférica del virus TBSV. Ilustración extraída de "Biología molecular de la célula", (Alberts et al., 1992, p.125).

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 **autoensamblarse** para formar grandes estructuras. El empleo de una o unas pocas subunidades para construir estructuras de gran tamaño presenta algunas ventajas (Alberts et al., 1992, pp.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 33nm de diámetro, está formada por el empaquetamiento de 180 subunidades proteicas idénticas, de 386 aminoácidos cada una (Alberts et al., 1992, p.125).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.2.2 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, p.984).

La posición de estas fibras en algunos huesos del esqueleto humano es característica y está directamente relacionada con la posición erecta exclusiva del hombre.



Imagen 5: Cabeza de fémur humano seccionada. Imágenes extraídas de "Sobotta - Atlas de anatomía humana" figuras 977 y 978 (Reinhard et al., 2006).

D'Arcy Thompson nos muestra como en una sección longitudinal de fémur (Thompson, 1961, pp.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.

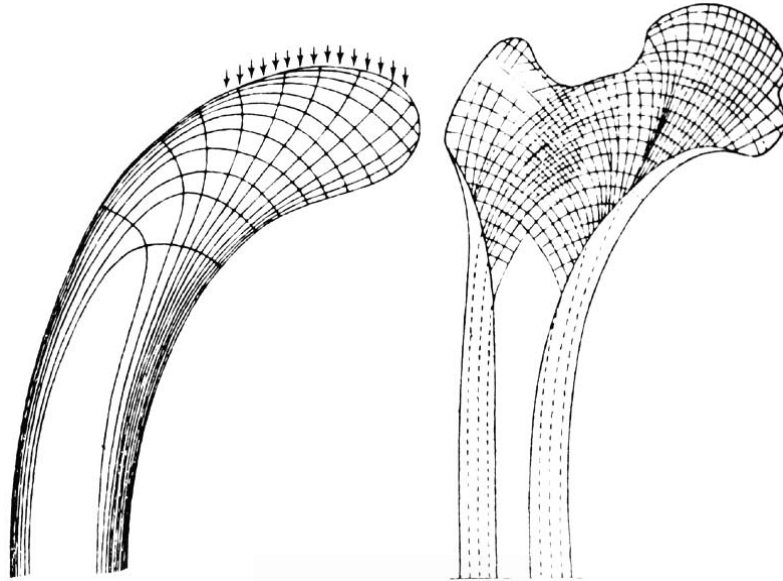


Imagen 6: Isostáticas de compresión y tracción en un fémur humano.
Imagen extraída de "On growth and form" (Thompson, 1945, p.978).

D'Arcy Thompson analizó 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, p.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, p.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 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, pp.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.



Imagen 7: Fotografías de fémur humano.

2: hueso esponjoso

2a: trabéculas del hueso esponjoso

3: hueso compacto

4: cavidad medular

6: epífisis

8: diáfisis.

Ilustración extraída de "Atlas fotográfico de Anatomía del cuerpo humano"
(Yokochi et al., 1991, p.7).

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, incluso, 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, p.6).

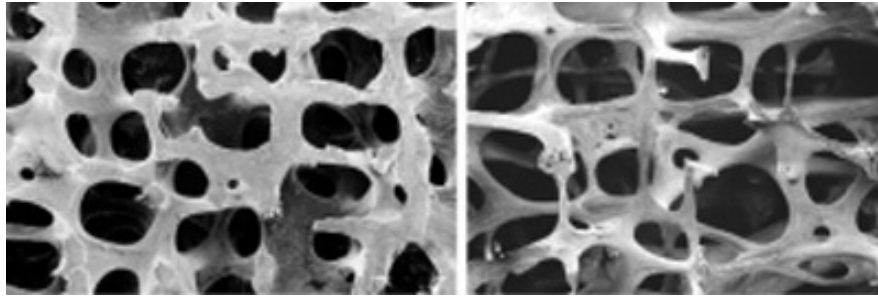


Imagen 8: Fotografías de microscopia de barrido de secciones de vértebras humanas.
Imagen extraída de "Estructura y remodelado del hueso" (Arnett, 2004, p.5).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.2.3 Las medusas

Dejando caer una gota de tinta en un vaso con agua, se puede observar como ésta 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 vorticulares 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, pp.395-397).



Imagen 9: Mecanismo fractal de disolución de una gota de aceite en parafina.
Ilustración extraída de "*On growth and form*" (Thompson, 1945, p.395).

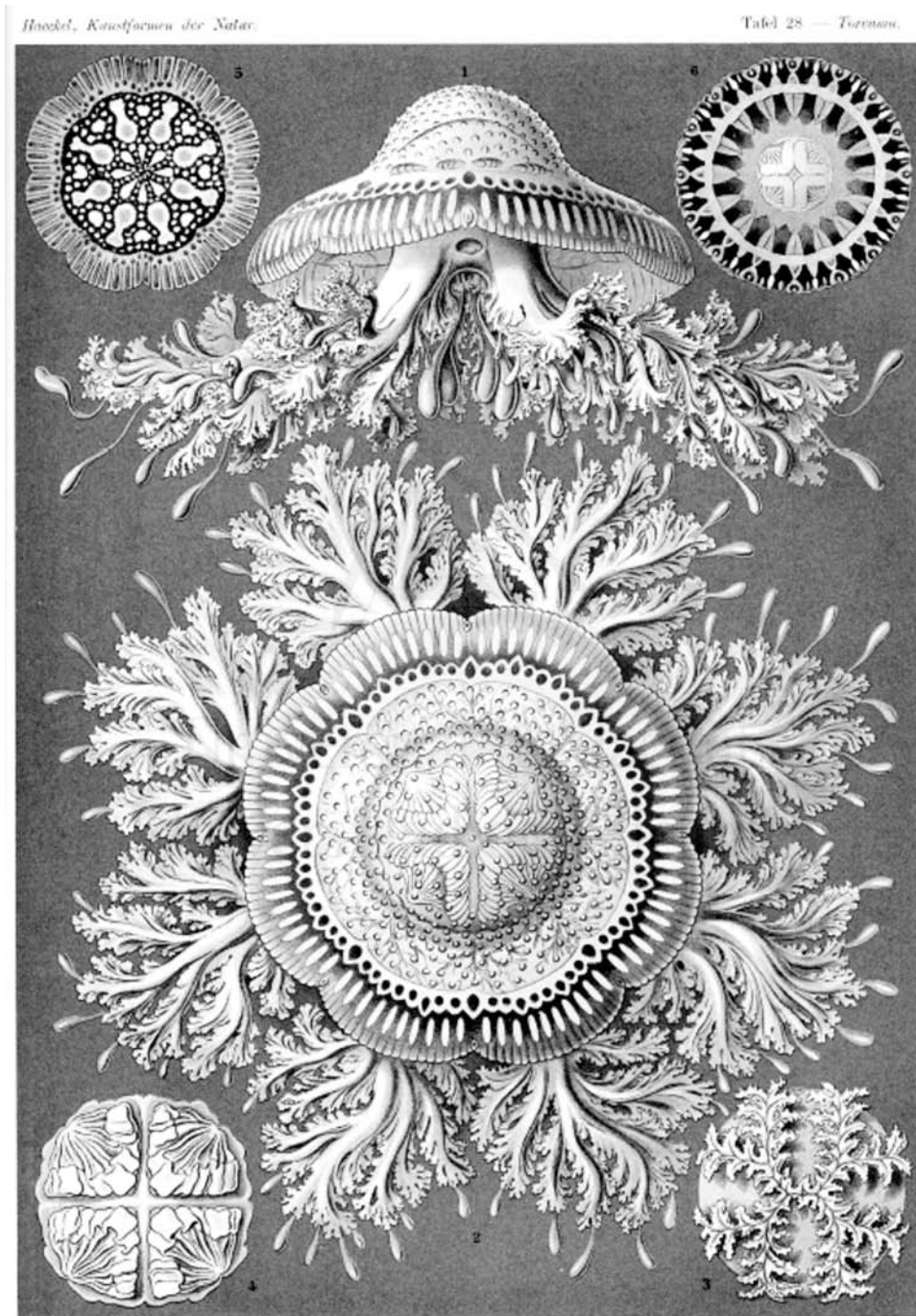
El cuerpo de una medusa está formado en un 98% por agua. De ejemplares con un peso de 6 kilogramos, apenas se han obtenido 10 gramos de materia orgánica. Es realmente un cuerpo líquido adaptado para desplazarse dentro de otro líquido.

Las medusas están compuestas por una campana con dos superficies, una superior llamada exumbrela y una inferior llamada subumbrela (Barnes, 1989, p.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, p.119).

La umbrela se asemeja notablemente a los anillos vorticiares 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.



Discomedusae. — Scheibenquallen.

Imagen 10: Medusas. Ilustración extraída de "Kunstformen der Natur", Lámina 28, (Haeckel, 1899).

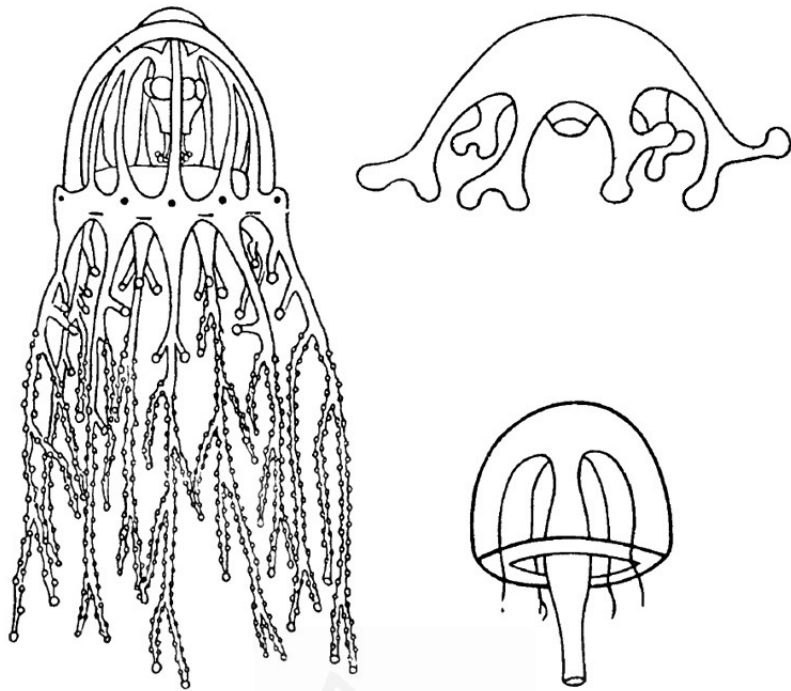


Imagen 11: Medusas.

Ilustración extraída de "*On growth and form*" (Thompson, 1945, p.396).

Si dejamos caer una cantidad suficiente de tinta en agua, se forma en un primer instante una cabeza descendente, de la que se desprenden por detrás varios brazos por efecto de la fricción, que se ondulan y estiran, recordando el movimiento tentacular.

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**.

3.2.2.4 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, pp.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, pp.548-553). El tetrakaidecaedro está limitado por tres pares de cuadriláteros iguales y cuatro pares de hexágonos iguales.

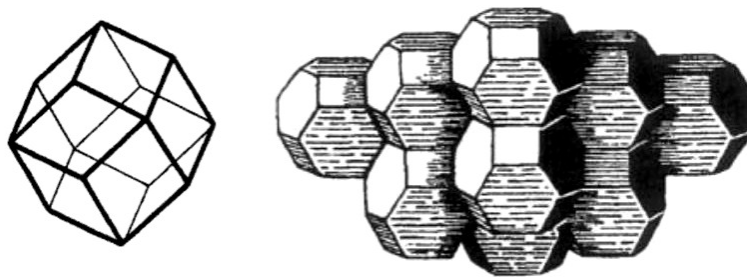


Imagen 12: Rombododecaedro y conjunto de tetrakaidecaedros.
Imágenes extraídas de "On growth and form" (Thompson, 1945, pp.545 y 551).

En un sistema homogéneo de películas fluidas, como podemos 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 se divide 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, adoptan 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, pp.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.

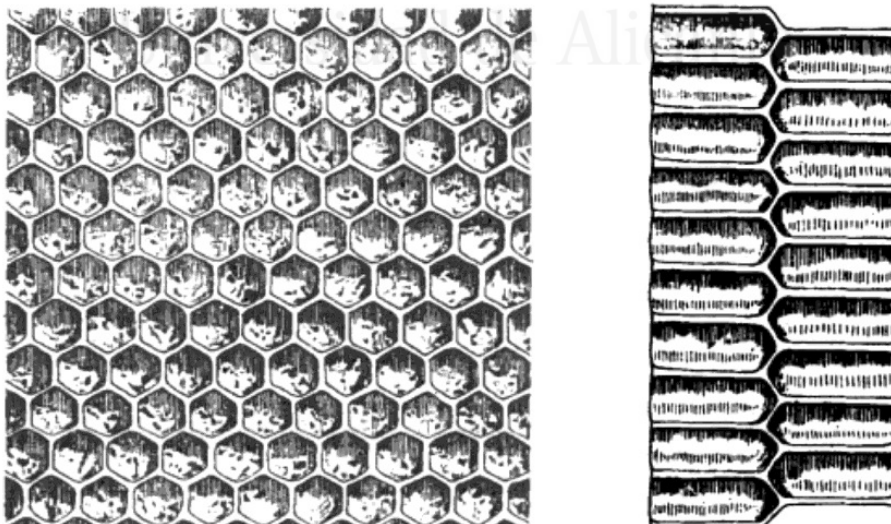


Imagen 13: Celdas del panal de abejas.
Imagen extraída de "On growth and form" (Thompson, 1945, p.527).

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.

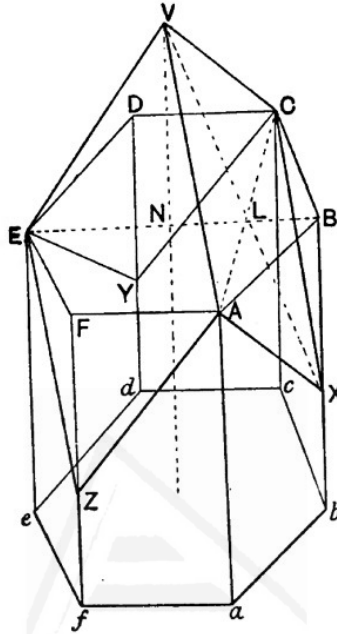


Imagen 14: El ángulo de Maraldi.
Imagen extraída de "On growth and form" (Thompson, 1945, p.532).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.2.5 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, pp.708-716).

Estos diminutos esqueletos, a pesar de su tamaño, son extremadamente complejos y se presentan en una extraordinaria variedad formal. Su constitución silíceo les otorga dureza, resistencia y rigidez, dando origen a un tejido óseo más ligero y delicado que el de los organismos calcáreos.

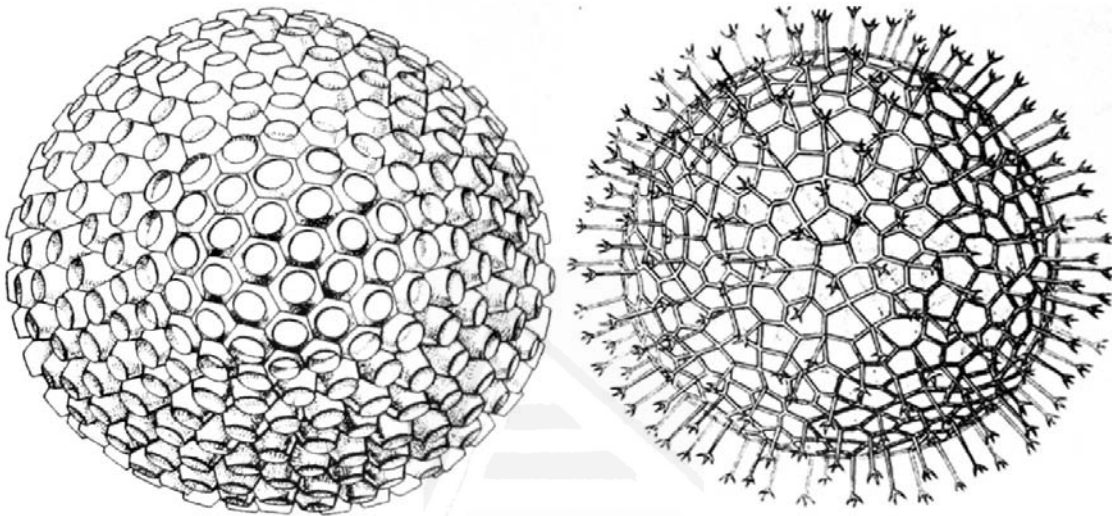


Imagen 15: Esqueletos de radiolarios.

Imágenes extraídas de "On growth and form" (Thompson, 1945, pp.710 y 711).

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 epísculas.

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 éstas 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, pp.714-716).

La figura 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.

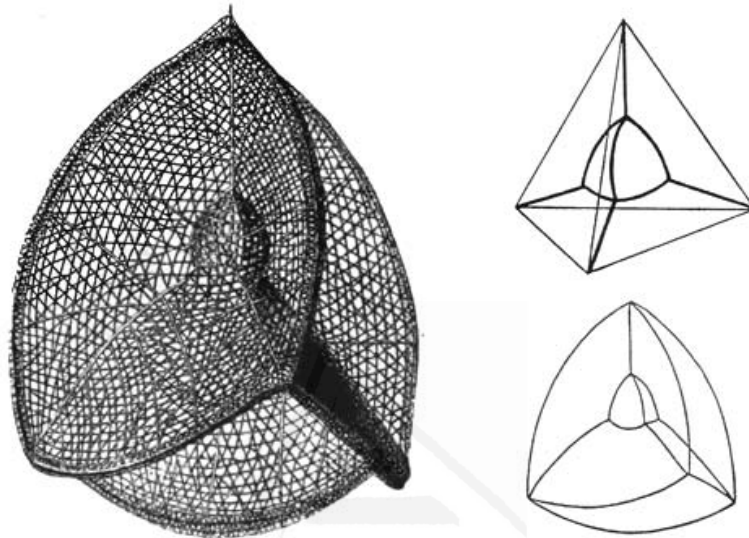


Imagen 16: Radiolarios.

Ilustraciones extraídas de "On growth and form" (Thompson, 1945, pp.712 y 713).

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**.

3.2.2.6 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 a principios del siglo XX, siguiendo estas ideas de Lamarck, fue el demostrar que **las fuerzas mecánicas actúan tanto sobre las estructuras vivas como sobre las inertes, modificándolas y haciéndolas más eficientes.**

Las formas en la naturaleza pueden siempre explicarse por la acción de fuerzas y cuando la búsqueda de la 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, no significa esto que dicha similitud provenga necesariamente de un ancestro en común, 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 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, podemos 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 la forma de nuestro cuerpo, hasta donde podemos entenderla 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 nuestro esqueleto a una escala mayor. Esta **extraordinaria complejidad formal** es la responsable de las **extraordinarias propiedades físicas** de nuestro cuerpo.

La información genética aislada, entonces, **no especifica por completo la forma**, 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 también optimizados energéticamente.

La forma en la naturaleza parece ser, también, el resultado de la optimización energética, en sus procesos de formación y en la relación con sus funciones.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

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

La **Teoría General de Sistemas** (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 diversos problemas y concepciones muy similares en áreas del conocimiento muy distintas (Bertalanffy, 1989, p.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 **Teoría General de Sistemas** (Bertalanffy, 1989, p.9). Uno de los objetivos de la TGS es la formulación y derivación 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, pp.32-33).

En 1926 Jan Smuts había ya 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, p.10).

La TGS afirma entonces que las propiedades de los sistemas no pueden describirse significativamente a partir de sus elementos separados, la comprensión de los sistemas sólo ocurre cuando se estudian globalmente, involucrando todas las interdependencias de sus partes.

Por otra parte, los sistemas siempre existen dentro de otros más grandes, de modo que se asume la necesidad del análisis de los problemas a distintas escalas.

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, pp.46-47).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.3.1 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, p.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. Los **sistemas no-lineales** presentan un comportamiento impredecible denominado como **caótico** (Addison, 2001, p.6).

Un sistema estable tiende, según transcurre el tiempo, a un atractor: un punto u órbita según su dimensión. Un sistema inestable se escapa de los atractores (Prigogine, 1997, pp.32-33). Un sistema caótico manifiesta los dos comportamientos, por un lado existe un atractor pero a la vez hay fuerzas que lo alejan de éste. De esta manera el sistema permanece confinado en una zona de su espacio de estados, pero sin tender a un atractor fijo.

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. Aún conociéndose las ecuaciones exactas que describen el comportamiento de un sistema, si los datos iniciales no son exactos, no podremos predecir que 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 sólo por períodos cortos de tiempo, ya que rápidamente los pequeños errores iniciales y las pequeñas perturbaciones hacen que el proceso parezca aleatorio (Prigogine, 1997, pp.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, p.53).

Las ecuaciones de Lorenz para predecir el clima, con tres variables, permiten visualizar el comportamiento de un sistema caótico determinista.

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, p.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 al., 1980).

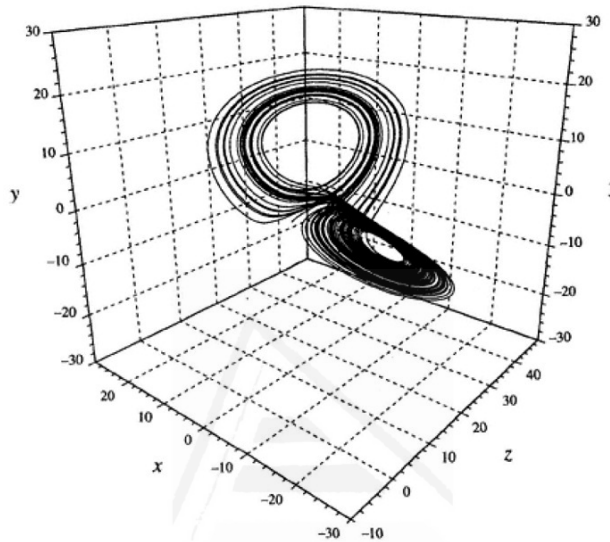


Imagen 17: Ecuaciones de Lorenz para la predicción del clima.

Imagen extraída de "Fractal and chaos. An illustrated course" (Addison, 2001, p.128).

Así, el no-equilibrio es creador de estructuras que sólo 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 entonces posible 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 éstos 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, p.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, 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, p.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 al., 2001, p.121).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.3.2 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, pp.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 una 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.

René Thom ha sido uno de los responsables del desarrollo de las *ciencias morfológicas*, estudiando con herramientas topológicas la aparición, estabilidad y desaparición de formas a partir de ciertos invariantes que llama rupturas o singularidades. La morfogénesis permite analizar procesos en los que la alteración suave de una variable de control sobre un sistema da lugar a una variación brusca en la variable de estado.

La Teoría de las Catástrofes pretende ayudar a explicar, entre otros temas, las discontinuidades en el comportamiento y 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, p.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, pp.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, p.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 éstos rara vez se invierten. Es decir, que una vez surgida una entidad más compleja, ésta 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 estudiar 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, p.4).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.3.3 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, p.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**.¹ 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, p.20).

Los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela, investigando la clase de sistema que es un ser vivo (Maturana et al., 1998, p.11), propusieron el término **autopoiesis** como la condición de existencia de los seres vivos en la continua producción de si 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 al., 1998, p.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.

Las trabéculas de los huesos, por ejemplo, son continuamente remodeladas por el organismo de acuerdo a las exigencias físicas en que se encuentra o ha encontrado el individuo. Las **leyes físicas**, entonces, son también responsables de **regular** el **proceso de autoproducción** de los componentes de los seres vivos.

Los seres vivos son sistemas determinados en su **estructura** (Maturana et al., 1998, p.24).

Es una determinada **organización** lo que los caracteriza y no sus componentes (Maturana et al., 1998, p.51) y esta organización está sujeta a las leyes físicas del entorno en que viven.

¹ 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, p.9)

La propiedad de autoorganizarse se da 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 cierta idea de continuidad entre la materia viva y la inerte. La entidad que se organiza a sí misma está compuesta por partes cuya configuración e interacciones mutuas determinan el todo que conforman.

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 éste 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 M. 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 como *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, p.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.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.2.3.4 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, p.1).

Entre 1975 y 1977 Benoît 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 **auto-similaridad**, exacta o estadística y cuya dimensión de Hausdorff es fraccionaria o no entera (Addison, 2001, p.8) y (Talanquer, 1996, pp.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, p.21).

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

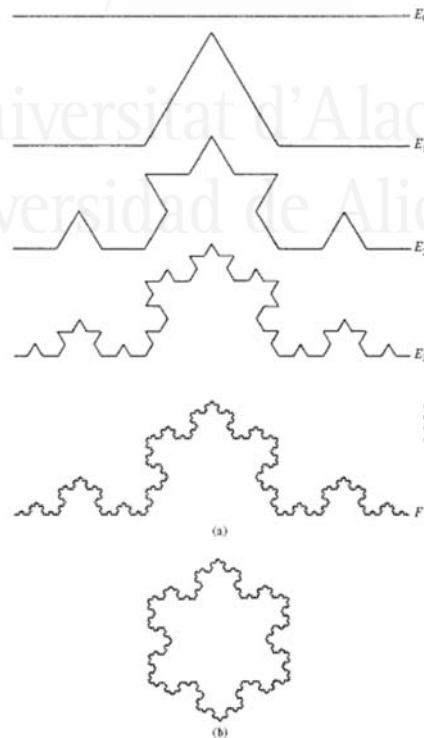


Imagen 18: Construcción de la curva de von Koch y copo de nieve de von Koch. Ilustración extraída de "Fractal geometry. Mathematical Foundations and Applications" (Falconer, 2003, p.xix).

Las formas fractales, aquellas en las que las 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, pp.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).

Las formas fractales se observan también en la propia dinámica evolutiva de los sistemas complejos. Dicha dinámica consta de ciclos en los que, partiendo de una realidad establecida simple, se culmina en la creación de una nueva realidad más compleja que a su vez forma parte de otros ciclos más complejos que, a su vez, forman parte del desarrollo de la dinámica de otros grandes ciclos y así sucesivamente. Las evoluciones dinámicas de todos estos ciclos presentan las similitudes propias de los sistemas caóticos.

Muchas veces, las formas fractales se subscriben a la definición anterior. Otras no y en lugar de observarse la misma estructura en proporciones menores de la figura principal que estemos observando, 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, p.8) y **estadística** en las no-lineales o caóticas (Addison, 2001, p.27).

La primera forma fractal pura que se ha definido, el *polvo de Cantor*, fue descrita por el matemático alemán Georg Cantor (inventor de la teoría de los conjuntos) alrededor de 1872. A pesar de ser una figura extremadamente sencilla, recoge todos los atributos discutidos sobre los fractales hasta el momento: 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, p.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 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.

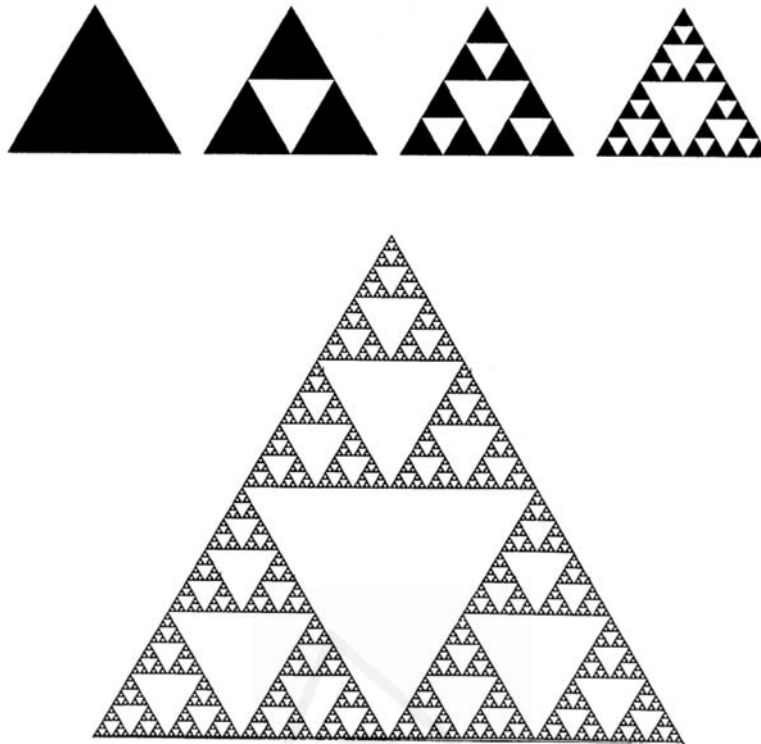


Imagen 19: El triángulo de Sierpinski.
Ilustración extraída de "*Fractal geometry. Mathematical Foundations and Applications*"
(Falconer, 2003, p.xx).

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, pp.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 los 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, pp.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 que posee una estructura extraordinaria como puede comprobarse ampliando la imagen y observando detalles a distintas escalas de su frontera.

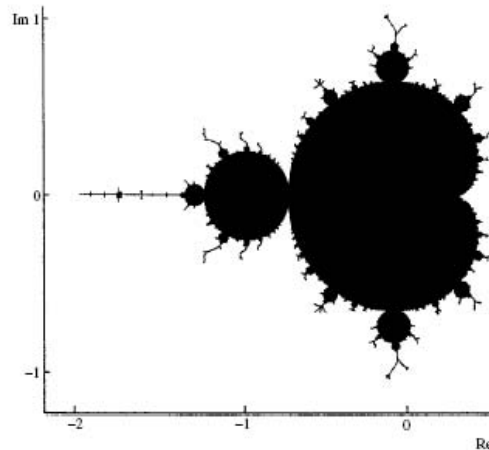


Imagen 20: Conjunto de Mandelbrot. Ilustración extraída de "*Fractal geometry. Mathematical Foundations and Applications*" (Falconer, 2003, p.224).

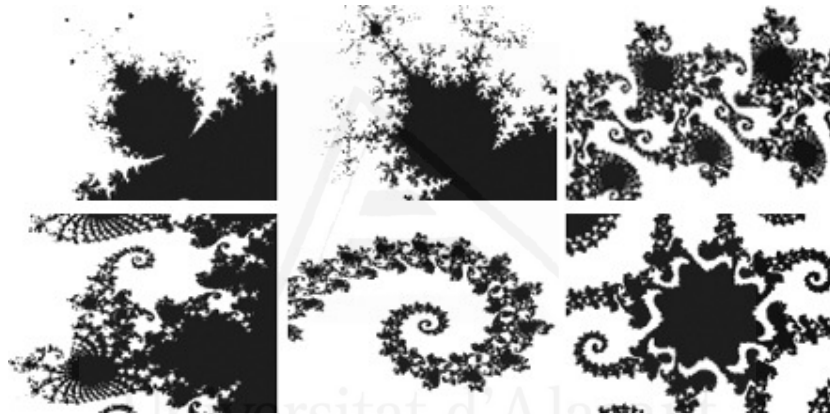


Imagen 21: Detalles de la frontera del conjunto de Mandelbrot. Imagen realizada con ilustraciones extraídas de "*Fractus, fracta, fractal. Fractales, de laberintos y espejos*" (Talanquer, 1996, p.38).

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 podríamos considerarla como fractal si observamos desde los niveles microscópicos la morfología de la queratina, que se presenta en forma de profibrillas 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.

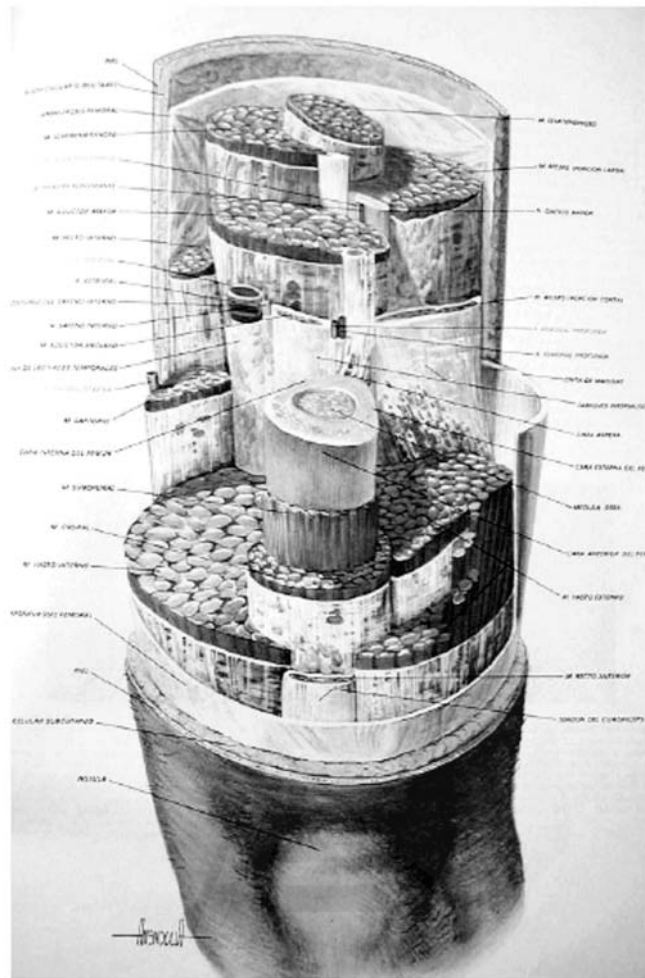


Imagen 22: Pierna humana.

Ilustración extraída de "Atlas de anatomía humana", (López Antunez et al., 1970, p.50).

Universidad de Alicante

3.3 Los inicios de la modernidad en el siglo XVII



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

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

La revolución científica del 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.

Era pues una ciencia intuitiva, deductiva y discursiva.

Los científicos del siglo XVII transformarán radicalmente este modo de pensar y verán a **la naturaleza como una gran máquina que, en última instancia, podríamos nosotros mismos diseñar**. La vida contemplativa deja paso así a la vida activa. La física cartesiana y galileana serán uno de los mayores logros de este período y la geometría y las matemáticas serán los principales instrumentos desarrollados (Tzonis et al., 1984, pp.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, pp.62-63).

Galileo dedicará gran parte de su vida al estudio de una física matemática, deductiva y abstracta. Propugna un nuevo método de análisis de la realidad, *el método experimental resolutivo-compositivo*, con cuatro etapas fundamentales: el aislamiento de una parcela de naturaleza a estudiar; la elaboración de hipótesis o teorías provisionales a la espera de una confirmación experimental que, en general, se trata de intentos de concepción de una idea general de orden matemático; sobre estas hipótesis o teorías se hace necesario, a continuación, extraer las consecuencias que se derivarían del hecho de admitirla como verdadera, fundamentalmente consecuencias deductivas de tipo matemático y finalmente la realización de experimentos a través de los cuales se pueda comprobar la verdad de la ley matemática que el investigador ha concebido.

Sin embargo, no desarrollará en general sus teorías de modo cuantitativo, sino que construirá diversos análisis de modelos abstractos y generales, para lo cual recurrirá continuamente a experimentos imaginarios (Koyré, 1980).

3.3.1.1 Las máquinas

En su libro "*Le Meccaniche*" de 1600, un tratado sobre máquinas simples siguiendo la escuela de Aristóteles, Galileo analiza la idea de momento. Define para ello 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.

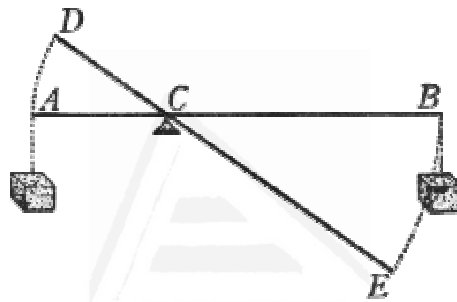


Imagen 23: Definición de momento. Ilustración extraída de "*Le Meccaniche*", figura 3 (Galilei, 1960).

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, está basado en estos conceptos.

El empleo de máquinas presenta tres grandes ventajas según Galileo: el transporte de cargas que no puedan ser divididas, ya que si esto fuese posible el transporte se efectuaría con una pequeña fuerza repetida varias veces, operar en lugares inaccesibles para el cuerpo humano y el **menor costo** con relación al del mismo trabajo efectuado por el hombre o por un animal.

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*, observa que muchos aparatos que funcionan sin problemas a una determinada escala, no logran hacerlo correctamente, sin embargo, a una escala mayor. Leonardo da Vinci, citado por Tzonis y Lefavre (Tzonis et al., 1984, p.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 comprende que las propiedades geométricas de los cuerpos no son las únicas que explican sus comportamientos, es 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 al., 1984, p.40).

Las arquitecturas romana y renacentista remitían al uso de órdenes que, bajo la forma de ornamento, aparecían como la más eficaz y directa asociación con la antigüedad. El orden implicaba, por lo tanto, una vuelta al origen, remitía a una sintaxis constructiva primitiva en la que se basaban las reglas arquitectónicas clasicistas como un conjunto de leyes inmutables, deducidas de la naturaleza.

Galileo refuta estas ideas proponiendo un nuevo proceso de diseño a través de sus análisis de máquinas: 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.¹ Las proporciones y la forma no la pueden preservar de la rotura. Observa, 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, p.70).

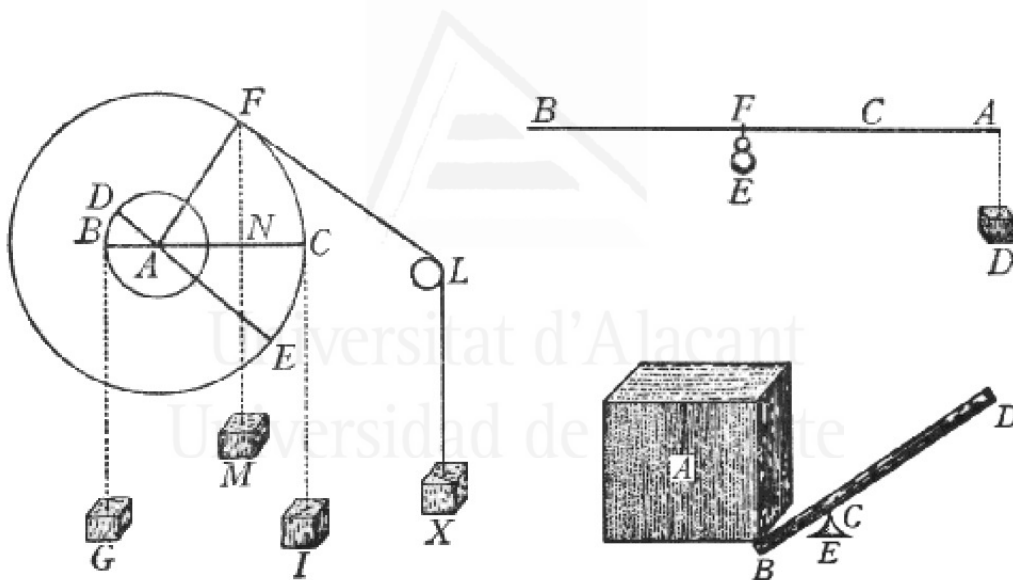


Imagen 24: Mecanismos estudiados por Galileo Galilei. Ilustraciones extraídas de "Le Meccaniche", figuras 4, 5 y 7 (Galilei, 1960).

¹ (...) 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 geométicamente 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, p.70).

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, analiza Galileo,¹ 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. La resistencia de los elementos estructurales depende entonces directamente, además del material, del tamaño que tengan y a medida que éste aumenta, las proporciones de sus dimensiones deberían cambiar si pretendemos mantener constante la capacidad resistente. La teoría de la invariabilidad de las proporciones en las formas naturales sobre la que se sustenta el método clásico de diseño, a través de los órdenes arquitectónicos, es entonces falsa.

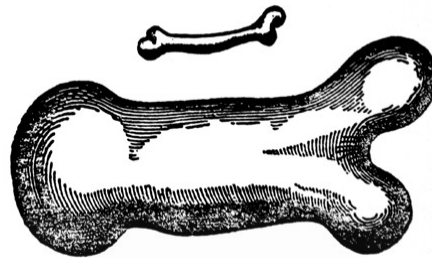


Imagen 25: Dos huesos de distinto tamaño y similar resistencia. Ilustración extraída de "Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias" de Galileo Galilei (Galilei, 1976, p.237).

Galileo Galilei observa los cuerpos y esqueletos de varios animales, como caballos, perros y hormigas,² analizando la dependencia existente entre la forma, el tamaño y el material. Estudia tanto el mundo de las máquinas como el de la naturaleza, dando origen a la teoría del **funcionamiento mecánico** de los seres vivos que se mantendrá vigente hasta principios del siglo XIX, cuando Lamarck establezca la ciencia de la biología como *el estudio de los seres vivos*, que dará origen a las teorías organicistas.

¹ (...) 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, p.237).

² ¿Quién no ve que un caballo que cae de una altura de tres o cuatro brazas se romperá los huesos, mientras que un perro que cae de la misma altura, y lo mismo podríamos decir de un gato que cae desde ocho o diez brazas, no se harán mal alguno, como tampoco un grillo que caiga de una torre o una hormiga que se precipite desde el orbe lunar?. ¿Quién no ve que los niños pequeños salen ilesos de caídas en las que los viejos se romperían una pierna o la cabeza?. (Galilei, 1976, p.71).

3.3.1.2 La idea de límite

El propósito de Galileo no era contradecir la teoría aristotélica de la forma como 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 al., 1984, p.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 sólo 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.

Comprende 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*" establece una serie de proposiciones sobre el comportamiento resistente de distintas piezas sometidas a distintos tipos de carga (Galilei, 1976, pp.218-236). Estudia, 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.

Deduce 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.

Plantea, 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.

En cuanto al equilibrio y a los momentos en una viga de madera en ménsula, empotrada por uno de sus extremos y sosteniendo un peso colgado en su extremo libre, decía:

"El peso E, (...) que cuelga del extremo C, presiona sobre la palanca BC con toda su intensidad (momento) de diez libras. Del mismo modo, si se hubiese colgado del mismo punto solo el peso BD, la presión ejercida con toda su intensidad sería equivalente a 2 libras. Pero este sólido está distribuido uniformemente a lo largo de toda la longitud BC. (...) el peso de todo el prisma se puede considerar como concentrado sobre su centro de gravedad, el cual corresponde al centro de la palanca BC. Ahora bien, un peso que cuelga del extremo C

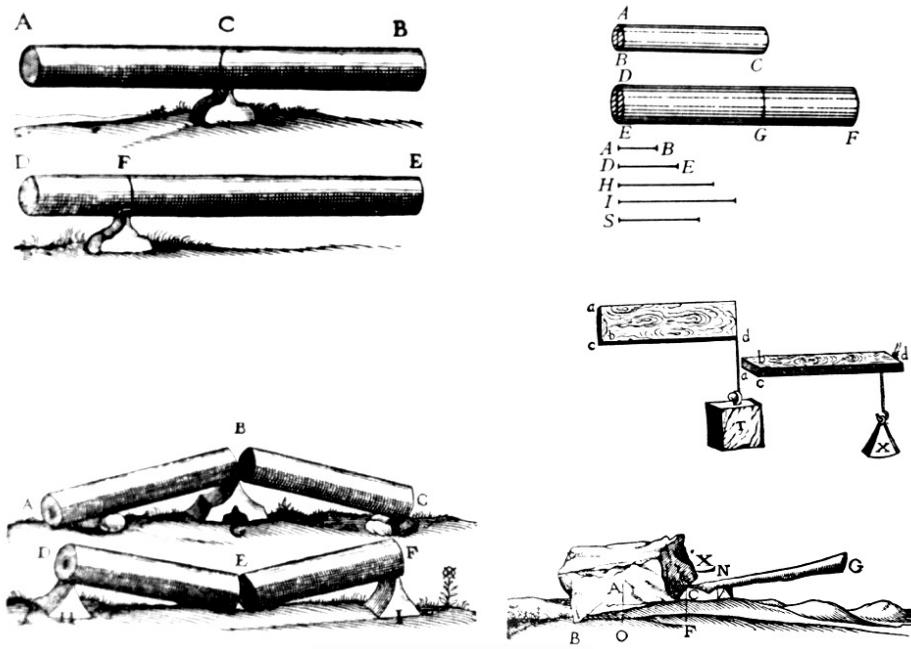


Imagen 26: Algunas estructuras de máquinas analizadas por Galileo Galilei. Ilustraciones de "Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias" de Galileo Galilei (Galilei, 1976, pp.217, 221, 227, 241 y 243).



Imagen 27: Ménsula BC sosteniendo un peso E en su extremo libre C. Ilustración extraída de "Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias" de Galileo Galilei (Galilei, 1976, p.219).

tiene una intensidad (momento) que es el doble del que tendría si se colgara del medio. Si consideramos, pues, los momentos de ambos en cuanto colocados en el extremo C, entonces hemos de añadir al peso E la mitad del peso del prisma." (Galilei, 1976, p.220).

La Mecánica, desde su nacimiento con Galileo Galilei, se conforma así como una teoría aplicable a cualquier tipo de estructuras, ya sean naturales o máquinas construidas por el hombre y pronto se traslada 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 al., 1984, p.41).

Es entonces que la forma en arquitectura empezará 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**.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.3.2 Los conceptos de eficacia y optimización

A mediados del siglo XVII los conceptos de **eficacia y optimización**, que confluieron por primera vez en el diseño de máquinas y sobre todo de máquinas militares, comienzan a aplicarse a la construcción. La **eficacia**, entendida como la búsqueda del **máximo beneficio al mínimo coste** y la **optimización**, como la **satisfacción de dos o más exigencias en conflicto**, sustituyen a la norma clásica de la pureza.

Se inicia así un proceso irreversible, un nuevo tipo de pensamiento que se irá proyectando paulatinamente sobre el diseño de cualquier producto: el **concepto moderno de diseño**. (Tzonis et al., 1984, p.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. Es por eso que 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 desde el siglo XVI, los primeros ejemplos y hacia fines del siglo XVIII, la mecanización del diseño rebasa los problemas de construcción y estabilidad en la obras edilicias para entrar en el funcionamiento propio del edificio.

Comenzará 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, ponen en evidencia la difusión de estas nuevas ideas (Tzonis et al., 1984, pp.43-44).

Universidad de Alicante

3.3.3 El reflejo en la arquitectura: la construcción eficaz y optimizada

3.3.3.1 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 como *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 militares los primeros en trasladarla y aplicarla a las construcciones arquitectónicas.

Francesco di Giorgio, citado por Tzonis y Lefaivre (Tzonis et al., 1984, p.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, cecos 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 consiste 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 introducen una serie de innovaciones decisivas en los sistemas defensivos a lo largo del siglo XVI.

Por un lado, las murallas pasarán a construirse con tierra y se revestirán 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 ésta comienza a plegarse, surgiendo así los bastiones y los revellines que caracterizaron a este nuevo tipo de fortalezas.

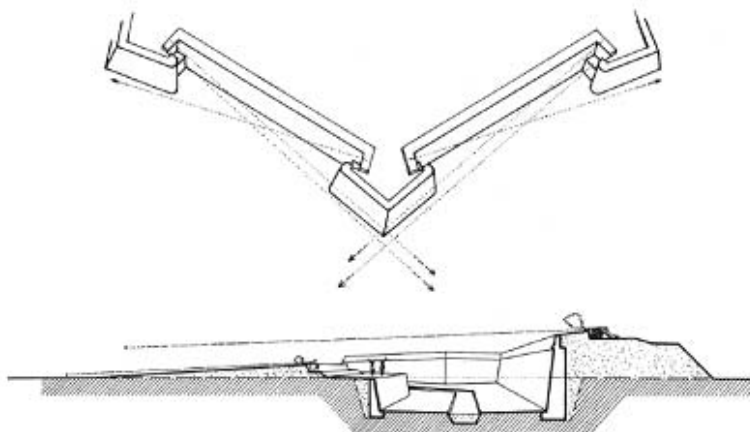


Imagen 28: Ataque a tiros en una fortaleza abaluartada. Ilustración extraída del libro de Vauban de 1742, *"Traité de l'attaque et de la défense des places"*, citada en *"Vauban le magnifique"* (Vasconi, 2003, p.25).

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. Eran diseñados geoméricamente 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.

Los bastiones y los revellines eran utilizados entonces como plataformas de artillería, obligando al ejército atacante a situarse más lejos de los muros y disminuyendo de esta manera su efectividad.

Por otra parte comenzarán a construirse, frente a las zanjas, terraplenes en pendiente llamados glacis para mantener a las murallas ocultas del fuego horizontal de artillería. El enemigo no veía más que un talud de tierra y no podía, por lo tanto, tirar contra la obra de fábrica, a la vez que se encontraba obligado a avanzar al descubierto (Griffith et al., 2006, pp.39-41).

Con el fin de retardar aún más el momento en que el ejército atacante pudiera tomar la muralla, comienzan a aparecer también otros dispositivos separados del cuerpo principal de la fortaleza como las media lunas, las tenazas o las contraguardias, que no representan un refugio para el asaltante una vez que los han tomado.

Como resultado de todas estas transformaciones se eliminan 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 surgen las fortalezas con forma de estrella, capaces de dispersar el poder de fuego del atacante provisto con estas nuevas armas.

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.

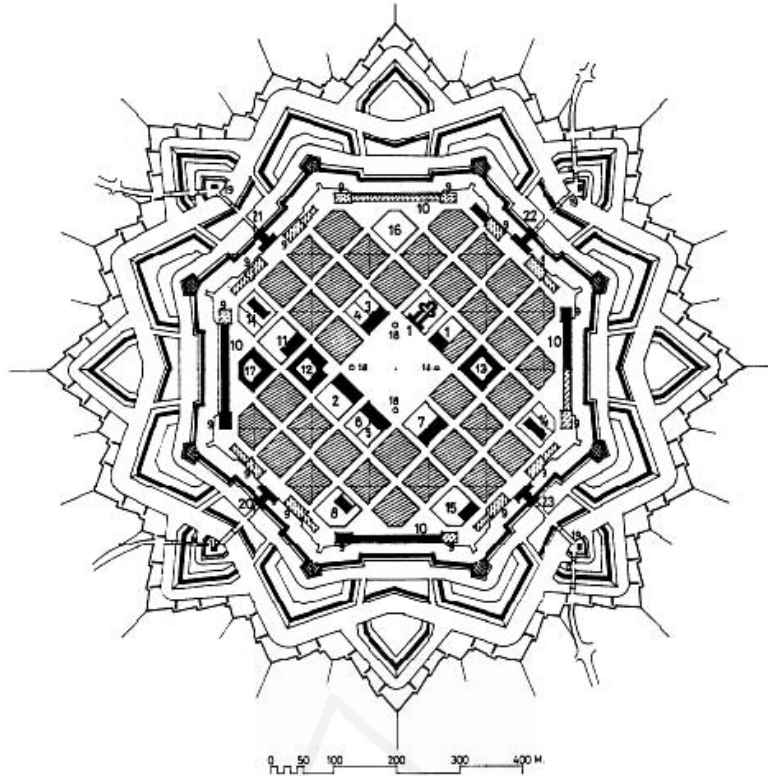


Imagen 29: Planta de la ciudad de Neuf Brisache, diseñada por Vauban. Ilustración extraída de "*Vauban le magnifique*" (Vasconi, 2003, p.31).

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 recogen 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. El ingeniero militar, según Errard, debía ser al mismo tiempo soldado y geómetra.

A finales del siglo XVII Vauban perfecciona el diseño de este tipo de fortificaciones construyendo numerosas ciudadelas abaluartadas con revellines, glacis, media lunas, tenazas, reductos, palisadas, fosos y todos los avances de su época.

En la evolución de su obra, que pretende alcanzar progresivamente la máxima eficacia defensiva multiplicando los obstáculos para el atacante de modo que pueda incluso caer un bastión y mantenerse a salvo la fortaleza, es posible distinguir tres sistemas amurallados diferentes.

Neuf-Brisach, ubicada en Alsacia 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 primero recogieron y sistematizaron en España el conjunto de conocimientos que había sido elaborado por los tratadistas italianos y franceses acerca de las nuevas fortificaciones abaluartadas (Carvajal, 1985, p.55).

Según Cristóbal de Rojas, el ingeniero militar debía tener conocimientos de geometría, matemáticas y experiencia en la materia.¹

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

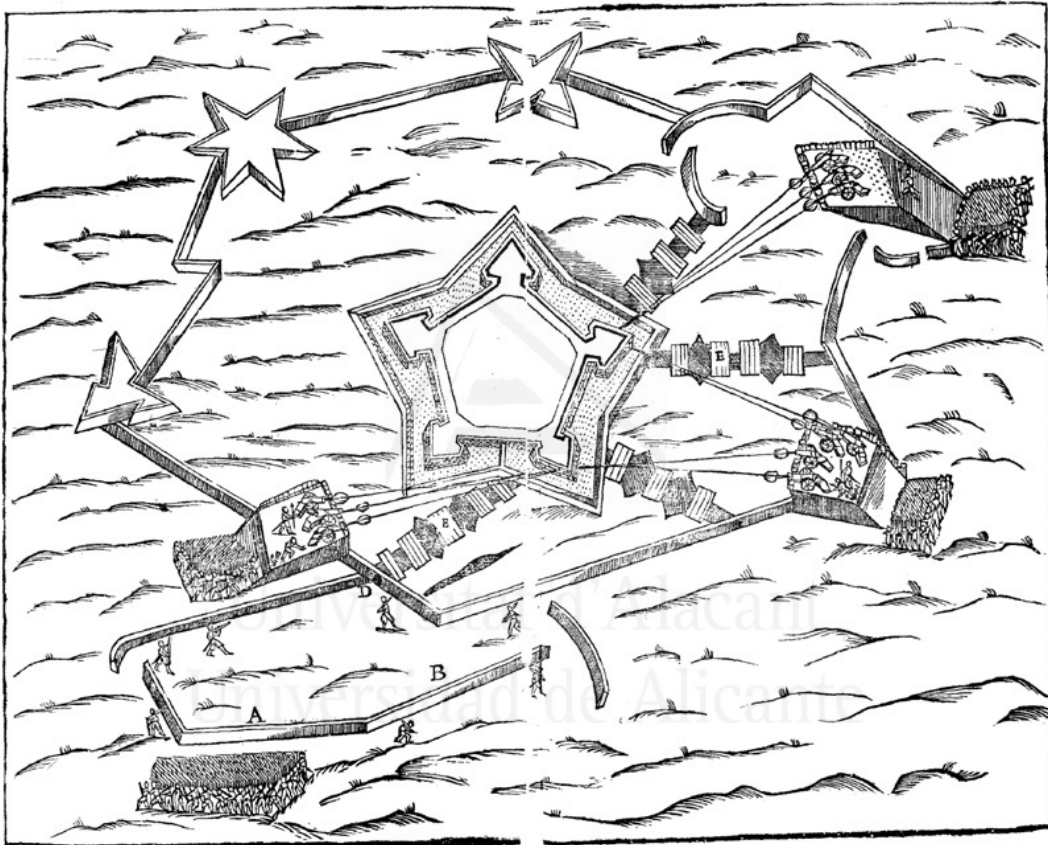


Imagen 30: Ataque a una fortificación abaluartada.
Ilustración extraída de "*Teoría y práctica de fortificación conforme a las medidas y defensas de estos tiempos*" (Rojas, 1598, p.105).

¹ Tres cosas han de concurrir en el soldado, o Ingeniero, que perfectamente quiere tratar la materia de fortificación. La primera, saber mucha parte de Matematicas: si fuere posible, los seis primeros libros de Euclides, (...) La segunda es, la Aritmética, que sirve para dar cuenta del gasto que para hacer la fabrica se ofrecerá antes que se haga, o después de hecha, y en su construcción para las medidas de distancias y proporciones (...) La tercera, y más principal para la fortificación, es saber reconocer bien el puesto donde se ha de hacer la fortaleza, o castillo. Será difícil saberlo dar a entender y enseñar el Ingeniero, si no hubiere estado en la guerra en ocasiones, y cerca la persona de algún gran soldado. (Rojas, 1598, p.21)

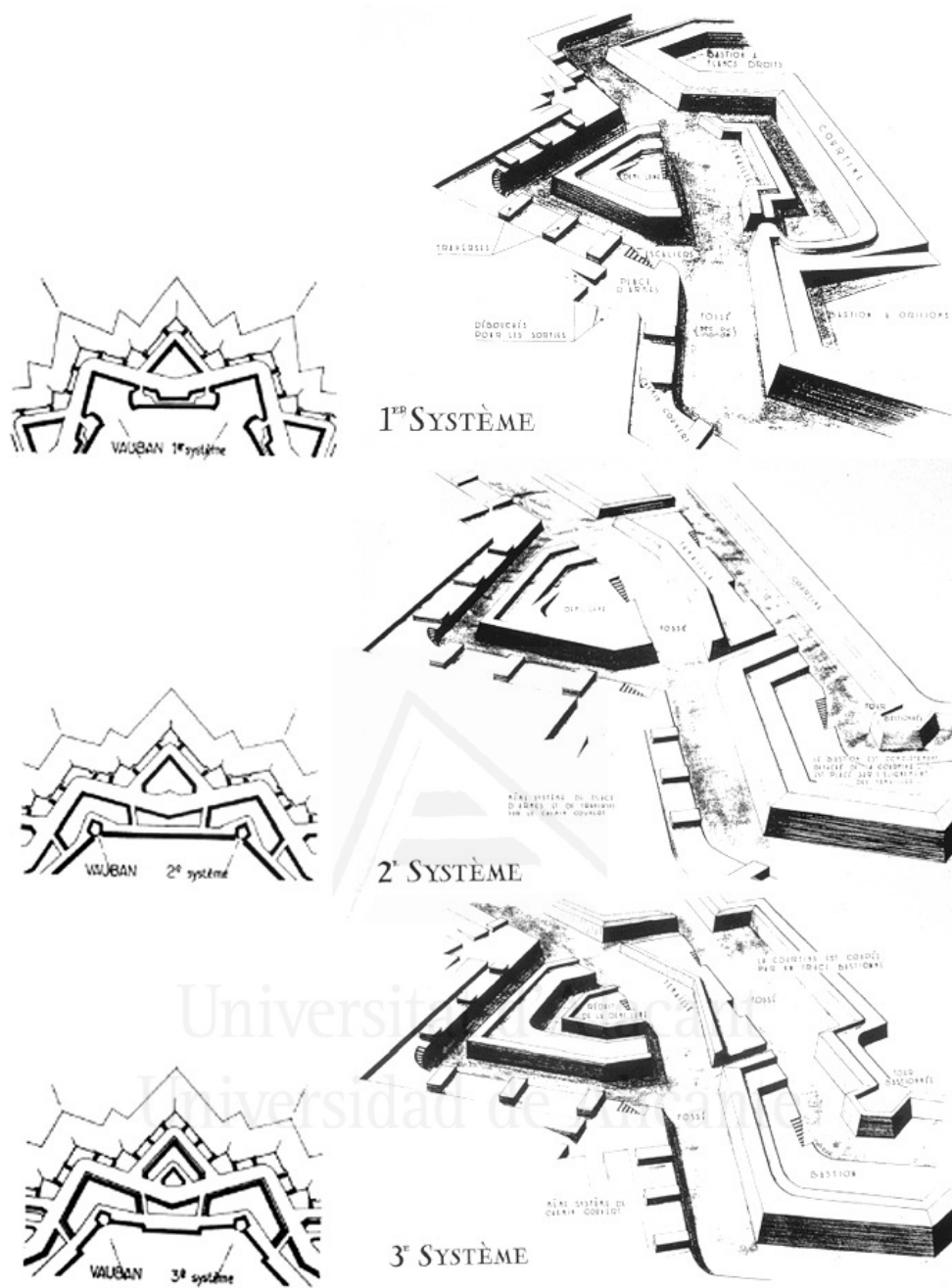


Imagen 31: Los tres sistemas de fortificación de Vauban. Ilustración extraída de "Vauban le magnifique" (Vasconi, 2003, p.30).

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 crea la "*Academia Especial del Cuerpo de Ingenieros*" de Alcalá de Henares y en 1805 la "*Academia de las Armas Generales*" de Zamora, que asumirán las funciones de la Academia de Barcelona.

Las materias impartidas en estas academias militares, entre las que se puede 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, son 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 las colonias en América y en el norte de África, tales como caminos, carreteras, puertos, canales, arsenales y fortificaciones, aplicando la nueva norma de la eficacia.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.3.3.2 Evolución de los perímetros amurallados europeos en los inicios de la modernidad

Los perímetros amurallados para la defensa de ciudades o plazas fueron construidos en Europa, desde la Antigüedad y hasta el siglo XV, con paños de muralla de planta circular o poligonal, de una altura importante y a los que podían eventualmente adosarse torres de planta también circular o poligonal.

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.¹

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, pp.617-621).

La evolución de los perímetros de las fortificaciones concebidas para la defensa frente a ataques de ejércitos equipados con armas arrojadas 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 distintos ángulos de talud², 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.

¹ Las fortalezas no deben tener forma rectangular, ni tampoco ángulos salientes, sino que su forma será circular, con el fin de observar al enemigo desde distintos puntos. Las torres construidas con ángulos salientes son difíciles de defender, pues tales ángulos protegen más y mejor al enemigo que al habitante de la fortaleza. (...) Las distancias entre las torres deben establecerse teniendo en cuenta que no estén tan alejadas una de otra que no puedan alcanzarse por una flecha, con el fin de que si una torre es atacada, sea posible rechazar a los enemigos desde las otras torres, que quedan a derecha e izquierda, mediante escorpiones u otra clase de armas arrojadas. (...) Las torres deben ser redondas o poligonales, pues si son cuadradas las máquinas de guerra las destruyen con toda facilidad, ya que los arietes rompen sus ángulos con sus golpes; pero si son circulares, con piedras en forma de cuña, aunque golpeen su parte central no pueden dañarlas. (Vitruvio, 1995, pp.79-80).

² Es completamente distinta la dificultad, si independientemente del tiro por elevación que aplasta, el atacante debe contar con tiros dirigidos oblicuamente. Estos tiros oblicuos se logran dando al pie del muro, en lugar de un perfil vertical, un asiento muy pronunciado, un talud contra el cual rebotan los proyectiles verticales desde el vértice. Este artificio era muy utilizado en Oriente, desde la más lejana antigüedad: los cruzados debieron aprenderlo de Siria, y la Edad Media lo aplicó sistemáticamente. (Choisy, 1980, p.618).

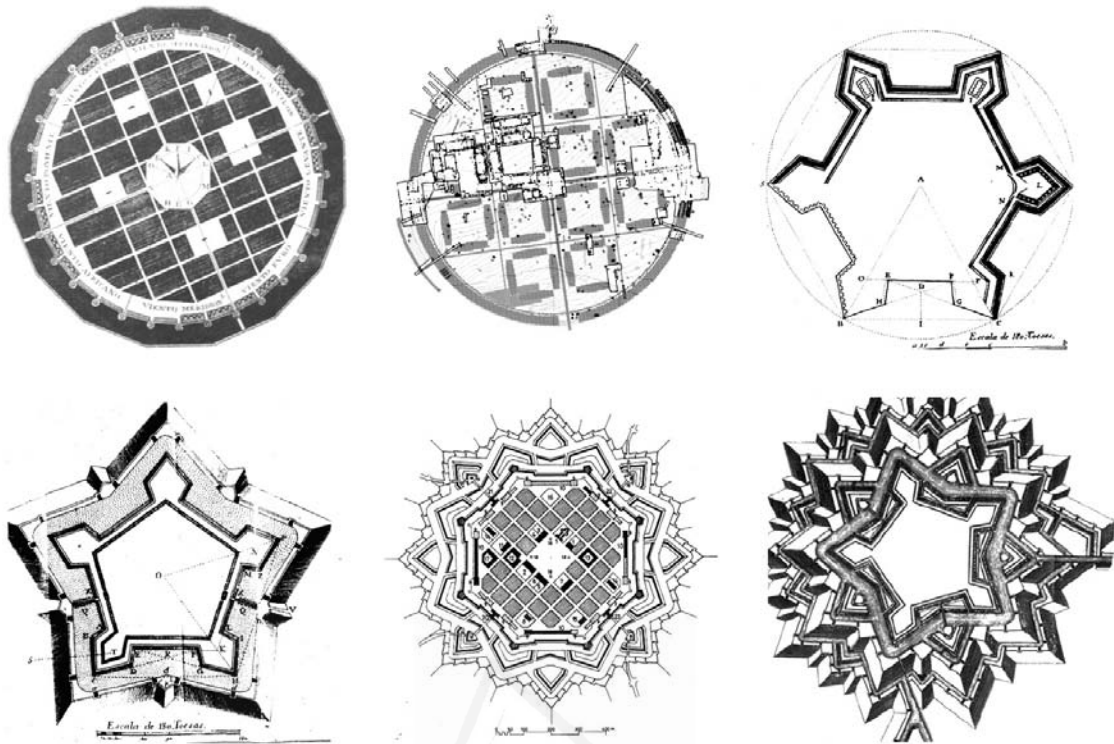


Imagen 32: Algunos perímetros amurallados europeos ordenados cronológicamente.

De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo:

- A: Planta de una ciudad. Ilustración extraída de *"Los Diez Libros de Arquitectura"* de Vitruvio (Vitruvio, 1992, lámina I).
- B: Planta de Aggersborg, Dinamarca, siglo X. Ilustración extraída de *"Geophysical survey at Aggersborg, North Jutland"* (Goodchild et al., 2011, figura 10).
- C: 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"* (García Melero, 1990, p.207).
- D: 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"* (García Melero, 1990, p.208).
- E: Plano de Neuf Brisach, Vauban, 1699-1702. Ilustración extraída de *"Vauban le magnifique"* (Vasconi, 2003, p.31).
- F: Ciudadela de Lille. Plano de Müller, realizado en 1746, sobre el proyecto de Vauban. Ilustración extraída de *"The Vauban fortifications of France"* (Griffith et al., 2006, p.40).

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, aparecen las plantas en forma de estrella y se reduce drásticamente la altura de los paños de muralla que, cuánto más altos fueran ahora, más vulnerables resultaban a los tiros de cañón.

La evolución geométrica de las fortificaciones, que pasa ahora 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, lleva a la aparición progresiva de bastiones, media lunas, revellines y glacis, que van definiendo un perímetro amurallado estrellado con características fractales.

Cada nueva punta que aparece tiene 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 en la evolución de su geometría.

Una nueva forma más compleja emerge como respuesta a un cambio en su entorno: la aparición 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 para el ejército que la construye.

Estas nuevas formas emergentes tienen características fractales que recuerdan al proceso de generación de un copo de nieve de von Koch.

Tal como ocurre en la evolución de algunas formas naturales, la búsqueda de la eficacia conduce a que la geometría de los perímetros amurallados europeos de los siglos XVI y XVII adquieran características fractales.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.3.3.3 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, surge en 1678 la conocida como *Ley de Hooke* (Timoshenko, 1957A, pp.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 los materiales más influyente en el desarrollo de la ingeniería estructural durante el siglo XIX.

A finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII, un gran número de 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, p.20).

El problema de Galileo de la viga en voladizo cargada con su peso propio y con un peso adicional en el extremo, conocido como "el problema de Galileo", vuelve a ser estudiado por el suizo James Bernouilli, quien supone que toda sección plana de una viga permanece plana durante la flexión.

En 1717 Johann Bernouilli, hermano de James, enunció el principio de los desplazamientos virtuales, método aún hoy empleado en la determinación de las deformaciones elásticas en estructuras.

Posteriormente su hijo, Daniel Bernouilli, estudia el problema de la determinación de la curva elástica de barras flexionadas. Leonard Euler, influido por Daniel Bernouilli, estudió los problemas de las curvas elásticas de vigas y columnas y empleó el método del *Trabajo Mínimo*; contribuyó además al avance de la disciplina con su discusión sobre el pandeo de las columnas.

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", con una definición muy diferente a la que se conoce hoy en día. Definía el Módulo de Elasticidad de cualquier sustancia como una columna de la misma sustancia, capaz de producir una presión en su base que es al peso que causa cierto grado de compresión como la longitud de la sustancia es a la disminución de la longitud. 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 París (Benévolo, 1987, p.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 es 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.

Barré de Saint-Venant trabajó sobre la flexión de vigas curvas, las vibraciones y las deformaciones plásticas. En 1855 presentó sus memorias que tratan el problema de la torsión y en 1856 las relativas a la flexión, en las que por primera vez se consideran correctamente los esfuerzos de corte en las secciones transversales de vigas. Discute, además, sobre problemas de impacto y vibración

Duhamel, contemporáneo de Saint-Venant, trabajó en la teoría de la vibración de los cuerpos elásticos. En su "*Mémoire sur les Vibrations d'un Système Quelconque de Points Matériels*" de 1834, demostró que los desplazamientos producidos por una fuerza variable pueden ser representados por una integral, subdividiendo los intervalos infinitesimales con el fin de obtener el movimiento forzado como la suma de los movimientos de los intervalos. Esta ecuación, conocida como la "Integral de Duhamel", es utilizada hoy en día en Dinámica de Estructuras para el cálculo sísmico.

Los conceptos de esfuerzo y de deformaciones principales, tal como hoy los conocemos, fueron introducidos por Agustín Louis Cauchy.

Todos estos 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 Paris en 1729, es considerado como el primer tratado sobre problemas de construcción basado en principios matemáticos y métodos algebraicos en lugar de aplicar las reglas tradicionales (Collins, 1998, p.191) o como el primer gran tratado de ingeniería moderna que representa un cambio de dirección en cuanto al dimensionamiento de la estructura a partir de procedimientos numéricos y a la organización de los trabajos de construcción (Galindo, 2000, p.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 sometidos a los empujes de distintos tipos de terreno; en el segundo libro se analiza la mecánica de bóvedas y en el tercero, estudia las propiedades físicas y la aplicación en la construcción de materiales como piedra, ladrillo, cal, arena, puzolana, yeso y morteros (Galindo, 2000, p.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, permaneciendo el conocimiento estancado "*en un estado de imperfección, tal como ocurre con la arquitectura*" (Galindo, 2000, p.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, pp.48-51).

Otro texto de Belidor, "*Architecture Hydraulique, ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie*", editado entre 1737 y 1753, trataba temas como la construcción de puertos, faros y demás edificaciones auxiliares en obras marítimas, incluidas las fortificaciones necesarias para su defensa. Este tratado es considerado uno de los más influyentes en la formación de los ingenieros en las Academias Militares durante el siglo XVIII (Cámara, 2005, pp.191-200).

Mientras tanto, en el ámbito académico de Francia y por orden de Jean-Baptiste Colbert, ministro de finanzas de Luis XIV, comienza a realizarse un estudio exhaustivo de los materiales de construcción utilizados en la época.

Comienzan 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 al., 1984, p.46).

A éstos 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, p.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, p.190) y (Tzonis et al., 1984, p.46).



Imagen 33: Iglesia Santa Genoveva de París, diseñada por Jacques Soufflot (1764-1790).
Fotografía del autor.

Para la construcción de la iglesia Santa Genoveva de Paris, 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, p.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, p.27).

Rondelet, quien disponía de toda la información acerca del diseño de esta iglesia, publicó en Paris, 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 (Gonzalez Moreno-Navarro, 1993, p.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, p.209).

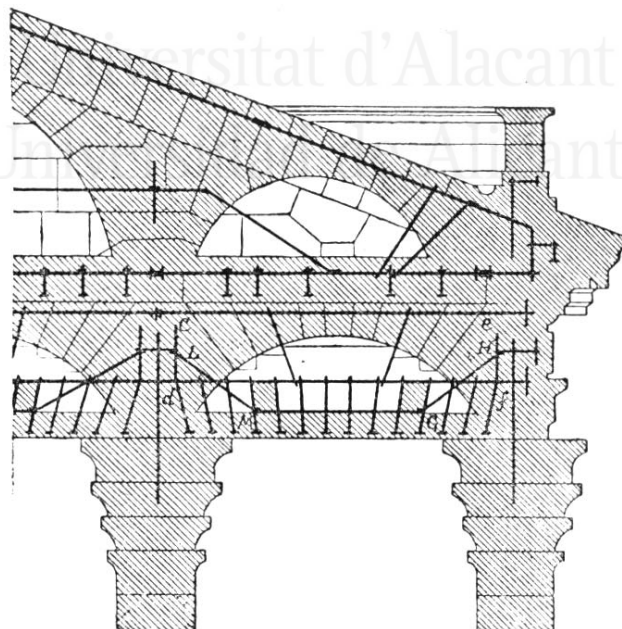


Imagen 34: Detalle de los refuerzos de hierro introducidos en la sillería de piedra de la Iglesia Santa Genoveva de Paris, de Jacques Soufflot (1764-1790). Ilustración extraída de "*Historia de la Arquitectura Moderna*" (Benévolo, 1987, p.27).

La primer entrega de su tratado, publicado en 1802, incluía los exhaustivos estudios sobre piedras y la segunda, de 1803, que traducía varios textos del tratado de Vitruvio, continuaba con los estudios de materiales. La segunda sección de la quinta entrega estaba dedicada a la descripción de los ensayos sobre resistencia de materiales pétreos que realizaron Gauthey, Perronet, Soufflot y él mismo. La tercera sección de la quinta entrega trataba sobre la estabilidad de los muros y la cuarta sección sobre la teoría de las bóvedas. En la sexta entrega se incluía un extenso estudio sobre maderas, incluyendo tablas que reflejaban las características mecánicas de la mayoría de las especies utilizadas en la época en la construcción edilicia. En la última parte de su tratado estudiaba las características de las construcciones con hierro y las resistencias de este material. (Gonzalez Moreno-Navarro, 1993, p.195-196).

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, p.192), con proporciones constantes, para comenzar a ser **diseñados en función de su material y de las cargas** que debían soportar.

Durante el siglo XVII, por otra parte, ya habían tendido a generalizarse en Europa las políticas económicas mercantilistas, lo cual implicó el surgimiento de 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**.

3.3.3.4 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 empieza 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 implicaba la búsqueda del placer en la organización visual de los elementos constructivos y si bien, a un nivel profundo, puede considerarse complementaria al proceso de mecanización, se convirtieron con el tiempo en procesos antagónicos.

La estetización del diseño responde también a intereses relacionados con el desarrollo del mercantilismo, pero lo hace en otro sentido: en la búsqueda del incremento del consumo. Su objetivo era hacer del producto un objeto de deseo. Mientras las técnicas de mecanización se desarrollan paulatinamente, lo hacen a su vez las ideas sobre estética y cada vez será más difícil encontrar conceptos, expresiones o lenguajes comunes entre ambos métodos de diseño (Tzonis et al., 1984, pp.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, p.22).

En 1747 se establece la "*École des Ponts et Chaussées*" (Escuela de Puentes y Caminos) en París que asume las enseñanzas técnicas impartidas por la vieja "*Academia Real*" y en 1748 se funda la "*École du Génie Militaire de Mézières*" (Escuela de Ingenieros Militares de Mézières) (Collins, 1998, p.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 establece por primera vez en esta época, entonces, la dualidad entre arquitectos e ingenieros.

El prestigio de la antigua Academia hace sombra sobre las escuelas de ingeniería en sus inicios, pero el progreso de la ciencia irá ampliando paulatinamente el campo de actuación de los ingenieros y restringiendo el de los arquitectos (Benévolo, 1987, p.22).

A finales de este siglo surgen dos instituciones nuevas en París: la Escuela de Bellas Artes y la Escuela Politécnica, que sustituyen a la vieja Academia y desarrollan con su propio estilo de enseñanza y sus propias ideas el concepto de diseño (Tzonis et al., 1984, pp.48-49).

Este modelo francés de enseñanza será 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, p.22).

4 Las formas estructurales en la arquitectura reciente

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.1 El análisis estructural a principios del siglo XX

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

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. Esta igualdad ya había sido establecida por Émile Clapeyron, quien había señalado que el trabajo efectuado por las fuerzas exteriores aplicadas en una pieza es igual a la energía elástica acumulada en su deformación (Gere, 2007, p.118).

El "*Teorema de las Deformaciones Recíprocas*" de Maxwell, de 1864, establece que la deformación inducida en un punto A por una fuerza unitaria aplicada en otro punto B, es igual a la deformación inducida en B por una fuerza unitaria aplicada en el punto A.

Posteriormente presentó su diagrama de esfuerzos internos para estructuras de barras, que reúne en un solo trazado todas 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, p.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 1875 presentó una versión inversa de su primer teorema, denominado "*Segundo Teorema de Castigliano*", que establece que la derivada parcial de la energía de deformación de una estructura con respecto a cualquier carga es igual al desplazamiento correspondiente a esa carga (Gere, 2007, p.649). En 1879 publicó en París su libro "*Théoreme de l'Equilibre 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 generaliza 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, p.5).

El desarrollo del hormigón armado y la experiencia que se va adquiriendo en su empleo lleva al vaciado paulatino de las antiguas estructuras macizas, tendiendo a permanecer en las construcciones únicamente las *líneas de firmeza*. **Se tiende a**

emplear cada vez más la mínima cantidad de materia y a hacerla trabajar uniformemente al máximo de su resistencia.

Comienzan entonces a desarrollarse diversos métodos para descubrir la forma y la ubicación de esas líneas de firmeza de los miembros resistentes y comienza también a estudiarse la aptitud de las distintas formas para reaccionar frente a las acciones exteriores.

El equilibrio estático en una estructura se supondrá, entonces, 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, p.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.

En el caso más general, las acciones exteriores de una de las regiones tendrán por resultante una fuerza y un momento situado en un plano oblicuo a dicha fuerza, es decir que la estructura estará expuesta a tensiones normales y tangenciales, o sea, a sollicitaciones de flexión y torsión.

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, podremos 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*" o "*línea de presiones*" (Cardellach, 1970, p.17).

Si la fibra media de la estructura se adapta a esta línea, la estructura resultaría sollicitada únicamente a compresiones y/o tracciones, representadas por las fuerzas coincidentes con los ejes centrales. 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.

El equilibrio se supone entonces un problema de resolución objetiva, no sujeta a particularidades, sea la forma que sea, construida mediante cualquier sistema, se emplee el material que se emplee, siempre analizando una sección se determinan actuando sobre ella dos fuerzas que se cruzan, en el caso más general o solamente una. No hay convenciones ni hipótesis, se determina objetivamente la influencia que las acciones exteriores ejercen sobre la estructura.

Pero es **en el estudio de las reacciones de la materia** donde **aparecen las hipótesis y los convencionalismos**. La solución a este problema se conoce únicamente en condiciones particulares, cuando los estados tensionales son simples o a lo sumo dobles (Cardellach, 1970, p.22): compresión simple, tracción simple y flexión plana, pero aún en estas condiciones la Teoría de la Elasticidad establece dos hipótesis no totalmente racionales: la homogeneidad, continuidad e isotropismo de la materia y la ley de Bernouilli de la conservación de las secciones planas.

La conocida como "ley trapecial" es aquella que, en esencia, expresa el reparto lineal de reacciones en la sección de un sólido por efecto de una fuerza exterior actuante.

Estos esfuerzos exteriores actuantes se pueden reducir a una fuerza central y un momento. El momento provocará una tracción y una compresión separadas por una fibra neutra y la fuerza central descompuesta en una normal y una paralela a la sección producirá un esfuerzo axial y otro cortante. Los esfuerzos normales producidos por el momento y la fuerza central pueden sumarse por el principio de superposición de efectos.

Estas conclusiones son aplicables a todo tipo de estructuras, pues se supone que todas ellas experimentan deformaciones elásticas. Ahora bien, cuando resultaba

desconocido el rigor de dichas deformaciones, especialmente para los cuerpos que no obedecían la ley de Hooke o de la elasticidad, era posible apoyarse en experimentos y en la ley de Bernoulli/Navier, admitiendo el simple giro de la sección transversal alrededor de un eje que pasa por la fibra neutra y una repartición lineal de reacciones en dicha sección, que adoptará siempre un diagrama de forma trapecial.

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, p.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.

Cada barra está sometida a una única fuerza cuyo vector coincide con el lugar geométrico de los centros de gravedad de sus secciones transversales. Las barras deben, a efectos de evitar la aparición de momentos flectores, ser rectilíneas.

Las fuerzas exteriores se concentran en los nudos o vértices. 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.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.2 Las estructuras de barras



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.2.1 Surgimiento de las estructuras trianguladas

4.2.1.1 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, inicia una búsqueda de formas aerodinámicas que lo llevan al principio de que dos o más superficies, una encima de la otra, logran mejor sustentación que una única superficie más larga.

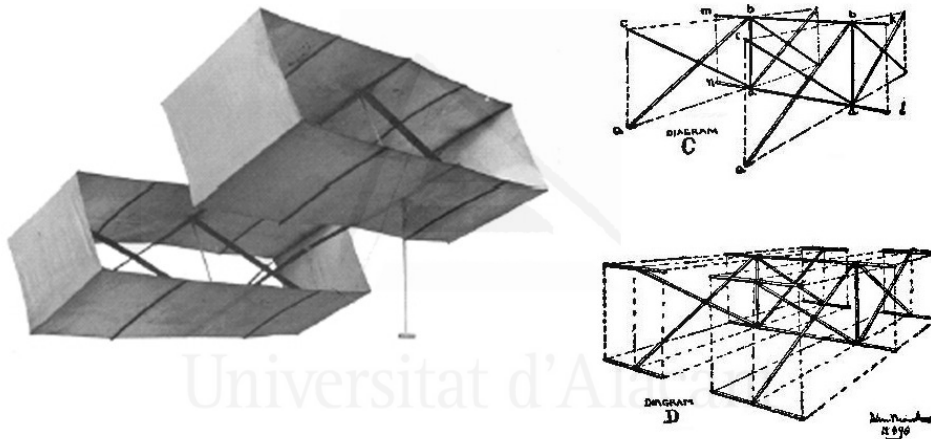


Imagen 35: Cometa celular diseñada por Lawrence Hargrave (1893).
Ilustración extraída de "Los precursores: de la cometa al aeroplano"
(Suay Belenguer, 2003, figura 4).

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.

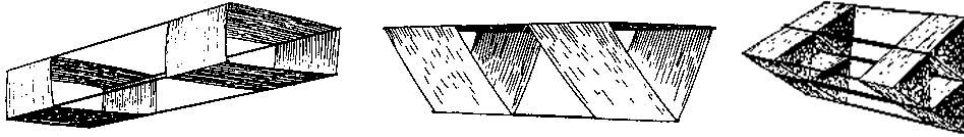


Imagen 36: Evolución del modelo de cometa de Lawrence Hargrave. Ilustraciones extraídas de "The Tetrahedral Principle In Kite Structure", figuras 1, 3 y 6 (Bell, 1903).

En la dirección del eje longitudinal, sin embargo, la estructura seguía siendo débil y era necesario 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** como elemento estructural o armazón 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", donde intentaba resolver el problema de la construcción de una máquina más pesada que el aire que pudiera volar y alojar tripulación.

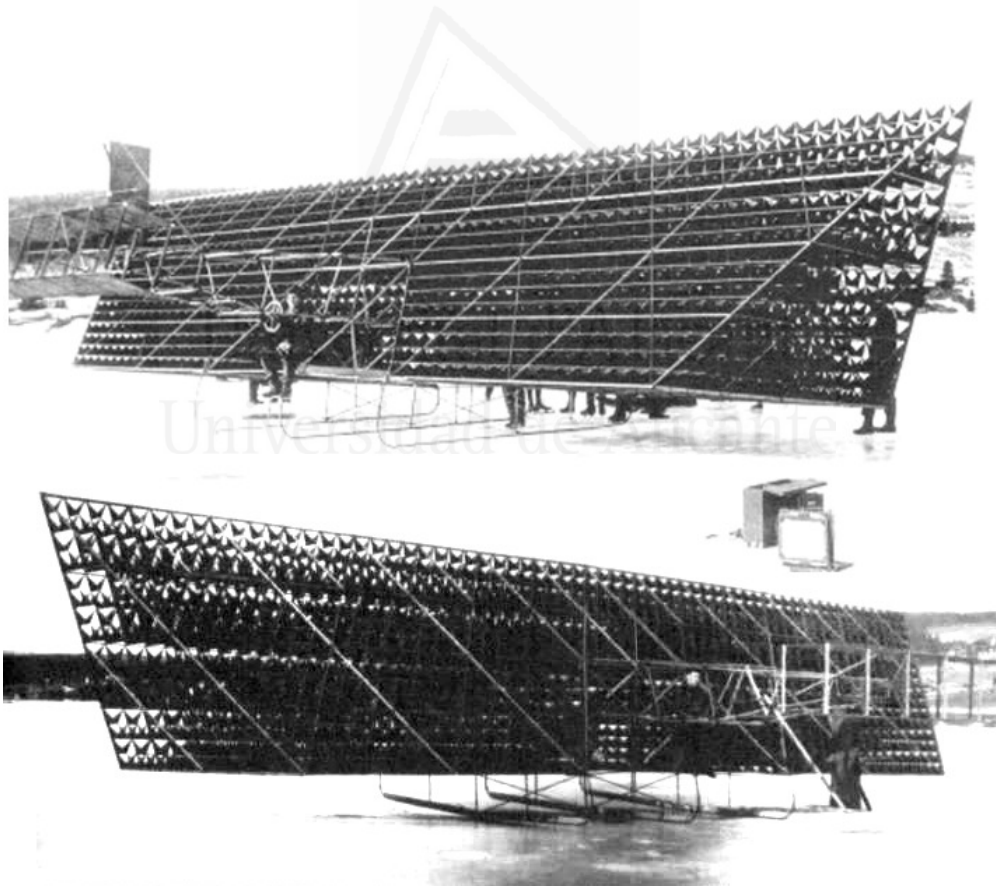


Imagen 37: El Cygnet II, máquina voladora diseñada por Alexander Graham Bell según el principio tetraédrico. Ilustraciones extraídas de Internet
<<http://flyingmachines.ru/Site2/Crafts/Craft28356.htm>>.

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, pp.219-251).

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.¹

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 razón de la eficiencia con respecto al 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, pp.432-435).



Imagen 38: Máquina voladora diseñada por Alexander Graham Bell según el principio tetraédrico. Imagen realizada con ilustración extraída de Internet
<http://photography.nationalgeographic.com/photography/photos/national-geographic-milestones/#/tetrahedral-truss-kite_245_600x450.jpg>.

¹ *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, pp.432-435).

Y 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 da cuenta, sin embargo, que este razonamiento es válido para dos modelos idénticos que únicamente difieran en sus dimensiones, pero si las cometas grandes están compuestas por pequeñas cometas formando una estructura celular, los resultados son 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, pp.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.

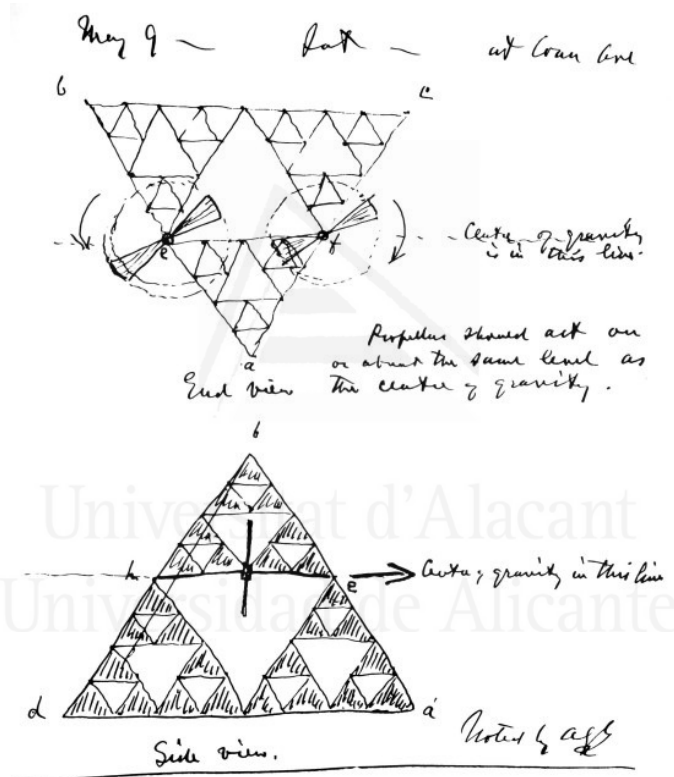


Imagen 39: Modelo de cometa según el principio tetraédrico inventado por Alexander Graham Bell. Ilustración extraída de "Alexander Graham Bell: Voice of Invention", A&E Home Video, Julio de 2005.

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, p.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, p.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.

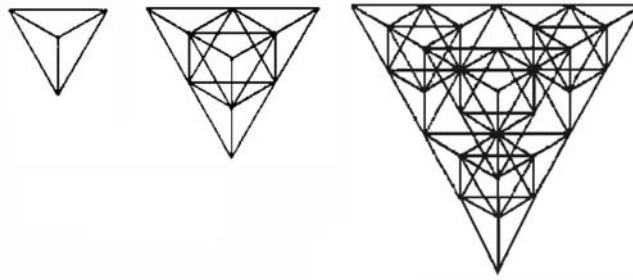


Imagen 40: Modelo de crecimiento celular fractal del armazón de una cometa, según el principio tetraédrico inventado por Alexander Graham Bell. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de "*The Tetrahedral Principle In Kite Structure*" (Bell, 1903, figuras 11, 12 y 13).

El uso de celdas tetraédricas, concluía Graham Bell, no se limita a la construcción de cometas y máquinas voladoras, **es aplicable a cualquier estructura en la que se desee combinar las propiedades de resistencia y ligereza.**



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.2.1.2 Modelos de crecimiento: lineal, fractal y celular fractal

Podríamos 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 (imagen 25), en su libro "*Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*".

Cuando ambos plantean el cambio de escala de los huesos o de las máquinas voladoras, suponen que éstos mantienen intactas las proporciones de sus dimensiones exteriores y también la misma estructura interna. Por este motivo, el peso propio crece siempre más rápido que la sección resistente de los huesos o que la superficie de vela expuesta al viento de las cometas, a medida que las dimensiones aumentan.

Es necesario entonces, según Galileo Galilei, ensanchar los huesos para mantener intacta la capacidad resistente del esqueleto del gigante y hay que evitar, según Simon Newcomb, aumentar en exceso el tamaño de las cometas si se pretende que éstas sean capaces de volar.

Cuanto mayor sea el tamaño de un animal y mayor sea, por lo tanto, la longitud de un determinado hueso de su esqueleto, menor parece ser, en términos generales, su esbeltez, es decir que su sección resistente crece más rápidamente que su longitud, tal como decía Galileo Galilei.

Pero esta variación no parece responder exclusivamente al mayor aumento del peso con relación al incremento de las secciones resistentes. Teniendo en cuenta las esbelteces geométricas medidas en los huesos de las extremidades posteriores de algunos animales (ver tabla 1) podemos concluir que, a medida que aumenta el tamaño del animal, 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 gran diferencia de esbelteces.

La esbeltez del fémur del perro y del gato es mayor que la del fémur de la vaca, pero la diferencia sólo oscila en el entorno del 10% y el 30% (ver tabla 1).

La diferencia de esbelteces en el húmero, para los mismos animales, es algo mayor: entre el 60% y el 70% (ver tabla 1).

Pero la esbeltez del hueso del hombre de estatura normal, medida en el dibujo realizado por Galileo Galilei (imagen 25), es casi 250% mayor que la esbeltez del hueso del gigante, cuya longitud ha sido aumentada tres veces.

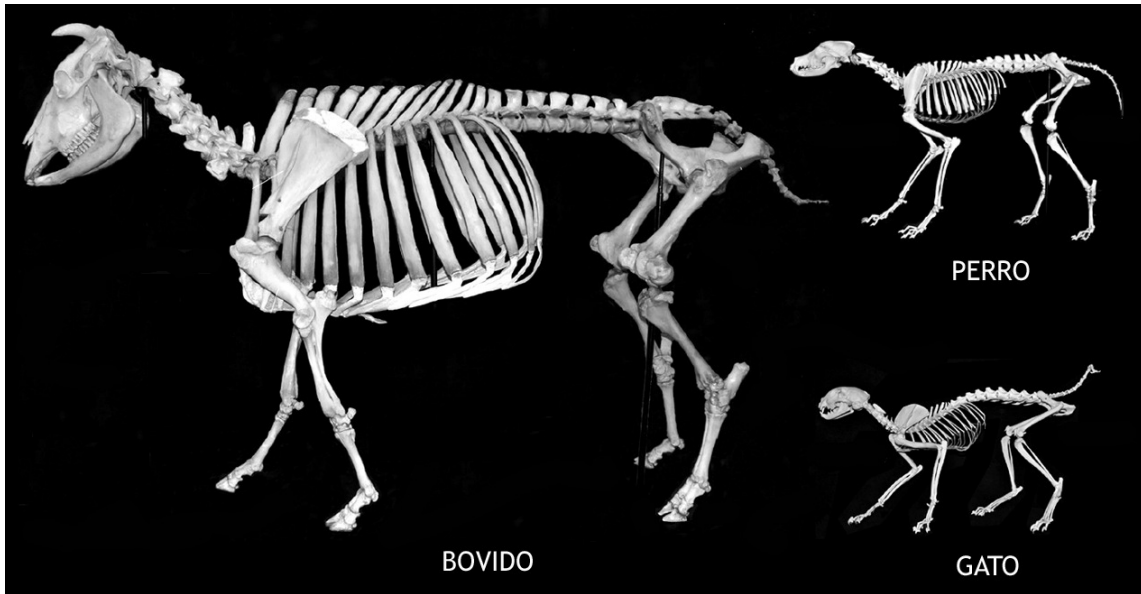


Imagen 41: Esqueletos de bóvido, perro y gato. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de "Atlas de Osteología de los Mamíferos Domésticos" (López Plana et al., 2008).

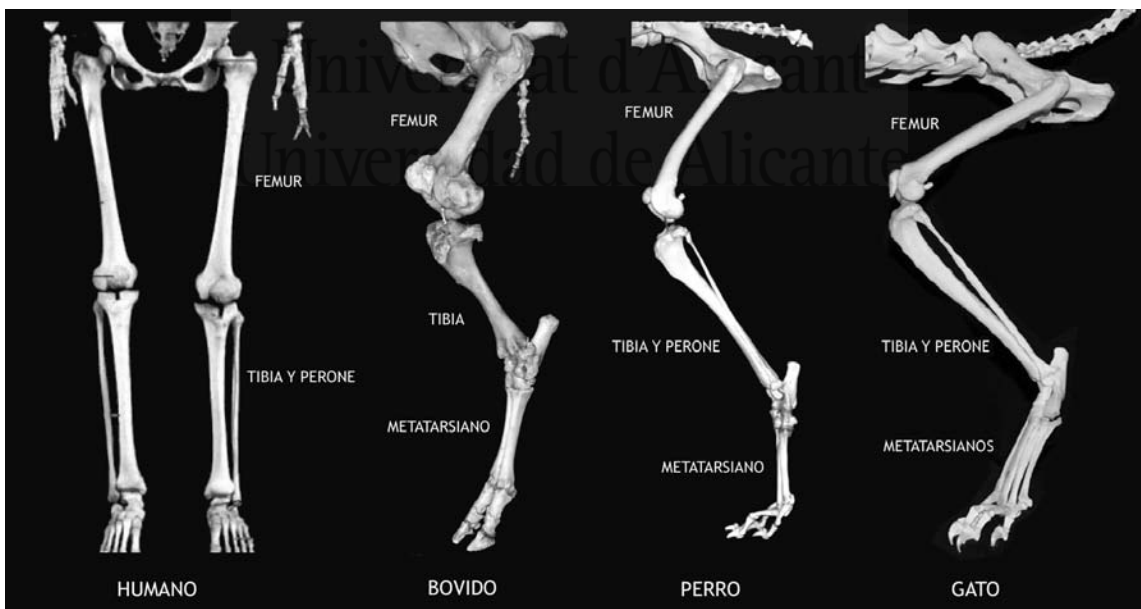


Imagen 42: Esqueletos de extremidades posteriores en distintas especies, llevados aproximadamente a la misma altura. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de "Atlas de Osteología de los Mamíferos Domésticos" (López Plana et al., 2008).

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. Las dimensiones de las que surgen los valores de esta tabla fueron tomadas de la imagen 43 para los fémures, de la imagen 44 para los húmeros y de la imagen 25 para los huesos dibujados por Galileo Galilei.



Imagen 43: Fémur izquierdo de distintas especies, visión craneal.

De izquierda a derecha: équido, bóvido, perro, gato y conejo. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de "Atlas de Osteología de los Mamíferos Domésticos" (López Plana et al., 2008).

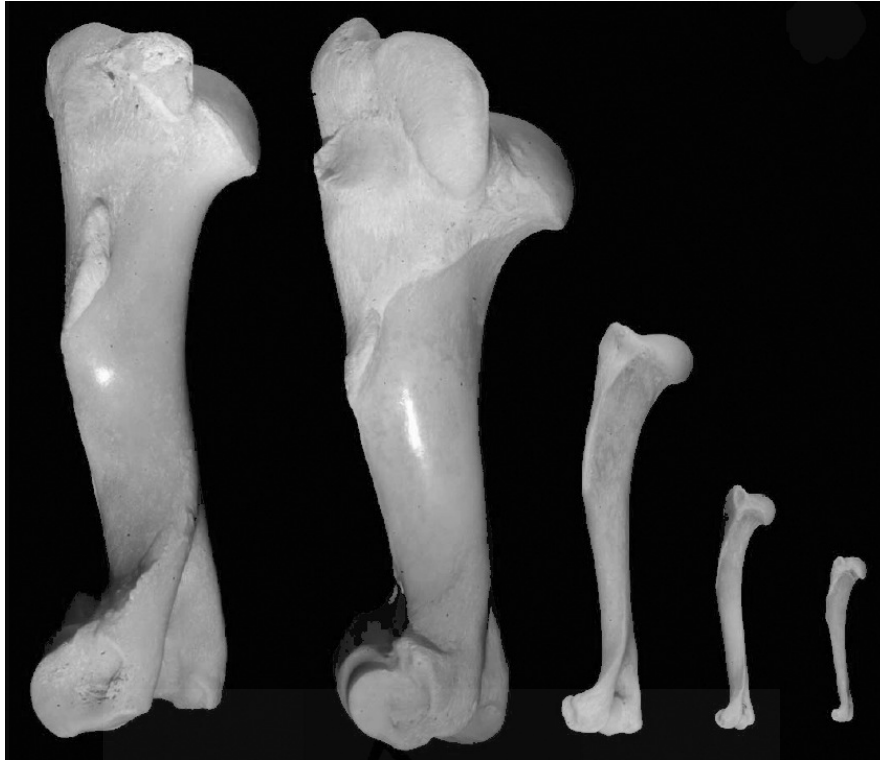


Imagen 44: Húmero izquierdo de distintas especies, visión lateral. De izquierda a derecha: équido, bóvido, perro, gato y conejo. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de "Atlas de Osteología de los Mamíferos Domésticos" (López Plana et al., 2008).

Si observamos la estructura interna de huesos similares en distintos animales podemos descubrir que cuando cambian las dimensiones, la naturaleza recurre a determinados mecanismos formales que atenúan la variación de la relación entre el peso propio y el área de las secciones resistentes.

Cuanto mayor sea el tamaño del hueso o cuanto mayor carga deba soportar, parecería ser mayor el volumen óseo ocupado por la cavidad medular y por el hueso esponjoso.

En la imagen 45 puede observarse cómo en el interior de un húmero de bóvido se encuentra una cavidad medular de mayor tamaño que la que podemos proporcionalmente encontrar en huesos similares de animales pequeños y cómo el espesor de las paredes de un metacarpiano de équido aumenta hacia la zona media de dicha cavidad, que en los extremos aparece, a su vez, parcialmente 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 ingeniarse para diseñar estructuras de distintos tamaños con el mismo material. Cuando el mamífero alcanza grandes tamaños, aparecen huecos en el interior de sus huesos que son proporcionalmente mayores.

Los huecos en el hueso esponjoso o en la cavidad medular del húmero de una vaca, por ejemplo, alcanzan una escala superior a los huecos en los húmeros de los perros o de los gatos. Es decir que su estructura es más compleja. O si pensáramos las sucesivas escalas de huecos en el hueso como generadas mediante un proceso iterativo, desde los espacios generados en el interior de la estructura de las cadenas polipeptídicas o en los sucesivos pliegues de la molécula de colágeno, hasta aquellos



Imagen 45: Corte longitudinal de huesos: fémur humano, húmero de bóvido y metacarpiano de équido. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de *"Atlas fotográfico de Anatomía del cuerpo humano"*, (Yokochi et al., 1989, p.7) y *"Atlas de Osteología de los Mamíferos Domésticos"* (López Plana et al., 2008).

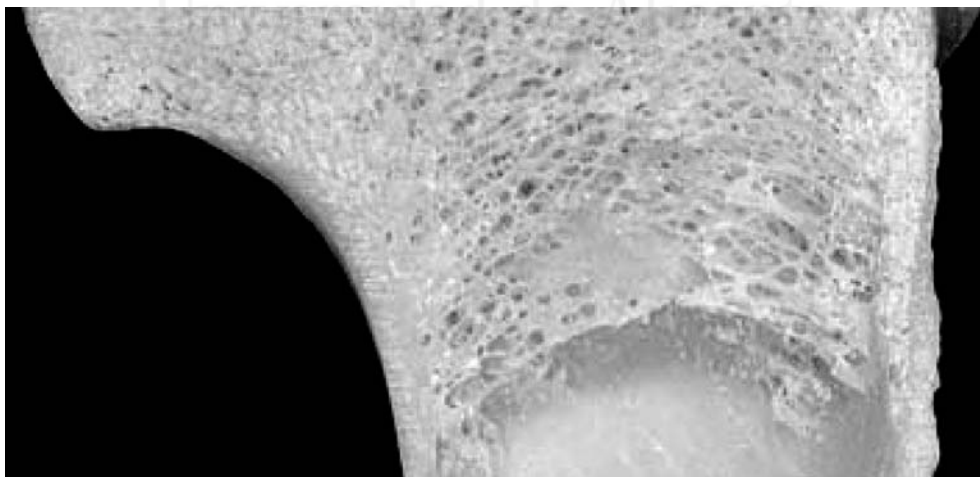


Imagen 46: Detalle del sistema trabecular en el hueso esponjoso de un húmero de bóvido. Ilustración extraída de *"Atlas de Osteología de los Mamíferos Domésticos"* (López Plana et al., 2008).

en el interior de las trabéculas y de la propia cavidad medular, podríamos decir que en los huesos de los animales grandes es necesario realizar un mayor número de iteraciones para definir su geometría, es decir, que el grado de fractalidad de sus huecos es mayor.

Una estructura jerárquica más compleja en la que se generan huecos de mayores escalas y un engrosamiento más diferenciado de las paredes de hueso compacto de acuerdo a la concentración de tensiones que existe en las distintas zonas, son entonces algunos de los mecanismos geométricos que la naturaleza parece utilizar para aumentar la escala de sus estructuras óseas, atenuando el impacto del aumento de su propio peso.

A este proceso de crecimiento podríamos denominarlo como **crecimiento fractal**, ya que van apareciendo progresivamente y en forma jerárquica huecos de mayores tamaños en el interior de las estructuras óseas a medida que aumentan de tamaño.

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 que favorecen la tarea de volar.



Imagen 47: Sección de un hueso metacarpiano del ala de un buitre, hueco y reforzado interiormente a modo de viga Warren.

Imagen extraída de "On growth and form" (Thompson, 1945, p.981).

Las investigaciones sobre la optimización de la forma de cometas realizadas por Graham Bell, parten del trabajo realizado por Lawrence Hargrave. Graham Bell evoluciona la cometa celular de Hargrave formada por dos celdas con forma prismática a la forma tetraédrica, reconociendo en la **triangulación espacial** un **mecanismo geométrico de rigidización estructural**.

Se da cuenta, además, que adicionando celdas tetraédricas según un determinado modelo de crecimiento, podía crear cometas de gran tamaño en las que creyó que la relación entre el peso y la superficie de vela expuesta al viento se mantenía constante. Más adelante se demostró que dicha relación disminuía favorablemente para el vuelo de la cometa, si se tenía en cuenta el peso de los nudos.

El modelo de crecimiento inventado por Graham Bell con el objetivo de la optimización del vuelo de cometas con estructura tetraédrica, permite la creación de grandes estructuras a partir de la adición de pequeñas células siguiendo un procedimiento con características fractales. A este proceso de crecimiento podríamos denominarlo, por lo tanto, como **crecimiento celular fractal**.

Uniendo cuatro células tetraédricas se obtiene una cometa celular, con forma igualmente tetraédrica. Cuatro de estas cometas celulares pueden igualmente agruparse para formar una cometa tetraédrica de mayor tamaño y así sucesivamente. Iterando este procedimiento un número determinado de veces

obtendremos finalmente una estructura de forma tetraédrica a partir de la adición de células tetraédricas menores, agrupadas jerárquicamente para conformar tetraedros de tamaño cada vez mayor.

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 diversas estructuras como las caparzones de virus formadas por la agrupación de subunidades proteicas de menor complejidad (imagen 4).

Un proceso de fabricación de estructuras edilicias con estas características presentaría grandes ventajas con respecto a los procedimientos habituales de la época: 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 o 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*", además de cometas, varios barcos, una estructura cortavientos y una vivienda (Bell, 1903, p.251). En 1907, además, levantó una torre de observación de 72 pies de altura con barras de media pulgada de espesor en Beinn Bhreagh, Nueva Escocia, siguiendo el principio tetraédrico.

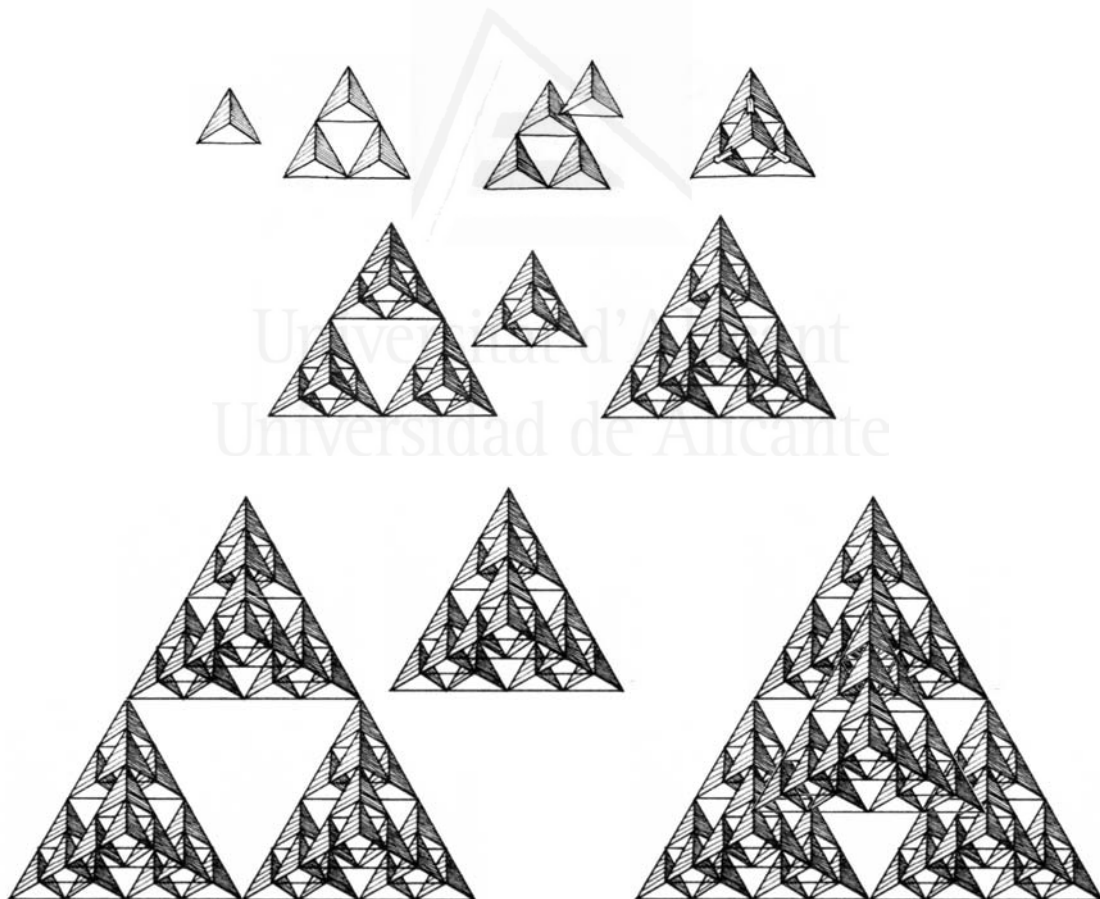


Imagen 48: Modelo de crecimiento celular fractal según el principio tetraédrico inventado por Alexander Graham Bell. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de "*Construcción de cometas tetraédricas con materiales sencillos*" (Suay Belenguer, 2000B, pp.38-39).



Imagen 49: Torre en Nueva Escocia diseñada y construida por Alexander Graham Bell (1907).
Ilustraciones extraídas de "*Alexander Graham Bell: Voice of Invention*", A&E Home Video,
Julio de 2005.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.2.2 El traslado a la arquitectura a mediados del siglo XX

4.2.2.1 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 ¹ a los que denominaba como "prodigios naturales", como los radiolarios, las caparazones de los moluscos o los cristales minerales. **Un modelo geométrico**, decía, **es el resultado de una determinada acción mecánica** (Mc Cleary, 1997B, pp.22-23).

Le Ricolais asimiló enseñanzas provenientes de la biología, la topología, la geometría y la cristalografía. Poincaré, Euler, Lord Kelvin, Ernst Haeckel y D'Arcy Thompson fueron referencias constantes en sus investigaciones y 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.



Imagen 50: Sistema Isoflex desarrollado por Le Ricolais. Ilustraciones extraídas de "*Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*" (Mc Cleary, 1997B, pp.23 y 24).

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, p.21). Le Ricolais analizó los que denominaba como "perfiles de economía máxima en la naturaleza", observando que los sistemas de ondulaciones complejas no son sino perfiles estáticos adaptados a determinadas solicitaciones.

¹ No he encontrado mejor disciplina en el impredecible problema de la forma que observar los prodigios creados por la naturaleza. (Mc Cleary, 1997C, p.40).

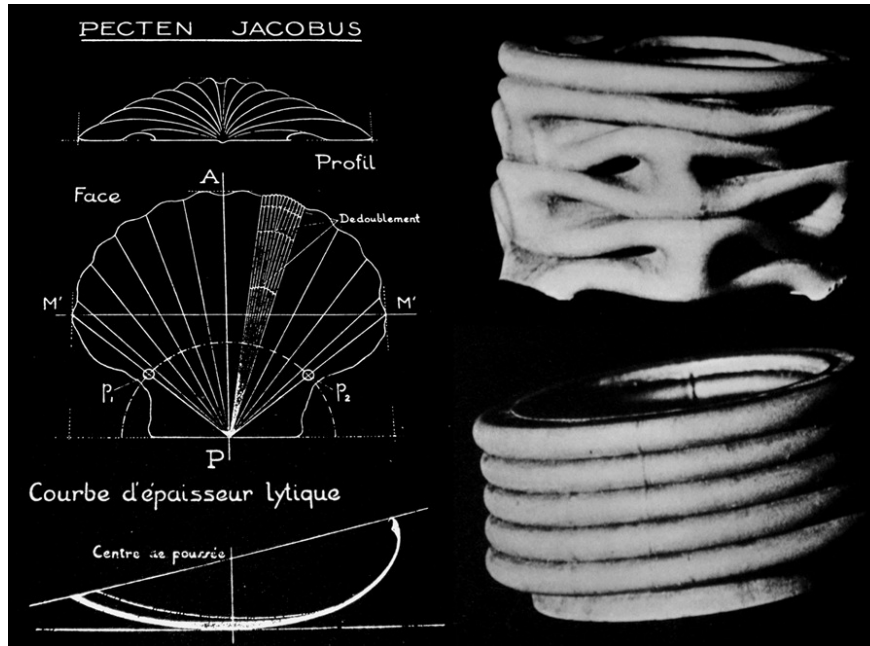


Imagen 51: Estudio de caparazón de molusco y sistema Isoflex. Ilustraciones extraídas de "Survey of works; Structural Research 1935-1971" (Le Ricolais, 1973, p.20) y de "Some Structural Principles Exemplified in the Work of Le Ricolais" (Mc Cleary, 1973, p.63).

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, p.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 al., 1997A, p.137).

El biólogo Monod-Herzen, citado por Le Ricolais en su artículo "Survey of works; Structural Research 1935-1971" (Le Ricolais, 1973, p.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 descubre que en sus esqueletos era posible visualizar algunos temas que Lord Kelvin había desarrollado sobre particiones igualitarias del espacio y se dedica al estudio de las

particularidades de algunas especies con el objetivo de encontrar posibles aplicaciones constructivas.

Le Ricolais se centra fundamentalmente en la **idea de separación de 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, p.23).

En esta configuración geométrica, no reconoce un modelo formal a seguir sino un **modelo de organización**, de disposición estructural.

Según Le Ricolais, es necesario que las estructuras creadas por el hombre obedezcan a las leyes de la naturaleza, pero esto no implica que deban imitar a las estructuras naturales.

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).

Una especie de radiolarios en particular, cuyo esqueleto estaba formado por tres esferas concéntricas de distinto tamaño dispuestas una dentro de otra y unidas por epísculos, llamó en especial su atención.¹

Le Ricolais era un ferviente admirador de las vigas tipo Queen Post con pendolones o péndolas² 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 esta especie de radiolarios 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.

Se puede decir, por lo tanto, que en la búsqueda de optimización de una tipología estructural, Le Ricolais aplicó el concepto de fractalidad, tal como ya había hecho Graham Bell en sus investigaciones sobre estructuras de cometas celulares, 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.

¹ *Una especie en particular me fascinó. Es la que se asemeja en gran medida a las pequeñas piezas chinas de marfil (...) que consisten en una esfera dentro de otra y ésta a su vez dentro de otra. (...) ¿Por qué se da esa recurrencia en la forma? Puede resultar demasiado obvio, pero puede que la estandarización comenzase ahí; la importancia de repetir algo. Este principio es el que en nuestra jerga denominamos automorfismo: una especie de ensamblaje geométrico de formas que van de una a otra repitiéndose.* (Mc Cleary et al., 1997A, pp.137-138).

² *(...) raramente descubrimos cosas tan maravillosas como la péndola. Nadie sabe su nombre, pero la persona que tuvo esa idea tiene que haber sido un hombre terriblemente intuitivo. (...) Es un artilugio glorioso, crear soportes artificiales. La paradoja de columnas suspendidas en el aire. Su belleza y sencillez descansan en la composición o difícil arte de tomar uno más uno y conseguir algo mayor que dos.* (Mc Cleary et al., 1997A, p.157).

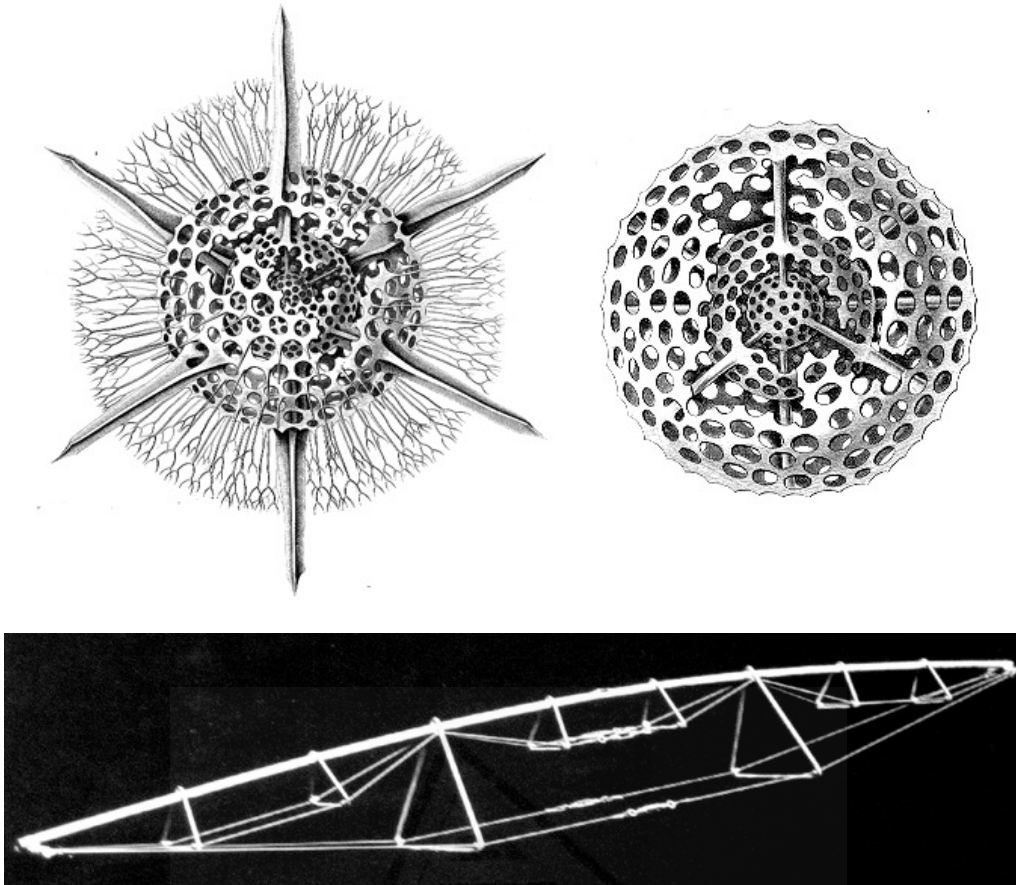


Imagen 52: Especies de radiolarios con esqueletos automórficos (fractales) estudiados por Le Ricolais y diseño de viga automórfica Polyten (1968-1969). Ilustraciones extraídas de "*Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*", lámina 24 (Haeckel, 1862) y de "*Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*" (Mc Cleary et al., 1997A, p.115).

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 repetimos 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 repetimos 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 que, 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, Le Ricolais llega 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. Descubre 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, p.24).

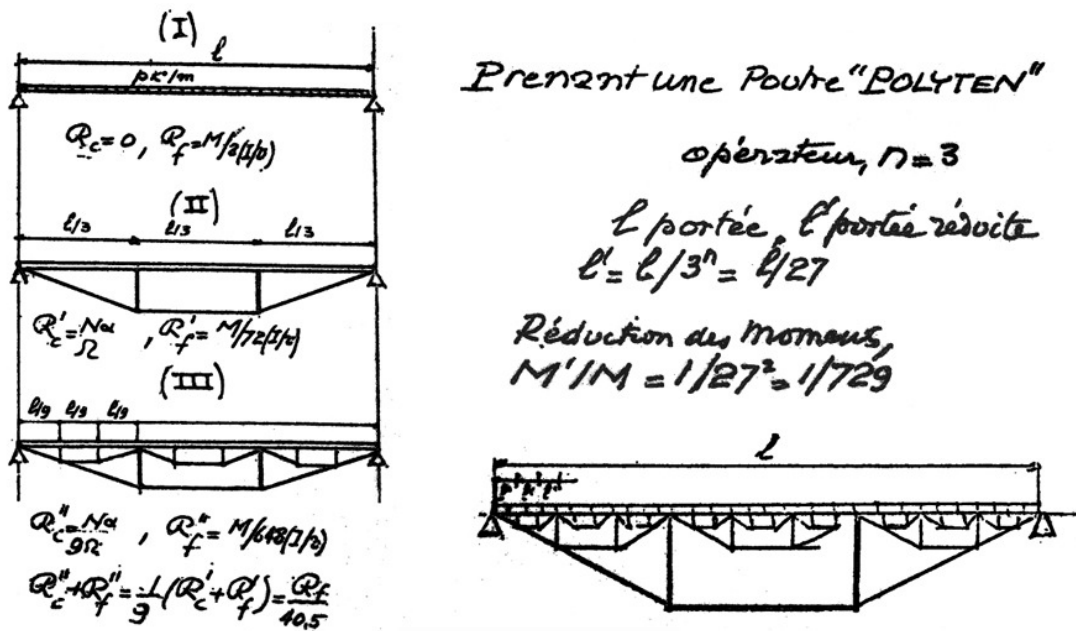


Imagen 53: Análisis de la eficacia de una viga "Polyten". Ilustraciones extraídas de "La nature des choses" (Le Ricolais, 1968, p.58).

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

Con el objetivo de descubrir las configuraciones geométricas más eficientes, es decir, las más resistentes con el empleo mínimo de material, realiza 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.

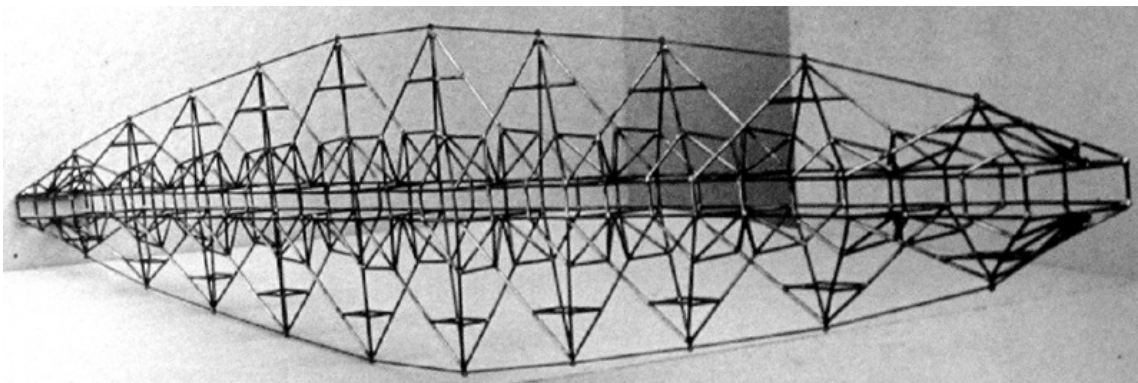


Imagen 54: Diseño de viga atirantada. Ilustración extraída de "Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas" (Mc Cleary et al., 1997A, p. 83).

Llega 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 cubo-octaédrica, 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) profundiza 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 evita en general la diferenciación tradicional entre elementos traccionados y comprimidos dispuestos alternadamente (como en una viga Warren, por ejemplo) y descompone toda la estructura en dos grupos claramente independientes, que se equilibran mutuamente (Mc Cleary et al., 1997A, pp.43-44).

Descubre 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 al., 1997A, p.135). Poco peso, por lo tanto y gran solidez estructural. Analizando una microfotografía de la estructura interna de un hueso descubre una red tridimensional de gran complejidad geométrica. Deduce entonces que una buena forma de diseñar estructuras es utilizar elementos huecos, livianos y con gran rigidez.

(...) 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, p.40).

Propone entonces que su sistema Isoflex pueda convertirse en un sistema de barras trianguladas. Cada estructura superficial podría tener su equivalente esquelético y viceversa (Mc Cleary, 1997B, p.24). Llega 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. Es preferible entonces sustituir 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.

Analizando modelos de rotura en compresión de diferentes combinaciones geométricas, descubre que una columna que combinaba tetraedros con pirámides de base cuadrada presentó un comportamiento óptimo (Mc Cleary et al., 1997A, p.78). En este modelo las deformaciones presentaron un carácter notablemente regular, aún luego de entrar la pieza en pandeo, permitiendo descartar el comportamiento inestable a menudo observado en estas circunstancias.

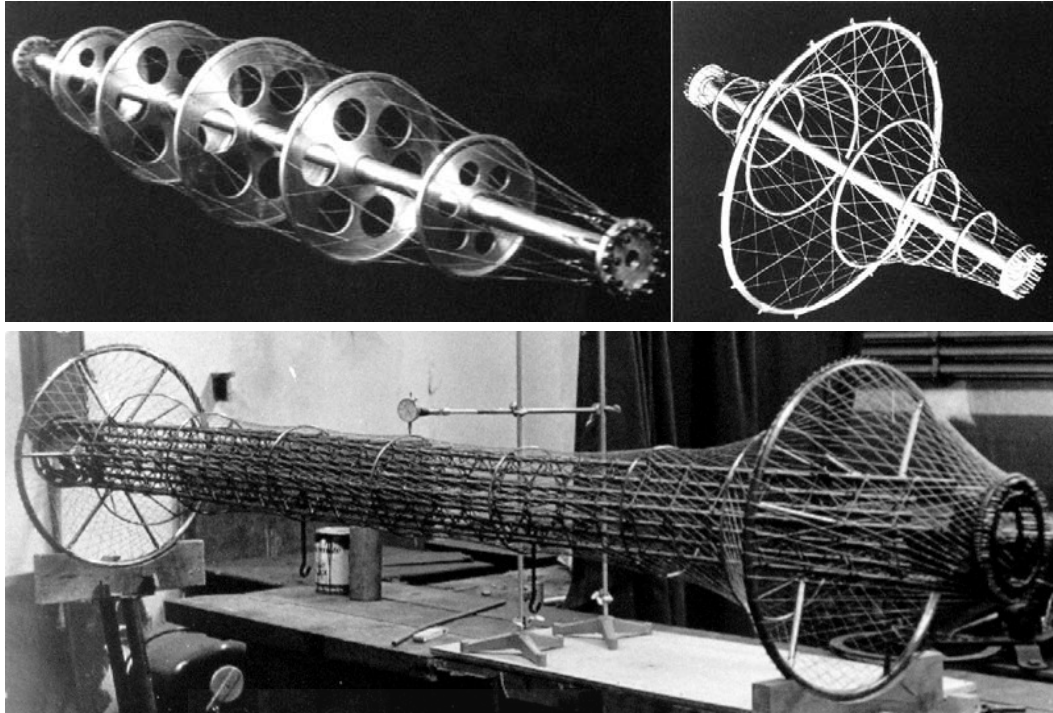


Imagen 55: Diseños basados en el sistema FPR. Ilustraciones extraídas de "*Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*" (Mc Cleary et al., 1997A, p.51) y de "*Trente ans de recherches sur les structures*" (Le Ricolais, 1963, pp.96 y 100).

Estos sistemas, creía 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.



Imagen 56: Diseños de Le Ricolais: maquetas de un "Esferovector", compuesto por 6 anillos suspendidos de una red de cables traccionados y un "Cosmorama" de 30 niveles de altura con un espacio libre interior de 100 m de diámetro, capaz de recibir 40.000 espectadores en 100.000 m² de entresijos. Ilustraciones extraídas de "*Survey of works; Structural Research 1935-1971*" (Le Ricolais, 1973, p.39).

Los conceptos de inercia, rigidez y triangulación se entrelazan en las investigaciones de Le Ricolais para redefinir la geometría espacial de las unidades estructurales y hacerlas más eficientes. Si se diseña un soporte vertical sometido a una gran carga de compresión como un tubo hueco, la materia adquiere una inercia y un radio de giro elevados y aumenta la rigidez frente a posibles problemas de pandeo. Pero los tubos de paredes delgadas pueden presentar problemas de pandeo localizados, así que es más efectivo un diseño de tubo hueco cuyas paredes estén conformadas por barras formando una malla triangulada en el espacio.

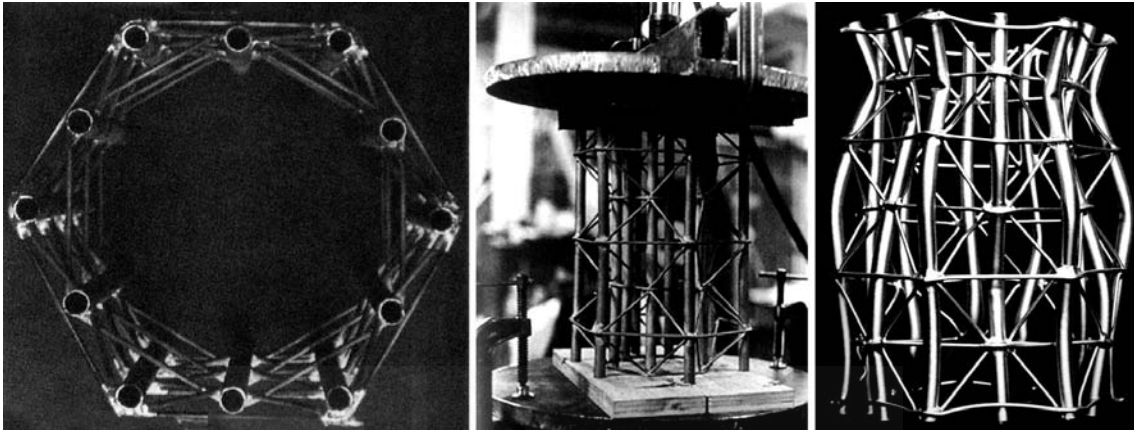


Imagen 57: Columna automórfica con geometría basada en el uso de tetraedros y pirámides de base cuadrada. Ilustraciones extraídas de "Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas" (Mc Cleary et al., 1997A, pp.79, 81 y 151).

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, p.39).

La *columna automórfica* es el resultado de un proceso de diseño del segundo tipo, es decir, surge de un proceso de 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 y formar estructuras de mayor escala y complejidad.

Este diseño de columnas podría considerarse como el resultado de las investigaciones realizadas para optimizar los soportes comprimidos de megaestructuras diseñadas con el sistema FPR, tales como el Esferovector o el Cosmorama, por ejemplo.

Le Ricolais reconoce en este análisis que los huecos que se generan en el interior de un elemento estructural comprimido de esta escala, gracias a los cuales se obtiene una gran inercia y un gran radio de giro, pueden ser aprovechados con diversos fines.

De la misma manera que el interior hueco de los grandes huesos, sometidos a importantes esfuerzos de compresión y flexión, 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 a distintas escalas según una jerarquía que recuerda la compleja organización geométrica de huecos interiores en las formas naturales.

Esta idea trasciende el ámbito restringido del diseño estructural para convertirse en una fructífera línea de trabajo e investigación sobre diseños arquitectónicos a gran escala. En esta línea se enmarcan gran parte de los trabajos que realizó con estudiantes de arquitectura en el Taller de estructuras experimentales de la Universidad de Pensilvania y también varios proyectos innovadores diseñados por diversos 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".



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.2.2.2 Richard Buckminster Fuller

Finalizada la Segunda Guerra Mundial, surgió en los Estados Unidos la urgencia por trasladar a la industria de la construcción la tecnología y los materiales ensayados durante el conflicto bélico.

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 guerra 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. Responden, de esta manera, a una búsqueda de optimización de la cantidad de energía necesaria para la prefabricación, el traslado y el montaje de una vivienda.

Estructuralmente estaban compuestos por una malla triangulada, seguramente inspirada en la forma de los esqueletos de los radiolarios, que al igual que el sistema geodésico de Barnes Wallis (ver capítulo 4.3.1.2) era capaz de responder en conjunto frente a una fuerza actuante en cualquiera de sus nodos.

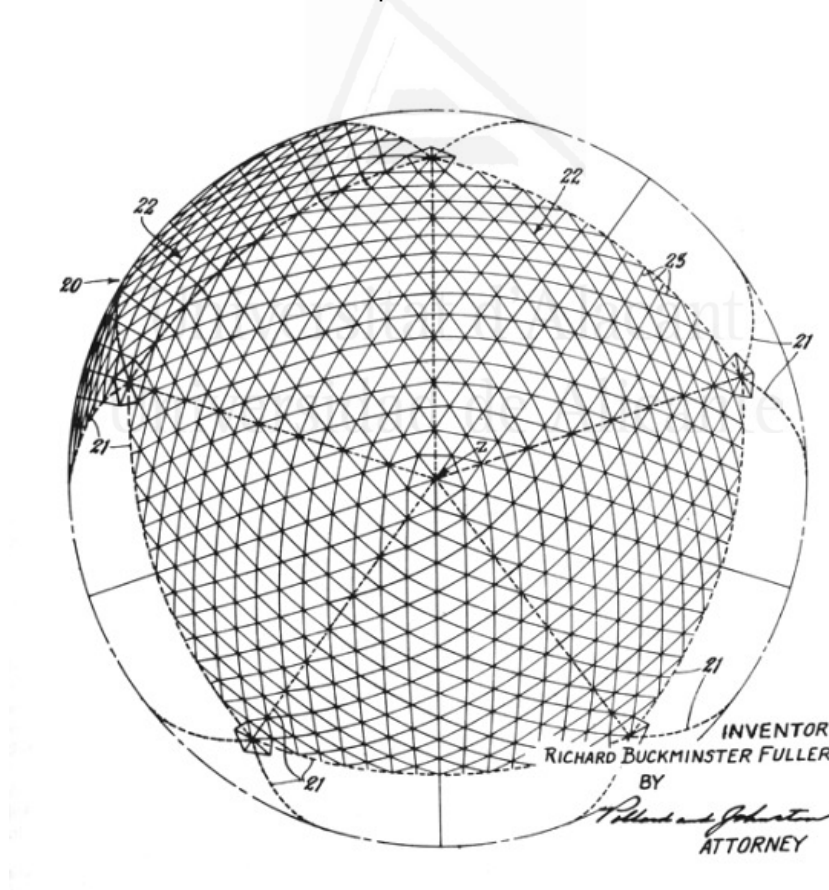


Imagen 58: Planta del Domo Geodésico. Ilustración extraída de la Patente de Estados Unidos Nº 2.682.235 del 29 de junio de 1954, disponible en Internet en <<http://www.bfi.org/about-bucky/resources/bibliographic/r-buckminster-fuller-usa-patents>>.

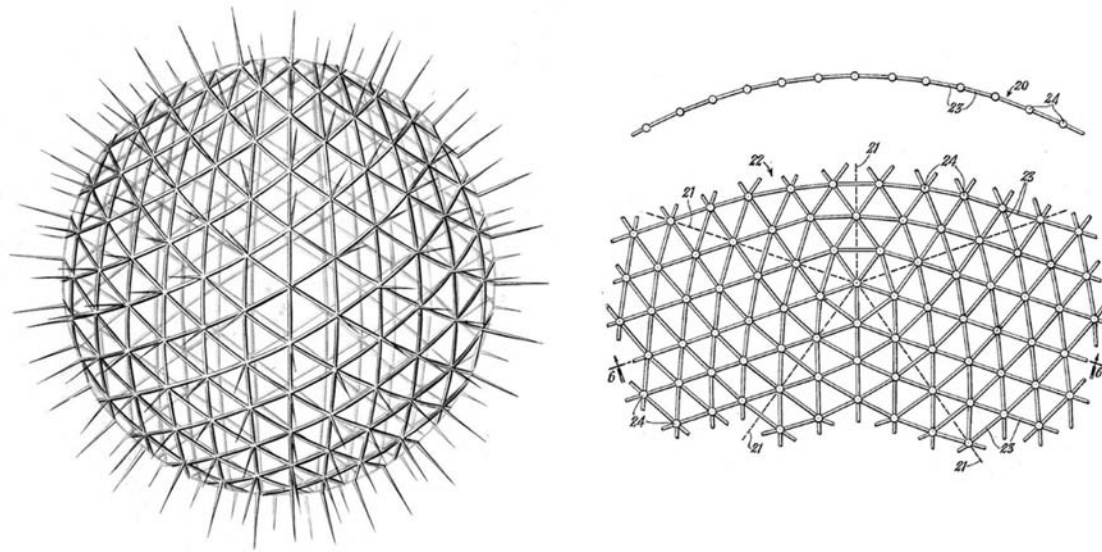


Imagen 59: Esqueleto de radiolario y detalle de la malla del Domo Geodésico de Buckminster Fuller. Ilustraciones extraídas de "*Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*", lámina 10 (Haeckel, 1862) y de la Patente de Estados Unidos N° 2.682.235 del 29 de junio de 1954.



Imagen 60: Domo Geodésico de Buckminster Fuller montado en el Campus de Vitra, Basilea. Fotografía del autor.

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, p. 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 conformado, 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 base 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 que el domo fuera capaz de resistir los esfuerzos de flexión derivados de su forma circular.

Esta geometría fue criticada en su momento por Robert Le Ricolais¹, quien creía que el perfil de los grandes domos debía seguir una geometría parabólica de modo de adaptarse a la forma de su 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 con el autoensamblaje de subunidades proteicas para la formación de estructuras laminares de mayor complejidad (el virus TBSV de la imagen 4, por ejemplo).

Es decir que, a partir de la repetición de una única unidad simple con 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, tanto por sus escalas microscópicas como por encontrarse estos organismos, en general, inmersos en medios líquidos. La geometría esférica es idónea para resistir esfuerzos uniformes en todas las direcciones. Pero esto no ocurre en el caso del domo, en el que son determinantes los esfuerzos derivados de su propio peso.

La geometría parabólica sería entonces 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 generarse el domo 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 mini-domos 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 mini-domos 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, pp.54-56). La unidad básica de la superficie, el mini-domo, 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, p.52).

¹ Ya saben que la forma parabólica es óptima para un elemento de carga uniforme por lo que, cuando Mr. Fuller dice que su cúpula podría ser una esfera o parte de una esfera, está equivocado. (...) una esfera no tiene nada que ver con una cúpula o con las leyes de la gravedad (...) La idea de trabajar con elementos iguales, la idea de la prefabricación está bien para construir una casa, pero cuando se quieren realmente altas prestaciones como en los puentes y las cúpulas tenemos que cambiar el criterio (...) el pabellón de Estados Unidos en Montreal me dio la impresión de estar contemplando una especie de desfile militar en el que lo impresionante es el número de soldados, alrededor de veinte mil, y no la forma en que están colocados. (Mc Cleary et al., 1997A, p.127)



Imagen 61: Vista interior del Pabellón de Estados Unidos para la Exposición de Montreal, 1967. Ilustración extraída de Internet
<http://archtctr2.0.viernulvier.nl/bucky_earth/buckyearth.htm> .

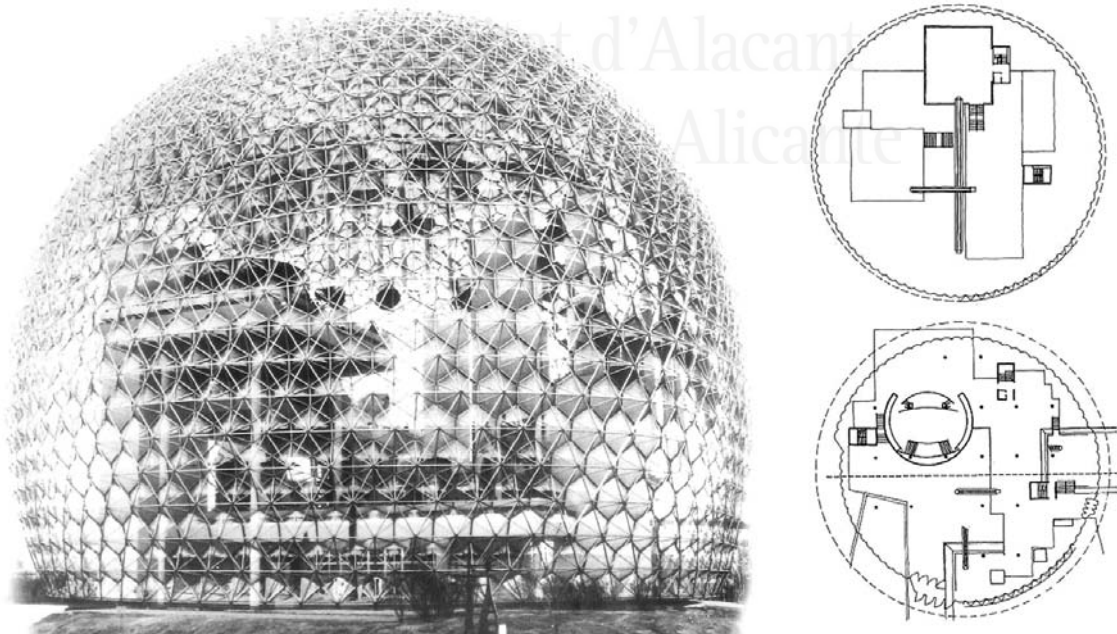


Imagen 62: Pabellón de los Estados Unidos para la Exposición Universal de Montreal (1969). Fotografía y plantas a nivel de planta baja y entresuelo Ilustraciones extraídas de "From Microcosm to Macrocosm: The surface of Fuller and Sado`s U.S. Pavillon at Montreal Expo `67" (Rohan, 2003, pp.50 y 56).

En este sentido, Fuller construye su domo según las ideas aristotélicas de la obra de arte como una representación personal del universo, reproduciendo sus leyes formales y representando un orden cosmológico perfecto y supremo. La obra del hombre se convierte en una prolongación de la obra divina, tal como ocurría con el arte antiguo. Los principios que rigen al arte y a la naturaleza pueden ser los mismos, acercándose de esta manera la obra del hombre a la perfección de la naturaleza.

Otro de los proyectos paradigmáticos de Fuller en su búsqueda de dominio de las leyes de la naturaleza es el "Cloud Nines".

En términos matemáticos el peso de una esfera está en función del cuadrado de su radio, mientras que su volumen está en función del cubo de su radio. Por lo tanto, a medida que el radio de la esfera crece aumentará más el volumen que la superficie envolvente.

Fuller propone que en un domo esférico de 1.320 pies de radio, el peso del aire encerrado es 1.000 veces mayor que el peso de la estructura envolvente. Si este volumen de aire se calentara por encima de la temperatura exterior, tendría un efecto antigravitatorio, como un gran globo de aire caliente.

En pequeñas estructuras a la escala de una vivienda este efecto es imperceptible, pero se incrementa geométricamente con el tamaño y una esfera de más de media milla de diámetro sería capaz de flotar en el aire con solo un grado Fahrenheit de diferencia con el aire exterior.

El domo puede, de esta manera, llegar a pesar menos que la suma de los pesos de sus componentes materiales.

Una esfera de una milla de diámetro podría flotar como una nube y alojar a miles de personas cuyo peso resultaría despreciable. Teóricamente se podrían construir anillos con este tipo de domos conectados a través de pasarelas, que podrían rodear la tierra cruzando mares y océanos.



Imagen 63: Proyecto de ciudades flotantes de Buckminster Fuller. Ilustración extraída de "*Astrazione scientifica e ricerca del concreto nell'utopia di Buckminster Fuller*" (Bottero, 1969, p. 57).

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.

Entre sus primeras propuestas se destaca el diseño de una sala de baños de plástico moldeado que utilizaba agua atomizada; Fuller estimaba que una ducha de una hora podría llegar a consumir solamente dos tazas de agua.

El inodoro de este baño prescindía totalmente del uso de agua, lo cual suscitó gran interés de la industria sanitaria, si bien nunca llegó a lanzarse al mercado.

Diseñó igualmente un automóvil con líneas aerodinámicas que era capaz de alcanzar grandes velocidades y cuyo consumo de combustible era sorprendentemente bajo para su época.

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.

Basado en criterios económicos y en la optimización de la velocidad de producción, Fuller mantuvo en la DDU una imagen fabril exterior derivada del silo.

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.

El refugio de planta circular 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 al., 2010, pp.72-75).

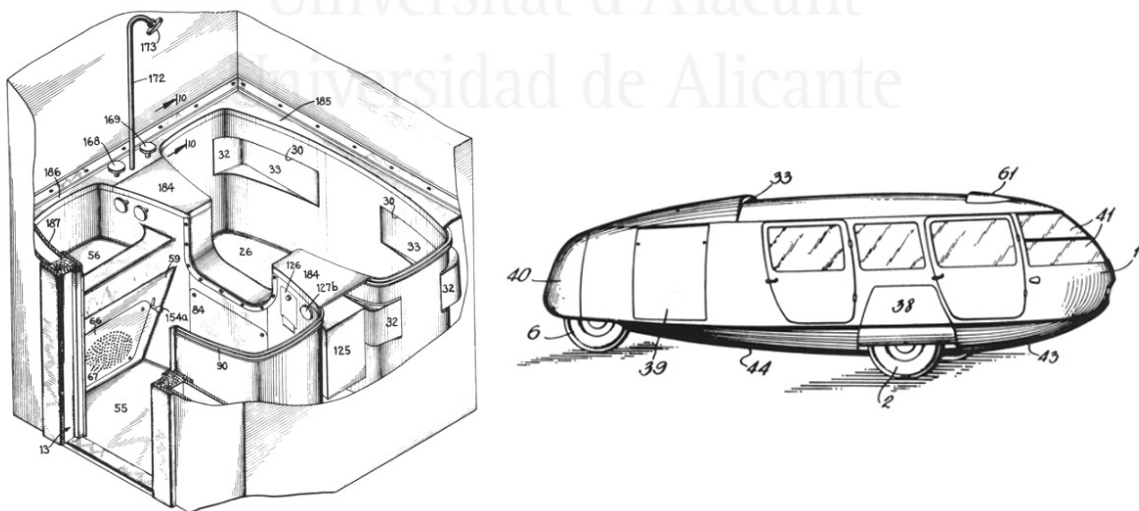


Imagen 64: Sala de baños y automóvil Dymaxion. Ilustraciones extraídas de las Patentes de Estados Unidos Nº 2.220.482 del 5 de noviembre de 1940 y Nº 2.101.057 del 7 de diciembre de 1937. Disponibles en Internet en <<http://www.bfi.org/about-bucky/resources/bibliographic/r-buckminster-fuller-usa-patents>>.

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 entonces investigar en como 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 con el apoyo de la Compañía Aérea Beech.

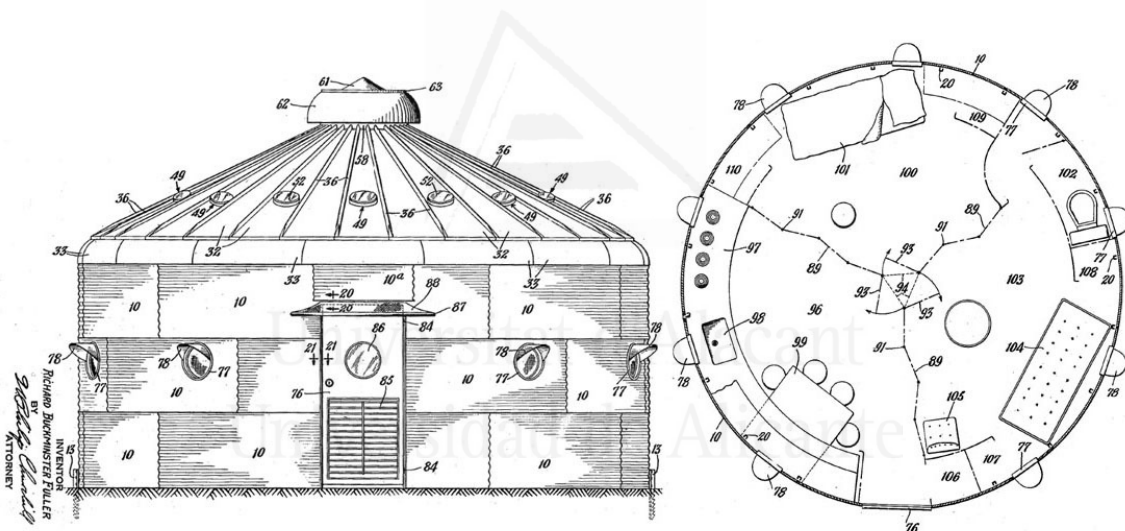


Imagen 65: Fachada y planta de la DDU. Ilustraciones extraídas de la Patente de Estados Unidos Nº 2.343.764 del 7 de marzo de 1944, disponible en Internet en <http://www.bfi.org/about-bucky/resources/bibliographic/r-buckminster-fuller-usa-patents>.

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 central resultaba el único elemento de la estructura principal sometido a esfuerzos de compresión, debido a las cargas gravitatorias y a flexión, debido a las cargas de viento 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 grandes zonas diferenciadas según el tipo de sollicitación a que quedan sometidas 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 de grandes estructuras suspendidas.

En el diseño de 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 en forma de triángulos equiláteros. Esta modulación colabora a la generación de una imagen orgánica del proyecto y seguramente facilita el empaquetamiento de la vivienda, que fue pensada para ser producida en una fábrica y transportada luego en un camión al lugar de implantación.

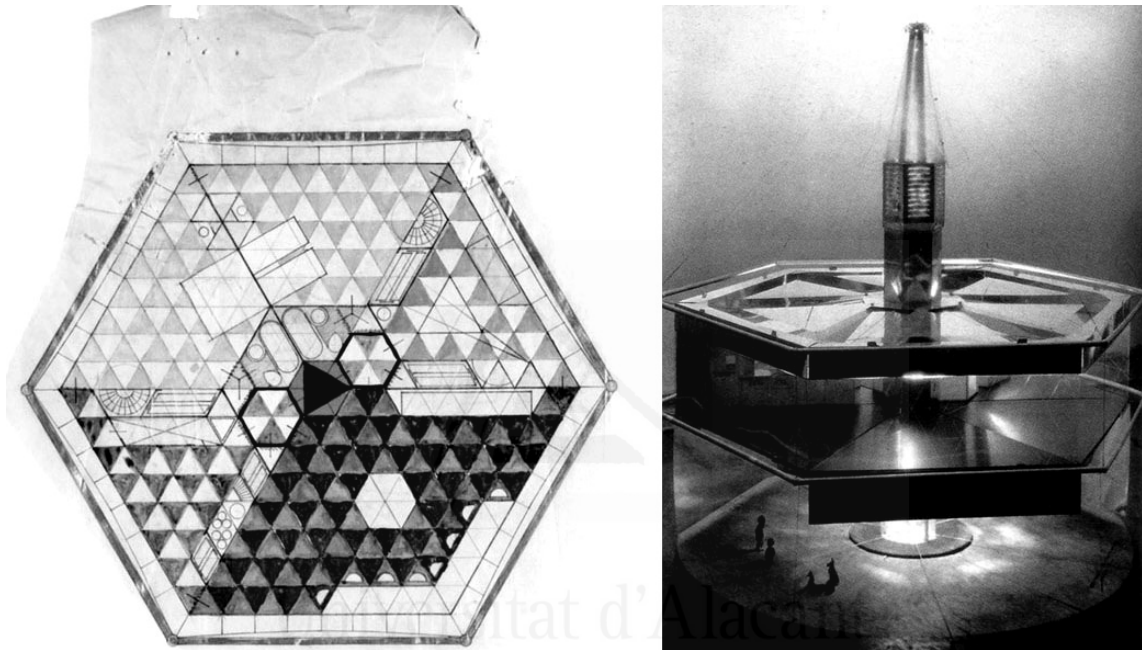


Imagen 66: Planta y maqueta del proyecto Dymaxion House de 1927. Ilustración extraída de *"Prefab Houses"* (Cobbers et al., 2010, p.17).

La Wichita House, construída en 1947, es una variación 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, de 11 metros de diámetro, proporcionaba el menor empleo de material de cerramiento para contener un determinado volumen de espacio interior y, por lo tanto, el menor peso a la hora de la fabricación y el transporte.

Todas las paredes de la vivienda fueron construidas con plástico y aluminio reciclado de chatarra de naves y aviones de la posguerra. Incluidos los muebles empotrados, todo el proyecto pesaba tan solo 2.200 kg (Cobbers et al., 2010, pp.86-91).

Su forma aerodinámica reducía la incidencia del viento, de modo que Fuller estimaba que podría resistir incluso el impacto de un huracán.

Se climatizaba siguiendo principios básicos sobre circulación de aire. La cubierta tenía forma de bóveda y en su cima se ubicaba un ventilador que hacía circular el aire de la vivienda para mantener en el interior la temperatura de confort. El agua de lluvia era recogida y llevada a una cisterna para ser reutilizada.

El diseño de las viviendas Dymaxion, incluyendo aspectos como la estructura, los cerramientos, las instalaciones sanitarias, la climatización del aire interior y el mobiliario, 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 los años 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.

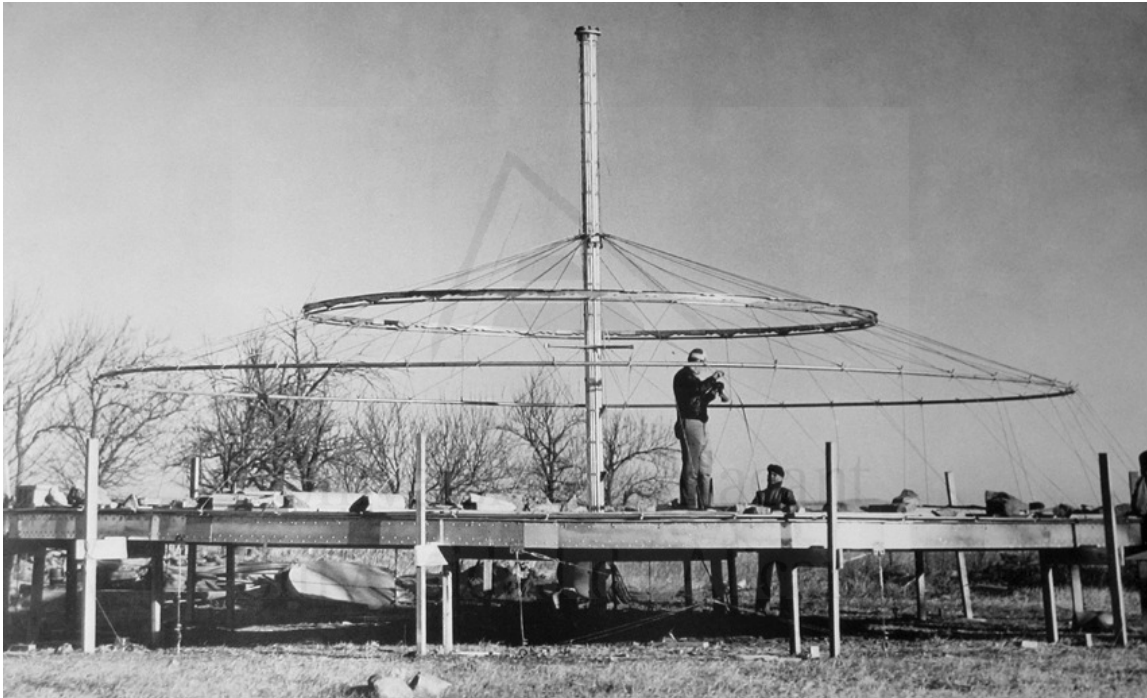


Imagen 67: Montaje de un prototipo de la Dymaxion House en Wichita, Kansas, 1947. Ilustración extraída de "Prefab Houses" (Cobbers et al., 2010, p.87).

4.2.3 Desarrollo reciente de las estructuras de barras

4.2.3.1 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, geoméricamente 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 vertical empotrada en el terreno, que recurría a la geometría tetraédrica para alcanzar una excelente resistencia frente a las cargas horizontales de viento, al descomponer los esfuerzos de flexión en tracciones y compresiones.

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.

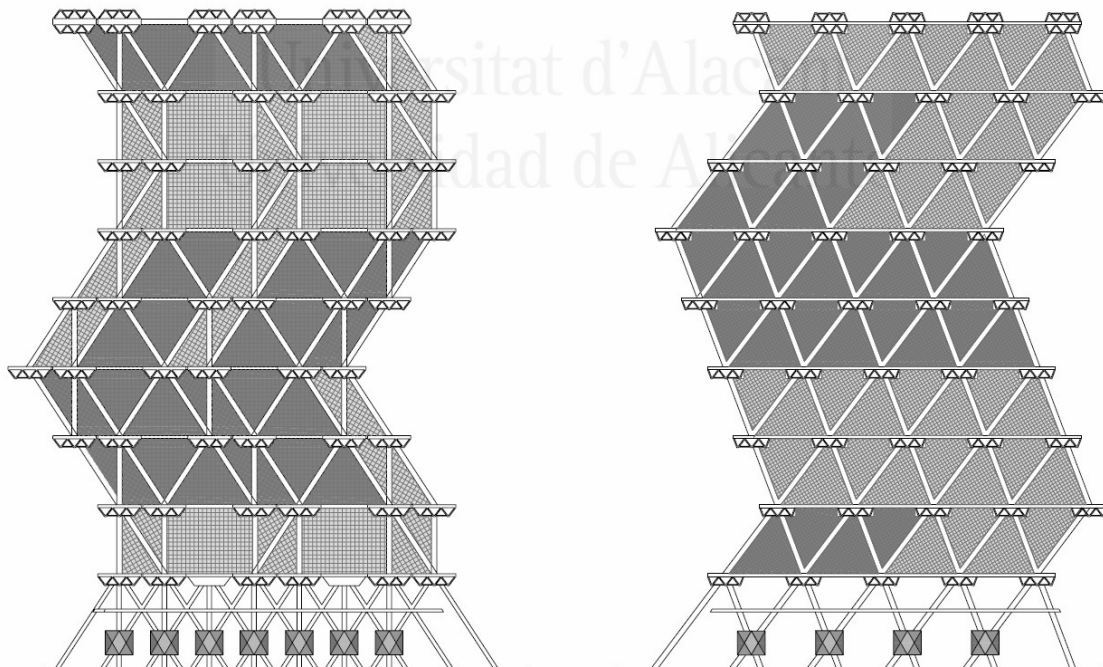


Imagen 68: Fachadas del Philadelphia City Tower. Ilustraciones extraídas de Internet, Departament de Composició Arquitectònica de la UPC <http://descartes.upc.es/historiaenobres/imatges/KA1952_tow00.pdf>.

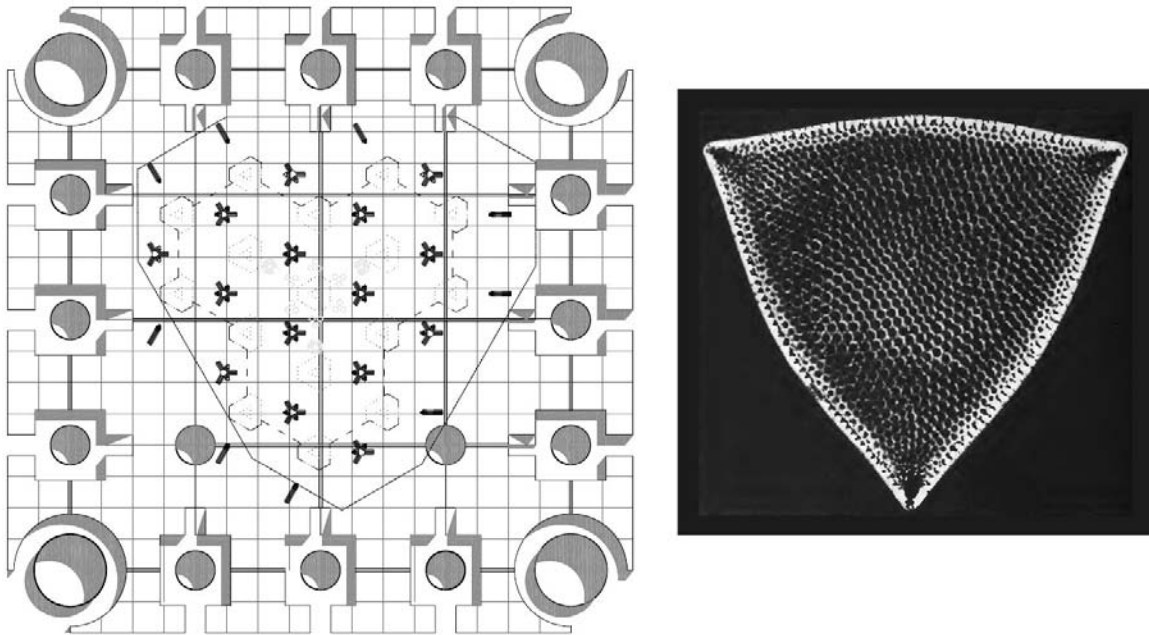


Imagen 69: Planta baja del Philadelphia City Tower y microfotografía de una diatomea. Ilustraciones extraídas de Internet, Departament de Composició Arquitectònica de la UPC <http://descartes.upc.es/historiaenobres/imatges/KA1952_tow00.pdf> y de "On growth and form" (D'Arcy Thompson, 1945, p.511).

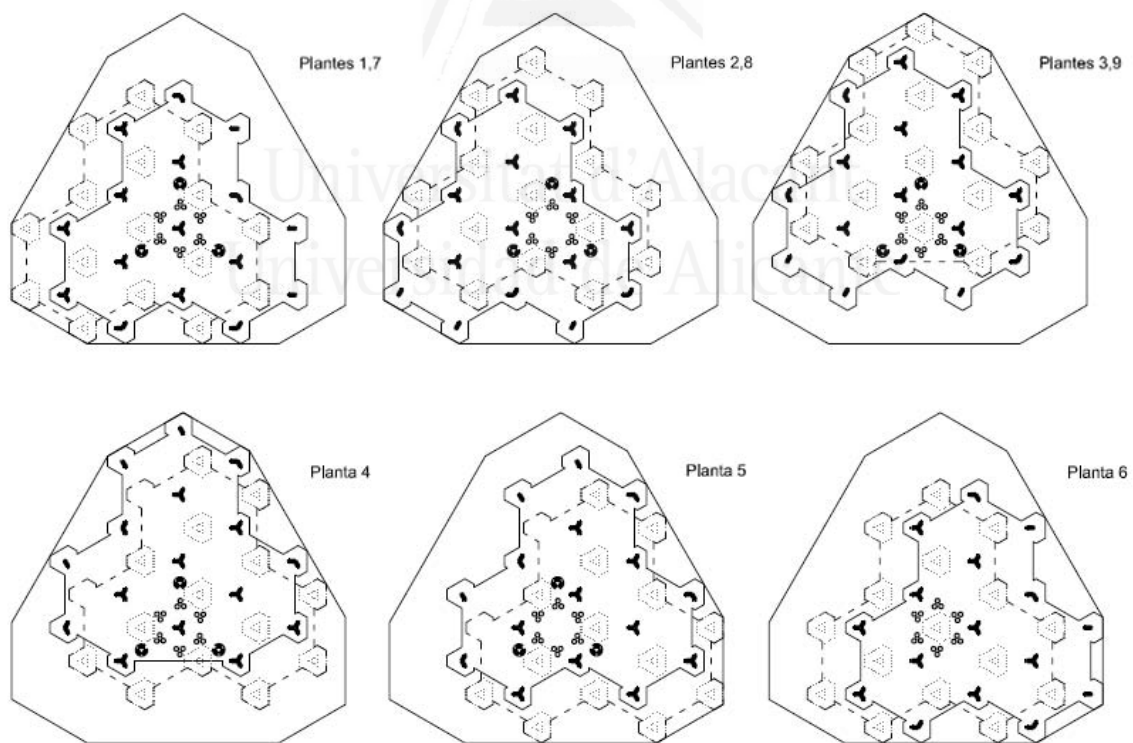


Imagen 70: Plantas superiores del Philadelphia City Tower. Ilustraciones extraídas de Internet, Departament de Composició Arquitectònica de la UPC <http://descartes.upc.es/historiaenobres/imatges/KA1952_tow00.pdf>.

Cada uno de los 9 niveles principales, de 20 metros de altura, se divide a su vez hasta en 6 niveles por medio de entrepisos con formas variadas en planta, acomodándose a los diferentes requisitos programáticos (Ayad, 1997, p.140).

La compleja jerarquía espacial de huecos resultante 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 al., 1992, p.55).

Louis Kahn realizó numerosos trabajos junto a Robert Le Ricolais en la Universidad de Pennsylvania, 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 y de la rigidez de los elementos que la componen.

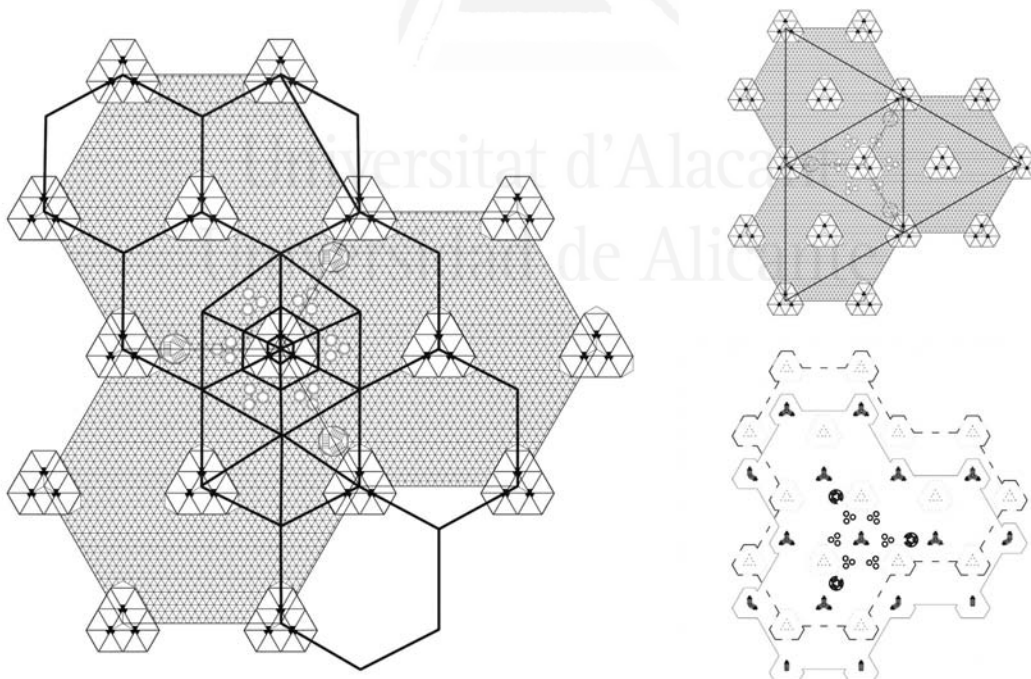


Imagen 71: Plantas de forjados del Philadelphia City Tower con superposición de esquemas de trazados reguladores del diseño.

Ilustraciones extraídas de Internet, Departament de Composició Arquitectònica de la UPC
<http://descartes.upc.es/historiaenobres/imatges/KA1952_tow00.pdf>.

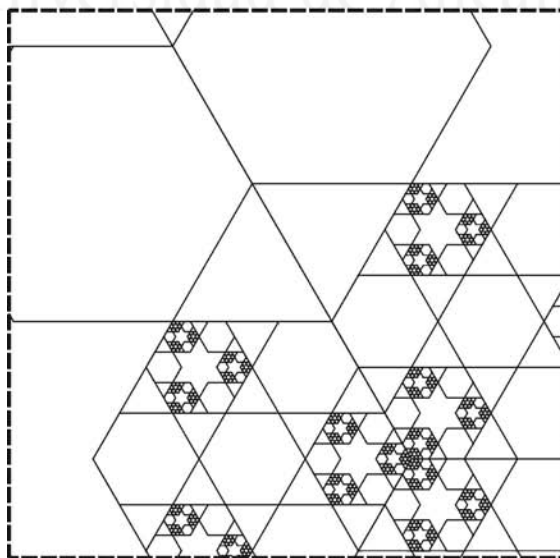
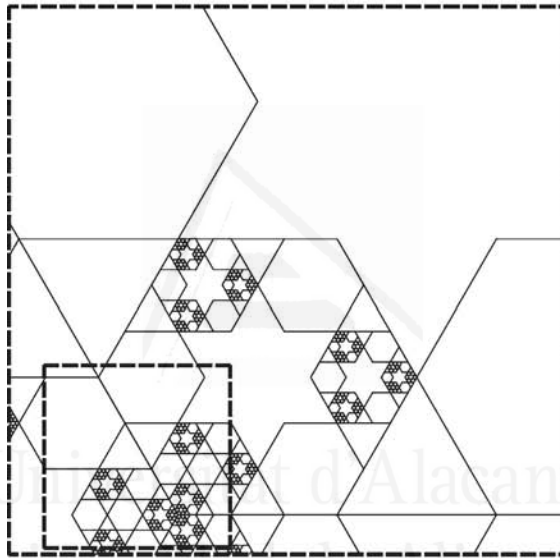
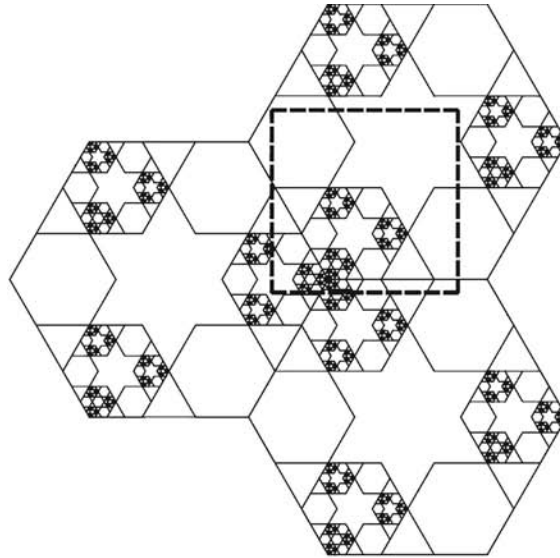


Imagen 72: Malla fractal hexagonal inspirada en la planta del Philadelphia City Tower.
Esquema creado y dibujado por el autor.

Seguramente fruto de la influencia de las ideas estructuralistas de Le Ricolais resultó, igualmente, la concepción general de la estructura como un organismo natural con un estricto orden espacial jerárquico.

El esquema de planta de la torre, con sus trazados reguladores en forma de triángulos y hexágonos (imagen 71), fue probablemente inspirado en la microfotografía de una diatomea (imagen 69) publicada en el libro "On growth and form" de D'Arcy Thompson, texto de gran influencia en la arquitectura de mediados del siglo XX (Ayad, 1997, p.131) y citado por Anne Tyng en su artículo "Geometric extensions of consciousness" (Tyng, 1969, p.145), en relación con la génesis de las formas en la naturaleza.

Las diatomeas son una especie de algas marinas que presentan en su superficie patrones hexagonales de células de una extraordinaria regularidad (D'Arcy Thompson, 1945, p.510).

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 (imagen 71).

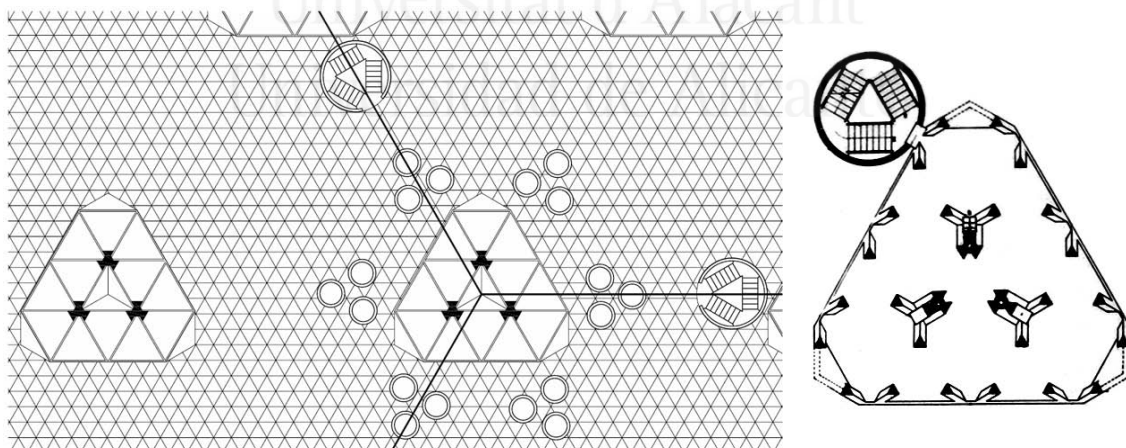


Imagen 73: Núcleos de servicio del Philadelphia City Tower.

Ilustraciones extraídas de Internet, Departament de Composició Arquitectònica de la UPC
<http://descartes.upc.es/historiaenobres/imatges/KA1952_tow00.pdf>.

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 (imagen 72).

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.

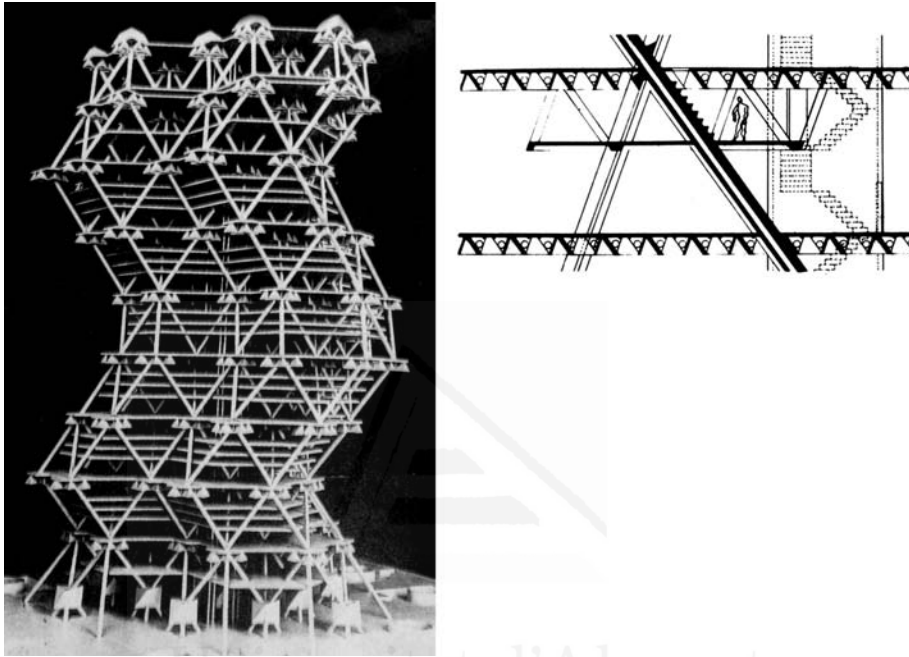


Imagen 74: Maqueta del Philadelphia City Tower y sección parcial por un módulo de servicio. Ilustraciones extraídas de "Louis I. Kahn", (Sabini, 1994, p.50) y de "¿La cruja es un tipo?" (Gubler, 1994, p.84).



Imagen 75: Galería de Arte de la Universidad de Yale en New Haven, de Louis Kahn, 1951-1953. Vista de un forjado tetraédrico.

Ilustración extraída de Internet <<http://artgallery.yale.edu>>.

Espacialmente 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 entonces según una jerarquía de escalas que define los distintos usos para los que pueden ser utilizados. Algunos albergan instalaciones, otros áreas de servicio, otros espacios de trabajo y otros grandes espacios de uso público.

Es posible identificar una disposición jerárquica de huecos similar a la del Philadelphia City Tower 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, pp.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. pp.59-60) o el Pabellón temático *Man the Producer* para la Expo de Montreal de 1967, de Guy Desbarats (Banham, 2001. pp.111-115).

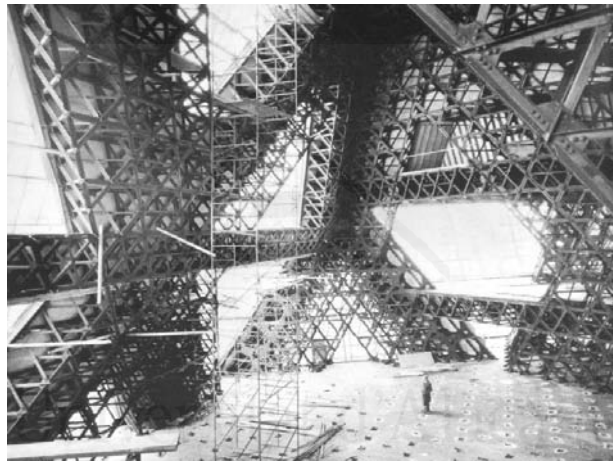


Imagen 76: Vista interior del pabellón temático *Man the Producer* en la Expo de Montreal de 1967, diseñado por Guy Desbarats. Ilustración extraída de "*Megaestructuras: Futuro urbano del pasado reciente*" (Banham, 2001. p.114).

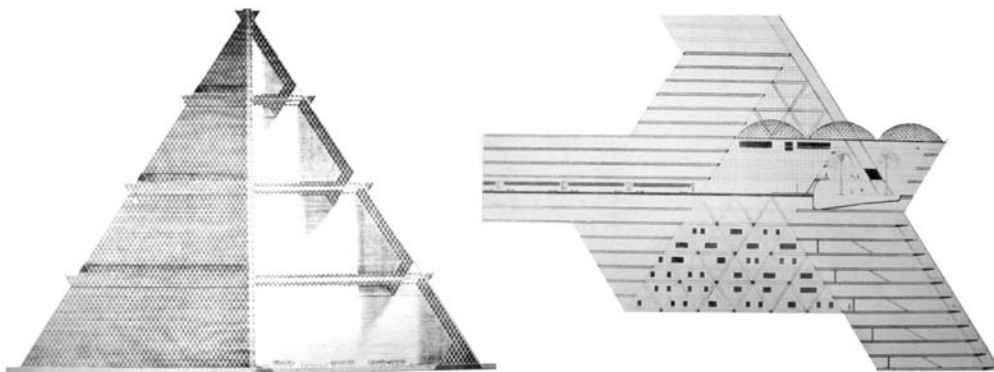


Imagen 77: Ciudad tetraédrica de Buckminster Fuller, 1965. Vista lateral seccionada y detalle de un sector. Ilustraciones extraídas de "*R. Buckminster Fuller: recent works*" (Fuller, 1969B, pp.82-83).

Una gran diversidad de espacios a distintas escalas surge en estos proyectos como iteraciones hacia el interior del módulo tetraédrico principal que origina la volumetría general del edificio, lo cual va agregando progresivamente nuevos niveles de complejidad a la estructura de la torre, el pabellón o la ciudad y también definiendo la rigidez global necesaria de la malla espacial de barras para enfrentar las sollicitaciones estáticas.

Este principio geométrico de subdivisión interior 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 obtiene una estructura espacial de barras de gran rigidez gracias a la triangulación y a la subdivisión en módulos de distintos tamaños.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.2.3.2 Centro Georges Pompidou (1969-1977)

En el año 1969 Georges Pompidou tomó la decisión de dotar a la ciudad de París de un centro cultural dedicado a las artes contemporáneas y llamó a un concurso internacional para la construcción de un edificio en un terreno vacío de 18.000 m² en el barrio de Beaubourg.

El jurado, dirigido por Jean Prouvé, eligió como ganador el proyecto presentado por los jóvenes arquitectos Renzo Piano y Richard Rogers, con la colaboración de Gianfranco Franchini, John Young, Marco Goldscmied y Ove Arup & Partners (L'Architecture d'Aujourd'hui, 1971, p.VI), quienes proponían ocupar la mitad del predio con un edificio de siete plantas y mantener la otra mitad libre, creando una gran plaza pública en el congestionado barrio del centro parisino.

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, p.145).



Imagen 78: La plaza y la fachada principal del Centro Pompidou. Ilustración extraída de Internet <http://www.vigoenfotos.com/paris/paris_pompidou_centre_museo_1.html>.

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, p.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. El tiempo de que dispone el jurado para dedicar a cada propuesta es muy limitado y alcanza, por lo tanto, solo para retener el espíritu y las ideas directrices del proyecto (Rice, 1998A, p.18).

Podía leerse esbozada en la memoria, las fachadas y la maqueta, la idea de materializar el edificio como un gran esqueleto de barras de acero formado por pilares, vigas, elementos reticulados y tirantes en forma de cruz de San Andrés, capaz de soportar grandes áreas de forjados libres de interferencias.^{1 y 2}

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 quienes definían la imagen del proyecto.³

Desde estas ideas estructurales iniciales hasta la solución final, se ensayaron una gran variedad de soluciones experimentales.

El principal problema técnico, sin embargo, era siempre 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, p.21).

¹ *Le concours de Beubourg nous semblait offrir l'occasion d'une expérimentation (...) la vraie raison de participer à un concours n'est pas de le remporter mais d'explorer des relations et des conceptions nouvelles. (...) C'est dans cet état d'esprit que nous avons contacté Richard Rogers et Renzo Piano, qui venaient tout juste de s'associer, afin de leur demander s'ils seraient prêts à participer à ce concours avec nous. Après quelque hésitation, ils se décidèrent. Le concours lui-même était un drôle d'affaire. Piano et Rogers avaient une vision assez claire du bâtiment, ou du moins de l'idée qu'ils désiraient explorer (...) C'était l'idée d'une structure très souple, propre à accueillir tout ce qui peut arriver. Une machine à information. (...) Une fois le parti architectural fixé -celui d'une grande ossature métallique ouverte-, il ne nous restait plus qu'à le dessiner. Nous avons commencé par chercher des solutions littérales, des poutres à grande portée permettant de dégager de vastes espaces dépourvus de poteaux. Le résultat était pataud et n'exprimait pas du tout nos intentions. Nous avons alors décidé de présenter plutôt une façon d'aborder le problème, une démarche qui soit capable, sur le fond, de traduire nos intentions, même si concrètement la solution devait apparaître quelque peu irréaliste. D'un point de vue structurel, l'idée d'une ossature avec de grandes surfaces de planchers dégagées était une solution simple. (...) Ainsi, ce que nous cherchions en mettant en avant une série d'idées inhabituelles mais adaptées à la philosophie et aux intentions de l'architecture, c'était à enflammer l'imagination. (...) Beaubourg, c'était plutôt pour explorer des idées et pour voir si la collaboration entre Structures 3 et Piano & Rogers méritait d'être poursuivie. Nous n'avons donc pas besoin de faire de compromis. Nous avons fait ce qui nous plaisait.* (Rice, 1998A, pp.16-17).

² *La surface de plancher totalement ininterrompue est réalisée en éliminant toute structure verticale interne, les zones de service et les circulations étant à l'extérieur. (...) Les éléments permanents sont les colonnes et les éléments transversaux qui permettent la stabilité de base. Ces colonnes fabriquées sur place au moyen de tubes en acier de même diamètre extérieur sont d'épaisseur variable selon les besoins. (...) La protection contre le feu et la corrosion sera assurée par le remplissage des espaces tubulaires avec de l'eau traitée.* (L'Architecture d'Aujourd'hui, 1971, p.VII)

³ *Sur les deux grandes façades, (...) un mur porteur tri-dimensionnel présentera des informations générales et spécifiques sur les événements survenant à Paris, en France ou à l'étranger: oeuvres d'art, situation de la circulation, météorologie, cinéma, monde financier, grâce à des équipements audio-visuels temporaires reliés à un ordinateur.* (L'Architecture d'Aujourd'hui, 1971, p.VI)

Quizás este criterio de flexibilidad programática adoptado, que llevó a la suposición de que la peor sobrecarga debía aplicarse a todas las plataformas, debiera ser revisado. Desde la inauguración del centro la biblioteca pública siempre se ha encontrado ubicada en el primer nivel, por lo que dicho criterio no parece haber sido aún justificado.

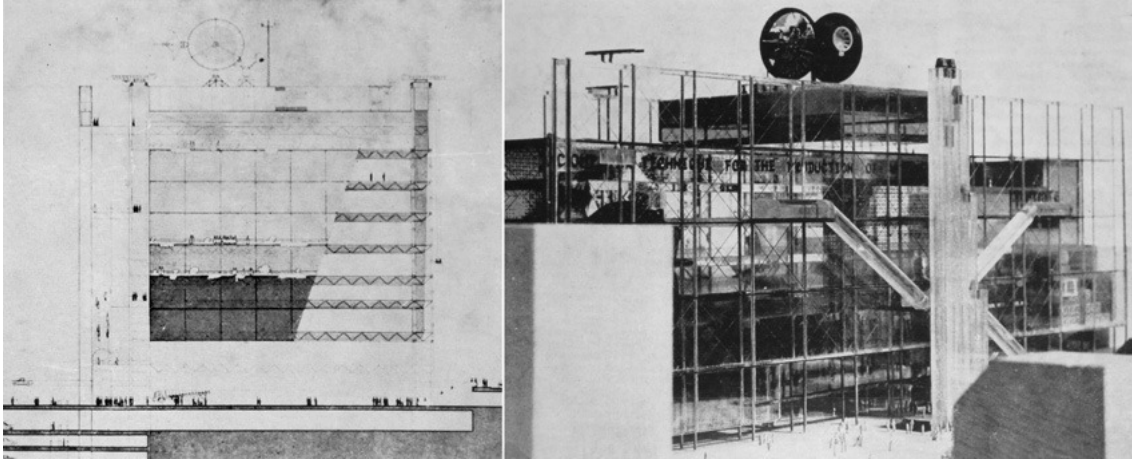


Imagen 79: Fachada lateral y maqueta del proyecto presentado a concurso en 1970. Ilustraciones extraídas de *"Concours International du Plateau Beaubourg"* (L' Architecture d' Aujourd' hui, 1971, pp.VI y VII).

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, p.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 al., 1970, p.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, p.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, p.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.

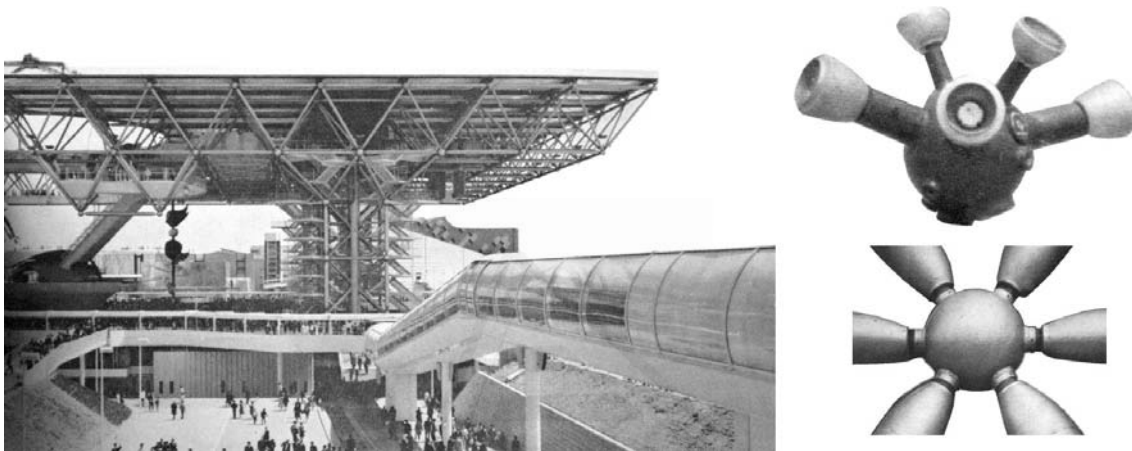


Imagen 80: Cubierta sobre la Plaza del Festival en la Exposición Universal de Osaka, 1970, de Kenzo Tange. Vista de la plaza y detalle de nudos de la estructura de la cubierta.
Ilustraciones extraídas de "Osaka 70" (Tange et al., 1970, pp.97 y 105).

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 del edificio.

El proyecto ajustado preveía que esta luz menor libre, 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 conforman 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.

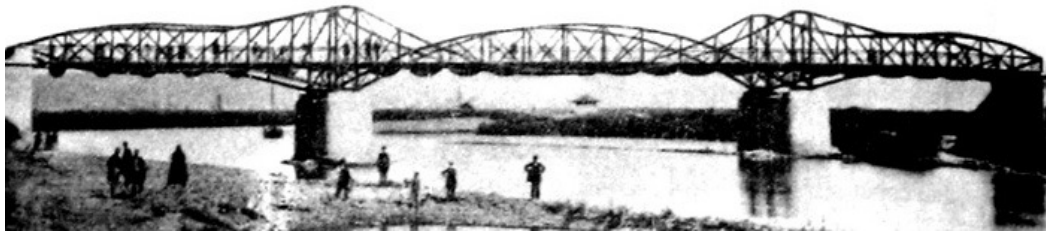
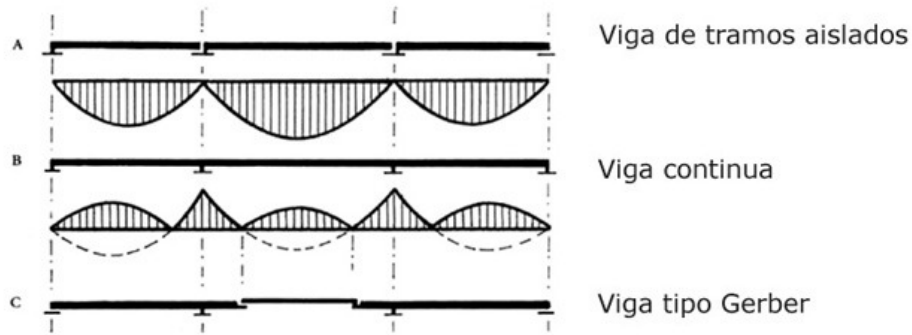


Imagen 81: El principio estructural de la viga Gerber y puente sobre el río Main, en Hassfurt, de Heinrich Gerber (1866-1867). Ilustraciones extraídas de "*Mémoires d'un ingénieur*" (Rice, 1998A, p.24).

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.

Toda la estructura se rigidiza frente a las cargas de viento a través del agregado de bielas formando cruces y 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.



Imagen 82: Escalera mecánica suspendida de los extremos de las vigas Gerber, sobre la plaza. Fotografía del autor.

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 los 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 puede apreciarse en la obra de Louis Kahn, bien conocida por los arquitectos Piano y Rogers¹.

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 precisamente una manera de poner en evidencia las características mecánicas de la estructura, también presente en estas zonas de servicio. Cada pieza estructural se diseña entonces como un elemento autónomo, de modo que el conjunto resulte un ensamble articulado en el que sus componentes solo están en contacto en algunos puntos. El hueco en la zona de apoyo de la viga Gerber sobre el pilar, por ejemplo, reafirma esta idea, aligerando la unión y enfatizando el proceso constructivo de ensamblaje.

En aquel tiempo estaba surgiendo en algunos países anglosajones una nueva ciencia que permitía prever el comportamiento de distintos metales bajo esfuerzos, así como sus reacciones frente pequeños defectos o frente a la aparición de pequeñas fisuras, fruto de la necesidad de construir tableros de acero confiables en reactores nucleares y plataformas petroleras en el Mar del Norte: la "Mecánica de la rotura" (Rice, 1998A, p.27). Esta nueva ciencia parecía brindar algunas respuestas a las interrogantes que el diseño de la estructura del Pompidou planteaba, de modo que se inició un trabajo conjunto entre el equipo de calculistas y diversos institutos de soldadura de metales en Francia e Inglaterra, con el objetivo principal de poner a punto un método para adaptar estos conocimientos al estudio del comportamiento de las vigas Gerber de acero fundido.

El complejo 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 la naturaleza 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, p.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 almas 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.

¹ 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 al., 1973, p.38)

La sección en forma de doble T, presente en la pieza a lo largo de casi toda su longitud, es idónea para resistir los esfuerzos de flexión.

Las exigencias del moldeado del acero se reflejan en los espesores de las alas superiores e inferiores.

La forma de la abertura superior y de las aberturas laterales refleja, a su vez, 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 grandes rótulas y los ejes que los atraviesan, sobre los cuales descargan las vigas Gerber, son necesarios para prevenir la transmisión de esfuerzos de flexión a los pilares y garantizar la esbeltez de los mismos.

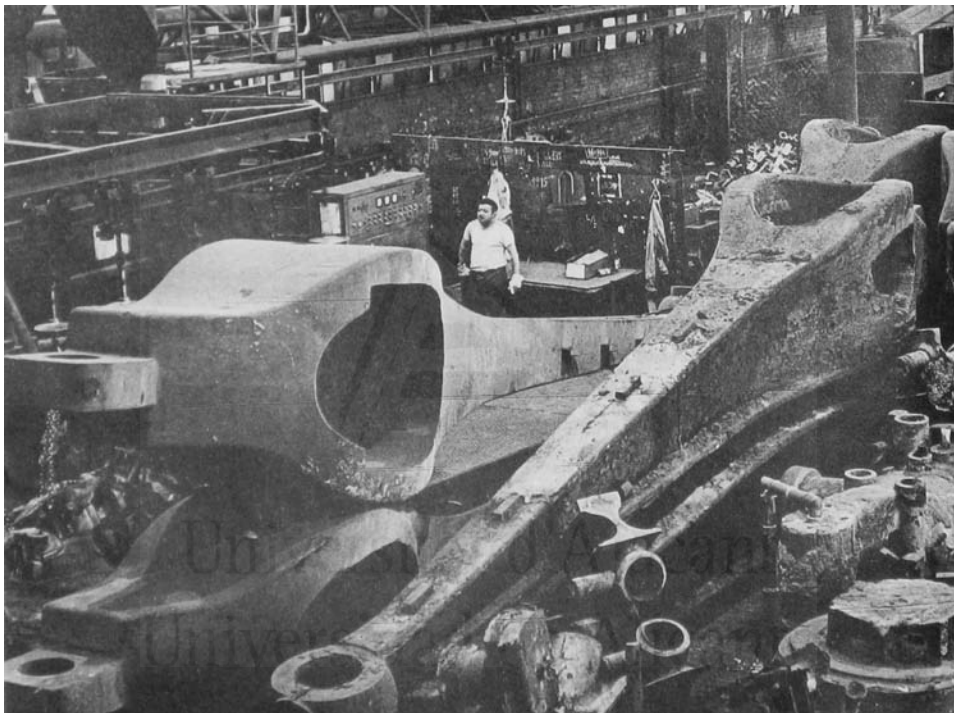


Imagen 83: Vigas Gerber en la fundición. Ilustración extraída de "*Mémoires d'un ingénieur*" (Rice, 1998A, p.32).

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, p.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.

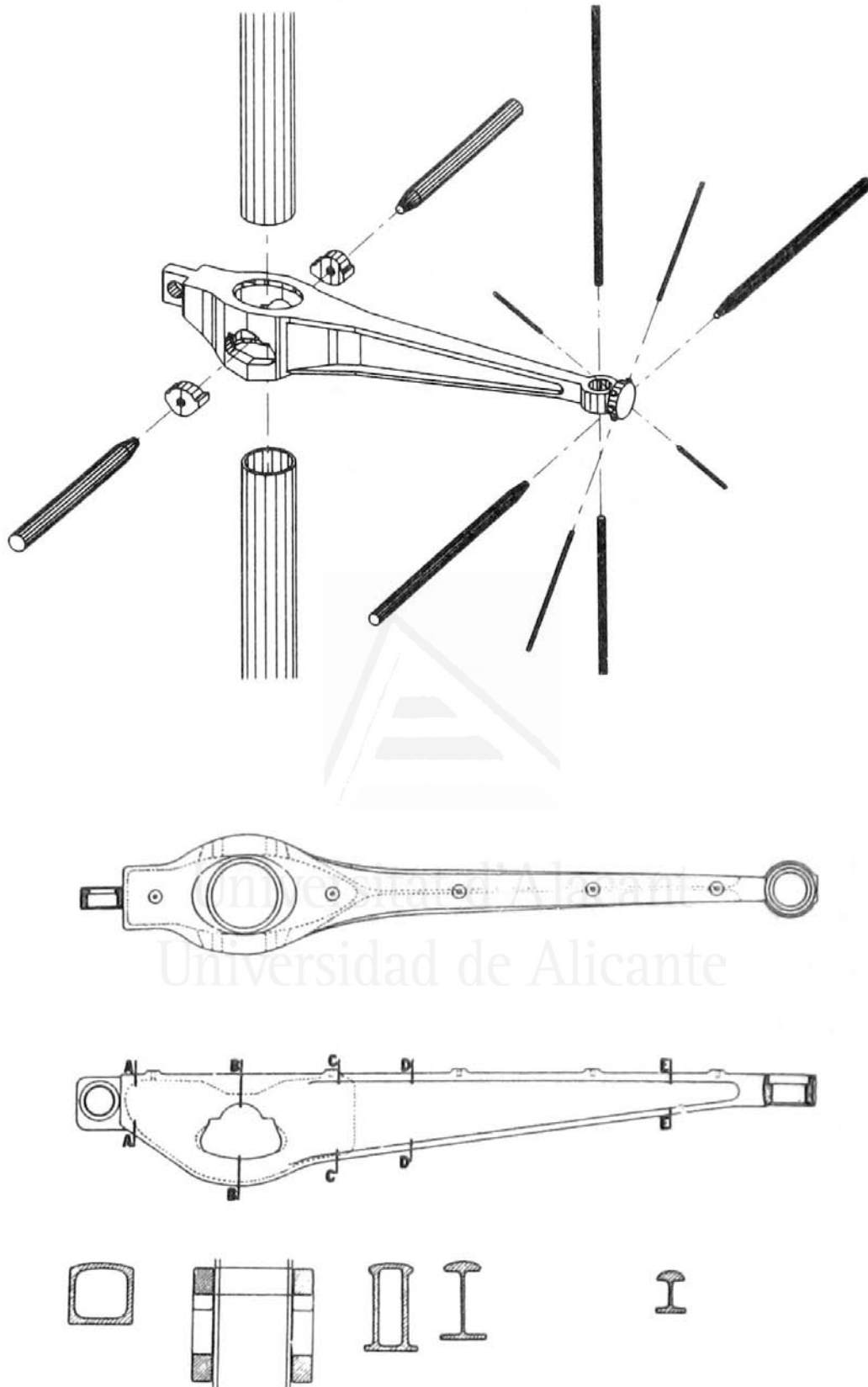


Imagen 84: La viga Gerber. Detalle de ensamble con el pilar y con los tirantes. Planta, vista lateral y 5 secciones transversales. Ilustraciones extraídas de "*Mémoires d'un ingénieur*" (Rice, 1998A, pp.28 y 140).

La definición 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.

La primera decisión estructural que se tomó fue la elección del material con el cual se trabajaría: acero fundido. Esta decisión, tomada luego de la visita de los ingenieros de Ove Arup & Partners a la Exposición Universal de Osaka en 1970, tuvo como objetivo la adhesión del Centro Pompidou a una corriente histórica de diseño de grandes estructuras de acero en Francia.

La elección del material llevó, a su vez, a la idea de convertir al proceso de ensamblaje de la estructura, que se prefabricaría en una fundición, en el espíritu del proyecto. Y si el proceso constructivo se convierte en el montaje de un gran mecano que llega a pie de obra por partes, la elección del principio estructural de las vigas Gerber parece idónea ya que permite, en una estructura discontinua, la reducción de los valores de momento flector y de deformación a los que presentaría una estructura continua.

La pretensión arquitectónica de salvar grandes luces y soportar grandes cargas con una estructura sugestiva e innovadora llevó así al uso de una solución estructural y un material habituales en las grandes estructuras del siglo XIX, que hubo que adaptar a la tecnología y a las exigencias de las normativas de finales del siglo XX.

Los nuevos requerimientos de seguridad y confiabilidad estructural implicaron una búsqueda de nuevos métodos de cálculo apropiados para el diseño de grandes piezas flexadas con acero fundido.

Fue necesario la adaptación de una nueva teoría, la "Mecánica de la rotura" y la puesta a punto de un procedimiento de soldadura adecuado, para garantizar las condiciones de seguridad de la estructura según criterios contemporáneos.

El proceso de diseño estructural del Centro Pompidou podría considerarse como exitoso, en la medida en que tanto el sistema como los materiales elegidos han resultado claves en la definición del funcionamiento, la espacialidad y la imagen del edificio, respetando las ideas arquitectónicas del proyecto ganador del concurso.^{1 y 2}

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

¹ 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 al., 1973, pp.34-35)

² 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 al., 1973, p.38)

4.2.3.3 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 retoma 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.

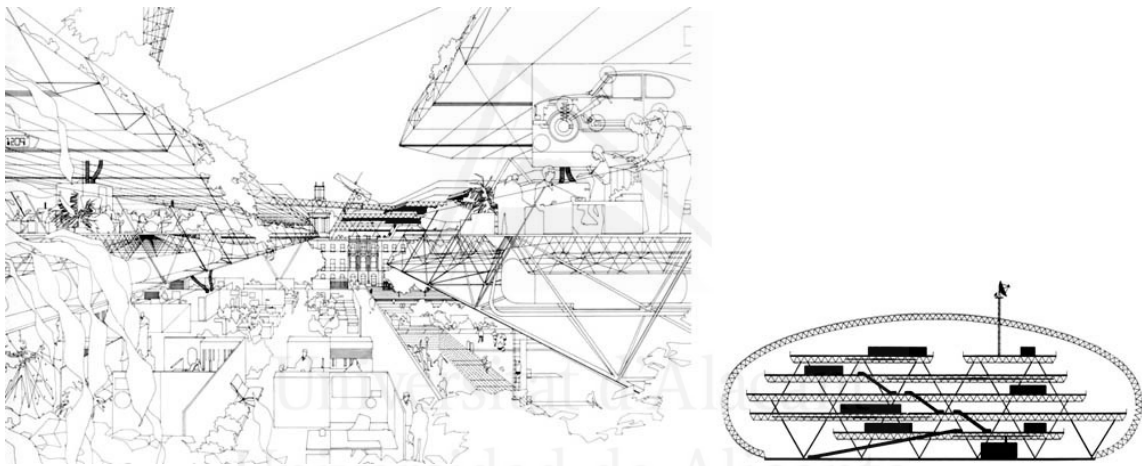


Imagen 85: Climatroffice, Buckminster Fuller y Norman Foster, 1971. Ilustraciones extraídas de "Norman Foster" (Fernández-Galiano, 1999, p.35).

La cubierta sobre el patio del Museo Británico cubre un área de 100 x 70 metros y salva luces que oscilan entre los 14 metros, cuando la Sala de Lectura está próxima a las fachadas interiores del museo y los 40 metros en las esquinas, convirtiéndose en el espacio público techado más grande de Europa hasta la fecha (Foster et al., 2001, p.46).

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, p.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 implicó la necesidad de recurrir al uso de programas informáticos de generación de forma, que Foster & Partners crearon en colaboración con Mike Cook y Steve Brown de Buro Happold y con el matemático Chris Williams (Foster et al., 2001, p.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 su imagen exterior.

La forma final, que capturaba la esencia de la maqueta con la película de jabón pero controlaba las limitaciones en la altura, se generó completamente por ordenador. Consistía en una grilla de elementos radiales que salvaban la luz entre la Sala de Lectura y el edificio del museo, intersectada por dos espirales que giran en sentidos opuestos, de modo que se generaba 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, por lo que el diseño de esta estructura podría considerarse como perteneciente a la línea de investigaciones sobre estructuras livianas basadas en analogías con formas naturales, iniciada por Le Ricolais y por Fuller.

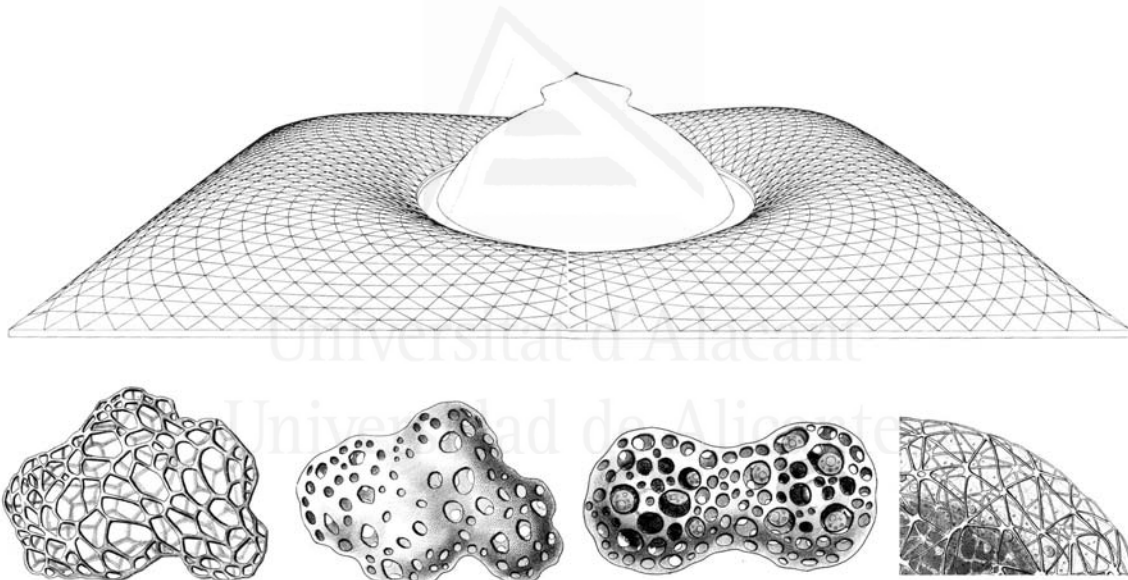


Imagen 86: Esquema de la malla de la cubierta y esqueletos de radiolarios. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de "*Norman Foster and The British Museum*" (Foster et al., 2001, pp.54-55) y de "*Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*", láminas 26 y 34 (Haeckel, 1862).

La transición desde el perímetro interior de menor longitud hasta el exterior de mayor longitud, fue resuelta con triángulos pequeños en el centro que aumentaban progresivamente de tamaño hacia los extremos. El número de triángulos de la malla fue optimizado, por otra parte, de modo que no resultaran ni demasiado pequeños como para que el número de barras fuera demasiado elevado ni demasiado grandes 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 de la doble curvatura, hubiera sido imposible la resolución de la cubierta tal como fue finalmente construida.

La complejidad de la problemática se tradujo, en este diseño, en una malla espacial triangulada con una compleja geometría, cuyo ajuste fue posible 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 la cubierta final, son todas diferentes. Aproximadamente el 70% de ellas tienen espesor constante pero varían en longitud y el 30% restante son de espesor variable. 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 austriaca Waagner Biro, encargada de la construcción de la cubierta, 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 al., 2001, p.46). Este proceso es conocido como CAD/CAM (Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing) o fabricación asistida por ordenador.

El surgimiento de los procesos CAD/CAM ha tenido un gran impacto en la producción industrial al normalizar el desarrollo de productos y reducir esfuerzos en el diseño, pruebas y trabajo con prototipos. Esto ha hecho posible reducir sustancialmente tiempos y costos de producción en diversas industrias. El avión bimotor de pasajeros Boeing 777, por ejemplo, fue diseñado en su totalidad por ordenador en 2.000 puestos de trabajo distintos y construido directamente con programas CAD/CAM, sin necesidad de recurrir a la elaboración de prototipos previos.

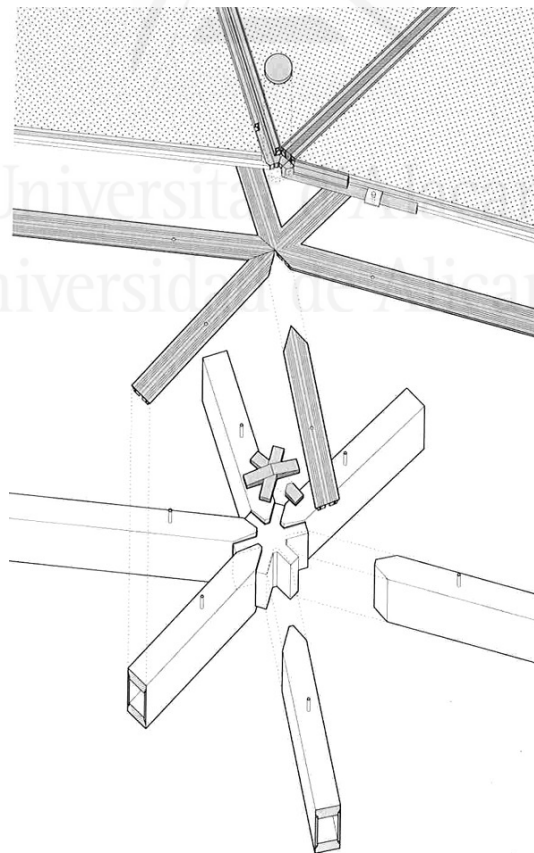


Imagen 87: Detalle de fijación de los paneles vidriados al marco estructural. Ilustración extraída de "Norman Foster and The British Museum" (Foster et al., 2001, p.65).

La irregularidad de la forma de la cubierta implicó, entonces, una solución de alta complejidad en la que todas las barras tenían 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 el equipo de diseño 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 al., 2001, p.46).

De esta forma, la estructura que en un principio se pensó formada por perfiles tubulares huecos de acero que soportaban una piel de paneles 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.

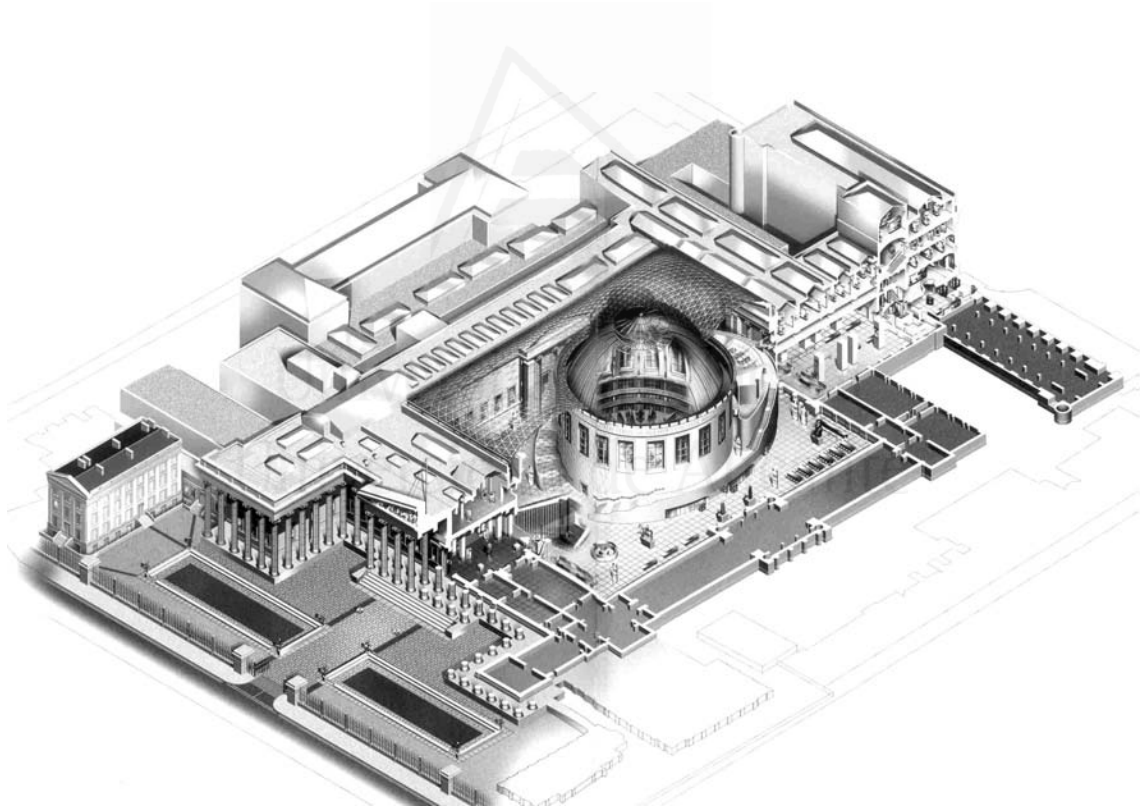


Imagen 88: Sección mostrando la inserción de la nueva estructura en el antiguo edificio. Ilustración extraída de "*Norman Foster and The British Museum*" (Foster et al., 2001, pp.84-85).

La estructura de la cubierta consiste en 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 al., 2001, p.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 al., 2001, pp.60-61).

Buro Happold desarrolló un sistema para ahorro de energía en el acondicionamiento del aire interior, utilizando la ventilación natural. Se colocaron rejillas en zonas altas y bajas por las que aire filtrado fresco es introducido en el patio a nivel del tránsito peatonal. A medida que el aire se va calentando, se eleva naturalmente y es expulsado por las rejillas superiores. Por otra parte, por debajo del piso del patio se colocaron tuberías de agua que, según la estación del año, pueden enfriar o calentar las baldosas de piedra (Foster et al., 2001, p.49).



Imagen 89: Vista interior del patio. Fotografía del autor.

La cubierta vidriada prevé el uso de una doble piel. Con una lámina exterior templada y una lámina interior laminada y coloreada, logra la resistencia adecuada y el control adecuado de la iluminación del patio y de las galerías del museo que lo rodean. Para reducir las ganancias de calor, los paneles de vidrio fueron serigrafiados con pequeños puntos que reflejan el 75% de la radiación solar infrarroja que incide sobre la cubierta (Foster et al., 2001, p.49).



Imagen 90: Vista aérea del patio antes de los inicios de la obra. Ilustración extraída de "*Norman Foster and The British Museum*" (Foster et al., 2001, p.62).



Imagen 91: Vista aérea del patio luego de finalizada la obra. Ilustración extraída de "*Norman Foster and The British Museum*" (Foster et al., 2001, p.63).

El diseño integrado de los diferentes componentes técnicos de 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.

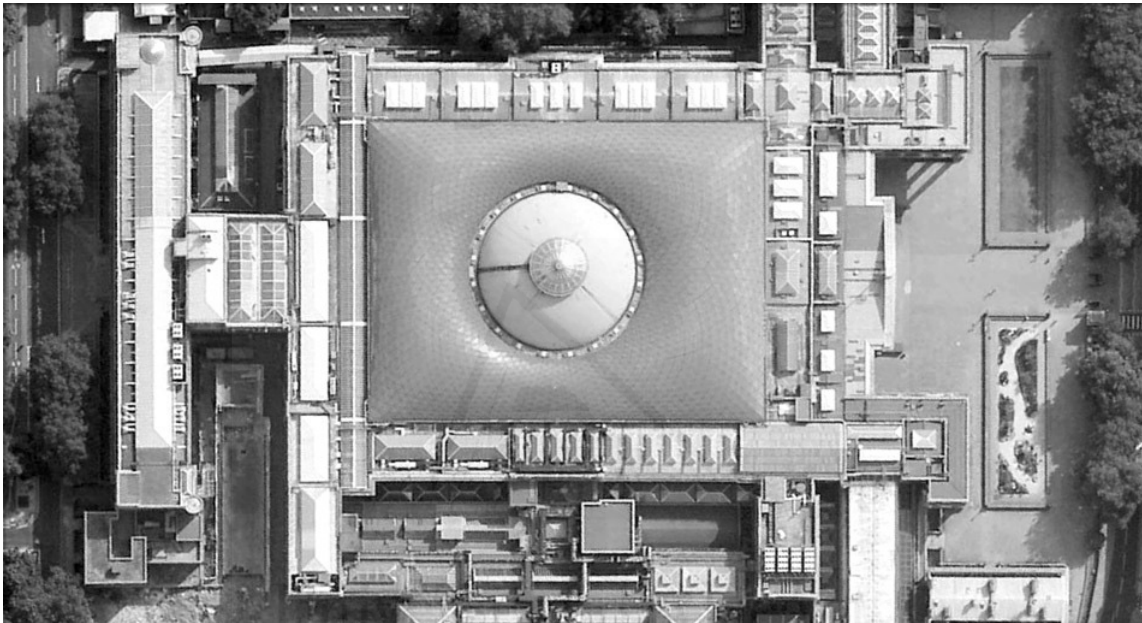


Imagen 92: Vista aérea del British Museum desde 225 metros de altura.
Imagen obtenida en enero de 2012 con el programa Google Earth.

4.2.3.4 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, p.126). El 75% del volumen de esta espuma lo ocupan los compartimentos de forma tetradecaédrica y el 25% restante los dodecaédricos.

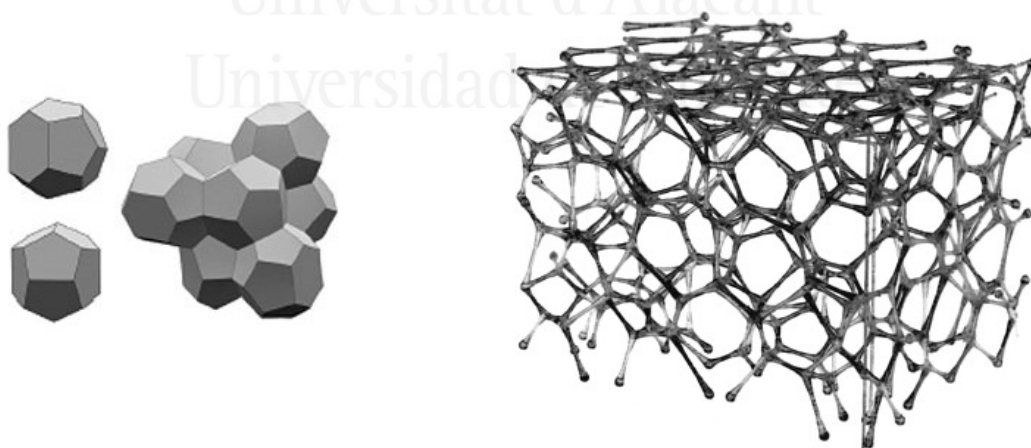


Imagen 93: Espuma de Weaire-Phelan y malla esquelética de barras del CNNP. Ilustraciones extraídas de "*PTW Architects + CSCEC Design + Arup. National Swimming Center, Beijing, China 2003-2007*" (A+U, 2005A, p.126) y de "*Calado de espuma. Centro Nacional de Natación*" (Arquitectura Viva, 2008, p.102).

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. Configuraciones rombododecaédricas y tetrakaidecaédricas pueden encontrarse fácilmente en la naturaleza, las primeras como resultado de la compresión de esferas sólidas empaquetadas y las segundas cuando un sistema de esferas puede resbalar y deslizarse para empaquetarse de forma aún más apretada. A lo largo de los siglos XIX y XX se han realizado numerosos experimentos con esferas enjabonadas para determinar formas eficientes de empaquetar el espacio (D'Arcy Thompson, 1945, pp.550-552) y el uso de herramientas informáticas permitió, a finales del siglo XX, llegar a la solución de la espuma de Weaire-Phelan.

El diseño de la malla del CNNP, podría considerarse, 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 entonces 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 sólo 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 tan sólo cuatro tipos de barras y tres tipos de nudos.

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 water-polo y el centro de recreo (Gonchar, 2008, p.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 de ingenieros de Arup & Partners encargados del proyecto, citado por Gonchar, una imagen orgánica de alta complejidad acentuada por el giro realizado en la malla ¹, a pesar de estar generadas por la repetición de unos pocos elementos un número elevado de veces.

¹ *Despite its regularity, the honeycomblike structure was well suited to the team's goals because "When viewed at an arbitrary angle, it appears totally random and organic" says Tristran Carfrae, leader of the group of engineers from Arup. (Gonchar, 2008, p.151).*



Imagen 94: Detalle de la malla estructural durante el proceso de obra. Ilustración extraída de "*Calado de espuma. Centro Nacional de Natación*" (Arquitectura Viva, 2008, p.108).



Imagen 95: El CNNP, antes y después de revestida la estructura. Ilustraciones extraídas de "*Calado de espuma. Centro Nacional de Natación*" (Arquitectura Viva, 2008, p.103) y de Internet <<http://www.notinat.com.es/vernoticia.asp?id=1565>>.

El modelado manual de una estructura de barras de esta complejidad es una tarea que llevaría 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 del CNNP, con más de 22.000 barras y 12.000 nudos (Carfrae, 2008, p.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 una pieza al concurso 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. La estereolitografía consiste un proceso de realización rápida de prototipos que utiliza la estratificación de resinas fotopoliméricas líquidas, que se solidifican expuestas a la luz ultravioleta.

Un programa informático traduce un modelo CAD tridimensional al formato electrónico STL, utilizado por las máquinas estereolitográficas, organizando la información en capas. Luego un láser de rayo ultravioleta traza cada sección del modelo CAD sobre la superficie de un recipiente conteniendo resina fotopolimérica, materializando de a capas el modelo CAD.

Este procedimiento permite, entonces, 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.

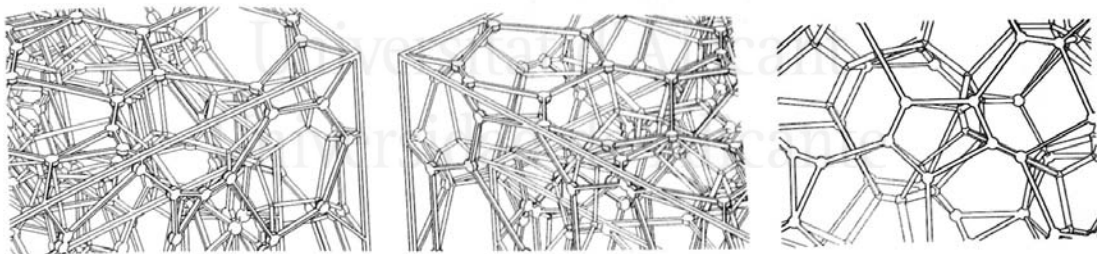


Imagen 96: Malla de barras del CNNP. Ilustraciones extraídas de "*Beijing National Aquatics Center. PTW Architects + CSCEC + Arup*" (Carfrae, 2008, p.133).

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, p.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.

El hecho de que la información se repitiera en distintos formatos generaba un grado de confiabilidad mayor a la hora de la producción de las distintas piezas. Una tarea de esta complejidad hubiera sido inabordable manualmente debido al elevado insumo de tiempo que hubiera implicado y a la alta probabilidad de error.

Los paneles de revestimiento del edificio, tanto de las fachadas exteriores como de las interiores, se diseñaron con almohadillas de un material plástico llamado Etileno-TetraFluoroEtileno (ETFE), que es 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, p.102).

Este sistema de revestimiento fue igualmente utilizado en obras como el Proyecto Edén, de Nicholas Grimshaw o en el estadio Allianz Arena en Munich, de Herzog y de Meuron.

En el punto 4.3.4.5 se desarrollará la evolución del diseño de las almohadillas de ETFE.

Los edificios destinados a albergar piscinas olímpicas utilizan habitualmente una gran cantidad de energía para su calefacción. El CNRP 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, p.130).

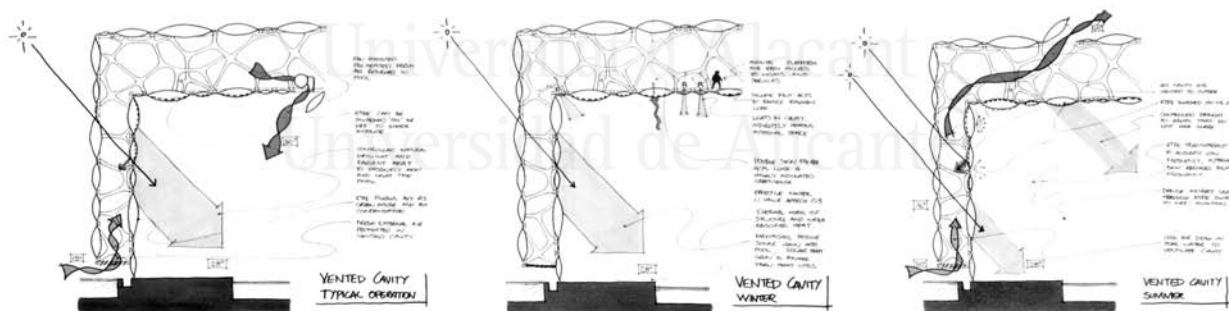


Imagen 97: Funcionamiento de los huecos de la malla estructural como cámara de aire a lo largo del año: estándar, invierno y verano. Ilustraciones extraídas de "Beijing National Aquatics Center. PTW Architects + CSCEC + Arup" (Carfrae, 2008, p.131).

Desde el punto de vista energético, el edificio se comporta como un gran invernadero ya que presenta siempre una ganancia neta de energía. El espacio entre las fachadas exteriores e interiores se utiliza como 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.

El agua de las piscinas y las superficies adyacentes a las mismas, por otra parte, se utilizan como masa para el almacenamiento de calor en invierno.

Las láminas de ETFE han sido serigrafiadas con pequeños puntos de pintura plateada translúcida que deja pasar la luz del sol pero refleja el calor. Estos puntos varían en densidad a lo largo del edificio, de modo que según los usos de los distintos espacios interiores adyacentes a las fachadas, se determina qué cantidad de calor es conveniente dejar ingresar (Pearson, 2008, p.102). Esto permite ganancias de calor diferenciales en distintos sectores.



Imagen 98: El CNNP, vista interior. Ilustración extraída de Internet
<http://www.arup.com/Projects/Chinese_National_Aquatics_Center/WaterCube_overview_1.aspx>.

El proyecto estructural en un edificio con una fuerte integración entre estructura, imagen y acondicionamientos físicos y con una alta complejidad geométrica, como es el caso del CNNP, fue posible de realizar en plazos razonables gracias al desarrollo de un innovador proceso de diseño.

Este proceso incluía la creación de programas informáticos específicos para la generación de la geometría de la malla estructural y para el cálculo, dimensionamiento y optimización de las secciones de todas las barras y nudos, que permitieran a su vez la exportación de datos con altos niveles de precisión a otros programas informáticos para la realización de maquetas, de la planimetría tradicional y para el intercambio de información con los asesores, los fabricantes y los constructores de la obra.

4.2.4 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 resultaba imprescindible la optimización de determinadas características como la rigidez y la liviandad.

A principios del siglo XX, Alexander Graham Bell propuso la forma tetraédrica como módulo apto 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.

Por esa época, el análisis estático de las estructuras de barras trianguladas y articuladas en sus extremos se basaba en Métodos de las Secciones, desarrollados por Cullman, Ritter, Maxwell y Cremona, que en forma gráfica o analítica equilibraban o descomponían los esfuerzos en las direcciones de las barras.

Le Ricolais desarrolló su propio método de análisis estático para estructuras espaciales, conocido como el Método de la Imagen, basado en los métodos de Cullman y Cremona.

A mediados del siglo XX surgieron una serie de proyectos arquitectónicos, algunos de los cuales llegaron a ser construidos, 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, definiendo la jerarquía espacial de usos del edificio.

Tanto en el Philadelphia City Tower de Kahn y Tyng como en la Ciudad Tetraédrica de Fuller o en el Pabellón temático *Man the Producer* en la Exposición de Montreal de Guy Desbarats, estos espacios a distintas escalas pueden entenderse como generados a partir de iteraciones hacia el interior del edificio de un módulo tetraédrico principal, según un principio geométrico de **crecimiento celular fractal**, 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 **malla 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 ya posible el dibujo, cálculo y fabricación de estructuras de barras con geometrías complejas en tiempos razonables.

El diseño del Centro Pompidou, un gran contenedor flexible y libre de obstáculos, capaz de salvar grandes luces y soportar grandes cargas, exigió la búsqueda de una solución estructural innovadora que culminó en la elección de un material que había sido dejado de lado en las estructuras desde hacía varias décadas en Francia y un sistema estructural propio de la construcción de puentes en el siglo XIX.

Se proyectó una estructura de barras plana que se repetía en forma paralela, definiendo una serie de espacios primarios de grandes luces y libres de todo obstáculo en el interior y otros secundarios, de menores dimensiones, sobre las fachadas longitudinales, donde se ubicaron las zonas de servicio que definieron la imagen del edificio. Los huecos de distintas escalas generados por el modelo estructural, por lo tanto, debieron ser proyectados en conjunto con la distribución espacial del edificio.

El proyecto se convirtió así en un sistema material eficaz para la generación de un gran espacio interior libre de obstáculos.

Si bien resultaba relativamente sencillo determinar las solicitaciones estáticas de las distintas piezas estructurales, el empleo del acero fundido en las vigas Gerber, sometidas a importantes esfuerzos de flexión, presentaba un problema novedoso que llevó a la adaptación de una nueva teoría surgida en otros campos de la construcción, para prever el comportamiento del material con adecuados criterios de seguridad.

Es decir que las exigencias espaciales y estéticas del proyecto arquitectónico llevaron a la utilización de un material en desuso que determinó, para que la estructura cumpliera con los criterios modernos de seguridad, la aplicación de una nueva teoría de comportamiento mecánico.

Desde las últimas décadas del siglo XX se cuenta con programas informáticos capaces de resolver con exactitud las solicitaciones de estructuras con geometrías complejas. El acelerado desarrollo de la capacidad de los ordenadores y los avances en la programación han hecho posible el dibujo y cálculo de complejas geometrías tridimensionales de barras en tiempos muy cortos, de modo que en la actualidad es posible trabajar fácilmente con estructuras de prácticamente cualquier forma imaginable.

Frente a problemas particulares de alta complejidad, como los planteados por la cubierta irregular sobre el patio del Museo Británico o por la malla 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 garantizan exactitud y eliminan 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 malla 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.

Estas formas de trabajo, que implican la cooperación de un número elevado de profesionales en distintas disciplinas y la necesidad de acceder a tecnología de última generación, solo pueden 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 podría decirse que 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 en Cornualles 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 posibilitado, sin embargo, el diseño de grandes estructuras optimizadas a través de ensayos de **autoorganización** o "form finding" (ver capítulo 4.3.3.3).

La forma final de cubiertas como la del patio del Museo Británico o las del Proyecto Edén se basan en estudios preliminares realizados 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 CNRP, 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.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



4.3 Las estructuras superficiales

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.3.1 Las estructuras superficiales a principios del siglo XX

4.3.1.1 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 que investiga.

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.



Imagen 99: Cubiertas reticuladas comprimidas para la "Exposición Industrial y Artística de toda Rusia" de 1896 en Nizhni Novgorod. Ilustración extraída de "*Vladimir G. Shukhov e la leggerezza dell'acciaio*" (Giovannardi, 2007A, p.20).

Las cubiertas hiperbólicas 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 de doble curvatura que cubrían un área total de unos 27.000 m². Cuatro pabellones se techaban con cubiertas colgantes traccionadas y cuatro con bóvedas reticuladas comprimidas (Graefe et al., 1990, p.43).

Próximo a los pabellones construyó también un tanque de 114.000 litros de agua elevado a una altura de 25 metros para abastecer a la exposición, utilizando una estructura de perfilera 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.

A través de una escalera en espiral era posible llegar a una plataforma sobre el tanque desde la que podía observarse todo el recinto ferial.

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

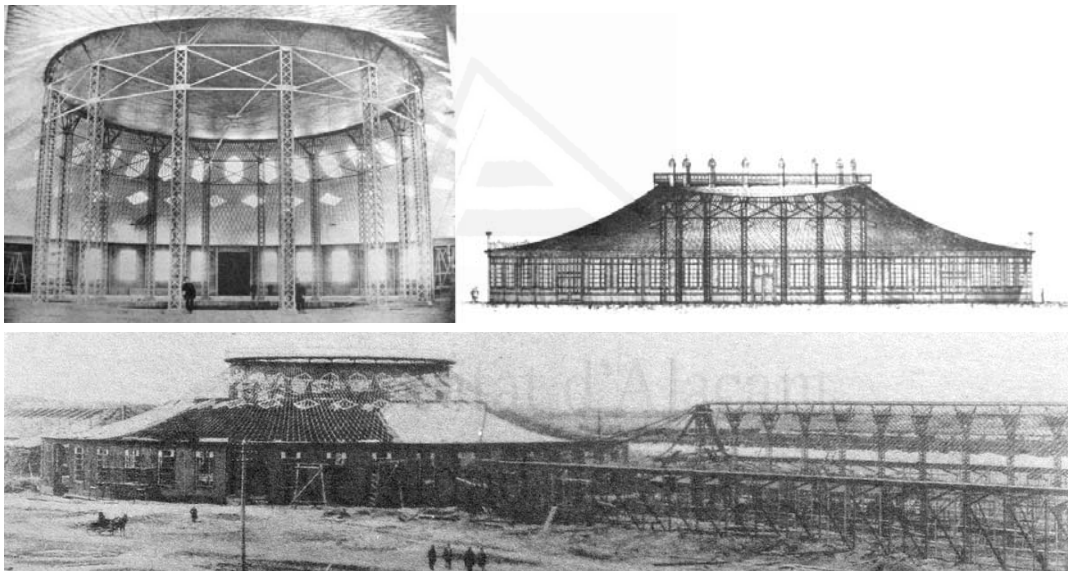


Imagen 100: Cubiertas suspendidas para la "Exposición Industrial y Artística de toda Rusia" de 1896 en Nizhni Novgorod. Aro central de pilares, fachada y vista durante la construcción. Ilustraciones extraídas de "*Un ingegnere rivoluzionario: Vladimir Grigor`evic Suhov 1853-1939*" (Graefe, 1990, p.46).

Shukhov construyó por primera vez, de esta manera, una estructura superficial 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

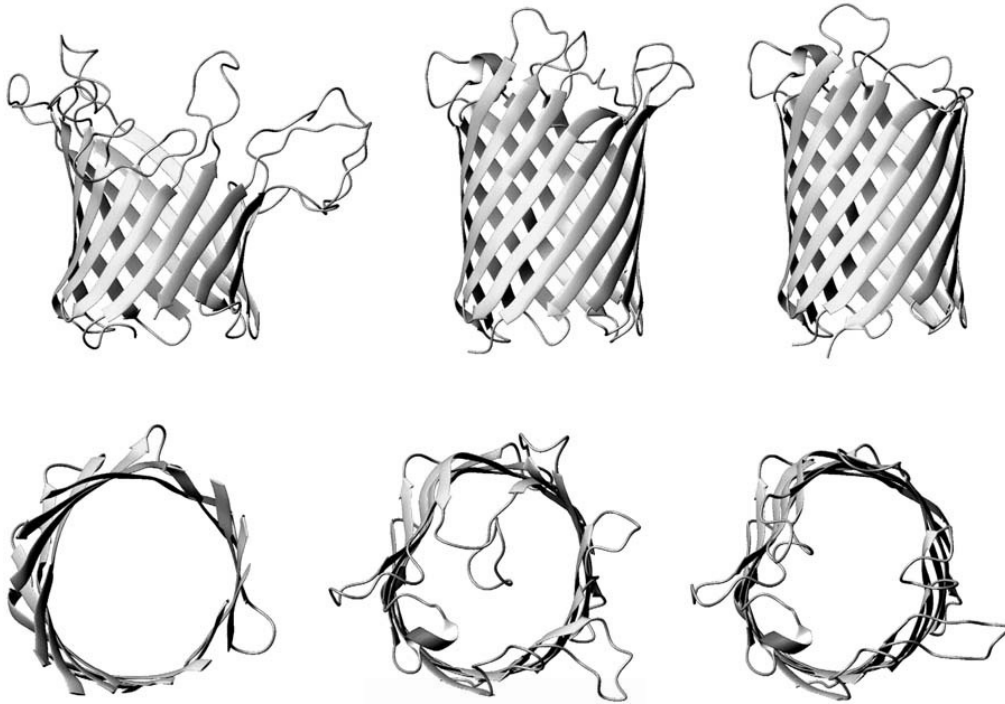


Imagen 101: Estructura "barril beta" de una proteína porina. Ilustración extraída de "*Structure of outer membrane protein G by solution NMR spectroscopy*" (Liang, 2007, p.16143).

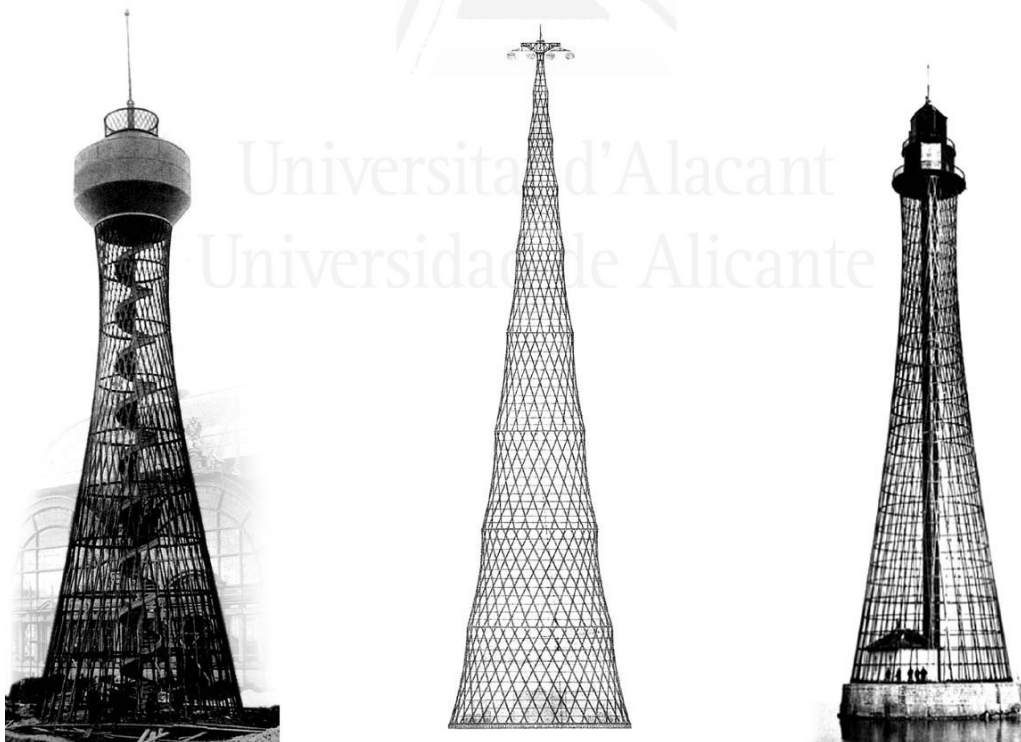


Imagen 102: Tres torres diseñadas por Shukhov. De izquierda a derecha: Depósito elevado de agua para la "Exposición Industrial y Artística de toda Rusia" (1896), proyecto original de la Torre Shabolovka (1919) y Faro de Adziolog (1908). Ilustraciones extraídas de "*Un ingegnere rivoluzionario: Vladimir Grigor'evic Suchov 1853-1939*" (Graefe et al., 1990, pp.47, 48 y 53).

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 de estas superficies y el empleo de elementos estandarizados de uso común, por otra parte, 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 las formas 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 a 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.



Imagen 103: Fibras elásticas y de colágeno del tejido conectivo del mesenterio.
Ilustración extraída de "Color Atlas of Cytology, Histology, and Microscopic Anatomy"
(Kuehnel, 2003, p.117).

Gracias a la gran economía de recursos que los sistemas constructivos que había desarrollado implicaban, Shukhov construyó en los años siguientes 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 sólo 150 metros de altura (Graefe et al., 1990, p.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, en este ejemplo, debido a la progresiva reducción de los diámetros de los sucesivos módulos.

Gracias a su estructura en forma de malla abierta y a su 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 Nº14 que se fijaban a anillos intermedios de rigidización, formados por perfiles simples UPN Nº10. 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 al., 1990, pp.48-49).

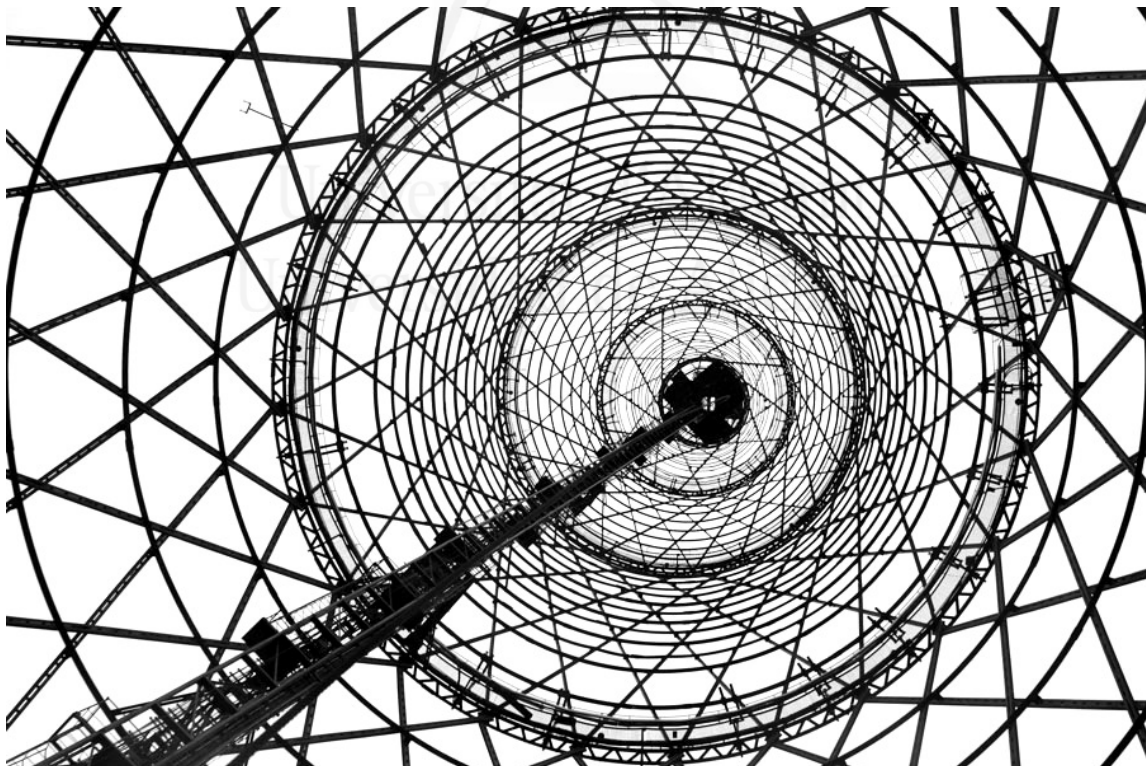


Imagen 104: Vista interior de la Torre Shabolovka. Ilustración extraída de *"Un ingegnere rivoluzionario: Vladimir Grigor`evic Suchov 1853-1939"* (Graefe et al., 1990, p.39).

4.3.1.2 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).

Sus primeros diseños de aeronaves, los dirigibles R80 y R100, emplearon principios geodésicos para su construcción.

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. Basándose en sus diseños de aeronaves, 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, más fuerte y más 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).

En 1936 Wallis 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.

Pero el sistema geodésico encontró pronto 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.

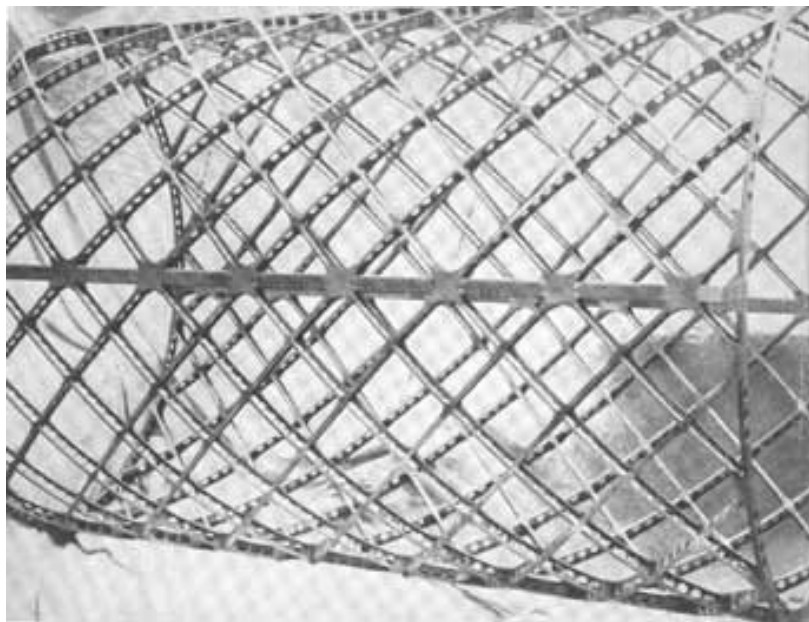


Imagen 105: Sistema geodésico inventado por Barnes Wallis. Ilustración extraída de Internet <<http://www.1940.co.uk/history/article/wallis/wallis.htm>>, [Acceso: 18 de marzo de 2011].

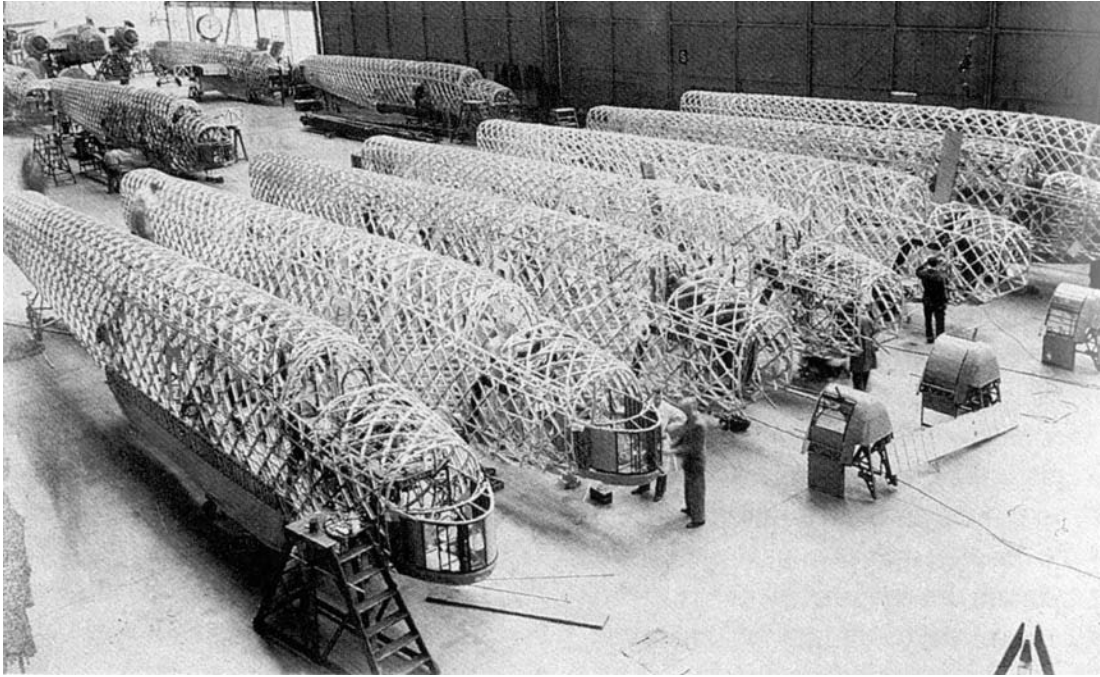


Imagen 106: Planta de fabricación de fuselajes del bombardero Wellington.
Ilustración extraída de Internet: "*Royal Air Force Museum*" de Londres.
<http://www.aviadores.eu/rafmuseo_bombarderos.html>, [Acceso: 18 de marzo de 2011].



Imagen 107: El bombardero Wellington, diseñado por el ingeniero británico Barnes Wallis.
Ilustración extraída de Internet: "*Encyclopaedia Britannica Online*".
<<http://www.britannica.com/bps/media-view/50980/1/0/0>>, [Acceso: 18 de marzo de 2011].

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

El hormigón armado surge a principios del siglo XIX en el este de Francia como resultado de la combinación de una doble tradición que se remonta a épocas del Imperio Romano, por un lado el sistema constructivo tradicional de muros de hormigón romano de origen puzolánico, a los que se daba forma con moldes de madera: el sistema de tapial y por otro los refuerzos metálicos a modo de grapas que se solían usar para trabar sillares.

Es un material con características totalmente diferentes a las del hormigón o a las del acero. Es una piedra orgánicamente constituida, dentro de cuya masa el complejo tendinoso de las armaduras se distribuye óptimamente, se dosifica para otorgar al hormigón armado la resistencia a la tracción necesaria en cada punto y se orienta y refuerza según las exigencias tensionales previstas (Jordá, 2002B, p.34).

A mediados del siglo XVIII, John Smeaton comenzó a estudiar el comportamiento de calizas impurificadas con arcillas para la fabricación de morteros y descubrió que la calidad del material aumentaba cuando agregaba una proporción importante de arcilla a la mezcla (Jordá, 2002B, pp.35-36).

En 1788 aparece la palabra *hormigón* en el Diccionario de las Nobles Artes para la Instrucción de Aficionados y usos de los Profesores de Diego Antonio Rejón de Silva, definida como "*argamasa compuesta de piedras menudas, cal y betún que dura infinito. También se hace sin betún*".

En 1796 James Parker patenta, en Inglaterra, un método para fabricar cemento hidráulico por calcinación de nódulos de cal con alto contenido en arcilla, conocido como "Cemento Romano" y utilizado hasta que Vicat inventa el sistema de fabricación por vía húmeda, que marca el inicio del actual proceso de fabricación. Dos décadas más tarde publica "*Recherches Experimentales*", una serie de pautas a seguir en la fabricación del cemento por medio de mezclas de calizas y arcillas, dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente.

Joseph Aspid patenta por primera un método para fabricar cemento Pórtland en 1824. La patente establecía que el barro o polvo de las calles empedradas con piedra calcárea o, en caso de que este material no pudiera obtenerse en suficiente cantidad, la piedra calcárea calcinada, se mezclara con una determinada cantidad de arcilla y se amasara con agua por medios manuales o mecánicos hasta reducirla a un limo impalpable. La pasta se debía dejar secar, luego se troceaba y se calentaba en un horno de cal hasta que se hubiera desarrollado todo el ácido carbónico; luego se reducía a polvo el producto con muelas y morteros y quedaba ya pronto para usarse (Benévolo, 1987, p.352).

El Dr. Fox elaboró, en 1829, un sistema para construir pavimentos en cemento armado usando el cemento Pórtland como elemento de relleno dentro de unas armaduras de hierro, en el que Guillermo de Fairbain se basó para la construcción de unos almacenes de siete y ocho plantas en Manchester en 1844.

En 1845 Lambot comenzó a fabricar objetos en los que combinaba el hormigón y el acero, surgiendo de esta manera el "*Hormigón Armado*". Entre 1847 y 1852 Francois Coignet proyectó la primera cubierta en cemento fraguado con encofrados y armado con perfiles de hierro para una terraza en Saint-Denis (Benévolo, 1987, p.352).

Joseph Monier construyó sus primeras jardineras para rosales en hormigón reforzado con tela metálica en 1849. Buscando una masa resistente a las heladas para recubrir las tuberías, descubrió las ventajas del material: combinando hierro con una masa fluida de cemento surge una combinación interior de carácter orgánico, ya que el cemento envuelve al hierro como la musculatura al esqueleto. Comenzó entonces a emplear entramados de alambre como armazón del cemento para la construcción de depósitos de agua en Fontainbleau (Benévolo, 1987, p.352). Labrouste ya había realizado una operación similar, pero con otros materiales, en la cubierta de la Biblioteca de Santa Genoveva en 1843. Más adelante Monier patentó tuberías, paneles, puentes, escaleras, vigas y cubiertas con el nuevo material y construyó, en 1875, el primer puente de hormigón armado en Chazalet, Francia, con un ancho de 4 metros y una luz de 16,5 metros.

En 1861 Francois Coignet publicó "*Betons Agglomérés*", estudiando por primera vez el papel que corresponde al hormigón y al acero como partes integrantes del nuevo material; en 1884 Edmond Coignet y De Tedesco publicaron el primer "*Método de Dimensionamiento Elástico de Secciones de Hormigón Armado*" y dos años más tarde Mathias Koenen, director técnico de la casa Wayss en Berlín, publicó su libro "*Método empírico de cálculo de secciones de Hormigón Armado sujetas a flexión*", donde establecía que el hormigón resiste a la compresión y el hierro a la tracción.

A fines del siglo XIX, François Hennebique comenzó a estudiar forjados de cemento armados con varillas de hierro y construyó la primera losa armada con hierros redondos.

Algunos años más tarde comenzó a producir casetas prefabricadas para los guardarrailes y entre 1899 y 1900, construyó en París el primer edificio con estructura de hormigón armado en la Rue Dantón N°1.

En 1903, Auguste Perret construyó su edificio con estructura de hormigón armado en la Rue Franklin N°25, también en París (Jordá, 2002B, p.40). Según Perret, esta era la primera vez que este material se utilizaba como medio de expresión arquitectónica.

Más tarde, en 1915, construyó una cubierta laminar de hormigón armado para unos almacenes en la ciudad de Casablanca.



Imagen 108: Edificio en la Rue Franklin N°25, París, de Auguste Perret (1903).
Fotografías del autor.

A partir de la década de los años 1920 comienza a experimentarse en varios países con la construcción de **cubiertas laminares de hormigón armado**, llegando esta tipología estructural a alcanzar un importante auge en los años 1950 gracias a su demostrada eficacia y economía.

Pronto se convierte 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 empieza a demandar.

En sus inicios, su construcción se encuentra 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 lleve a su desuso en la década de los años 1960 (Jordá, 2002B, pp.51-52).

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, p.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.

La necesidad de que el equilibrio de las estructuras quede garantizado mediante cálculos, hace cobrar un protagonismo especial al análisis matemático y en algunos casos, éste llega incluso a volver inviable la construcción de una obra razonable.

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 éstas no produjeran esfuerzos de flexión.

Más tarde, C. B. Airy y A. E. Love establecieron que la teoría de la membrana sólo 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, pp.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 paraboloides, aunque lo parecieran, impidió aplicar los métodos de cálculo entonces conocidos (Jordá, 2002A, p.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, p.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, p.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, dice, 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, p.307-312).

Es siempre fundamental evaluar el grado de correspondencia entre el comportamiento que se previó para la estructura y el que finalmente ocurre en la realidad. Si por ejemplo, las condiciones de sustentación de la estructura no son las previstas, si el comportamiento del material no se corresponde enteramente con el de la teoría de la elasticidad adoptada, si aparecen cargas que no fueron consideradas o si el proceso de ejecución de la obra da lugar a estados tensionales no previstos, el comportamiento real de la obra no estará de acuerdo con el que surge del cálculo (Torroja, 1960, p.373).

Nunca es la realidad la que contiene errores sino los modelos que adoptamos para modelizarla y nunca debe confiarse en el afinamiento excesivo de los cálculos ya que siempre llevan consigo el "*estigma congénito de sus propias hipótesis*" (Torroja, 1960, p.374).

(...) la imaginación no puede trabajar con éxito si no va asociada a los principios básicos que una larga experiencia de trabajo técnico creativo deja en los abismos insondables de nuestra personalidad, de tal modo que más tarde condiciona de forma inconsciente nuestro propio razonamiento intuitivo. (...) Pero tales principios básicos no son suficientes por sí solos para crear una nueva forma de modo crítico y deductivo. Para que emerja dicha forma se necesita un chispazo de la imaginación. De hecho, a menudo aparece en el momento más inesperado, cuando menos estamos intentando crear (Jordá, 2002A, p.308).

La cubierta del Hipódromo de la Zarzuela está compuesta por sectores de hiperboloide con un vuelo de 12,8 metros. Sobre los soportes la flecha de la sección transversal en arco es de 1,4 metros y el radio de curvatura de 2,75 metros, mientras en el extremo del voladizo la flecha es de 50 centímetros y el radio de curvatura de 6,7 metros. En este borde, el espesor es constante de 5 cm, generando una fuerte sensación de ligereza.

La teoría de la elasticidad no había desarrollado aún procesos matemáticos adecuados para el análisis de esfuerzos en este tipo de estructuras, pero se sabía que poseían buenas propiedades estructurales en el espacio.

Se realizaron varias pruebas con el objetivo de determinar la dirección e intensidad de los esfuerzos, pero surgieron complicaciones a causa de la excesiva armadura necesaria en las proximidades de la línea de soportes o de clave, donde la curvatura es mayor.

Se decidió, entonces, construir un modelo y el contratista se ofreció a hacerlo a escala real. Esta operación sirvió para observar el comportamiento estático de la cubierta y también para revisar el procedimiento constructivo.

El modelo ensayado acusó una resistencia del orden del triple de la necesaria para cumplir con las condiciones normales de carga, incluyendo su peso propio y la sobrecarga de nieve.

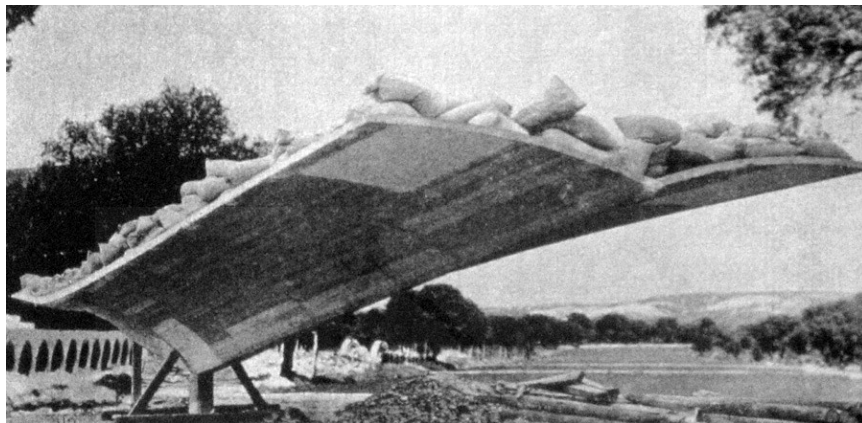


Imagen 109: Prueba de carga en un modelo a escala real para la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela. Ilustración extraída de *"La vigencia de un legado, Eduardo Torroja"* (Jordá, 2002A, p.83).

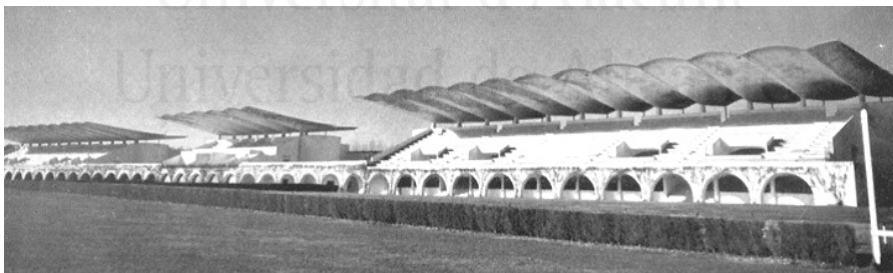


Imagen 110: Tribunas del Hipódromo de la Zarzuela, 1935. Ilustración extraída de *"La vigencia de un legado, Eduardo Torroja"* (Jordá, 2002A, p.147).

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, p.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.

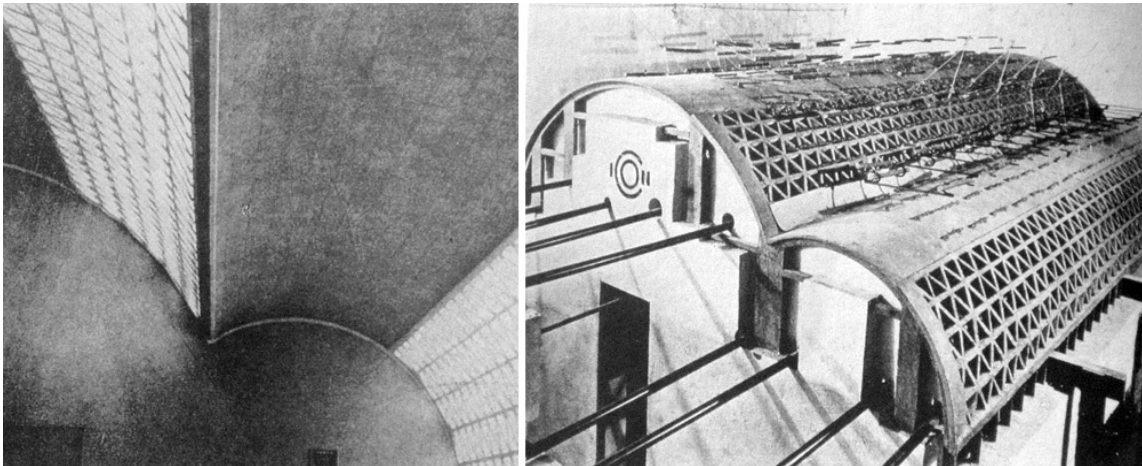


Imagen 111: Vista interior de la cubierta del Frontón de Recoletos y modelo a escala reducida para la realización de ensayos. Imágenes extraídas de *"Razón y ser de los tipos estructurales"* (Torroja, 1960, pp.119 y 375).

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, p.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, pp.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 icono de la arquitectura de mediados del siglo XX.

Su diseño surgió, según Saarinen, de la expresión formal de tres principios: función, estructura y la voluntad de ser parte del espíritu de su tiempo (Leubkeman, 1992, p.108).

A través del uso de formas orgánicas y sinuosas en la cubierta abovedada de hormigón armado, Saarinen pretendía representar la función del edificio (Fisher, 1992, p.96), pero esta referencia aerodinámica con un inusual despliegue de creatividad formal, también reflejaba una estudiada distribución de los esfuerzos estáticos (Jordá, 2002B, p.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, p.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, p.103).

Este edificio fue, por otra parte, una de las primeras terminales en utilizar pasarelas mecánicas y cintas para equipajes como medio de acelerar los movimientos y evitar congestiones.

Saarinen analiza de esta manera al edificio como un artefacto entre máquina y órgano. **La función**, podría decirse, **esculpe la forma** de la terminal.



Imagen 112: Fachada principal de la Terminal de pasajeros de la TWA del Aeropuerto Kennedy en Nueva York. Ilustración extraída de "Eero Saarinen. TWA Terminal. Il calcolo e l'invenzione" (Papademetriou, 2001, p.27).

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, p.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.

Seguramente el proyecto de Jørn Utzon presentado al concurso internacional para la Opera de Sydney, del cual Saarinen había sido jurado poco tiempo antes, tuvo 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.

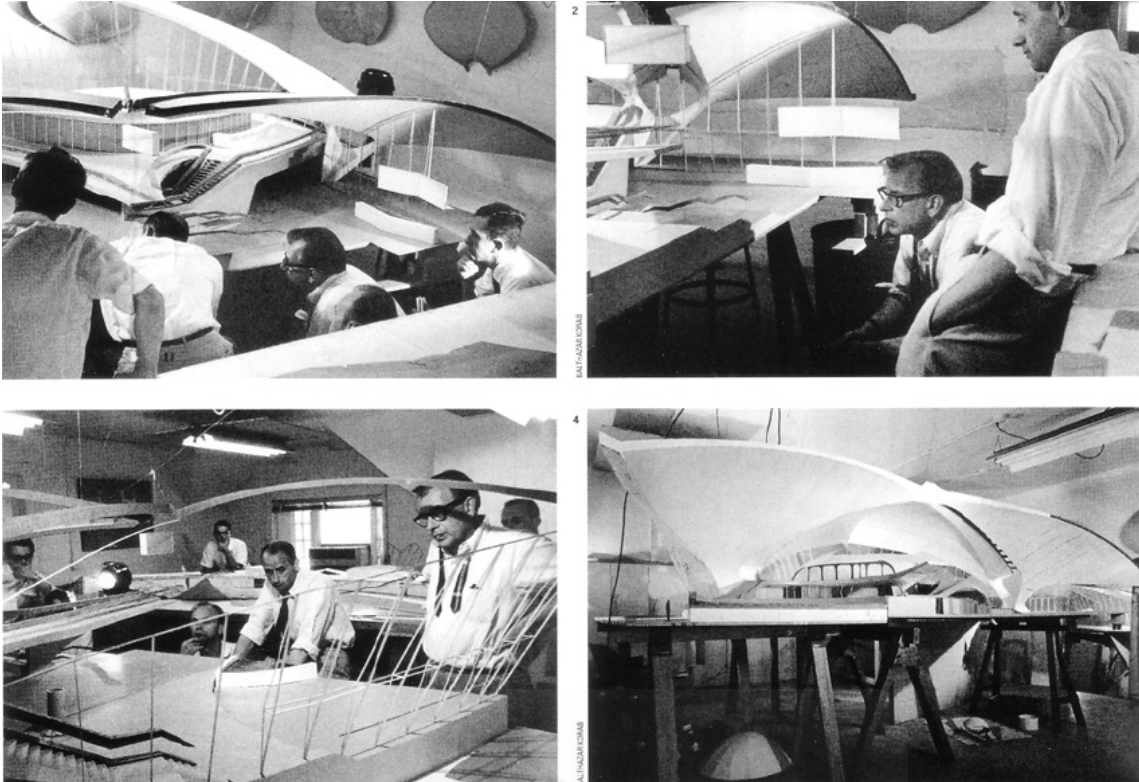


Imagen 113: Diseño de la Terminal de la TWA en el taller de Saarinen. Eero Saarinen, Kevin Roche, Cesar Pelli y otros. Ilustraciones extraídas de "*Eero Saarinen. TWA Terminal. Il calcolo e l'invenzione*" (Papademetriou, 2001, p.22).

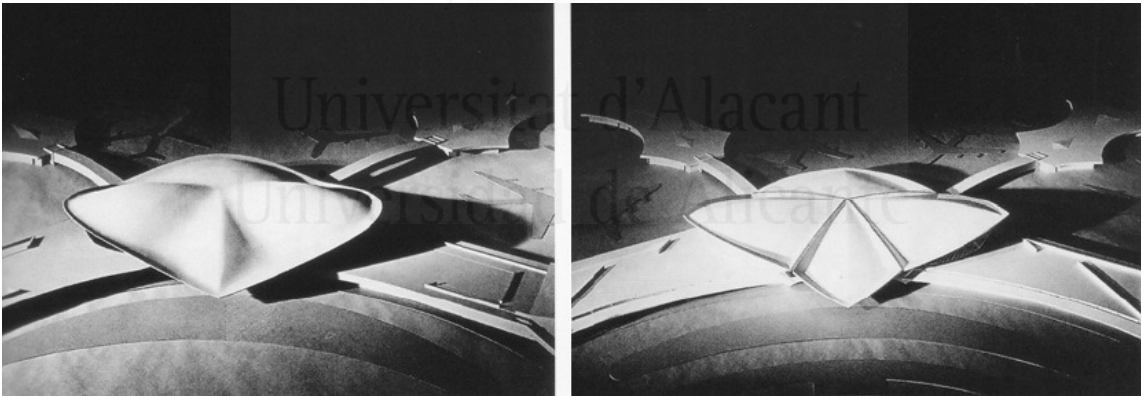


Imagen 114: Evolución del diseño de la cubierta. Ilustraciones extraídas de "*TWA's Influence*" (Papademetriou, 1992, pp.103 y 104).

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, p.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.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.3.2 Las cáscaras complejas a mediados del siglo XX

4.3.2.1 Las cubiertas de la Opera de Sydney

En 1957 se realizó uno de los primeros concursos internacionales de arquitectura, luego de finalizada la Segunda Guerra Mundial, para el diseño de un complejo de edificios en Sydney dedicado a las artes musicales y dramáticas.

El programa del concurso preveía la construcción 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, p.12).

El esquema ganador del concurso 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 al., 1973B, pp.4-7). Las cáscaras principales se conectaban entre sí por una serie de cáscaras secundarias laterales que tampoco tenían una definición geométrica precisa.



Imagen 115: La Opera de Sydney, de Jørn Utzon. Ilustración extraída de Internet <http://en.wikipedia.org/wiki/Sydney_Opera_House>.

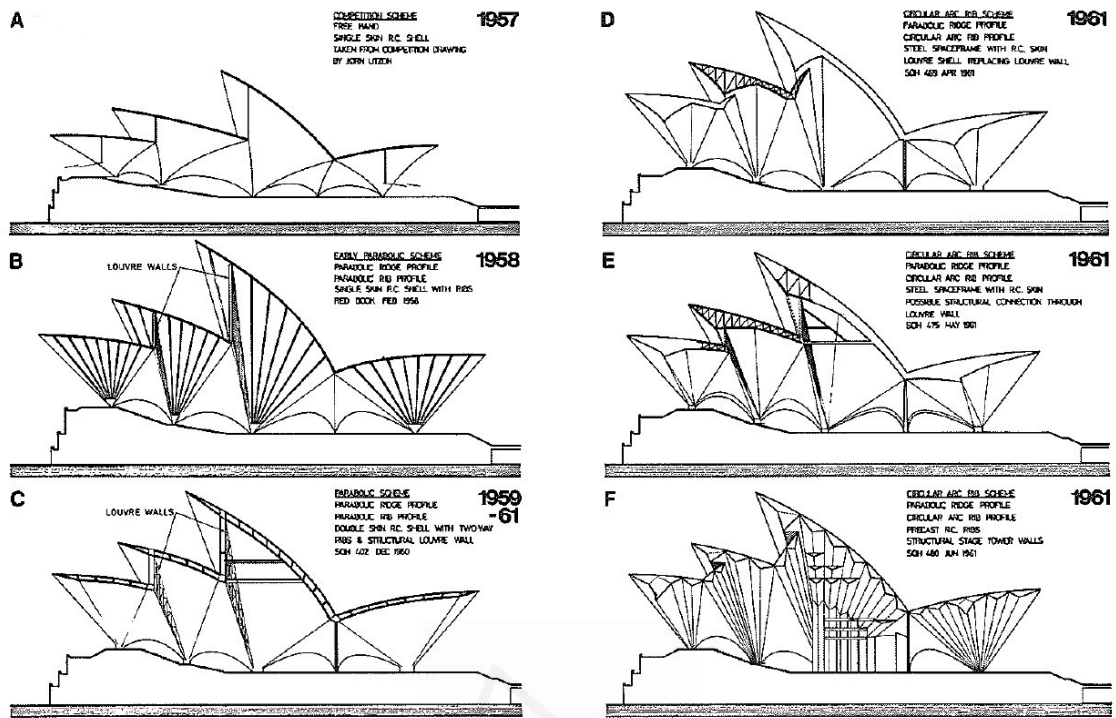


Fig. 17
History of development of roof design: 1957-1961

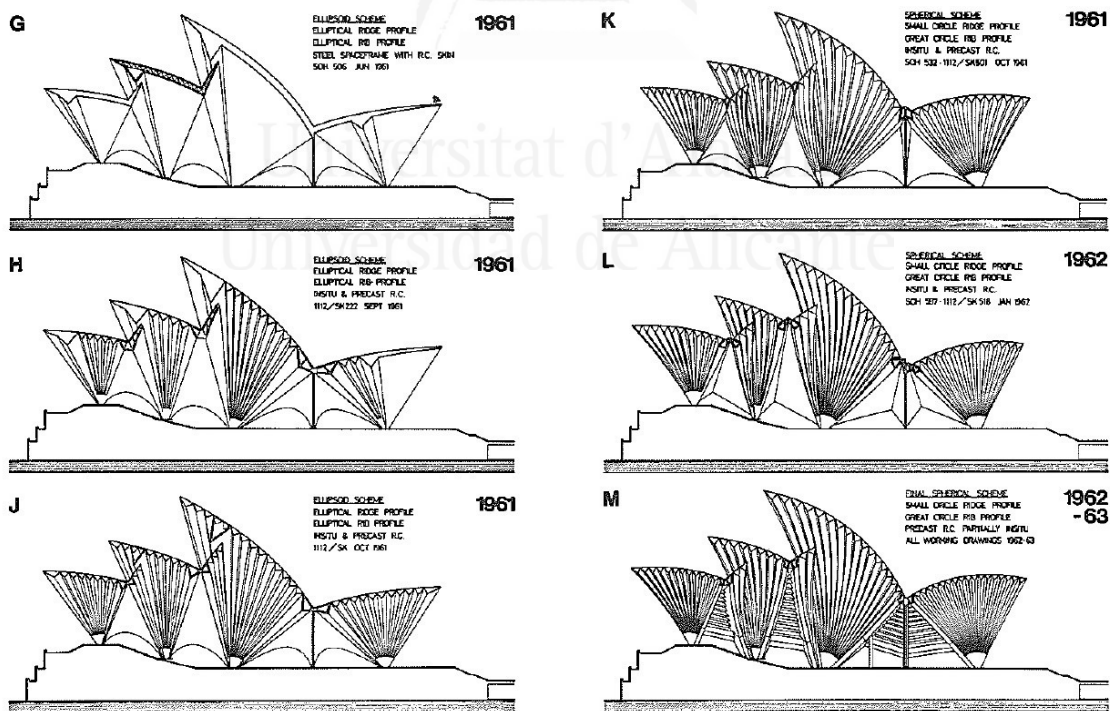


Fig. 18
History of development of roof design: 1961-1963

Imagen 116: Diagramas de la distintas soluciones estudiadas para la estructura de la Ópera de Sydney entre 1957 y 1963. Ilustración extraída de "Sydney Opera House" (Arup et al., 1973B, p.9).

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 solicitaciones estáticas (Arup et al., 1973A, p.22).

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 al., 1973B, pp.5-10).

Era prioritario 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 necesario, 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 la definición 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, éstos 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 solicitaciones 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 (ver figura 116H).

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, esto implicó que las cáscaras se diseñaran con un 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, p.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 al., 1973B, pp.12-13). Sus juntas longitudinales coinciden con las juntas entre las costillas estructurales de modo de reflejar el sistema constructivo de la cubierta.

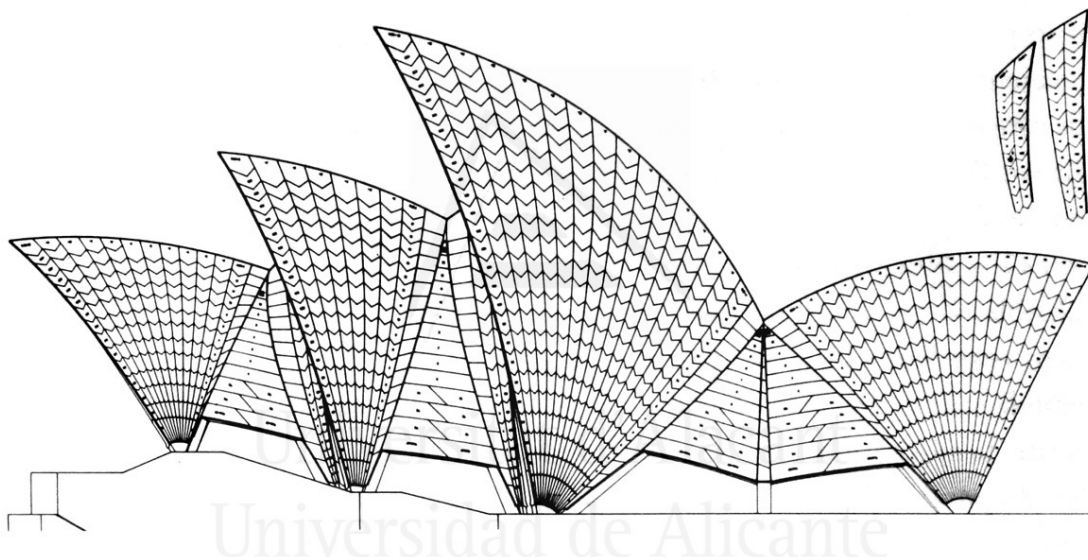


Imagen 117: Vista lateral de las cáscaras finales de la Ópera de Sydney con sus paneles de revestimiento. Ilustración extraída de "Sydney Opera House" (Arup et al., 1973B, p.11).

Cada cáscara principal, en alzado, finalmente 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 juntarían teóricamente en los polos de la esfera (los vértices de apoyo) y se ensanchan hacia la cumbre (la clave del arco ojival).

La sección de las costillas es variable, desde una forma en T llena en la base hasta una forma en Y hueca en la cumbre y su altura va aumentando hacia la cumbre, **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 al., 1973B, pp.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 entonces la clave de un arco ojival que luego se pretensa a los segmentos adyacentes para formar una única viga (Arup et al., 1973B, p.12).

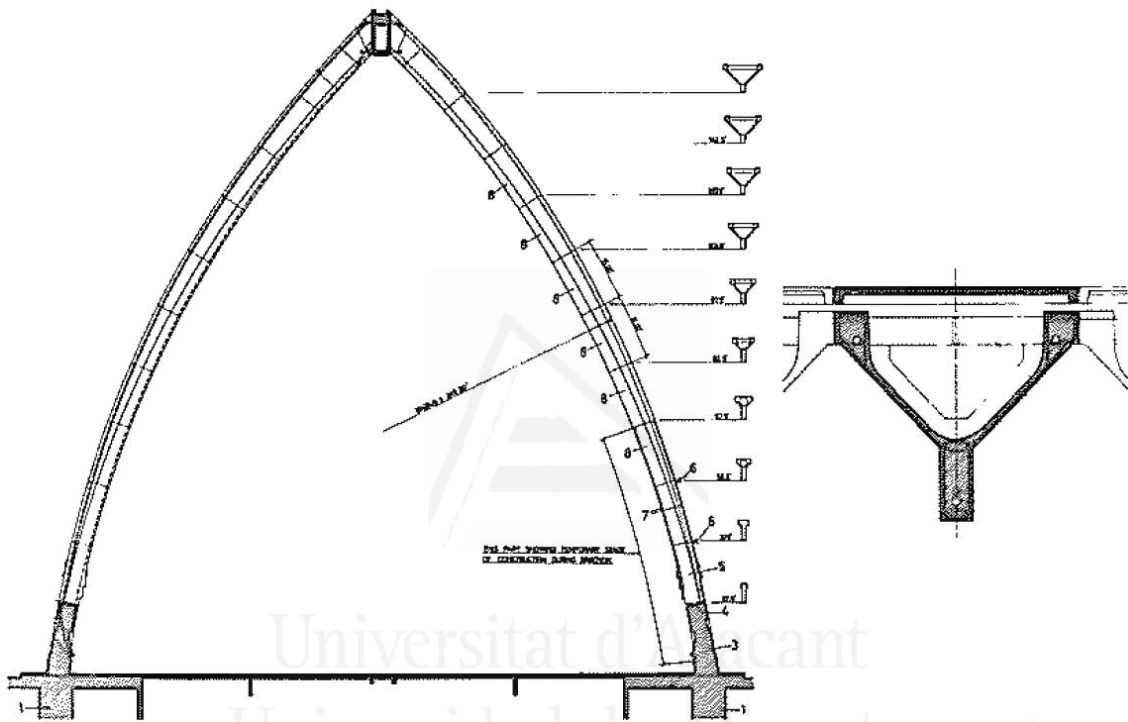


Imagen 118: Sección transversal de las cáscaras de la cubierta en zona del Hall principal de la ópera de Sydney, Jørn Utzon. Ilustración extraída de "Sydney Opera House" (Arup et al., 1973B, p.11).

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 al., 1973B, p.10). Era prioritario, por lo tanto, encontrar la manera de **optimizar los tiempos de cálculo**.

La estructura de la Ópera de Sydney fue entonces 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 al., 1973B, pp.8 y 17).

Algunas de las cáscaras de la cubierta fueron analizadas con programas matriciales especialmente escritos para esta estructura 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 cumbre y en varios puntos intermedios entre ésta y el pedestal de apoyo, de modo de reducir los momentos flectores laterales y los torsores. Los esfuerzos axiales en la cumbre y en las conexiones intermedias se transmitían finalmente a las cáscaras laterales.

El ingeniero 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.

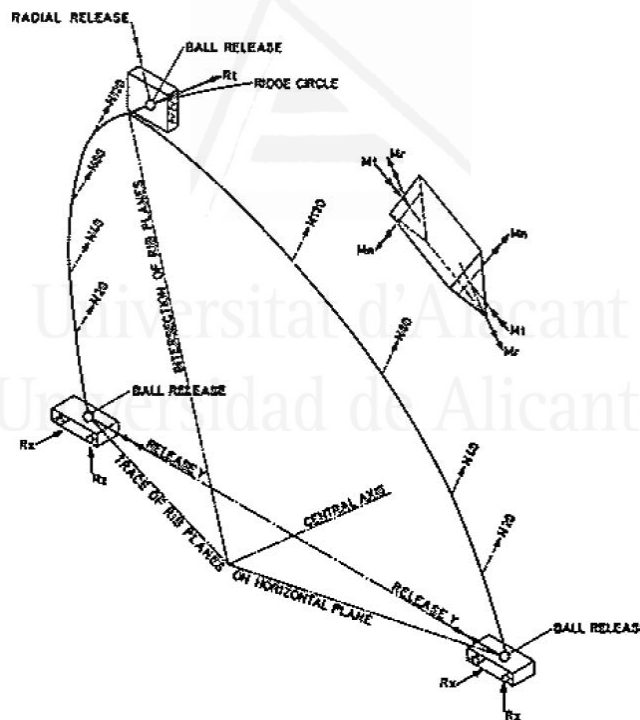


Imagen 119: Modelización estructural de las costillas de una de las cáscaras principales de la Opera de Sydney. Ilustración extraída de "Sydney Opera House" (Arup et al., 1973B, p.16).

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 al., 1973B, pp.16-18).

El proyecto presentado a concurso por Utzon fue concebido sin asesoramiento estructural (Zunz, 1988A, p.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, p.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.

La definición 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 Opera 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 al., 1973B, p.6). Es decir que 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 Opera 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 Opera de Sydney.

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.

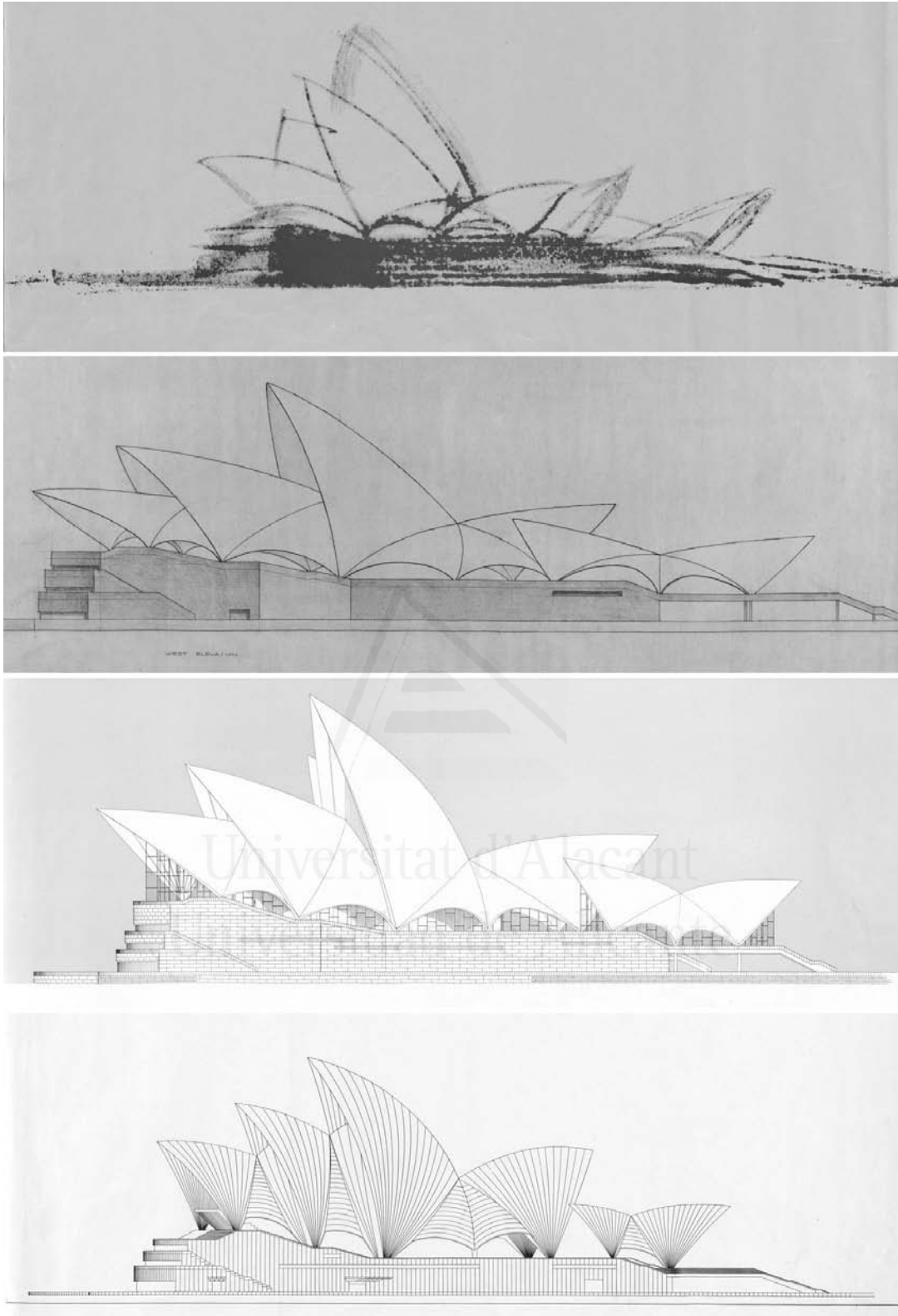


Imagen 120: Evolución del diseño de la fachada oeste de la Opera de Sydney.
A: croquis inicial de Utzon; B: fachada presentada al concurso por Utzon; C: fachada presentada en el reporte de avance de 1958; D: fachada presentada en el reporte de avance de 1962. Ilustraciones extraídas de "Competition drawings submitted by Jørn Utzon to the Opera House Committee", "Sydney National Opera House" ("Red Book") y "Sydney Opera House" ("Yellow Book").

Este análisis representó un importantísimo **avance en la organización de los trabajos** de diseño y construcción de estructuras de alta complejidad, con enormes repercusiones en los años posteriores.

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 comprobar, con herramientas actuales de cálculo, si los coeficientes de seguridad adoptados no fueron excesivos a efectos de calificar la eficiencia en el uso del material de la estructura proyectada.

La introducción de la geometría circular en las cubiertas, originalmente definidas con trazos libres, seguramente no resultó beneficiosa para la imagen orgánica y natural que las primeras fachadas y los primeros croquis expresaban, pero fue necesaria para la racionalización geométrica de la obra.

Podría considerarse que, a pesar de ello, las cualidades escultóricas del proyecto original de Utzon fueron conservadas a lo largo del proceso de diseño y el edificio se ha convertido en un icono de la ciudad de Sydney, tal como el jurado del concurso previó.

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 **colaboran** 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.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.3.2.2 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.



Imagen 121: Bóvedas gausas del gimnasio municipal de Durazno (1973-1975), Uruguay, de Eladio Dieste. Fotografías del autor.

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 basan en el estudio de la forma y en el análisis 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 desarrollan tanto las ideas de Robert Le Ricolais de que un modelo geométrico debe surgir a partir de una determinada acción mecánica, como las de D`Arcy Thompson de que las formas son moldeadas por las fuerzas físicas.

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, pp.233-234).

Diafragmas, cúpulas, bóvedas y superficies plegadas o regladas de doble curvatura (Jiménez et al., 2001, p.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 profesional, tales como torres, naves industriales, grandes superficies techadas para almacenamiento de mercaderías o actividades deportivas, iglesias, tanques de agua o silos (Jiménez et al., 2001, pp.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 sólo 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, p.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 al., 2001, p.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, observa 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.

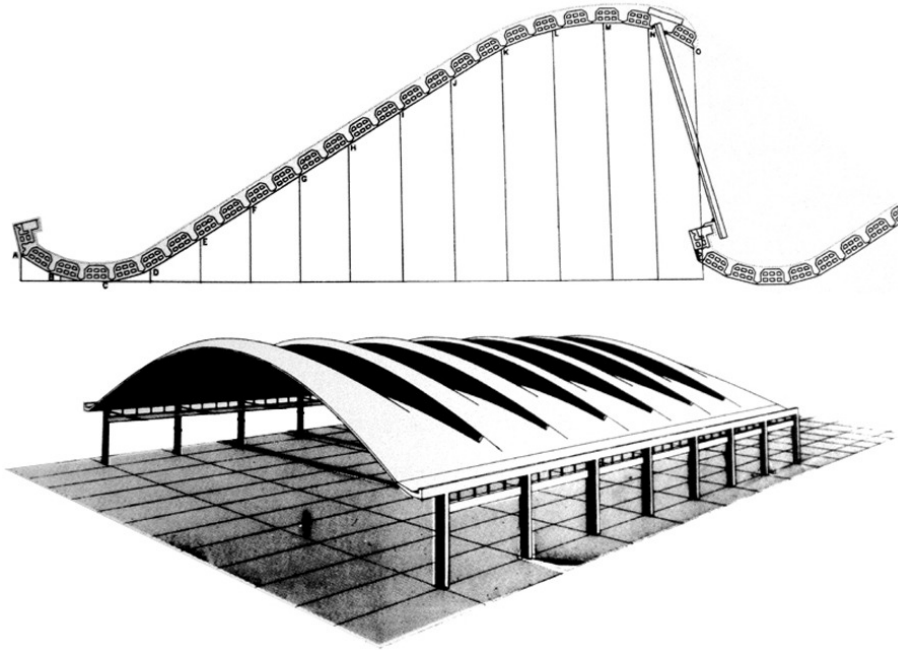


Imagen 122: Bóvedas gausas, Eladio Dieste. Ilustraciones extraídas de "*Eladio Dieste. 1943-1996*" (Jiménez et al., 2001, pp.45 y 44).

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 geoméricamente podrían definirse como una catenaria de cuerda fija y flecha variable que se desplaza a lo largo de un eje, de modo que los arranques definen dos rectas paralelas contenidas en un mismo plano horizontal (Jiménez et al., 2001, pp.41-43).

Manipulando la forma de una bóveda cilíndrica, Dieste encuentra una superficie de doble curvatura que es capaz de salvar luces considerablemente mayores, evitando de este modo el refuerzo a través de la incorporación de nervaduras de mayor sección que aumentan considerablemente la cantidad de material utilizado y generan una discontinuidad brusca de la sección transversal, afectando al comportamiento elástico de la cubierta y complicando constructivamente su puesta en obra.

Este tipo de bóvedas admite, por otra parte, 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, pp.228-231).

Dieste ha desarrollado complejos procedimientos manuales basados en la teoría de la elasticidad para analizar sus estructuras y no ha prácticamente recurrido al ensayo de modelos para verificar sus teorías.

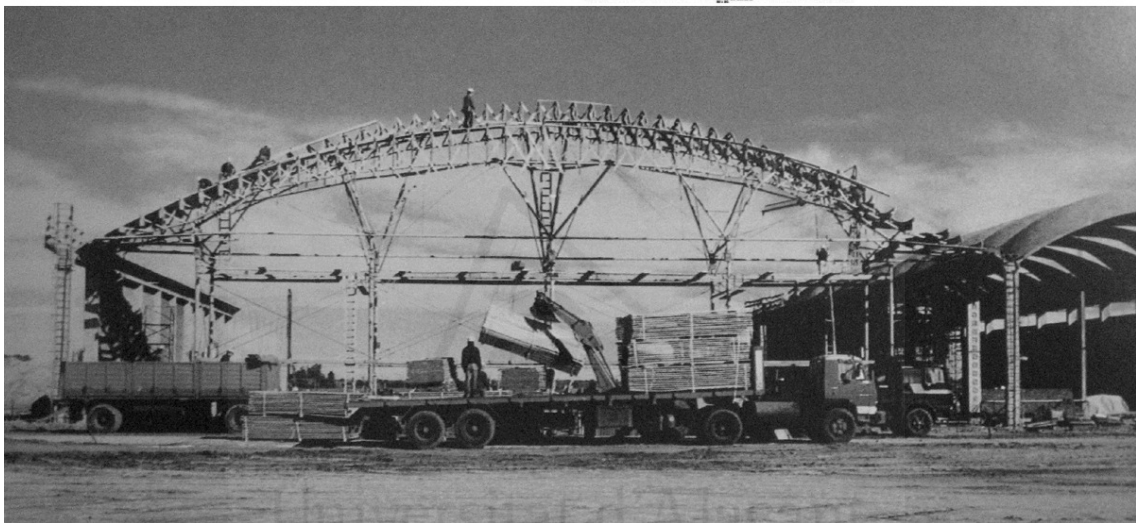
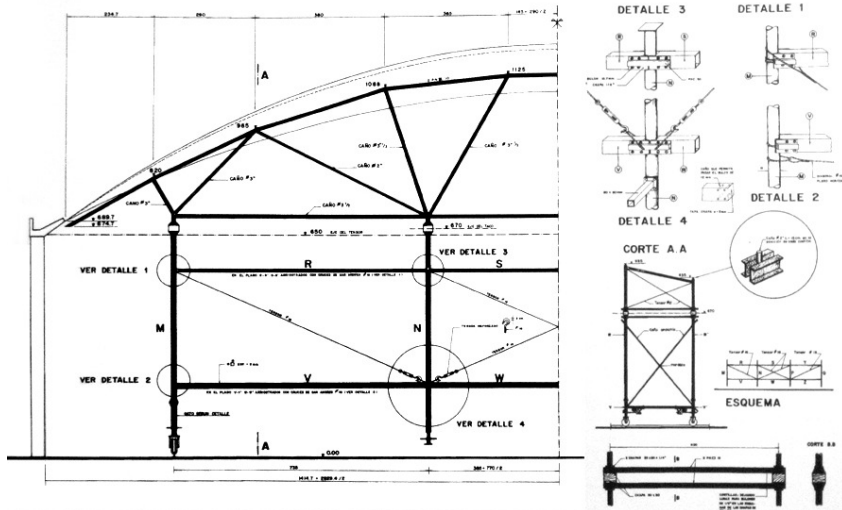


Imagen 123: Encofrados deslizantes para bóvedas de cerámica armada diseñados por Dieste. Ilustraciones extraídas de "Eladio Dieste. 1943-1996" (Jiménez et al., 2001, pp.79 y 49).

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 es posible, según Dieste, 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 al., 2001, p.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 ya que la rigidez de la cubierta, recién desencofrada, es muy alta. Con un único molde deslizante es posible 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 cuenta con una base de barras de acero capaz de adaptarse a distintas luces que se completa en obra con un molde de madera; dispone, 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, pp.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**.^{1, 2, 3 y 4}

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 o Alberti.

¹ *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, p.231).

² *(...) 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 al., 2001, p.219).

³ *Para dar una referencia relativamente estable, la iglesia [Iglesia de San Pedro en Durazno, Uruguay] costó algo menos de cuatro dólares el metro cúbico cubierto y unos treinta dólares de 1968 por metro cuadrado de planta.* (Jiménez et al., 2001, p.186).

⁴ *El costo de la iglesia [Iglesia de Atlántida, Uruguay] fue del orden de los treinta dólares, de 1959, por metro cuadrado.* (Jiménez et al., 2001, p.167).

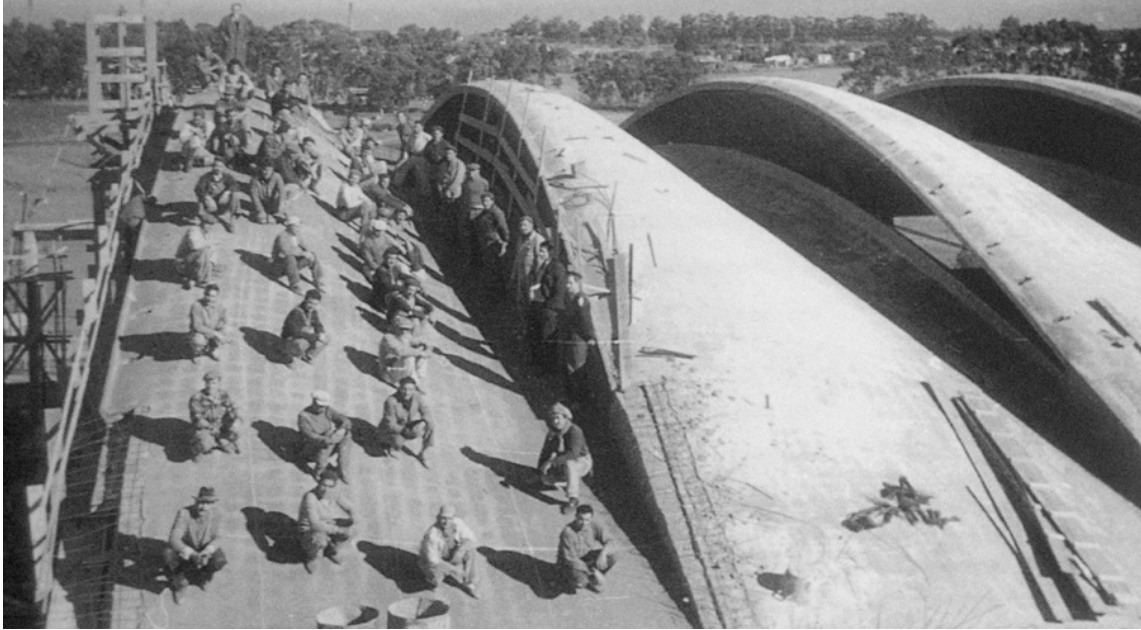


Imagen 124: Prueba de carga en una bóveda gausa de 42 metros de luz, a 16 horas de haber sido construida y con el encofrado deslizante a pocos centímetros por debajo. Ilustración extraída de "Eladio Dieste. 1943-1996" (Jiménez et al., 2001, p.48).

En el proceso de desarrollo formal de las superficies rígidas resistentes, iniciado a finales del siglo XIX por Shukhov con el diseño y construcción de sus cubiertas hiperbólicas para "Exposición Industrial y Artística de toda Rusia" de 1896, las bóvedas gausas de cerámica armada de Dieste podrían considerarse, hasta el día de hoy, como el máximo nivel alcanzado de **optimización formal**.



Imagen 125: Iglesia de Atlántida de Eladio Dieste (1960), Uruguay. Fotografía del autor.

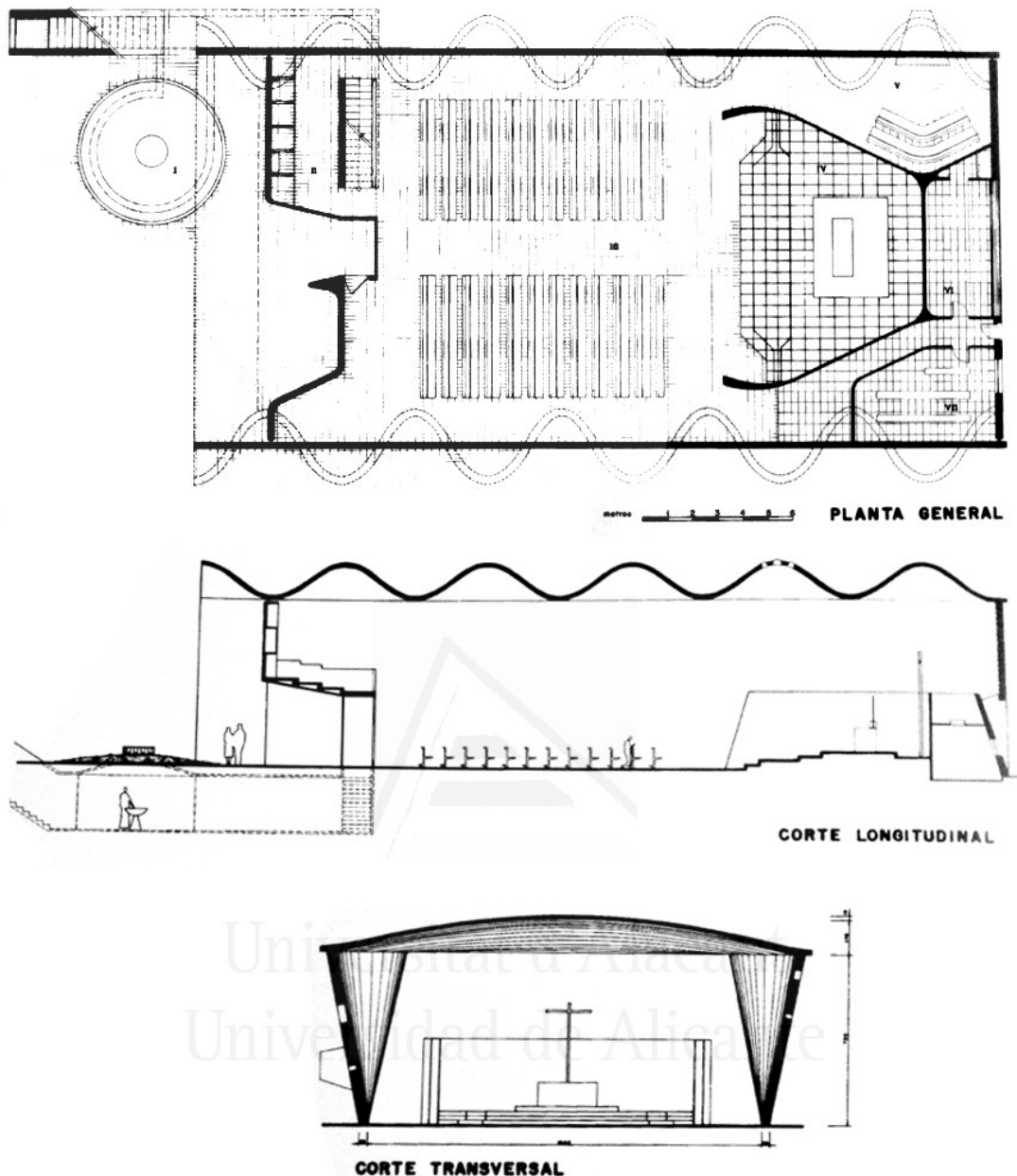


Imagen 126: Planta y secciones de la Iglesia de Atlántida, Uruguay, de Eladio Dieste (1960).
Ilustraciones extraídas de "*Eladio Dieste. 1943-1996*" (Jiménez et al., 2001, p.152).

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 al., 2001, pp.164-165).



Imagen 127: Vistas interiores de la Iglesia de Atlántida, de Eladio Dieste. Fotografías del autor.

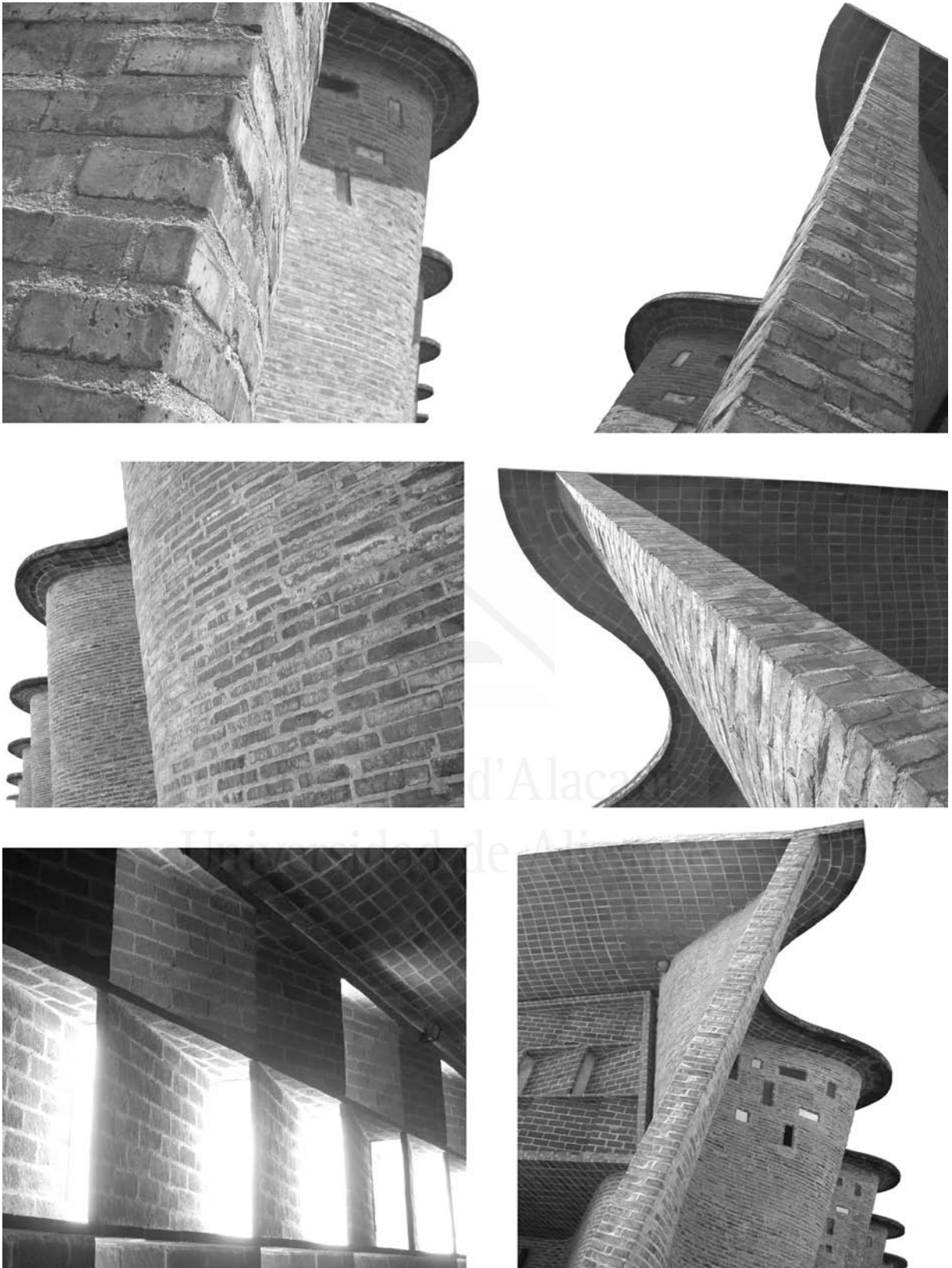


Imagen 128: Vistas parciales de la Iglesia de Atlántida, de Eladio Dieste.
Fotografías del autor.

El cálculo manual de una superficie de tal complejidad es prácticamente inabordable,¹ 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 primer zona es tan grande, que sin necesidad de afinar demasiado el cálculo, resulta para Dieste evidente que las máximas tensiones se encuentran 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 al., 2001, pp.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 aperticada 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 al., 2001, p.164).

La iglesia de Atlántida es uno de los proyectos más reconocidos de Eladio Dieste y un claro exponente de las principales características presentes en toda 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.

¹ Esta obra es un buen ejemplo de como se puede llegar a dimensionar una estructura con seguridad y economía con métodos no rigurosamente matemáticos. Su cálculo es inabordable analíticamente; ya la expresión matemática de la ecuación de la superficie es complejísima. (Jiménez et al., 2001, p.165)

4.3.3 Las estructuras de membrana a mediados del siglo XX

4.3.3.1 El desarrollo del Método de los Elementos Finitos

Las limitaciones de la mente humana son tales que no puede captar el comportamiento del complejo mundo que la rodea en una sola operación global. Por ello, una forma natural de proceder de ingenieros, científicos, e incluso economistas, consiste en separar los sistemas en sus componentes individuales, o elementos, cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad y a continuación reconstruir el sistema original para estudiarlo a partir de dichos componentes. (Zienkiewicz et al., 2004, p.1).

En matemáticas se denomina como problemas **discretos** a aquellos que pueden modelizarse utilizando un número finito de componentes y como problemas **continuos** a aquellos en los que, por el contrario, la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema sólo puede definirse haciendo uso del concepto matemático de infinitésimo (Zienkiewicz et al., 2000, pp.1-3).

Los problemas continuos en general conducen, tal como sucede con aquellos problemas planteados por la teoría de la elasticidad, a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados.

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, implicó 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 Método de los Elementos Finitos 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 método de los elementos finitos, 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).

El método de los elementos finitos se concibe hoy en día como un método de análisis basado en cálculo matricial, mediante el cual se pueden determinar las deformaciones y tensiones en gran número de puntos de un determinado elemento estructural.

La base conceptual 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.

La forma de los elementos, que puede ser cuadrada, rectangular, triangular, etc. y los puntos de enlace, definen el procedimiento específico (Zienkiewicz et al., 2000, pp.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 al., 2000, pp.5-10).

Este método resulta entonces 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.

Una serie de aproximaciones han sido introducidas en los modelos de sólidos divididos en elementos finitos.

En primer lugar, no siempre es fácil asegurar que las funciones de desplazamientos escogidas satisfagan las condiciones de continuidad de los desplazamientos relativos con los elementos adyacentes. Por consiguiente, esta condición de compatibilidad, puede no cumplirse en el contorno de los elementos.

En segundo lugar, al concentrarse fuerzas equivalentes a las originales en los nodos de los elementos, las condiciones de equilibrio sólo se cumplirán para el conjunto del continuo, pero normalmente ocurrirá que tales condiciones no se cumplirán en zonas localizadas, tanto en el contorno como dentro de cada elemento. Será entonces tarea del diseñador escoger la forma de los elementos y las funciones de desplazamiento que mejor se adecuen a cada caso particular, dependiendo el grado de aproximación que se alcance del uso que se haga de estas dos facultades (Zienkiewicz et al., 2000, pp.18-19).

La solución de problemas de elasticidad plana mediante el Método de los Elementos Finitos puede ser, de incrementarse lo suficiente el número de subdivisiones, una

solución exacta. Lo importante es que el diseñador de estructuras conozca el grado de precisión alcanzable, en los problemas más corrientes, para una subdivisión dada. En cada caso particular se podrá estimar el error por comparación con soluciones exactas conocidas o mediante el estudio de la convergencia, utilizando dos o más tamaños de subdivisiones.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.3.3.2 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 y cubiertos con lonas generalmente construidas con tela de algodón (Burkhardt, 2000A, p.964) o pieles de animales (Gardner, 1985, p.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 alta durabilidad aptos para la construcción de cubiertas de grandes luces, tales como el PVC y el PTFE (Moritz, 2000, p.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 y constructivos 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 basketball, 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.

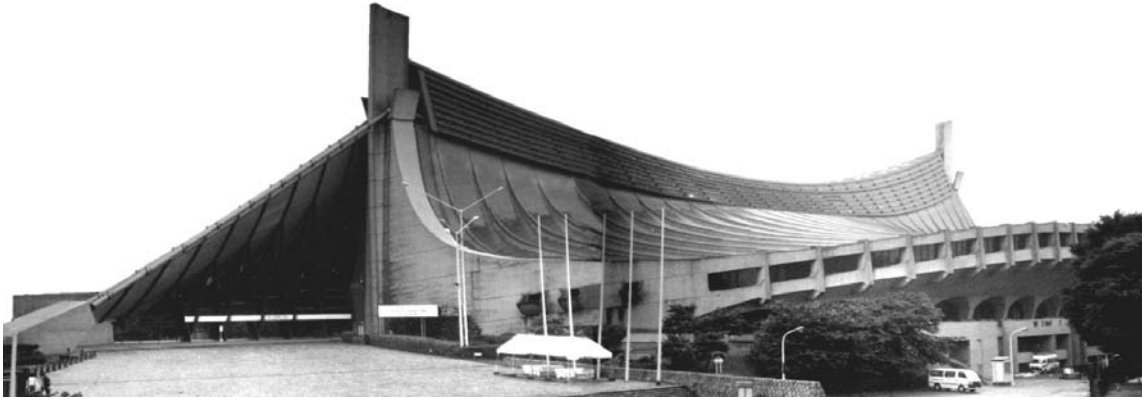


Imagen 129: Estadio Olímpico de Tokyo diseñado por Tange, Tsuboi e Inoue para los Juegos Olímpicos de 1964. Fotografía del autor en dos tomas.

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 al., 2006, p.13).

En los años 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, pp.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.

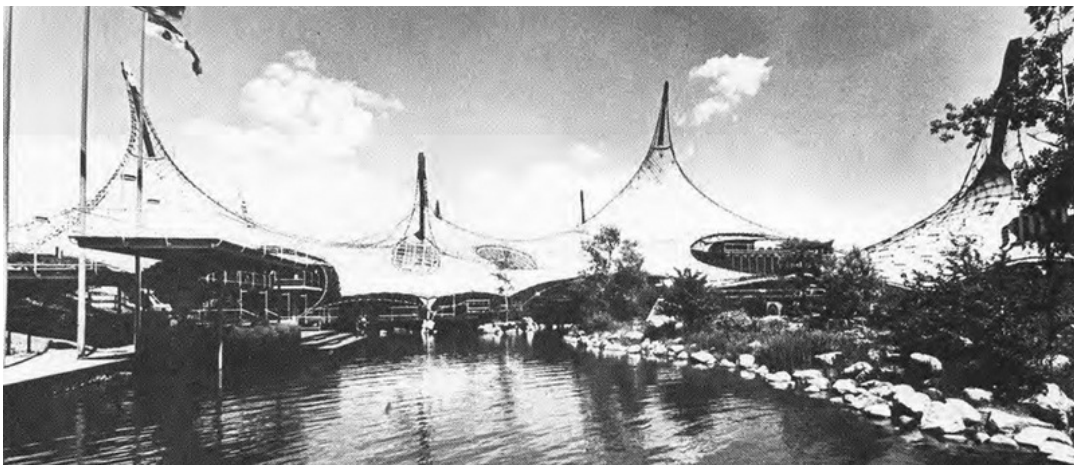


Imagen 130: Pabellón de Alemania en la Exposición de Montreal 1967, diseñado por Gutbrod, Otto y Leonhardt. Ilustración extraída de "A brief history of cable and membrane roofs" (Forster, 1980, p.10).

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 gran 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, p.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 similares en varias partes del mundo, 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 7 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 aborda por primera vez, en el pabellón alemán de la Exposición de Montreal, el diseño de una estructura traccionada con una geometría compleja y define un proceso de diseño que será el antecedente directo del utilizado para el proyecto de las cubiertas sobre los edificios olímpicos de 1972 en Munich.

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, p.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 ésta 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 obtienen con este procedimiento son 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 optimizar y comprender mejor un sistema estructural, puede considerarse en la línea de las investigaciones morfológico-estructurales llevadas a cabo por Robert Le Ricolais y por 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.



Imagen 131: Torre de enfriamiento en Schemehausen, diseñada por Leonhardt y Andra, 1975. Ilustración extraída de "*A brief history of cable and membrane roofs*" (Forster, 1980, p.10).

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, p.2), ya que 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, p.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, p.968).

4.3.3.3 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, p.53-54).

Forma y función se encuentran intrincadamente relacionados 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, p.14). La información genética depende, según esta teoría, de la física de procesos denominados "form finding" para poder generar la forma de un individuo.

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 al., 2004B, p.20). Reproducían mecanismos naturales de autoorganización intentando descubrir formas eficaces para una determinada función.

El arquitecto Antoni Gaudí fue el primero en diseñar sus construcciones basado en este tipo de experimentos, desarrollando procedimientos que le permitían encontrar formas óptimas para resistir las fuerzas gravitatorias.

En 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.

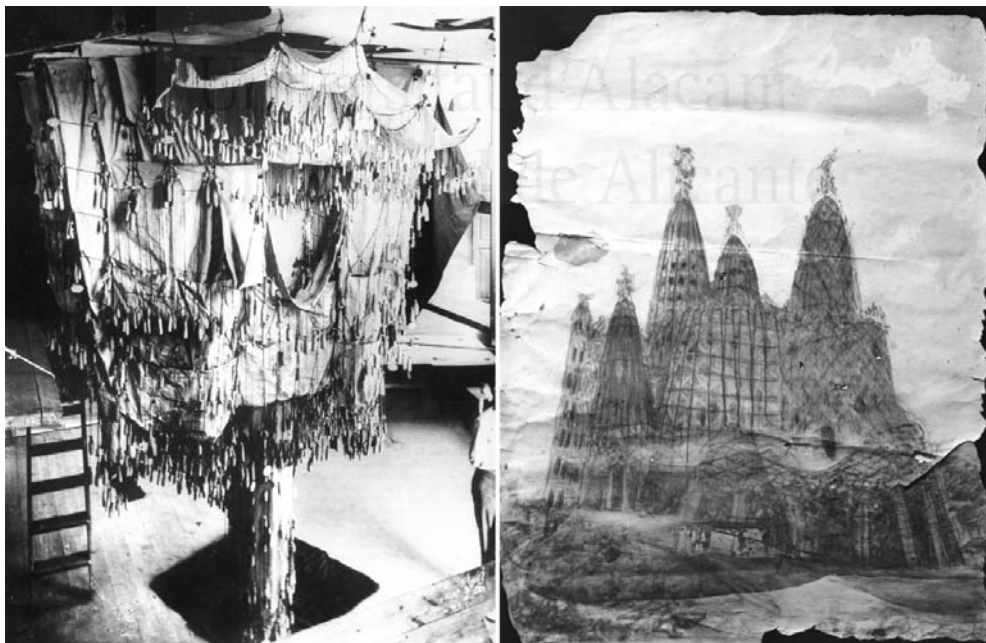


Imagen 132: Iglesia de la Colonia Güell en Barcelona, Antoni Gaudí. Maqueta de estudio formal de los arcos catenarios espaciales y croquis de la obra sobre una fotografía invertida del modelo. Ilustraciones extraídas de "Gaudí. La búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción" (Giralt-Miracle, 2002, p.69)

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 al., 2006, pp.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 que 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 al., 2006, p.45).

Hoy 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 al., 2006, p.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, p.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.

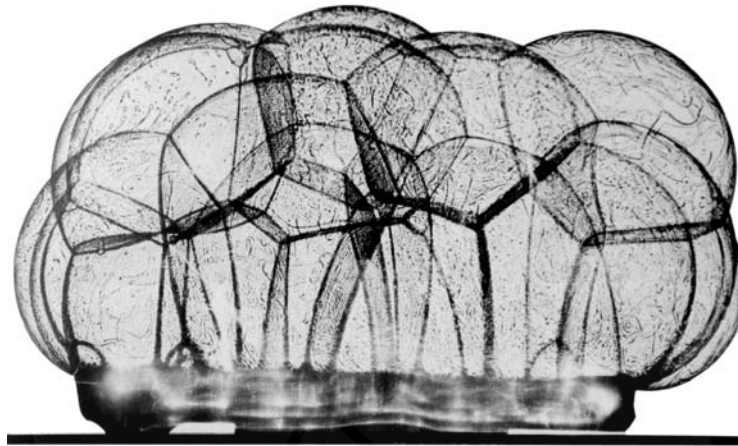


Imagen 133: Experimentos con burbujas de jabón en el IL de Stuttgart, Frei Otto. Ilustración extraída de "*Finding Form*" (Otto et al., 2006, p.118).

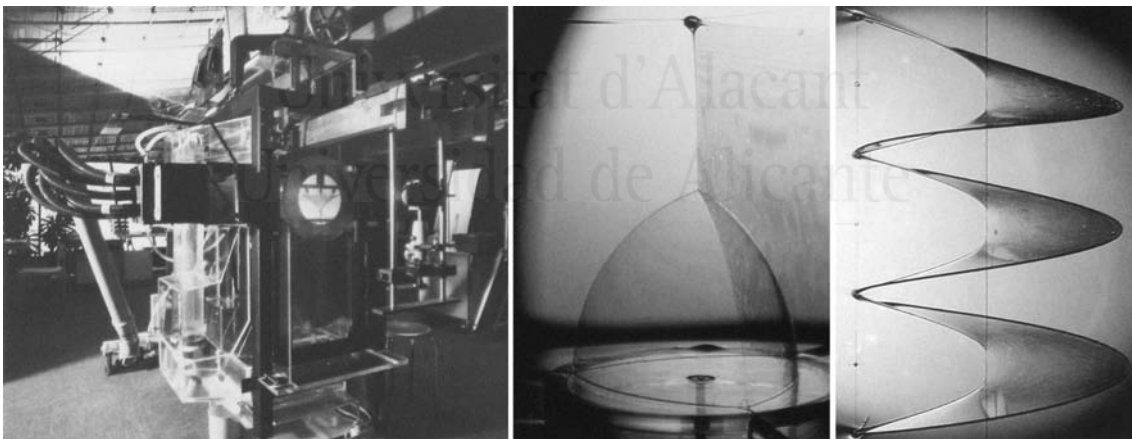


Imagen 134: Máquina para producir y fotografiar películas de jabón en el IL de Stuttgart y algunos modelos realizados bajo la dirección de Frei Otto. Ilustraciones extraídas de "*Finding Form*" (Otto et al., 2006, pp.58 y 59).

4.3.4 Desarrollo reciente de las estructuras superficiales

4.3.4.1 Cubiertas sobre los edificios para las Olimpiadas de 1972 en Munich

El objetivo principal del proyecto ganador del concurso para los edificios olímpicos de Munich en 1972, presentado por los arquitectos Behnisch & Partners, no era el de crear una serie de edificios aislados sino 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 encontraba 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, p.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, con una imagen orgánica de gran espectacularidad.

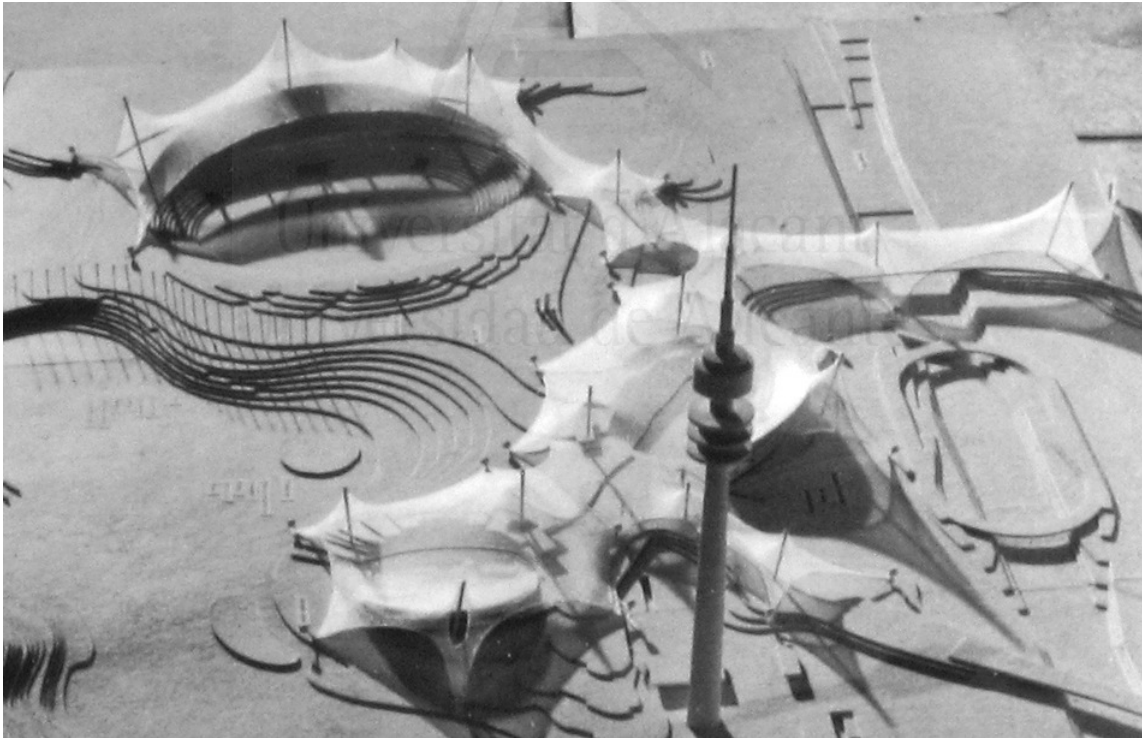


Imagen 135: Propuesta para los edificios de los Juegos Olímpicos de Munich en 1972 presentada a concurso por Behnisch & Partners. Ilustración extraída de "*Frei Otto and the Munich Olympic Games (from the measuring experimental models to the computer determination of the pattern)*" (Eeckhout, 1972, p.14).

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 resguardarían del clima una superficie de 74.800 m² (Eeckhout, 1972, p.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, pp.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 muy similar al que Otto ya había desarrollado para el diseño de la cubierta del pabellón alemán en la Exposición Internacional de 1967 en Montreal, que tenía cinco fases principales (Eeckhout, 1972, p.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 aleja en parte a estos modelos de la forma de una cubierta real sobre la que pueden 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, p.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 que pudiera ser sometido a ensayos de carga (Eeckhout, 1972, pp.27-28).

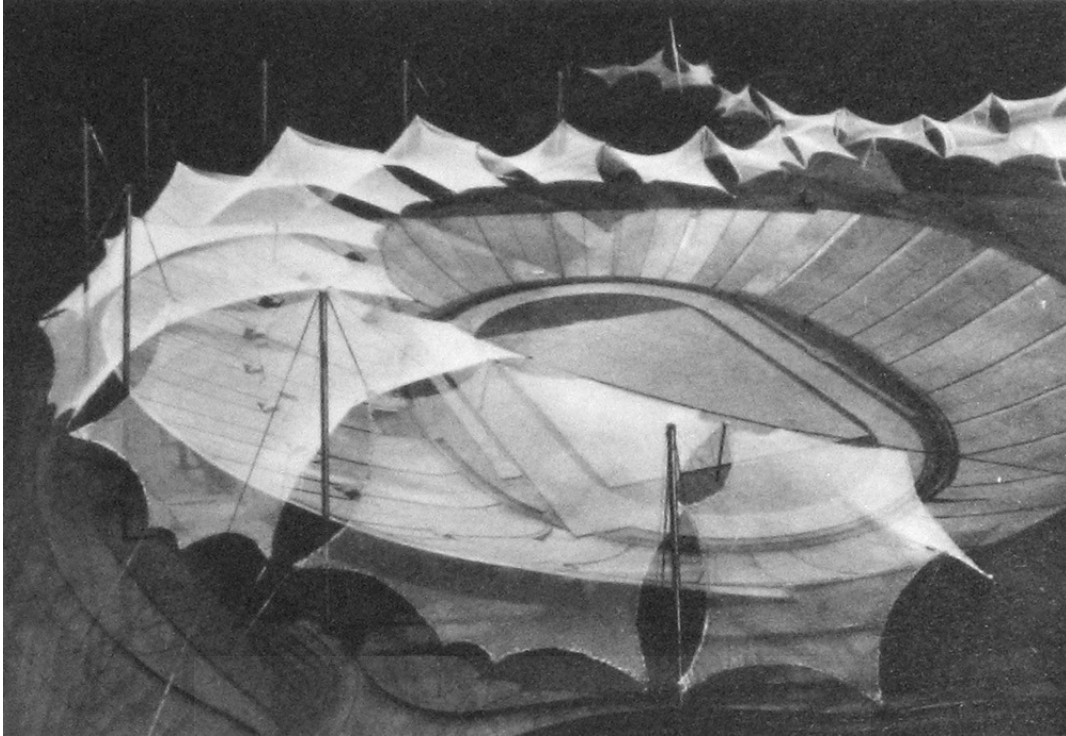


Imagen 136: Cubiertas para los edificios de las Olimpiadas de 1972 en Munich, modelo final en tela polyester. Ilustración extraída de "*Frei Otto and the Munich Olympic Games (from the measuring experimental models to the computer determination of the pattern)*" (Eeckhout, 1972, p.30).

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 al., 2004B, p.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 hubiera sido introducida en la cubierta, con una distribución óptima en toda la superficie. Este trabajo implicó un enorme insumo de tiempo (Eeckhout, 1972, pp.30-32).

La geometría del modelo de la malla de cables a escala 1:125, construido a partir de las dimensiones extraídas del modelo con tela poliéster, debía ser lo más exacta posible ya que de él se pretendía extraer la información geométrica final y cualquier error sería luego transmitido a la obra ampliado 125 veces.

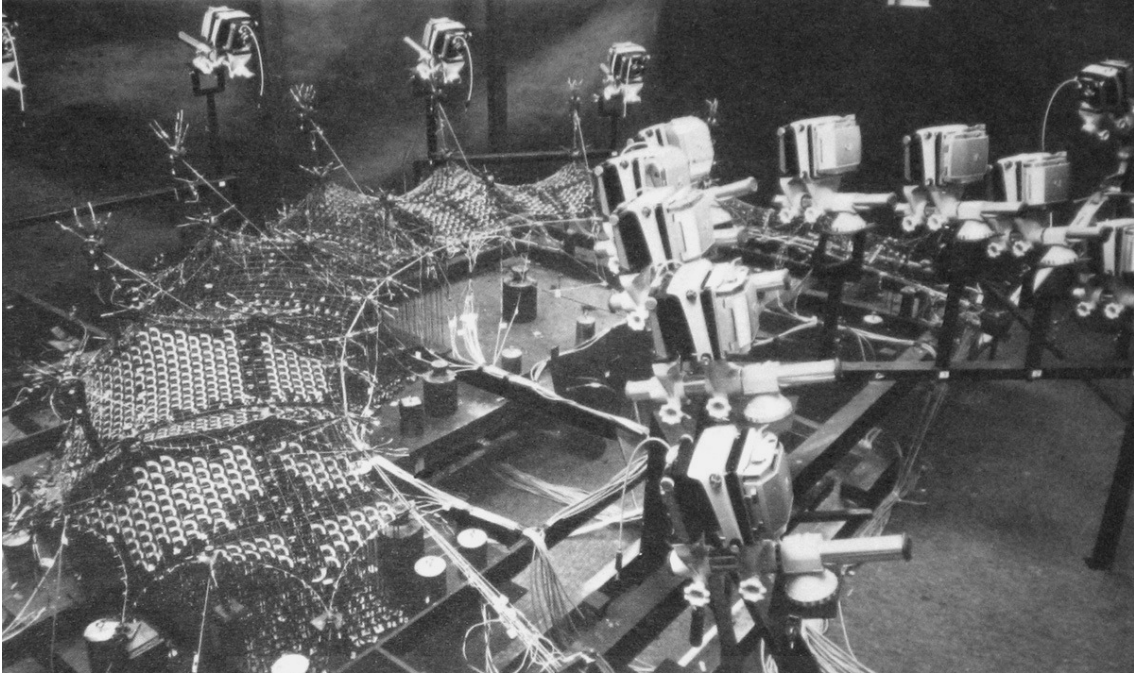


Imagen 137: Modelo final de cables para la cubierta del estadio olímpico con carga asimétrica, Frei Otto y Behnisch & Partners. Ilustración extraída de "*Finding Form*" (Otto et al., 2006, p.107).

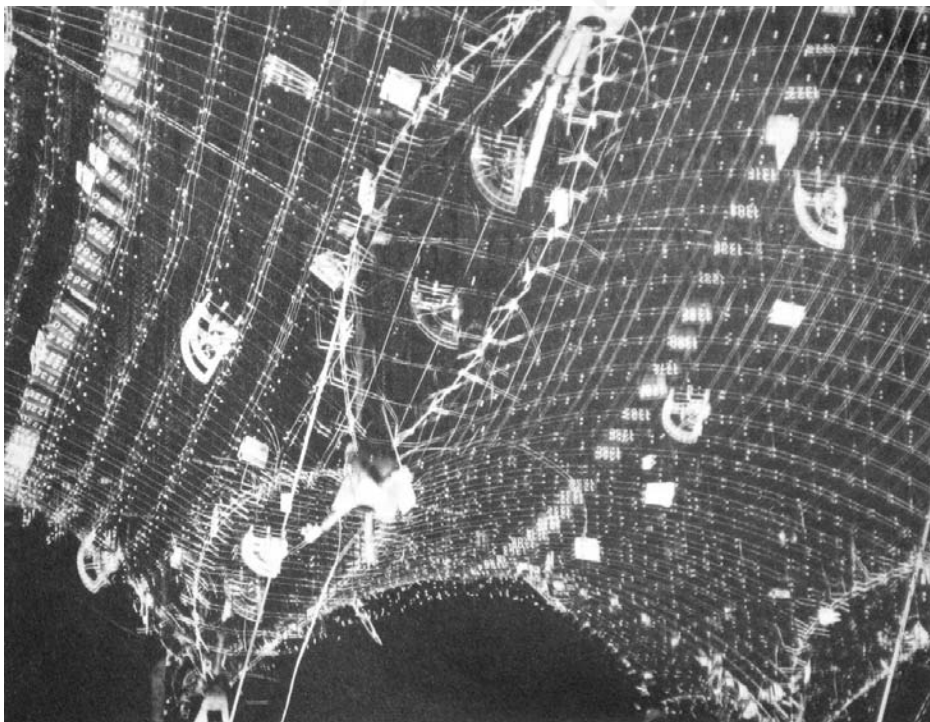


Imagen 138: Fotografía de doble exposición del modelo de cables de la cubierta del gimnasio, tomada en 1969. Se registra la geometría descargada y con una carga de 125 kg/m². Ilustración extraída de "*Frei Otto and the Munich Olympic Games (from the measuring experimental models to the computer determination of the pattern)*" (Eeckhout, 1972, p.35).

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, p.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, pp.38-39).

Pero a mediados de 1969, el IFG de Stuttgart llegó a la conclusión de que este ajuste matemático de la geometría de la cubierta no 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, p.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 nudo 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, pp.39-43).

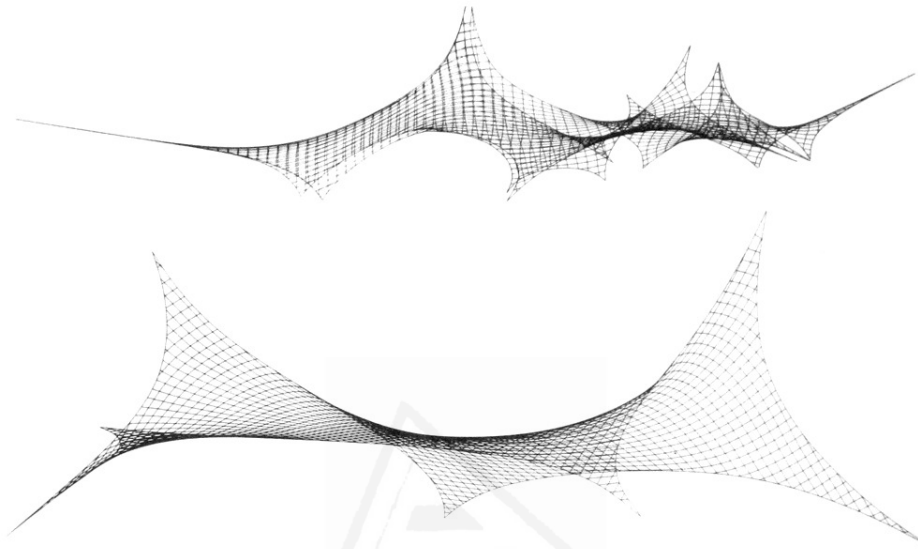


Imagen 139: Perspectiva y vista lateral de un tramo de malla de las cubiertas de los edificios de Munich, dibujadas por los programas informáticos utilizados en el diseño y cálculo final. Ilustración extraída de "*Frei Otto and the Munich Olympic Games (from the measuring experimental models to the computer determination of the pattern)*" (Eeckhout, 1972, p.46).

El diseño de las cubiertas del recinto olímpico de Munich 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 éstas 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.



Imagen 140: Cubiertas para los edificios de las Olimpíadas de 1972 en Munich.
Fotografías del autor.

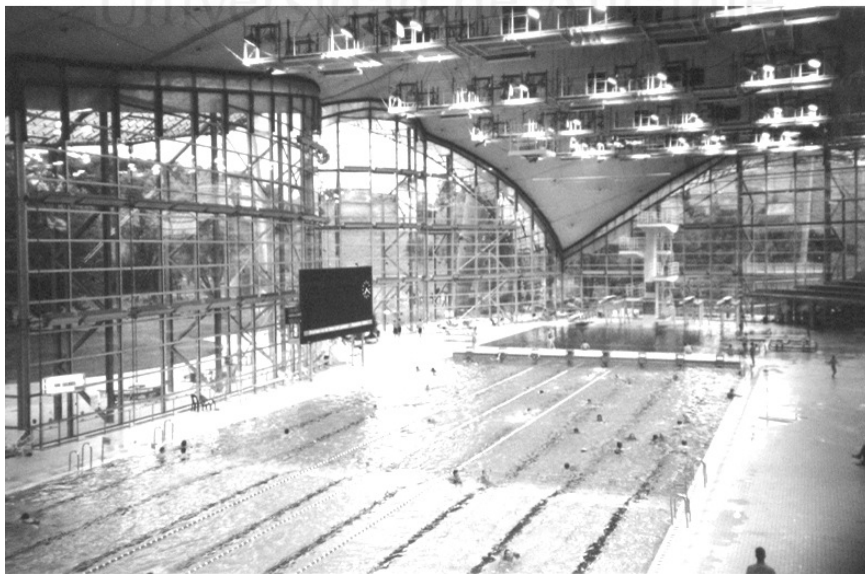
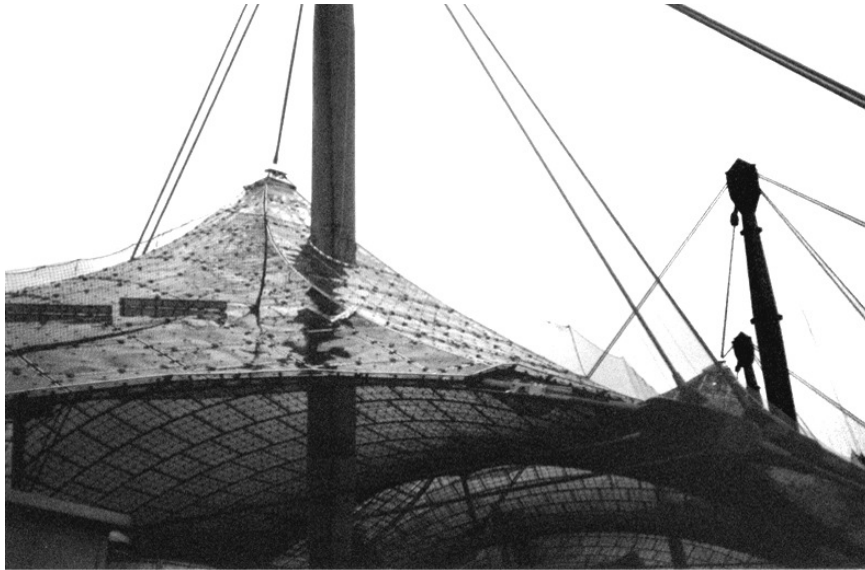


Imagen 141: Cubiertas para los edificios de las Olimpíadas de 1972 en Munich.
Fotografías del autor.

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, pp.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.



Imagen 142: Edificios para las Olimpiadas de Munich de 1972, vista de la malla de la cubierta del estadio inmediatamente luego de tendida. Ilustración extraída de "*Frei Otto and the Munich Olympic Games (from the measuring experimental models to the computer determination of the pattern)*" (Eeckhout, 1972, p.50).



Imagen 143: Vista aérea de la cubierta de los edificios para las Olimpiadas de Munich desde 800 metros de altura. Imagen obtenida en enero de 2012 con el programa Google Earth.

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 resultó indispensable para el desarrollo de un proceso de diseño con estas características.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.3.4.2 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. El proyecto original consistía en dos naves de usos múltiples cubiertas por carpas, soportadas por globos inflados con helio.

Para el desarrollo del proyecto de ejecución del Multihalle 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 et al., 2006, p.138), cuya forma había sido determinada a través de la inversión de modelos traccionados estudiados a través de ensayos de autoorganización o "form finding".



Imagen 144: Multihalle en Mannheim, Alemania, Mutschler & Partners y Frei Otto, 1973. Ilustración extraída de "Finding Form" (Otto et al., 2000, p.140).

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.

Frei Otto fue quien propuso la construcción de una única cáscara comprimida con una forma curva, libre y continua, como alternativa a los dos pabellones sostenidos por globos (Happold et al., 1976, p.432).

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 Guell.

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.

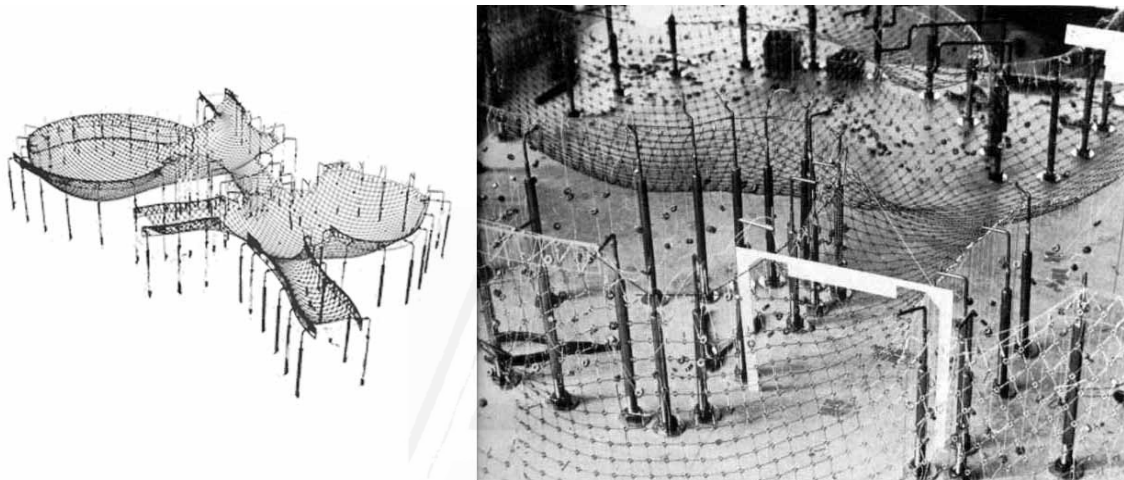


Imagen 145: Modelo de cables para determinar la forma del Multihalle en Mannheim, Frei Otto y Klaus Linkwitz. Ilustraciones extraídas de *"Model-based formfinding processes: free forms in structural and architectural design"* (Wendland, 2000, p.7).

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 extrapolaron su geometría a las dimensiones reales de la obra (Hensel et al., 2004B, p.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 al., 1976, p.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 al., 1976, p.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 et al., 2006, p.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 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.

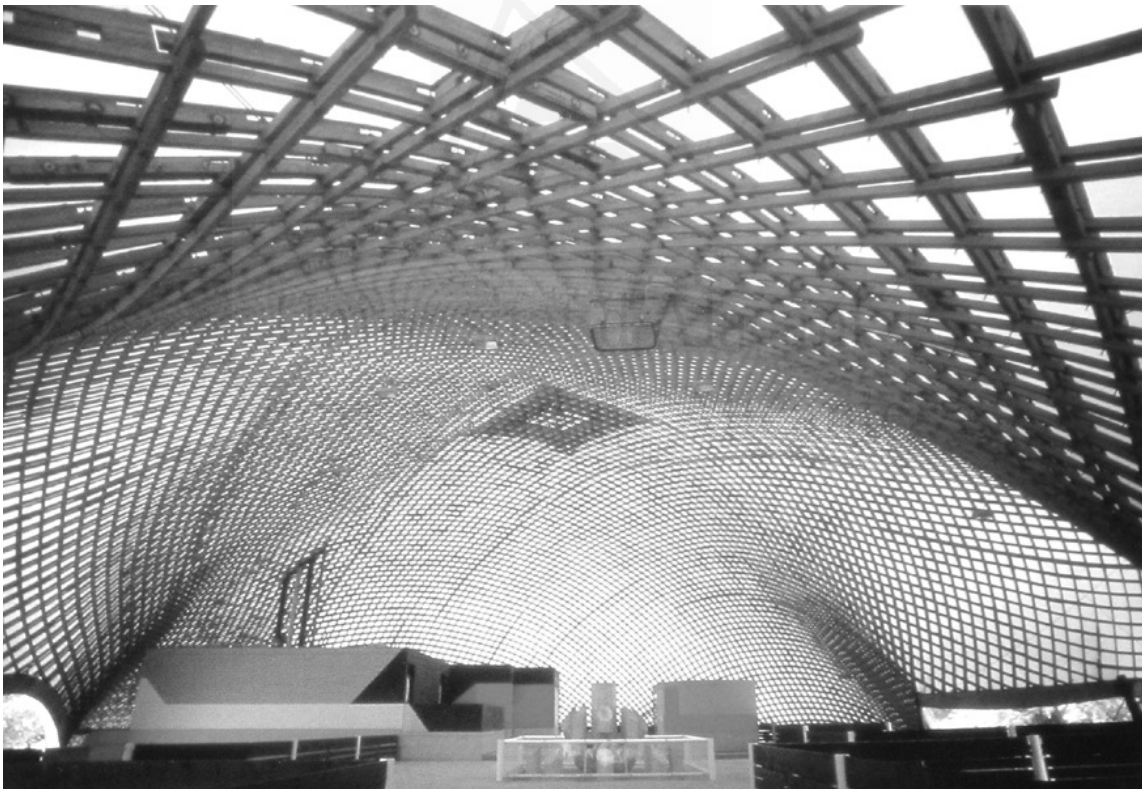


Imagen 146: Vista interior del Multihalle en Mannheim. Ilustración extraída de "*Finding Form*" (Otto et al., 2000, p.142).

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 al., 2004B, p.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 necesario 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, éste debe estar hecho con la misma forma, los mismos vínculos y los mismos 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 éste 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 dificultoso 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.

Universitat d'Alacant

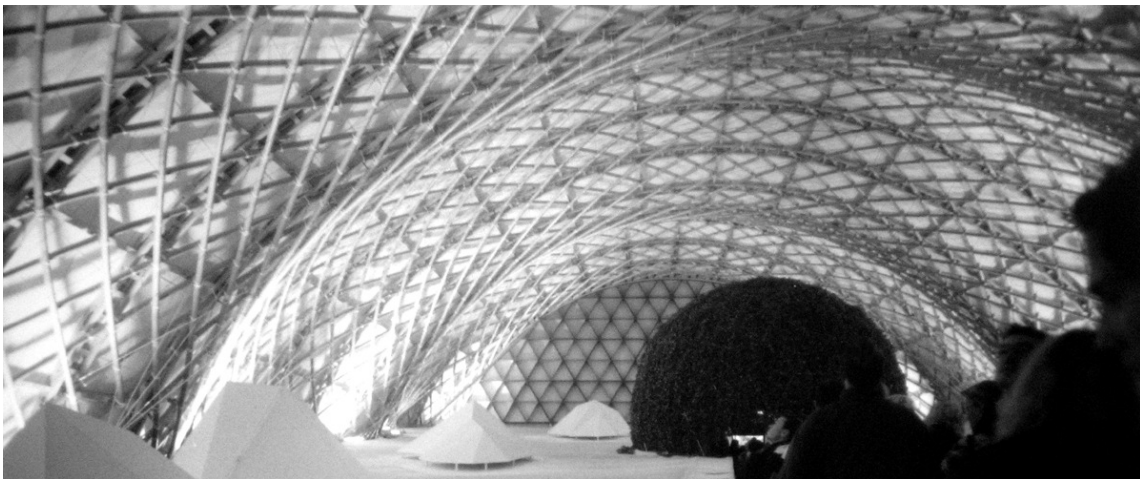


Imagen 147: Vista interior del Pabellón de Japón para la Exposición Internacional de Hannover, 2000, diseñado por Shigeru Ban y Frei Otto. Fotografía del autor.

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.



Imagen 148: Vista aérea de la cubierta del Multihalle de Mannheim desde 200 metros de altura. Imagen obtenida en enero de 2012 con el programa Google Earth.

4.3.4.3 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, p.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 y 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.

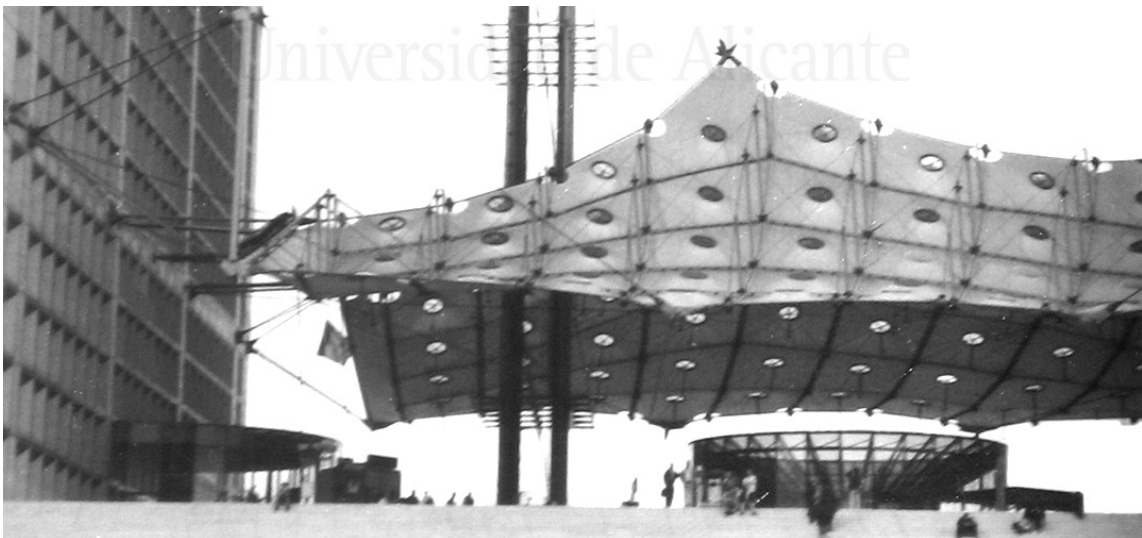


Imagen 149: La nube interior del Arco de la Défense, Otto von Spreckelsen.
Fotografía del autor.

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, p.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.

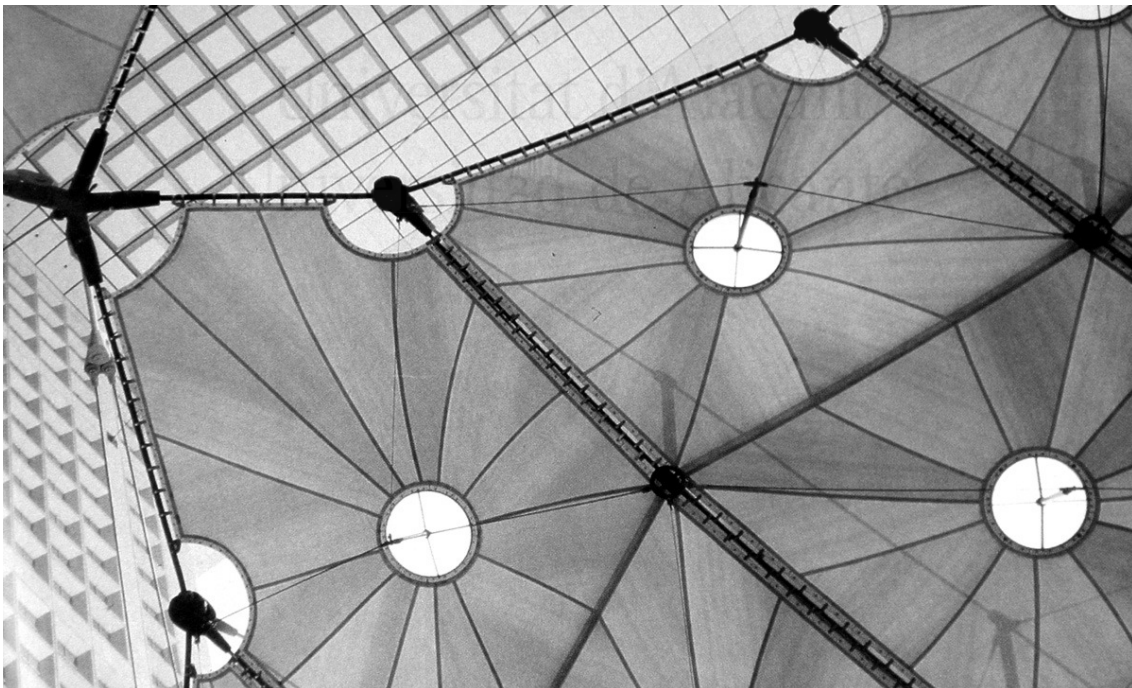


Imagen 150: La nube interior del Arco de la Défense, Otto von Spreckelsen. Ilustración extraída de "*Ossature des nuages*" (Suner, 1989, p.205).

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, p.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.

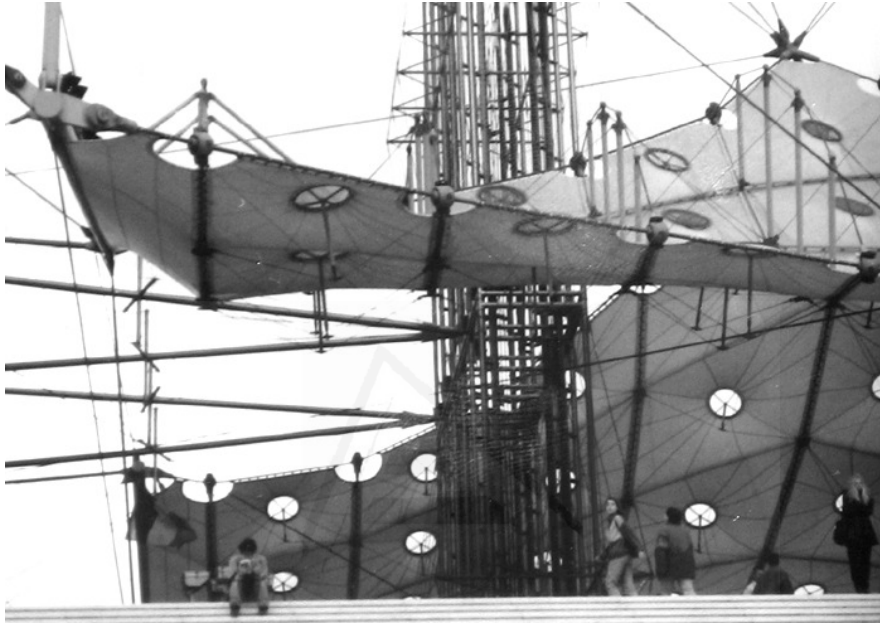


Imagen 151: La nube interior del Arco de la Défense, Otto von Spreckelsen. Fotografía del autor.

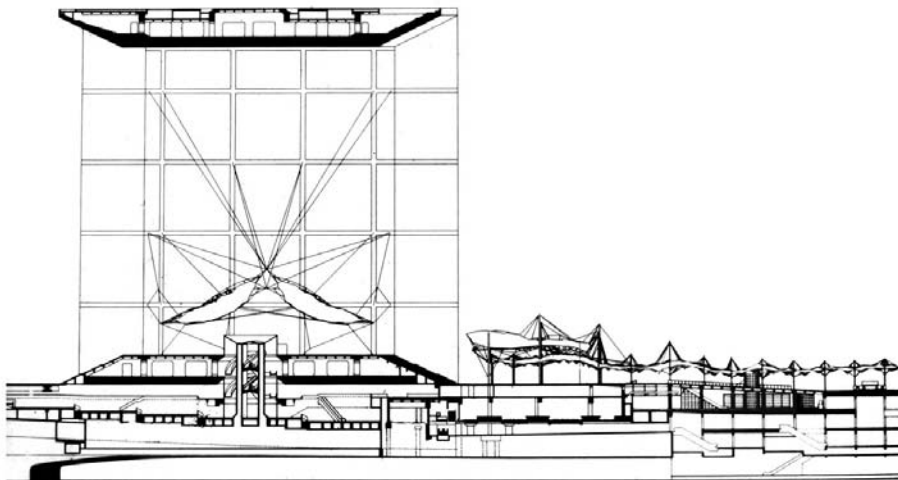


Imagen 152: Sección del Arco y las Nubes en la Défense, Otto von Spreckelsen, Peter Rice y Paul Andreu. Ilustración extraída de "*Ossature des nuages*" (Suner, 1989, p.200).

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, p.120).

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, p.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.

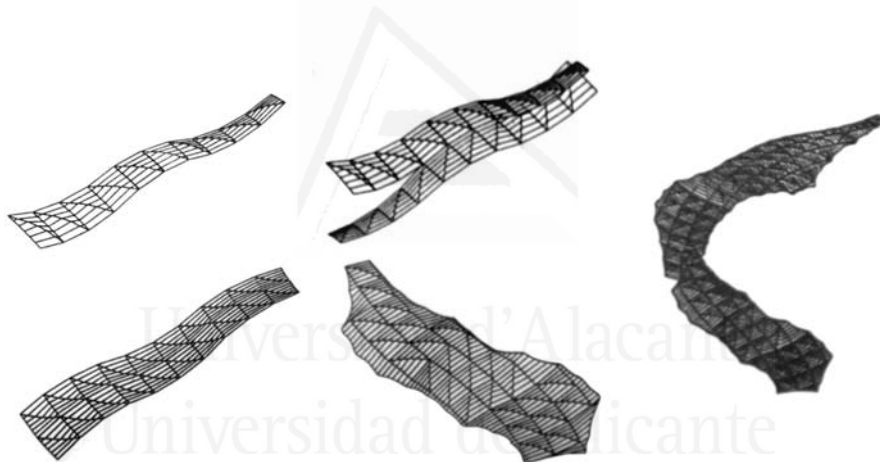


Imagen 153: Las nubes del atrio de la Défense, estudio de la variedad formal que puede obtenerse a partir de un único elemento estándar. Ilustración extraída de "*Mémoires d'un ingénieur*" (Rice, 1988A, p.120).

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.

4.3.4.4 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 como éstas se volvieron más sofisticadas luego de su encuentro con Frei Otto en el año 1998 (Spuybroek, 2004, pp.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, Neeltje 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, p.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, p.22).

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 sólo podían operar con perfiles de tramos rectos o circulares (Spuybroek, 2004, p.22).

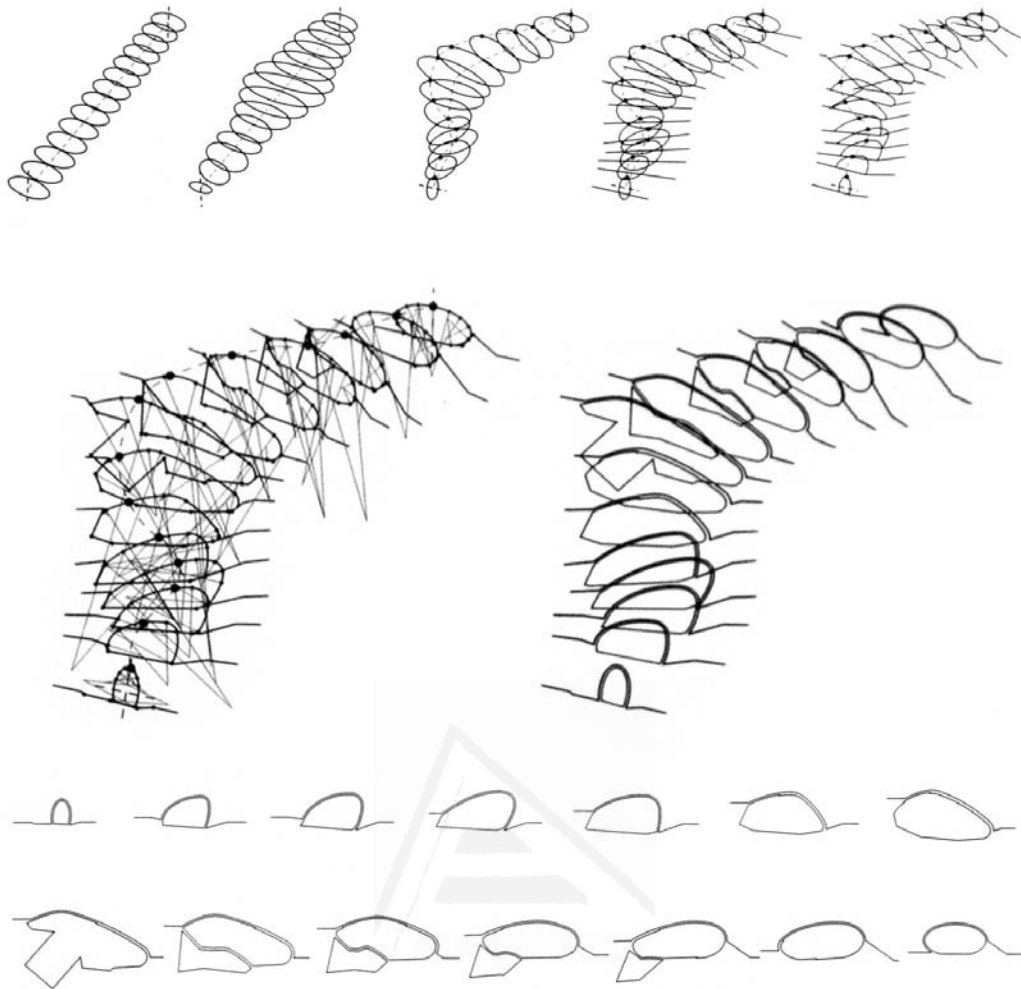


Imagen 154: "Pabellón del Agua" en Neeltje Jans, Holanda, NOX, 1993-1997. Proceso de generación de la forma y principales secciones transversales del edificio. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de "NOX: machining architecture" (Spuybroek, 2004, pp.19, 22 y 23).

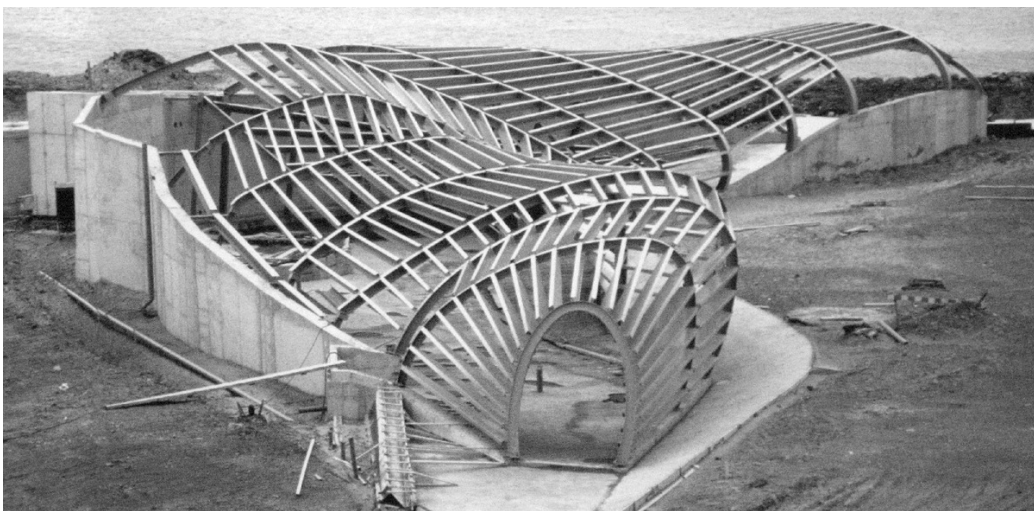


Imagen 155: Estructura del "Pabellón del Agua" en Neeltje Jans, Holanda. Ilustración extraída de "NOX: machining architecture" (Spuybroek, 2004, pp.22-23).

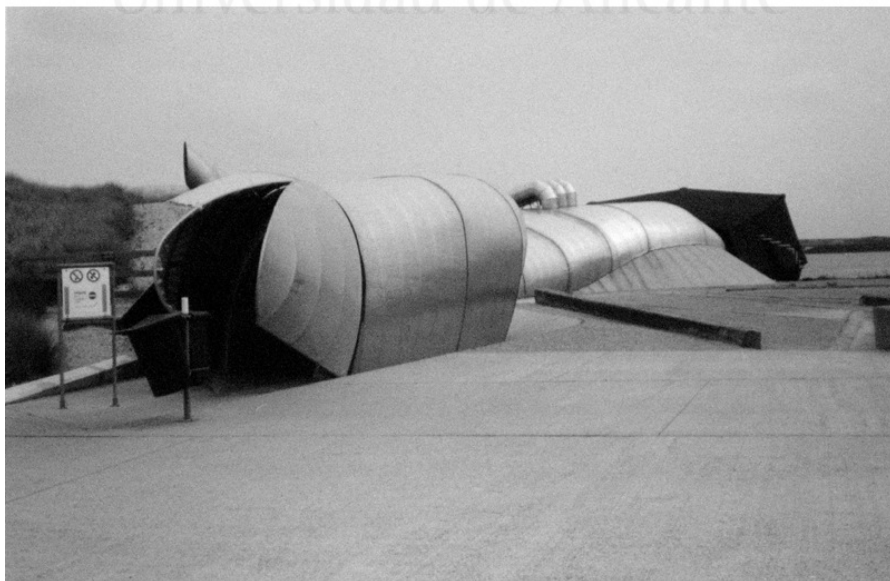


Imagen 156: "Pabellón del Agua" en Neeltje Jans, Holanda. Fotografías del autor.

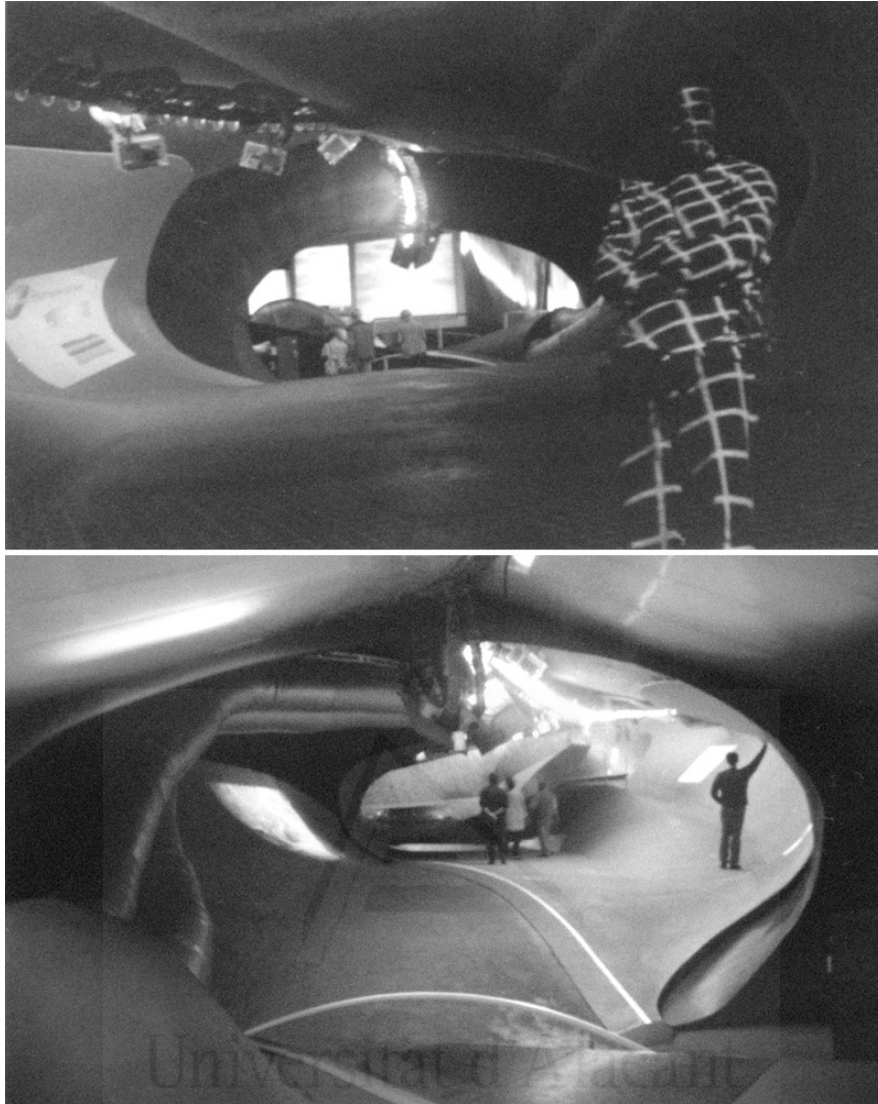


Imagen 157: Vistas interiores del "Pabellón del Agua" en Neeltje Jans, Holanda. Fotografías del autor.

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 Doetinchen, 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, p.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, p.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, p.161). Finalmente 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.

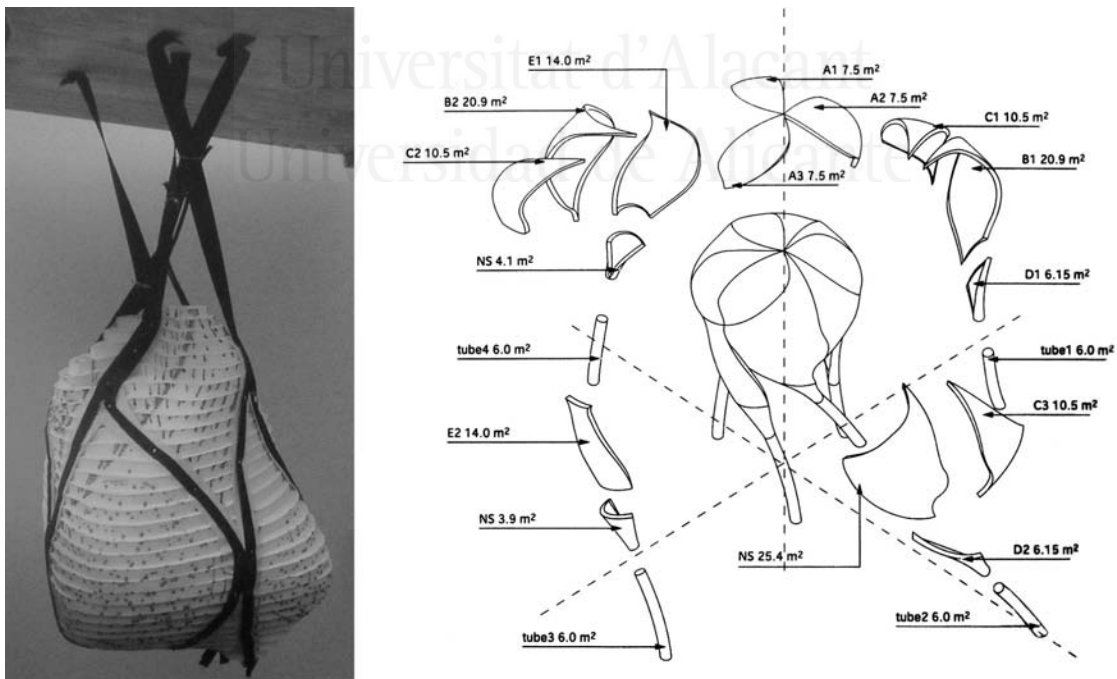


Imagen 158: "D-Tower", Nox, 1998-2004. Modelo "form finding" de estudio y despiece de paneles. Ilustraciones extraídas de "NOX: machining architecture" (Spuybroek, 2004, pp.161 y 162).

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, p.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.

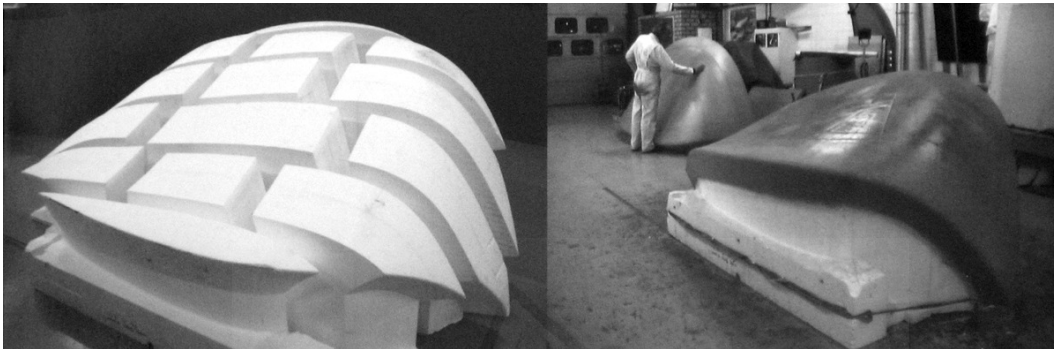


Imagen 159: Volcado de resina sobre los moldes de poliestireno de la "D-Tower". Ilustraciones extraídas de "NOX: machining architecture" (Spuybroek, 2004, p.165).

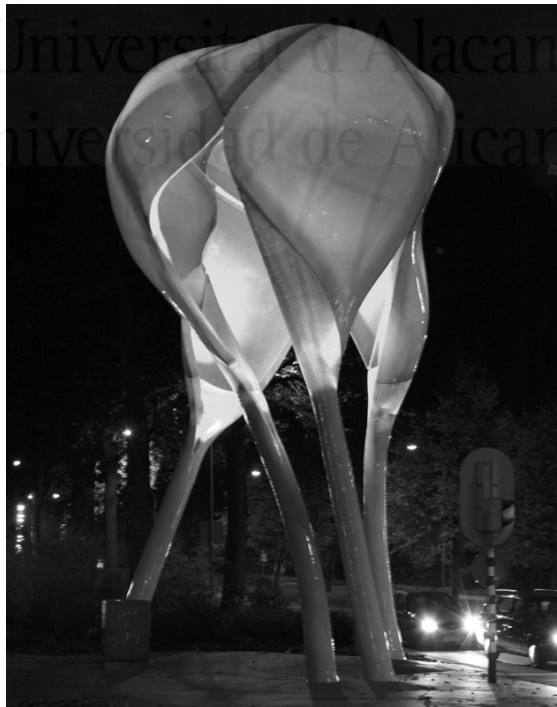


Imagen 160: D-Tower, NOX, 1998-2004. Ilustración extraída de Internet <<http://www.nox-art-architecture.com/>>



Imagen 161: Análisis por ordenador de la "D-Tower" con un programa de elementos finitos. Ilustraciones extraídas de "NOX: machining architecture" (Spuybroek, 2004, p.163).

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, p.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, p.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.

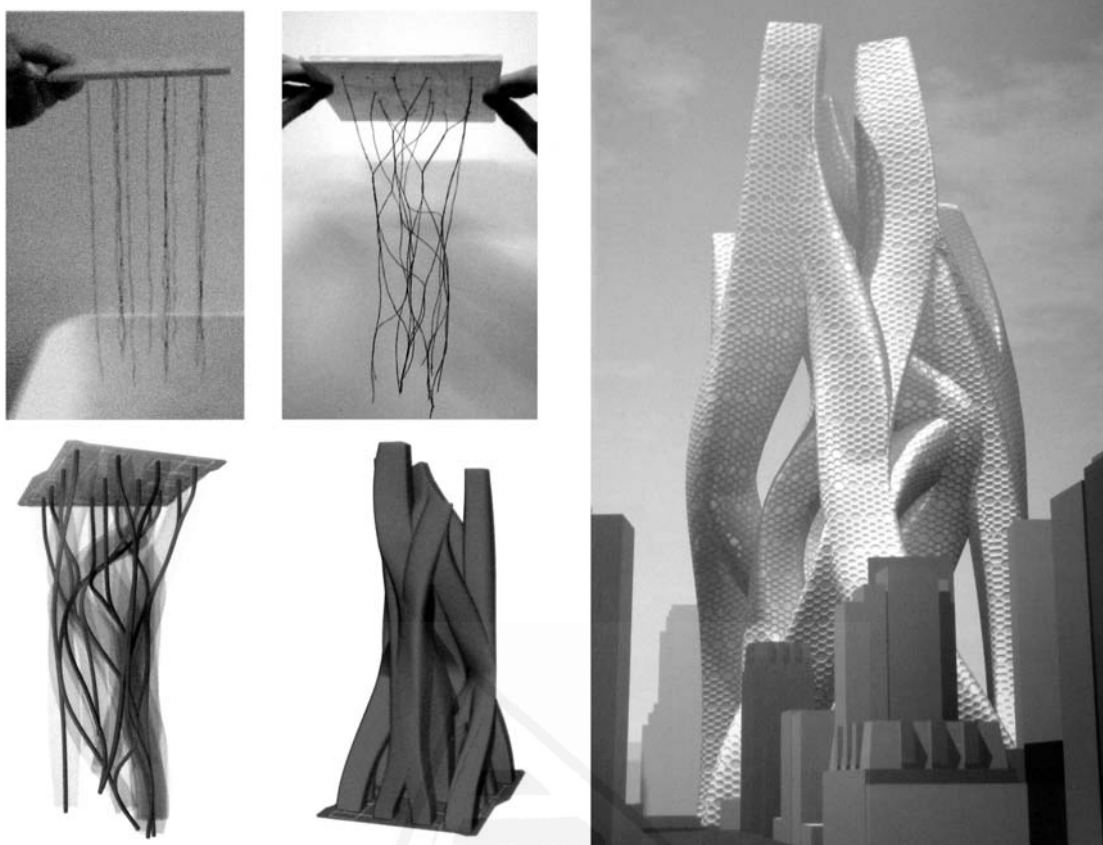


Imagen 162: Proceso de generación de la forma del "obliqueWTC": ensayo de "form finding" con dos etapas, digitalización del esquema resultante, aumento del espesor y renderización. Ilustraciones extraídas de "NOX: machining architecture" (Spuybroek, 2004, pp.260, 261 y 262).

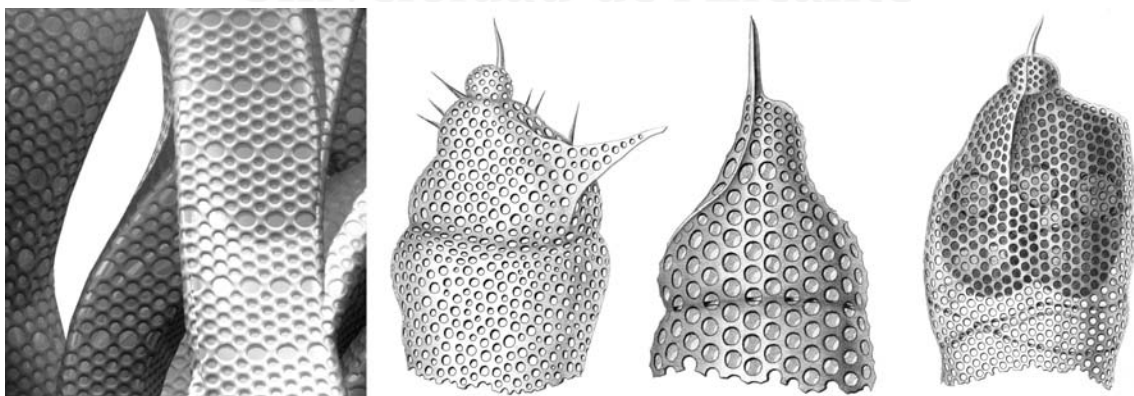


Imagen 163: Renderizado de la piel estructural diseñada para el "obliqueWTC" y esqueletos de radiolarios dibujados por Ernst Haeckel. Ilustraciones extraídas de "NOX: machining architecture" (Spuybroek, 2004, p.263) y de "Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)" (Haeckel, 1862, láminas 7 y 8).

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, p.96).

Cada tubo tenía una longitud 8% superior a la distancia recta entre los nudos de anclaje en sus extremos.

La primer 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.

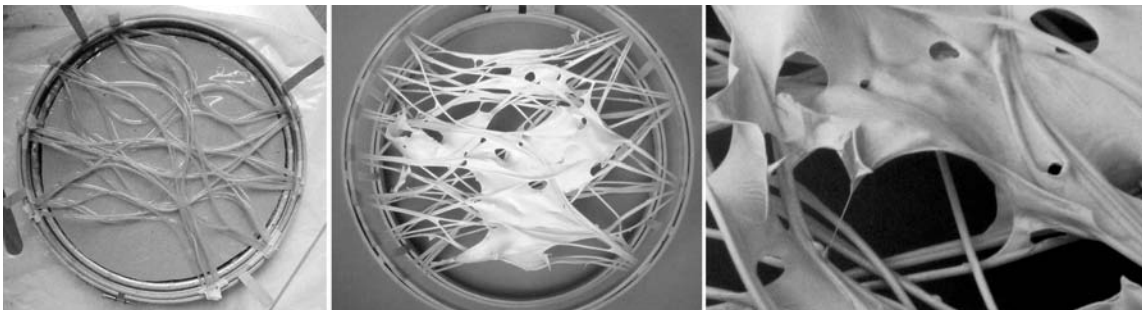


Imagen 164: Experimento de "form finding" para el diseño del proyecto "Soft Office": malla de tubos de goma sumergidos en laca líquida, malla tridimensional luego de la separación de los aros de madera, con la laca ya endurecida y detalle de la malla. Ilustraciones extraídas de *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.220 y 221).

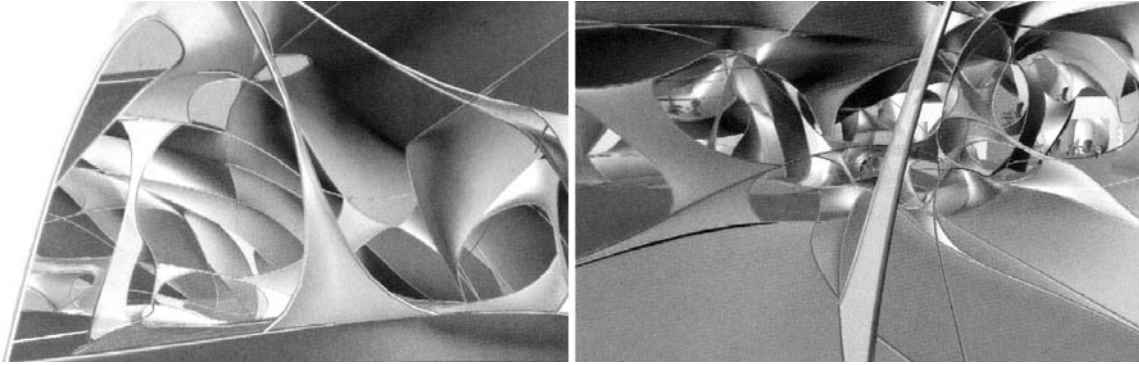


Imagen 165: Malla digitalizada. Ilustraciones extraídas de "*NOX: machining architecture*" (Spuybroek, 2004, pp.222).

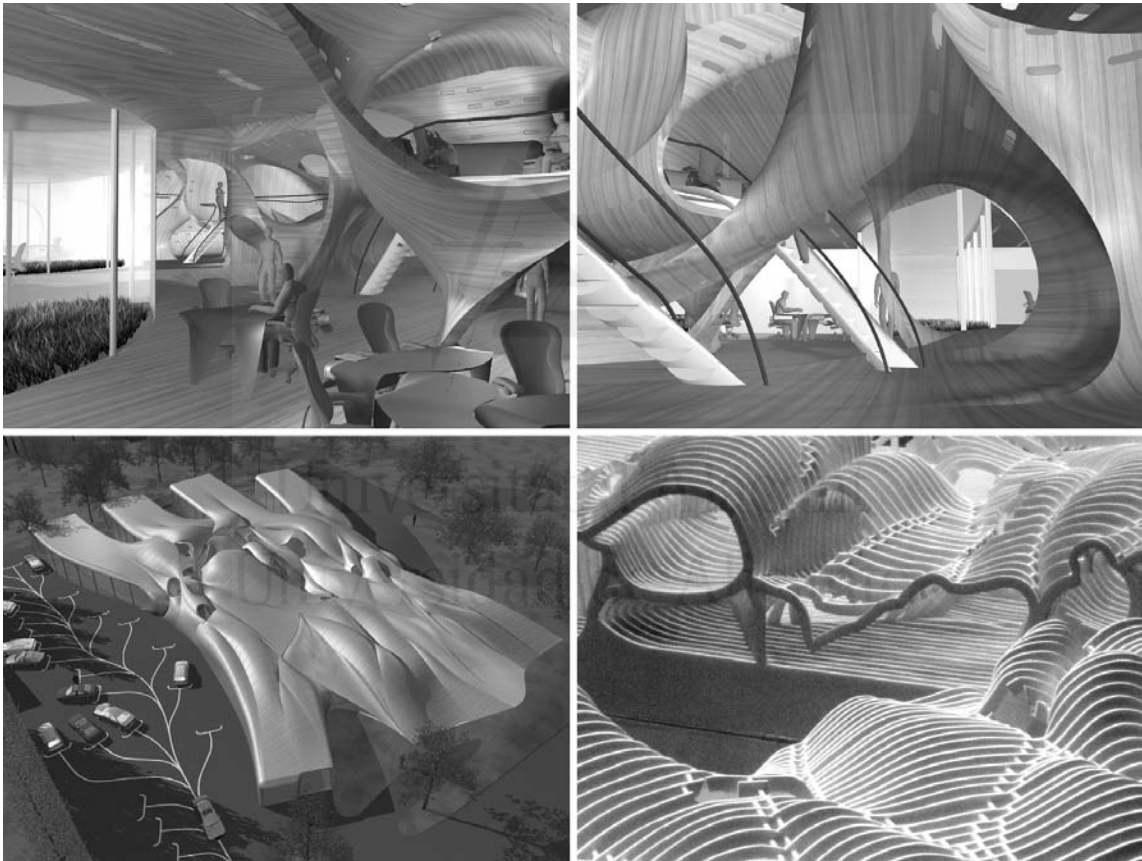


Imagen 166: Imágenes renderizadas del proyecto: vistas interiores y vista a vuelo de pájaro y modelo con esquema de la estructura. Ilustraciones extraídas de "*NOX: machining architecture*" (Spuybroek, 2004, pp.228-229, 231, 232 y 233).

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"* (*"H₂Oexpo"*) construido en Neeltje Jans, Holanda. Consiste en una serie de costillas paralelas sobre las que se apoyan tablonces 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"*¹, la *"Son-O-House"*² o el museo *"Pompidou Two"*³, 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"*⁴ para Waterland en Neeltje Jans, el complejo de oficinas *"Goes goes"*⁵, el centro *"Fedurok"*⁶, las oficinas para el *"European Central Bank"* (ECB)⁷ en Frankfurt o el complejo de viviendas *"OffTheRoad_5Speed"*⁸. En estos casos, el proceso de deformación geométrica es realizado exclusivamente con herramientas informáticas de modelización en tres dimensiones.

También se ha interesado el grupo Nox 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"*⁹, la exposición itinerante *"Flying Attic"*¹⁰, el hotel *"beachness"*¹¹, la vivienda *"Foam Home"*¹² o las oficinas y laboratorio *"V2_LAB"*¹³ 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"*.

¹ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.138-157) y *"wetGRID / D-Tower"* (Spuybroek, 2001, pp.27-33).

² Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.174-197).

³ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.304-321).

⁴ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.46-53).

⁵ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.80-83).

⁶ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.280-289).

⁷ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.290-303).

⁸ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.114-127) y *"Off the Road_5speed"* (Spuybroek, 2000, pp.56-61).

⁹ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.106-113).

¹⁰ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.100-105).

¹¹ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.64-73) y *"Beachness"* (Spuybroek, 1998C, pp.35-39).

¹² Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.54-63).

¹³ Ver *"NOX: machining architecture"* (Spuybroek, 2004, pp.84-99).

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.

Se entiende como 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 un objetivo 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.

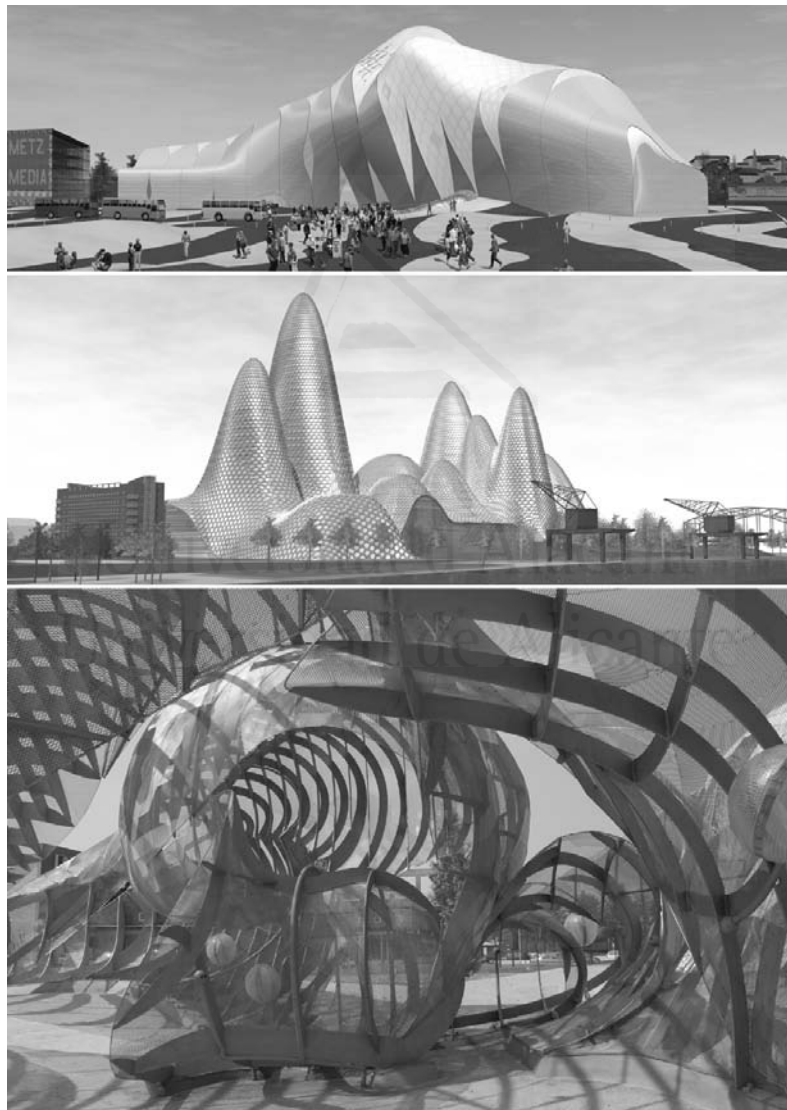


Imagen 167: El "Pompidou Two", el "European Central Bank" y la "Son-O-House".
Ilustraciones extraídas de "NOX: machining architecture" (Spuybroek, 2004, pp.308-309, 300-301 y 195).

4.3.4.5 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. Pero en total son 4.000 almohadillas las que cubren todo el edificio de modo que existe una alta repetición de formas; sin embargo, el giro realizado en la malla de la estructura principal de acero y sus características orgánicas (ver punto 4.2.3.4), 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 éstas fueron finalmente diseñadas fijas (Gonchar, 2008 p.152).



Imagen 168: Fachada del Centro Nacional de Natación de Pekín, PTW Architects.
Ilustración extraída de Internet <<http://www.ptw.com.au/ptw.php>>.

La forma de las almohadillas fue determinada a través del uso de programas informáticos de "form finding" que, a principios del siglo XXI, han alcanzado ya un nivel de desarrollo tal que permiten emular con gran precisión los procesos de autoorganización de las burbujas de jabón. Superficies de áreas mínimas que reparten las tensiones igualmente en todos sus puntos, pueden ser ahora

fácilmente 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 ésta 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, pero hubo que hacer algunos ajustes formales posteriores.

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.¹

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".²



Imagen 169: Detalle de la fachada del Centro Nacional de Natación de Pekín, PTW Architects. Ilustración extraída de Internet <http://www.arup.com/Projects/Chinese_National_Aquatics_Center.aspx#!b:/Projects/Chinese_National_Aquatics_Center/WaterCube_overview_2.aspx>.

¹ Ver más información en Internet:

<http://www.daviddexter.co.uk/pdfs/project%20sheets/watercube_beijing.pdf>.

² Ver más información en Internet: <<http://www.oasys-software.com/casestudies?id=18/>>.

Una vez completada esta etapa de determinación de la forma con programas de "form finding", 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, ésta 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.

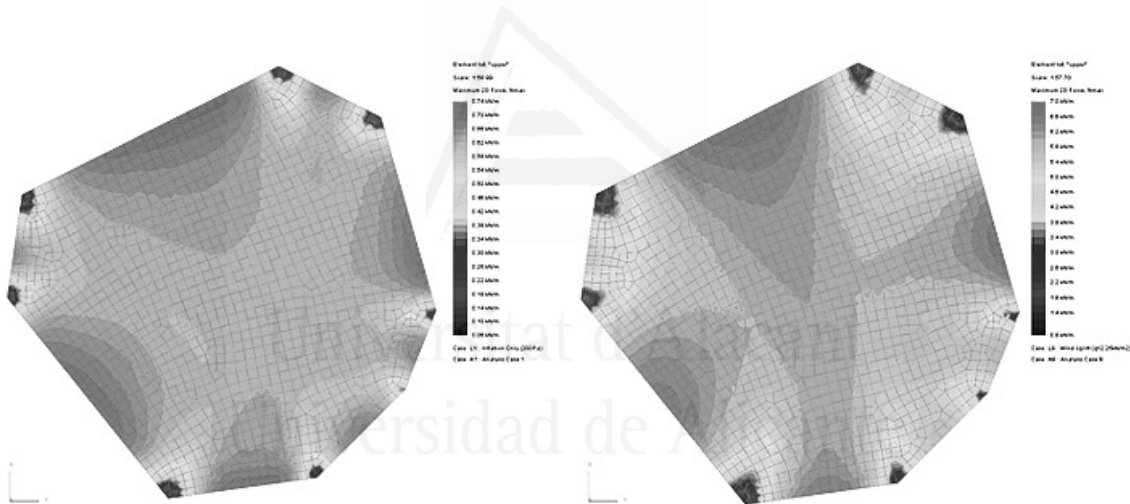


Imagen 170: Análisis estático de una almohadilla con el programa "GSA Fabric" de Oasys. Ilustraciones extraídas de Internet <<http://www.oasys-software.com/casestudies?id=18/>>.

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; se descartó la opción de utilizar láminas más gruesas de ETFE ya que el material se torna más frágil cuanto mayor espesor presente (Gonchar, 2008 p.156).

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 pp.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.

Se inflaron con 18 ventiladores que quedaron instalados de forma permanente en el edificio.

La presión interna de las almohadillas es continuamente monitoreada por un sistema informático de gestión que activa los ventiladores e inyecta aire filtrado y deshumidificado en aquellas almohadillas en las que la presión desciende por debajo del nivel deseado.



Imagen 171: Montaje de las almohadillas de ETFE en la estructura de acero.
Ilustración extraída de Internet <<http://www.oasys-software.com/casestudies?id=18/>>.

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.



Imagen 172: Vista aérea del CNNP de Pekín desde 200 metros de altura. Imagen obtenida en enero de 2012 con el programa Google Earth.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.3.5 Evolución reciente en el diseño de las estructuras superficiales

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

Shukhov fue el primero en construir una estructura superficial de doble curvatura utilizando elementos rectos, a finales del siglo XIX. A partir de la adecuada disposición de elementos estandarizados, lineales y simples, obtuvo un elemento estructural complejo: una superficie de doble curvatura. 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 podemos encontrar similitudes morfológicas con esta familia de curvas.

Algunos años más tarde, previo a la Segunda Guerra Mundial, el ingeniero británico Barnes Wallis desarrolló el sistema geodésico, 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. En la década de 1960, sin embargo, el encarecimiento de la mano de obra y de la construcción de encofrados llevó a su desuso.

La primera lámina estructural construida en hormigón armado fue la cubierta del Planetario de Dusseldorf, en 1926. El primer paraboloide hiperbólico laminar fue construido en Milán por Giorgio Baroni, en 1937. En esta misma época, el ingeniero español Eduardo Torroja construía algunas de sus obras más célebres, como la cubierta del Mercado de Algeciras, las Tribunas del Hipódromo de la Zarzuela y el Frontón de Recoletos. En los años 1940, 1950 y 1960, arquitectos e ingenieros como Eugène Freyssinet, Pier Luigi Nervi o Félix Candela, quienes se dedicaron al diseño, estudio y construcción de estructuras laminares de hormigón armado, construyeron sus obras más emblemáticas.

Hacia mediados del siglo XX comienzan a surgir cáscaras con formas más complejas. La terminal para la TWA en el Aeropuerto Kennedy de Nueva York, diseñada por Eero Saarinen e inaugurada en 1962, podría considerarse como una de las primeras bóvedas con una geometría libre y orgánica y el proyecto del arquitecto danés Jørn Utzon, ganador del concurso de la Opera de Sydney en 1957, que presentaba un conjunto de sugestivas cubiertas con formas orgánicas curvas de una escala monumental, fue una de las últimas grandes cáscaras de hormigón armado construidas en esta época.

Desde principios de los años 1950 y hasta finales de los 80, por otra parte, Eladio Dieste desarrolló sus bóvedas de cerámica armada. Gracias a los reducidos tiempos de fraguado que las caracterizaban, podían construirse con sólo un tramo de encofrado que tenía un alto grado de reuso y que representaba un pequeño porcentaje de la superficie total de la cubierta. De esta manera, los costos de mano de obra para la construcción de encofrados se reducían drásticamente.

En las décadas de 1950 y 1960 comenzaron a construirse, en diversas partes del mundo, una serie de edificios con cubiertas soportadas por mallas de cables de acero pretensado que retomaban directamente las investigaciones de Shukhov sobre sistemas estructurales basados en el uso de barras traccionadas.

Gracias a la aparición en el mercado de materiales plásticos como el PVC y el PTFE, la construcción de estructuras de membrana y de redes de cables experimentó un importante impulso a finales de la década de 1960.

Frei Otto, junto a algunos de los ingenieros más reconocidos de la época, tales como Fritz Leonhardt, Ove Arup y Edmund Happold, desarrollaron una nueva metodología de trabajo para el diseño de tensoestructuras y de bóvedas con forma de catenarias invertidas, en la que el ordenador adquirió un rol fundamental. Esta metodología ha sido utilizada prácticamente hasta el día de hoy para el diseño de numerosas cubiertas en todo el mundo.

La creciente necesidad de que la estabilidad y el equilibrio de las edificaciones sean garantizados mediante cálculos matemáticos, se convirtió en un fuerte impulso para el desarrollo de la Teoría de la Elasticidad a lo largo de la primera mitad del siglo XX.

Las limitaciones en los conocimientos sobre modelado estructural y análisis de solicitaciones fueron un gran obstáculo para la construcción de muchas obras, aunque su diseño se supiera racional y eficiente. Por este motivo, fueron pocos los arquitectos e ingenieros que en esta época se atrevieron a construir estructuras laminares, si bien ya se había demostrado que sus formas eran muy eficaces para cubrir espacios de grandes luces.

Para suplir la falta de un cálculo ajustado, generalmente se realizaban cálculos simplificados que se comparaban con los resultados obtenidos en ensayos de carga de modelos de escala reducida. De esta manera trabajaban ingenieros como Eduardo Torroja, en la década de 1930.

Por otra parte, se procedía con cautela, de modo que las luces libres de las estructuras que se construían iban aumentando progresivamente.

Para que el ensayo de un modelo reducido sea válido, éste debe estar hecho con la misma forma, los mismos vínculos y los mismos materiales con que se construirá finalmente la estructura. Si se cumplen estas condiciones y sobre el modelo actúa la misma carga por unidad de superficie que en la obra real, compensándose la menor incidencia de su peso propio, en las secciones de ambas estructuras deberían aparecer las mismas solicitaciones. Pero la capacidad última resistente y las deformaciones en ambas estructuras dependerán también del comportamiento del material y para que éste presente idénticas propiedades físicas a diferentes escalas, debería ser continuo, homogéneo e isótropo.

El comportamiento del acero se asemeja bastante al de un material con estas características, por lo que los resultados de los ensayos de cubiertas con mallas de cables traccionados a escala reducida, tal como los que realizaba Frei Otto, son los que más se aproximarán al comportamiento de un edificio a escala real.

Otros materiales estructurales usuales en la construcción son más difíciles de modelizar con exactitud en tamaño reducido ya que sus propiedades resistentes dependen de varios factores, algunos de los cuales están directamente relacionados con el tamaño de las secciones.

El comportamiento de la madera depende de la disposición y regularidad de sus fibras y de la presencia de discontinuidades tales como nudos, bolsas de resina, picaduras u ondulaciones de las fibras, que en un material orgánico aparecen con mucha frecuencia.

La sección de tamaño reducido, por otra parte, es en verdad un trozo de la sección del material a escala real, es decir, está compuesta por una menor cantidad de fibras del mismo tamaño que las de la sección real.

En el hormigón armado es imposible realizar una reducción a escala de todos los componentes: armaduras, áridos finos y gruesos, partículas de cemento y agua, 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 estructuras de distintas escalas.

Además, los áridos y los granos de cemento reducidos, al igual que en el caso de la madera, siempre serán trozos pequeños de material a escala real.

El proceso de fraguado del hormigón en una estructura pequeña nunca producirá el mismo fenómeno de retracción que en una estructura de mayor superficie, por lo que el estado inicial de fisuración en ambas estructuras no será comparable.

Los resultados de ensayos en modelos reducidos de madera u hormigón armado deberían, por lo tanto, tomarse con precaución y confrontarse, de ser posible, con resultados de ensayos similares realizados sobre estructuras reales para determinar en cada caso su pertinencia.

Eladio Dieste desarrolló complejos procedimientos matemáticos basados en la Teoría de la Elasticidad para analizar sus estructuras. Pero el cálculo manual de una superficie con la complejidad geométrica de una bóveda gausa era prácticamente inabordable. Se basó, entonces, a efectos de comprobar la viabilidad de esta tipología de cubiertas, en una serie de cálculos simplificados que, en general, demostraban que las bóvedas proyectadas eran más resistentes de lo que se preveía como necesario. Comenzó construyendo estructuras de luces pequeñas, por otra parte, que paulatinamente fueron creciendo de tamaño a medida que iba conociendo con mayores certezas el comportamiento de esta tipología estructural.

Durante la etapa de diseño de la Opera 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.

A partir de mediados del siglo XX, el extraordinario desarrollo de la informática brindó a arquitectos e ingenieros una herramienta ideal para el cálculo rápido y preciso de estructuras con geometrías complejas. Los métodos matriciales se adaptaron óptimamente al tipo de trabajo que el ordenador realizaba, por lo que el Método de los Elementos Finitos fue retomado y ajustado para reproducir el comportamiento de los principales sistemas estructurales, incluyendo las estructuras de membrana con importantes deformaciones.

Para el diseño de las cubiertas del recinto olímpico de Munich, Frei Otto previó utilizar la misma metodología que había desarrollado algunos años antes para el diseño del pabellón alemán 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.

Dado que se trata de una estructura sometida exclusivamente a esfuerzos de tracción, que su peso propio tanto a la escala del modelo como a la de la cubierta real resulta despreciable con relación a la magnitud de las cargas que es capaz de soportar y que el acero presenta un comportamiento bastante cercano al de un material homogéneo, continuo e isótropo, en primera instancia se podría pensar que, de ser idénticas las tensiones en los cables, el tamaño y la forma de sus secciones no afectarían a su comportamiento elástico. El cambio de la escala real a la escala 1:125 del modelo construido no parecería ser entonces un factor que influya en el comportamiento estructural de la cubierta.

Pero debido a las importantes 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, entonces, el desarrollo de nuevos programas capaces de modelizar con exactitud el comportamiento de una cubierta suspendida pretensada.

Para el diseño del Multihalle en Mannheim se construyó un modelo que podría ser considerado como una etapa preliminar en el proceso de definición de la forma. Las mediciones extraídas de este modelo fueron ingresadas a programas informáticos que analizaron tanto la geometría como la estática de la cubierta y realizaron los ajustes finales.

Entre los años 1960 y 2000 se produjeron extraordinarios avances en los programas informáticos para el análisis de tensoestructuras, impulsados por el éxito mundial de esta tipología estructural a partir de los trabajos de Frei Otto y por la necesidad de diseñar, en plazos limitados, estructuras cada vez más grandes y más complejas. Este desarrollo posibilitó, en una primera instancia, el cálculo preciso de estructuras con geometrías complejas diseñadas manualmente o con modelos y la eliminación de la probabilidad de error humano y más tarde, el diseño de formas estructurales de mayor complejidad que requieren del empleo de una herramienta de alta precisión.

La forma de las estructuras superficiales está íntimamente relacionada con los **métodos de cálculo conocidos** en el momento en que son diseñadas, con los procesos de **optimización** entre estructura y otros componentes arquitectónicos y con los procedimientos que se utilizan para su **construcción**.

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

La escala de las tensoestructuras diseñadas por Behnisch & Partners para los Juegos Olímpicos de Munich resultó un factor igualmente imprevisto, que determinó la búsqueda de nuevas metodologías de diseño y llevó al desarrollo de programas informáticos específicos para el análisis de la geometría y la estática de las mallas de cables traccionados.

Tanto la Opera de Sydney como las cubiertas del recinto olímpico de Munich resultaron ser un gran desafío debido a lo inédito de sus escalas. La informática parecía brindar las herramientas más adecuadas para el diseño de sus proyectos de ejecución, con la precisión requerida y en tiempos reducidos, pero su desarrollo era

aún incipiente; por este motivo, ambos proyectos se convirtieron en importantes **promotores** del desarrollo de nuevos **programas informáticos** de diseño y cálculo y de nuevas metodologías de trabajo en **colaboración interdisciplinaria**, que tendrán una enorme repercusión en las décadas posteriores en la forma en como las estructuras superficiales serán diseñadas.

En las últimas cuatro décadas, los programas informáticos han evolucionado asombrosamente y han hecho posible el diseño de innumerables obras en tiempos razonables y con una adecuada precisión. 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, 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 que presenta una enorme variedad de barras, la "D-Tower" en Doetinchen con sus curvas irregulares o el revestimiento del CNNP, son novedosas aplicaciones de estas nuevas técnicas.

Para la definición formal de las cubiertas de la Opera de Sydney, la simplificación de los procedimientos de prefabricación de la estructura y del recubrimiento cerámico fue un factor decisivo. La **optimización** de la producción y del procedimiento de puesta en obra de las diferentes piezas requería de un alto grado de sistematización que solo podía alcanzarse con una geometría regular.

Todas las cáscaras de la cubierta se definieron, entonces, como trozos de una misma esfera de 75 metros de diámetro, descartándose formas más eficaces desde un punto de vista estructural, como los arcos de parábola o las catenarias. Por otra parte, el tamaño máximo de los segmentos en que se subdividieron las cubiertas surgió del máximo peso que una grúa de la época podía levantar. La forma del edificio estuvo, por lo tanto, fuertemente condicionada por los métodos de fabricación y por las herramientas disponibles en su época.

Materiales, métodos de cálculo, procedimientos constructivos y diseño de equipos, se relacionan íntimamente en la obra de Eladio Dieste para generar una forma. Una reflexión conjunta sobre todos estos temas ha determinado el éxito de su obra y por ello sus proyectos, además de innovadores desde un punto de vista técnico y formal, resultan muy económicos. Las bóvedas gausas están excepcionalmente ajustadas a las leyes de la estática y podrían considerarse como el máximo nivel de optimización alcanzado en la evolución de la forma de las superficies rígidas resistentes.

La forma es el principal factor determinante de la capacidad portante de las obras de Frei Otto y de Eladio Dieste. La idea de D`Arcy Thompson de que las formas son moldeadas por las fuerzas físicas y la de Robert Le Ricolais de que un modelo geométrico debe surgir a partir de una determinada acción mecánica, se ven claramente reflejadas en sus proyectos.

Los métodos "form finding" son procedimientos empíricos que se basan en la autoorganización que algunos sistemas materiales desarrollan bajo la influencia de ciertas fuerzas externas, que tienen por objetivo el encontrar formas eficaces para cumplir con determinadas funciones. 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 experimentos de "form finding" 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 a los de estos experimentos utilizando programas informáticos especializados. La ecuación de la catenaria, por ejemplo, es bien conocida y fácil de trabajar con ordenador.

Pero el comportamiento de la materia en la naturaleza es muchísimo más complejo de lo que llegamos a comprender, de modo que aún existen innumerables fenómenos naturales de los que podremos seguir extrayendo nuevos conocimientos. El ordenador, en cambio, simula el comportamiento de un universo en el que únicamente rigen las leyes naturales ya conocidas que le han sido programadas.

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. El ahorro de tiempo que implicó el hecho de que un robot cortara las piezas con la información geométrica que un ordenador le suministraba es, por otra parte, la diferencia entre cumplir o no con los plazos previstos de obra.

El diseño con programas de dibujo y de análisis estructural por métodos matriciales, basados en conocimientos adquiridos a través de la observación de la naturaleza, que emulan las leyes del universo conocido y la fabricación con máquinas alimentadas con información geométrica directamente desde un ordenador, parece ser la metodología de trabajo más eficaz para la construcción de estructuras superficiales con formas complejas en el futuro próximo.



4.4 Las estructuras aporricadas

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.4.1 Los puentes de Robert Maillart

El hormigón armado se desarrolló en sus inicios fundamentalmente ligado a los sistemas aperticados 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 sus sucesivas secciones, es decir, del comportamiento mecánico.

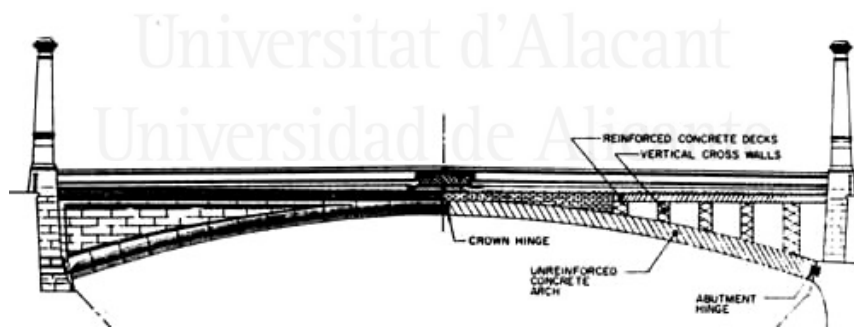


Imagen 173: Puente Stauffacher. Ilustraciones extraídas de Internet
<<http://www.nbq.ch/daniel/STS/STS.html>>.

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, p.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 necesario 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 tabiques verticales comprimidos; éstos descargaban a su vez sobre un arco de hormigón y éste 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 Zurich decidieron revestir la estructura con una fachada decorativa de mampostería.

En 1900 Maillart 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, p.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.

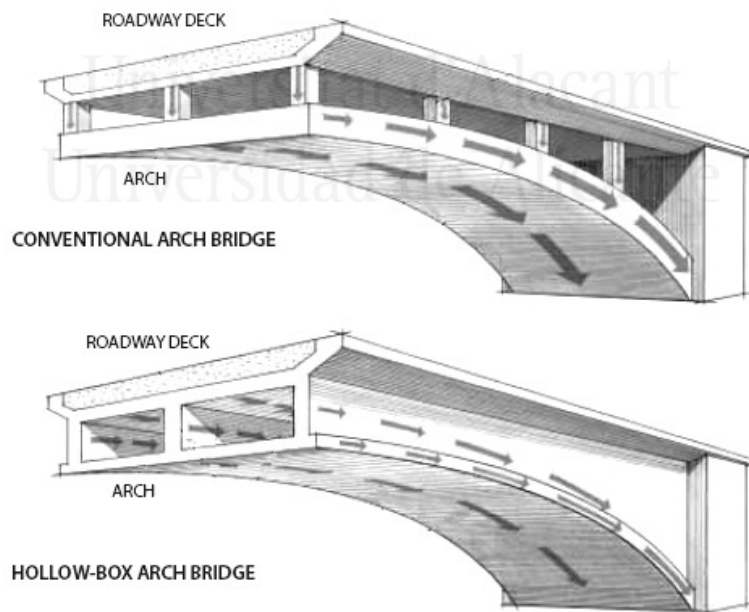


Imagen 174: Sección transversal de un puente convencional y sección del puente de Zuoz. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de *"The Revolutionary Bridges of Robert Maillart"* (Billington, 2000, p.86).

La continuidad entre los elementos permitía definir un sistema estático claro y obtener un importante ahorro de material. La plataforma pasó 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 al., 2002B, p.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, p.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, elegantes y económicas.

Este nuevo sistema estructural, surgido a partir de la evolución de los puentes en arco, representa un cambio radical en el diseño de estructuras.



Imagen 175: Puente de Zuoz. Ilustración extraída de *"The Revolutionary Bridges of Robert Maillart"* (Billington, 2000, p.86).

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 a diferentes condiciones climáticas de las distintas partes de la estructura, 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, p.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.

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.



Imagen 176: Puente de Tavanasa. Ilustración extraída de Internet
<<http://www.nbq.ch/daniel/STS/STS.html>>.

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 Zurich.

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, p.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 acerca fuertemente a la forma de su **línea de presiones**.



Imagen 177: Puente de Salginatobel. Ilustración extraída de *"The Revolutionary Bridges of Robert Maillart"* (Billington, 2000, pp.84-85)

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 el puente de Salginatobel.

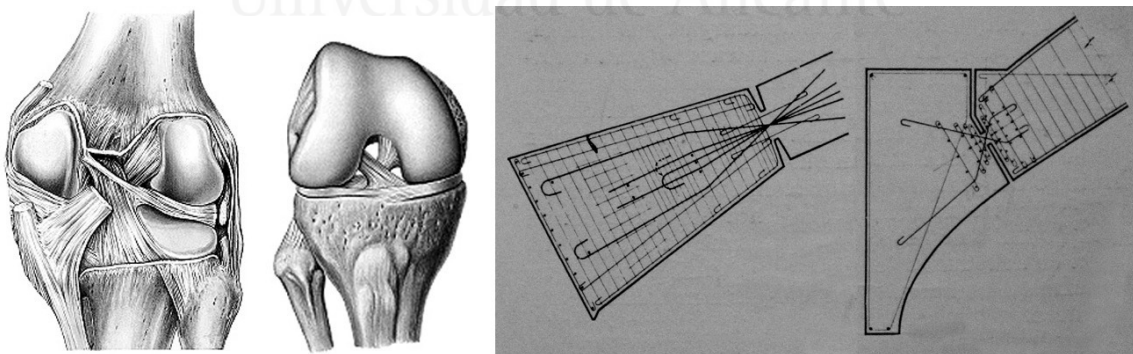


Imagen 178: Articulación en la rodilla con ligamentos cruzados y rótulas tipo Mesnager y Freyssinet. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de *"Sobotta - Atlas de anatomía humana"*, figuras 1005 y 1007 (Reinhard et al., 2006) y de *"Razón y ser de los tipos estructurales"* (Torroja, 1960, p.75).

4.4.2 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 (Lavalou, 2005, p.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 los años 1940 y 1950 desarrolló numerosos proyectos de viviendas, refugios y barracas militares (Peters, 2006, pp.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.¹

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, pp.46-47).

En 1939 diseñó un prototipo de barraca militar desmontable (Peters, 2006, p.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.

¹ Ver Patentes de Jean Prouvé N°849.762 de 1939, N°865.235 de 1940, N°922.364 de 1946, N°943.352 de 1947, N°1.022.385 de 1950 y N°1.138.751 de 1955 en "*Prouvé, the inventor: 32 patents. Renzo Piano: memories of Prouvé*" (Piano et al., 1998, pp.57-62).

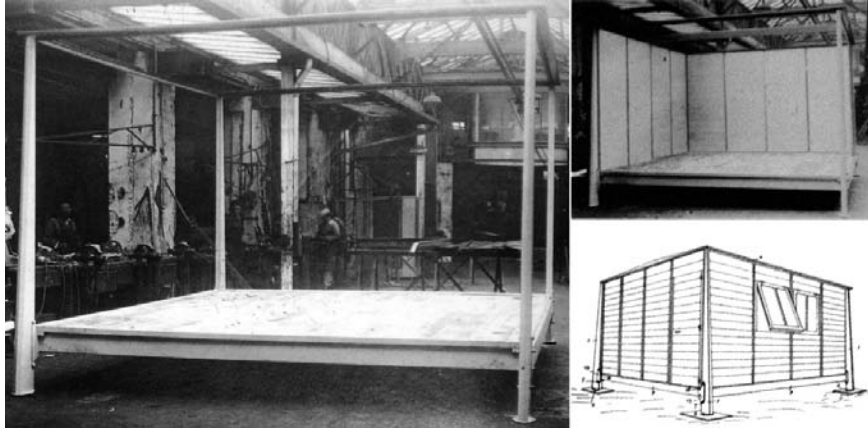


Imagen 179: Prototipo de barracas militares desmontables, 1939, Jean Prouvé.
Ilustraciones extraídas de "Jean Prouvé" (Peters, 2006, p.34).

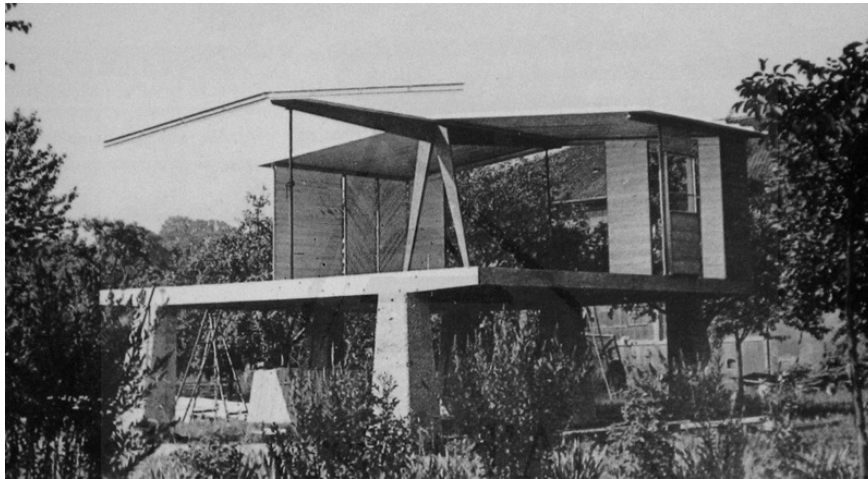


Imagen 180: Pabellón 8x8 para le empresa Permali en Maxéville, 1946, Jean Prouvé.
Ilustración extraída de "Jean Prouvé" (Peters, 2006, p.36).



Imagen 181: Construcción de la Casa estándar en Meudon (1949-1952), Henri Prouvé,
André Sive y Jean Prouvé. Ilustración extraída de "Jean Prouvé" (Peters, 2006, p.44).

Tras la Segunda Guerra Mundial comenzó a desarrollar sus "Maisons à portiques" (Peters, 2006, pp.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.

En 1946 construyó en Maxéville, para la empresa Permali, un pabellón de planta cuadrada de 8 x 8 metros con estos mismos paneles.

La estructura principal prefabricada, también consistente en un pórtico en forma de V invertida, se elevaba en este proyecto sobre una estructura de hormigón armado que alojaba las áreas de depósito.

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, p.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, p.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 (Lavalou, 2005, p.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 extruído 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 construidos 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 éste 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.

Todo cuanto he hecho personalmente se ha desprendido de un pensamiento que era instantáneamente constructivo, hasta el punto que yo sabía exactamente qué materias primas, qué maquinaria emplearía, y cómo haría el objeto a construir. Nunca parto de una visión o una forma. La forma es el resultado. Jean Prouvé, citado por Lavalou (Lavalou, 2005, p.94).

Prouvé 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, p.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, puede 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, p.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 U.A.M. (Unión de Arquitectos Modernos) en la "Exposition Internationale des Arts et Techniques" de Paris 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 sollicitaciones estáticas a que estaba sometida.

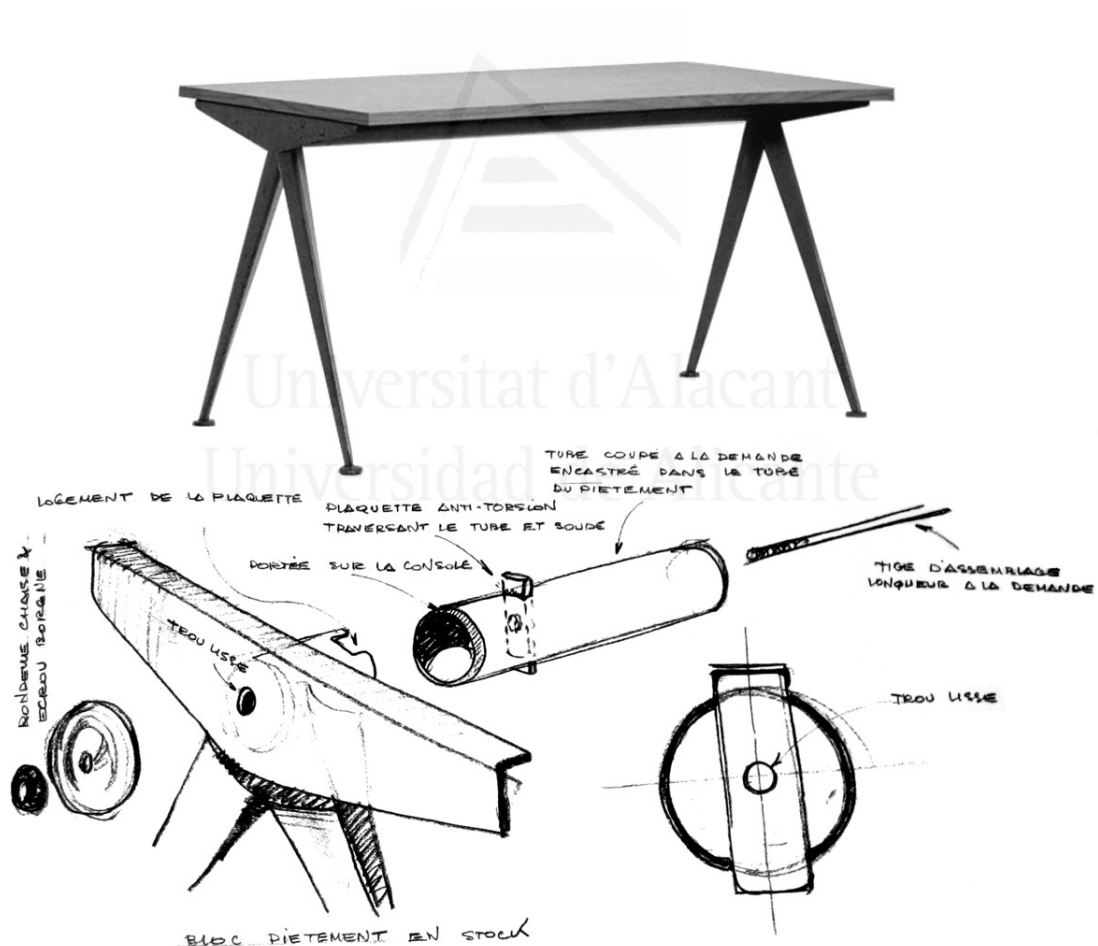


Imagen 182: Mesa Compas (1953), Jean Prouvé. Ilustraciones extraídas de "Jean Prouvé" (Peters, 2006, pp.60 y 61).



Imagen 183: Pupitre escolar con dos asientos (1936), "Silla estándar" (1934) y mesa "Guéridon" (1949), Jean Prouvé. Ilustraciones extraídas de "Jean Prouvé" (Peters, 2006, pp.30, 22 y 40)



Imagen 184: Silla "Antony" (1954), Jean Prouvé. Ilustración extraída de "Jean Prouvé" (Peters, 2006, p.72).

Siempre me ha preocupado la construcción bien hecha. En mi opinión una silla tiene que ser ligera. Una silla se rompe siempre por la junta trasera, por el ángulo entre las patas y el asiento, razón por la que todos mis muebles tienen formas de resistencia equivalente. Una mecedora mía tiene secciones variables. Y mis máquinas me permitían hacerlo.
Jean Prouvé, citado por Lavalou (Lavalou, 2005, p.26).

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 aperticada 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 aporricada en forma de U invertida, similar a la de algunas de las "Maisons à portiques", aseguraba la estabilidad horizontal y vertical de la construcción.

El material elegido para la fabricación de esta pieza fue la chapa de acero plegada, de gran resistencia y apta para la fabricación de piezas con cierta complejidad geométrica. El resto de los componentes metálicos eran de aluminio.

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, p.92).

Utilizando principios de ventilación natural, aislamiento y protección, la vivienda logra niveles óptimos de temperatura y humedad sin necesidad de recurrir al uso de equipamientos eléctricos (Rice, 1998A, p.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.

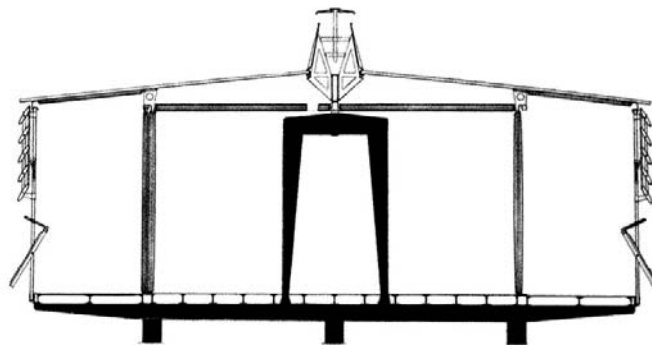


Imagen 185: Sección constructiva de la Maison Tropicale, Jean Prouvé. Ilustración extraída de "Jean Prouvé" (Peters, 2006, p.46)

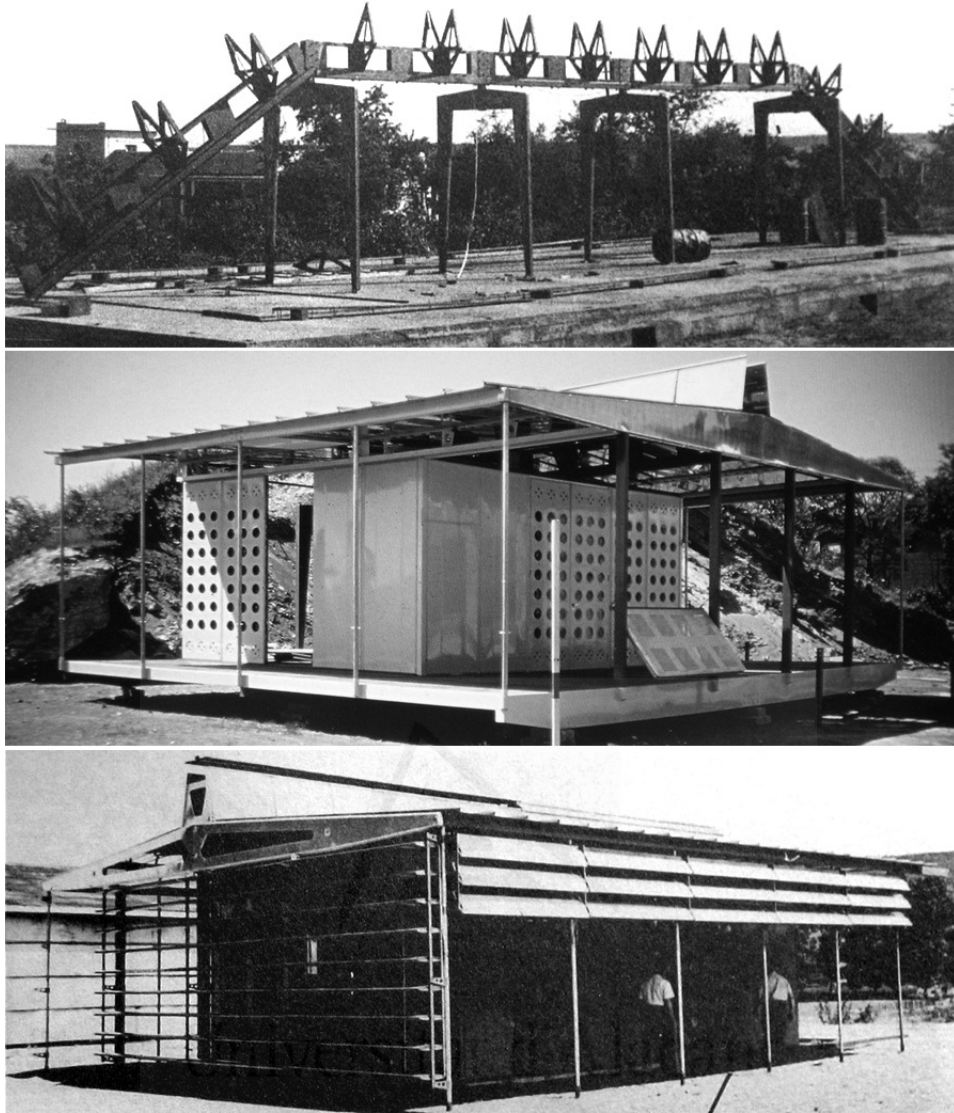


Imagen 186: Montaje de la "Maison Tropicale", 1949, Jean Prouvé. Ilustraciones extraídas de "Jean Prouvé" (Peters, 2006, pp.47 y 46) y de "Mémoires d'un ingénieur" (Rice, 1998A, p.93).

4.4.3 Las estructuras aporricadas en la segunda mitad del siglo XX

4.4.3.1 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 éste descubrió observando algunos monumentos clásicos de la arquitectura como la "Villa Rotonda" de Andrea Palladio (Sabini, 1994B, p.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.¹

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).

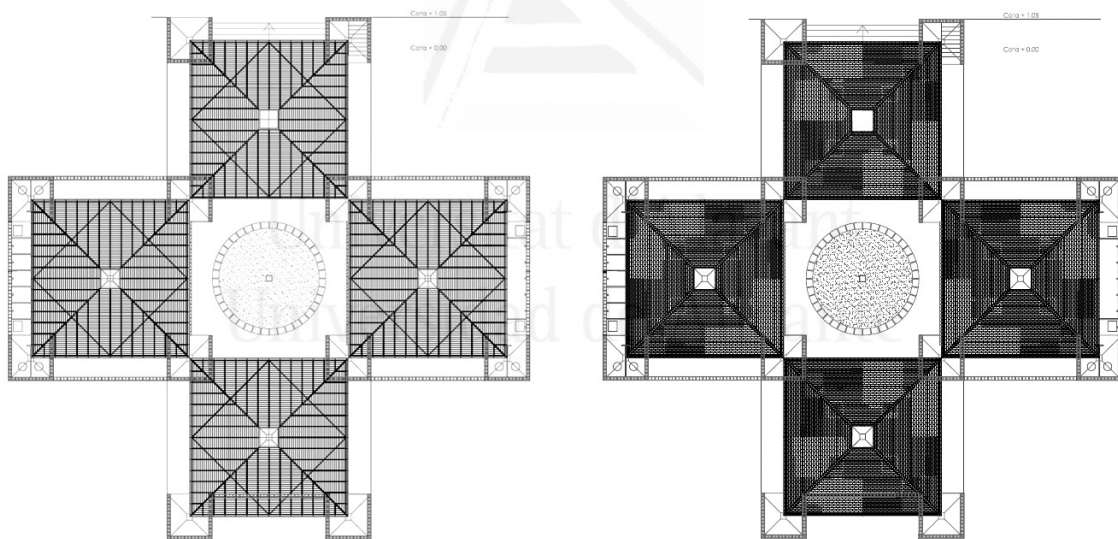


Imagen 187: Planta baja y planta de cubierta de la "Casa de baños" para el *Trenton Jewish Community Center* en Nueva Jersey, Louis Kahn (1954-1959). Ilustraciones extraídas de Internet, Departament de Composició Arquitectònica de la UPC <http://descartes.upc.es/historiaenobres/imatges/KA1954_Ba00.pdf>.

¹ *Los depósitos, los espacios de servicio y las pequeñas oficinas no deben resultar de la simple subdivisión de una única estructura espacial; a ellos se les debe asignar una estructura propia. El concepto de orden espacial debe ir más allá de la sistematización de las instalaciones mecánicas y afectar también a aquellos espacios sirvientes que flanquean los espacios servidos. Esto dará una Forma significativa a la jerarquía de los espacios (...)* Louis Kahn, citado por Maurizio Sabini (Sabini, 1994B, pp.43-44).

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 entonces 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 también 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 (Wright, 1961, p.48).

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 (ver punto 4.2.3.1).

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), el conjunto de las funciones arquitectónicas básicas tales como la distribución de espacios principales y de servicio, la volumetría, la solución estructural y las instalaciones, se integran en una única solución constructiva, tal como ocurre en un organismo.

Alrededor de un núcleo central de circulaciones verticales, horizontales y servicios, se agrupan los bloques principales de laboratorios. Alrededor de éstos, 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 éstos 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, p.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

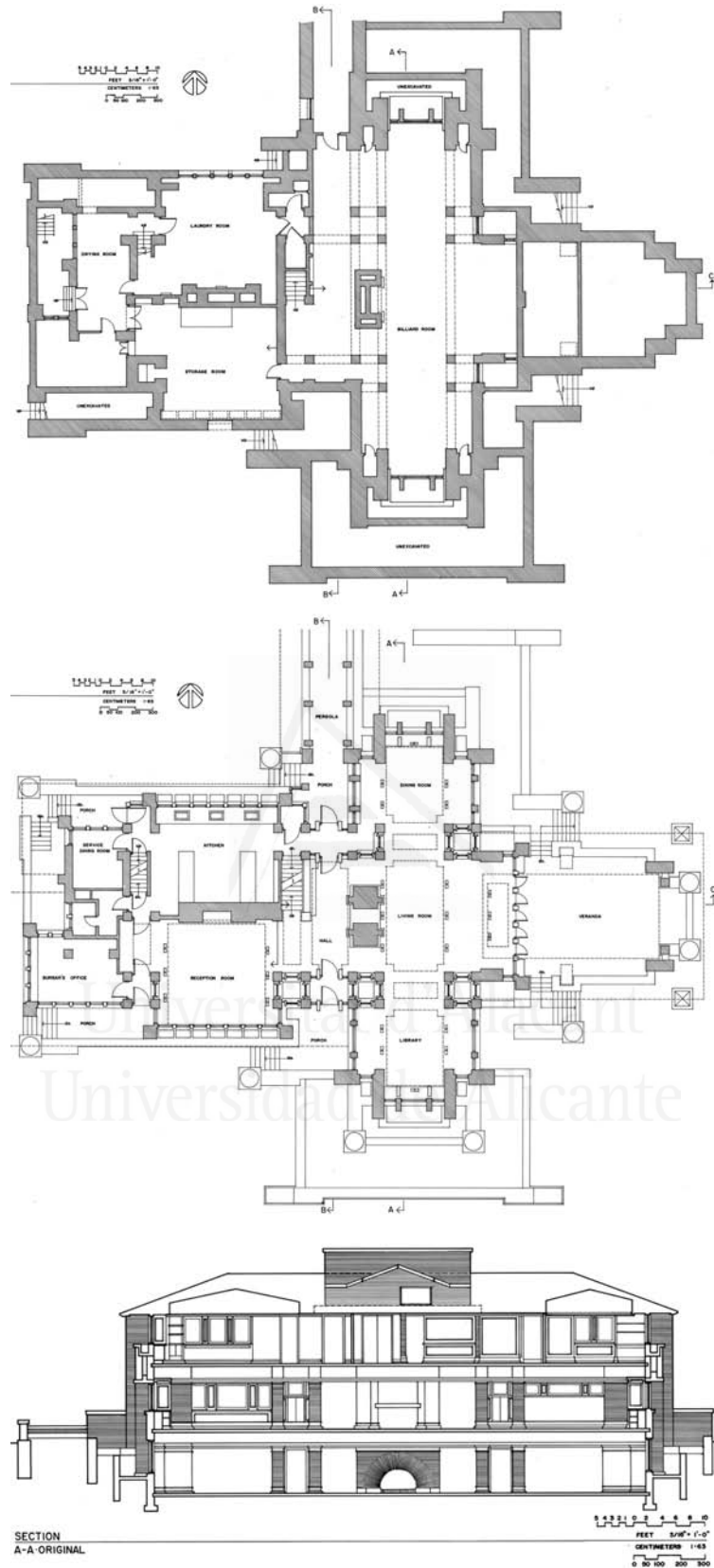


Imagen 188: Planta baja, planta del primer nivel y sección de la Darwin D. Martin House, Frank Lloyd Wright, (1903-1905). Ilustraciones extraídas de Internet, Biblioteca del Congreso de Estados Unidos (Historic American Buildings Survey), <http://www.loc.gov/pictures/search/?q=Drawing:ny0203&fi=number&op=PHRASE&va=exact&co=hh&st=gallery&sg=true>.

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, p.11).

En el interior de los huecos de las vigas Vierendeel se alojan los tramos horizontales de las distintas instalaciones (A&V Monografías, 1993C, p.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.

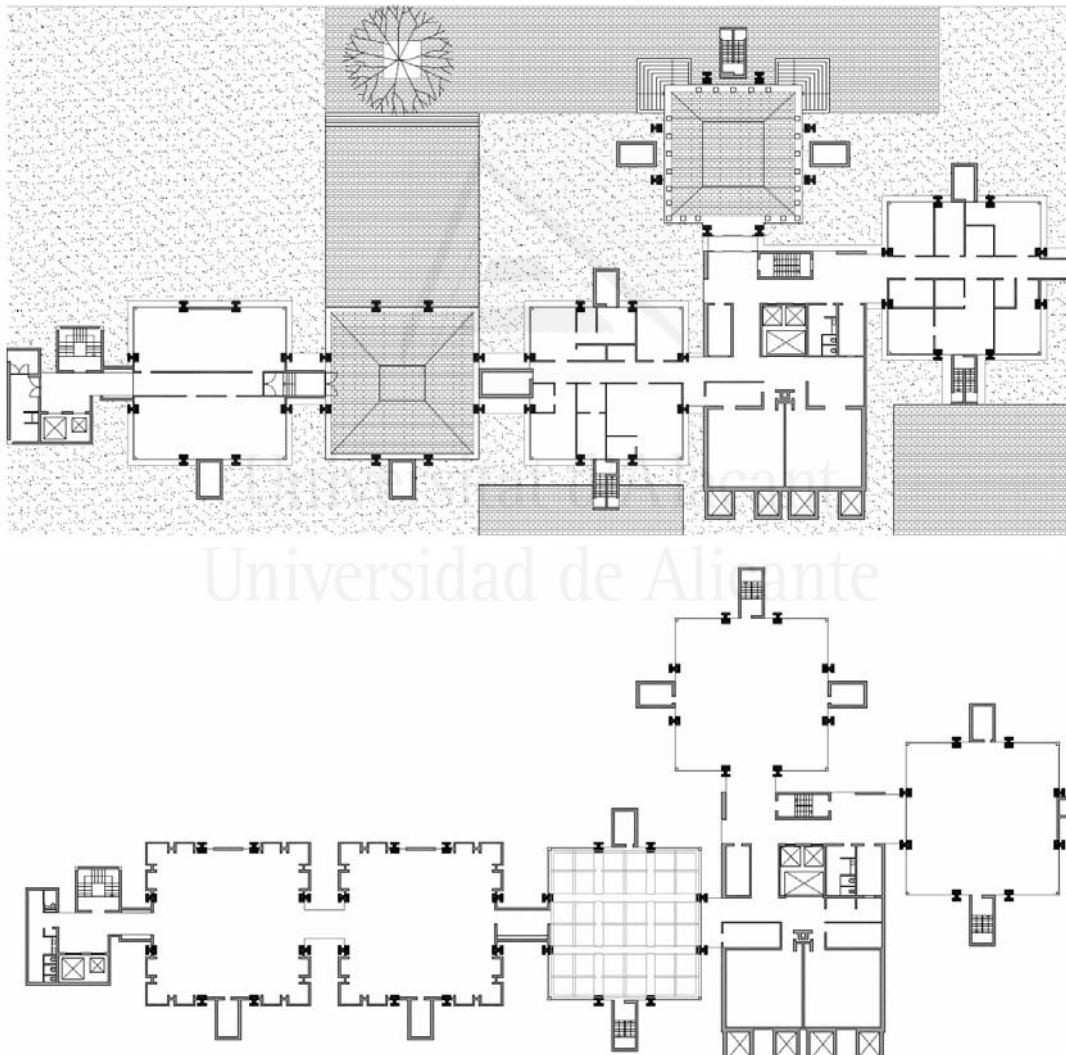


Imagen 189: Planta baja y planta tipo de los "Laboratorios de Biotecnología Richards", proyecto final (1957-1965), Louis Kahn. Ilustraciones extraídas de Internet, Departament de Composició Arquitectònica de la UPC
<http://descartes.upc.es/historiaenobres/imatges/K1957_RiMe00.pdf>.

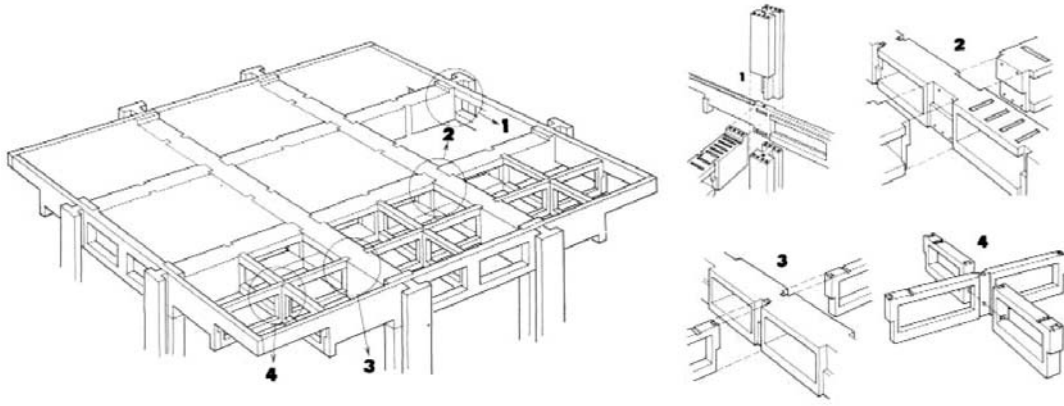


Imagen 190: Elementos básicos que componen los forjados de los "Laboratorios de Biotecnología Richards", (1957-1965), Louis Kahn. Ilustraciones extraídas de "18 years with Architect Louis I. Kahn" (Komendant, 1975, p.11).

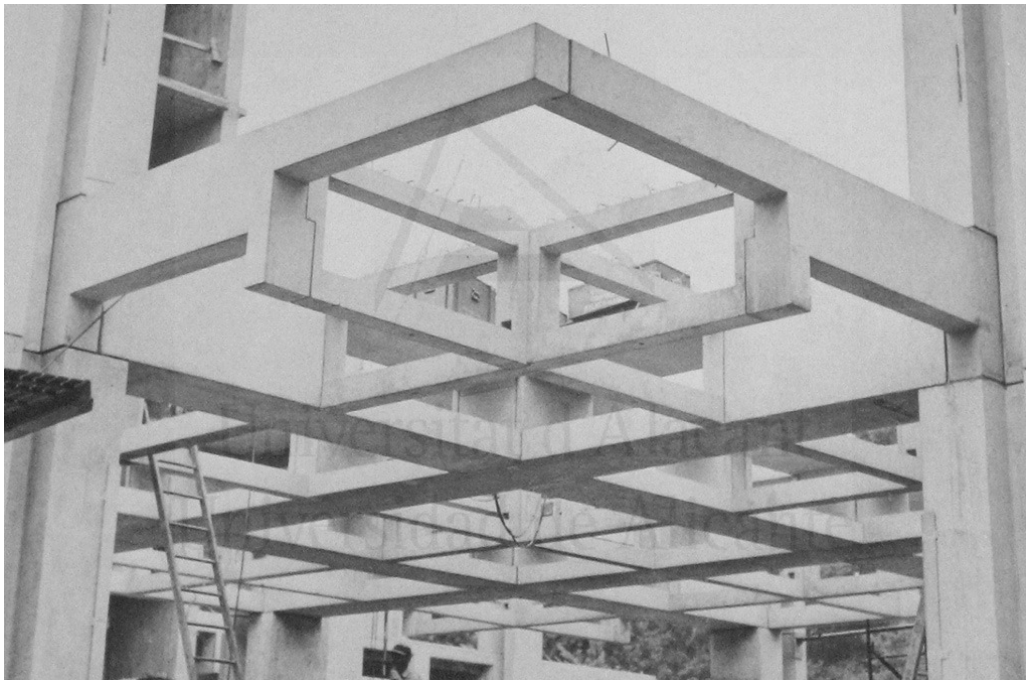


Imagen 191: Estructura de los "Laboratorios de Biotecnología Richards" durante su construcción. Pódico tipo Vierendeel de un nivel terminado; se aprecian claramente las uniones de los elementos de hormigón prefabricado. Ilustración extraída de "18 years with Architect Louis I. Kahn" (Komendant, 1975, p.15).

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.

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, p.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 huecas, 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 estáticamente necesaria para poder salvar la luz menor del edificio.

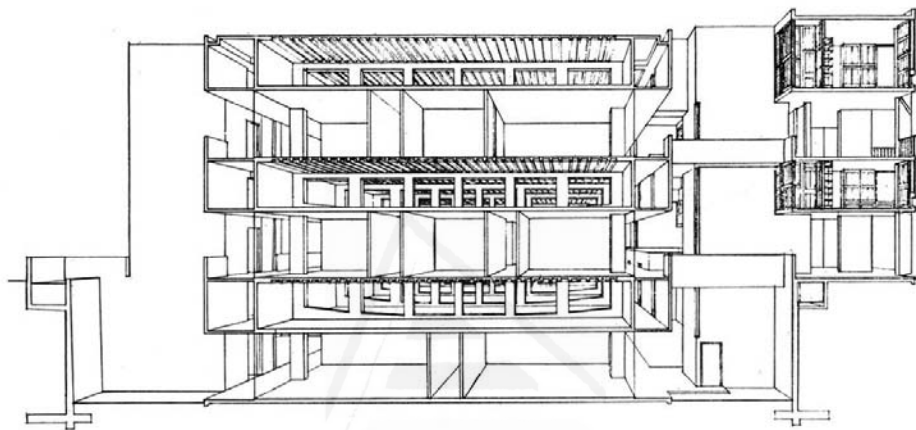


Imagen 192: Esquema estructural del "Salk Institute", (1959-1966), Louis Kahn. Ilustración extraída de "Instituto Salk de Estudios Biológicos" (A&V Monografías, 1993D, p.49).

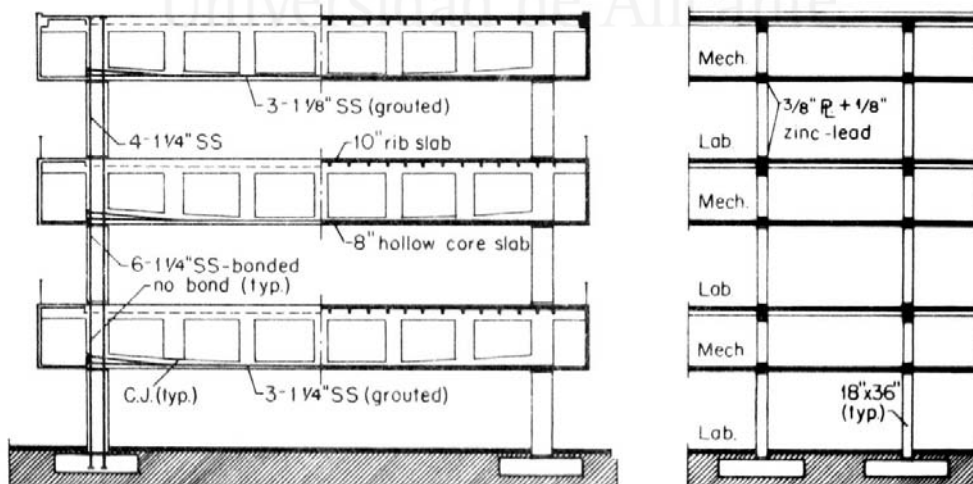


Imagen 193: Secciones estructurales del "Salk Institute", (1959-1966), Louis Kahn. Ilustraciones extraídas de "18 years with Architect Louis I. Kahn" (Komendant, 1975, p.52).

Esta tipología estructural resultó muy exitosa y fue retomada en varios edificios recientes, como por ejemplo en el Museo Kunsthal I de Rotterdam ¹ o en el proyecto para el Zentrum für Kunst und Medien-technologie (ZKM) de Karlsruhe ² 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 de Koolhaas para la Biblioteca de Francia (Koolhaas et al., 1995, pp.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 al., 1995, pp.674-685), planteando la pertinencia de su uso en la arquitectura contemporánea. ^{3 y 4}



Imagen 194: Esquema de edificio con estructura reticulada y con viga Vierendeel, Cecil Balmond. Ilustración extraída de "S, M, L, XL" (Koolhaas et al., 1995, p.677).

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 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 al., 1995, p.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.

¹ Ver "S, M, L, XL" (Koolhaas et al., 1995, pp.428-429).

² Ver "S, M, L, XL" (Koolhaas et al., 1995, pp.691-761).

³ *Vierendeel, a Belgium engineer, working at the turn of the century thought the monotony of the diagonals too much. To create a better aesthetic, one that freed the vision, he proposed an open configuration of vertical chords only attached to horizontal beams. The diagonal disappeared and with it the limitations of space. Vierendeel offered the idea to architects. He thought the possibilities of his "beam" gave more opportunity for design.* (Koolhaas et al., 1995, p.674).

⁴ *But could a floor become an inhabited truss? We could occupy the entire depth of a floor with a vierendeel beam (see Kunsthal I) to create "even" floors dominated by structure alternating with "odd" floors totally free from any structural presence.* (Koolhaas et al., 1995, p.671).

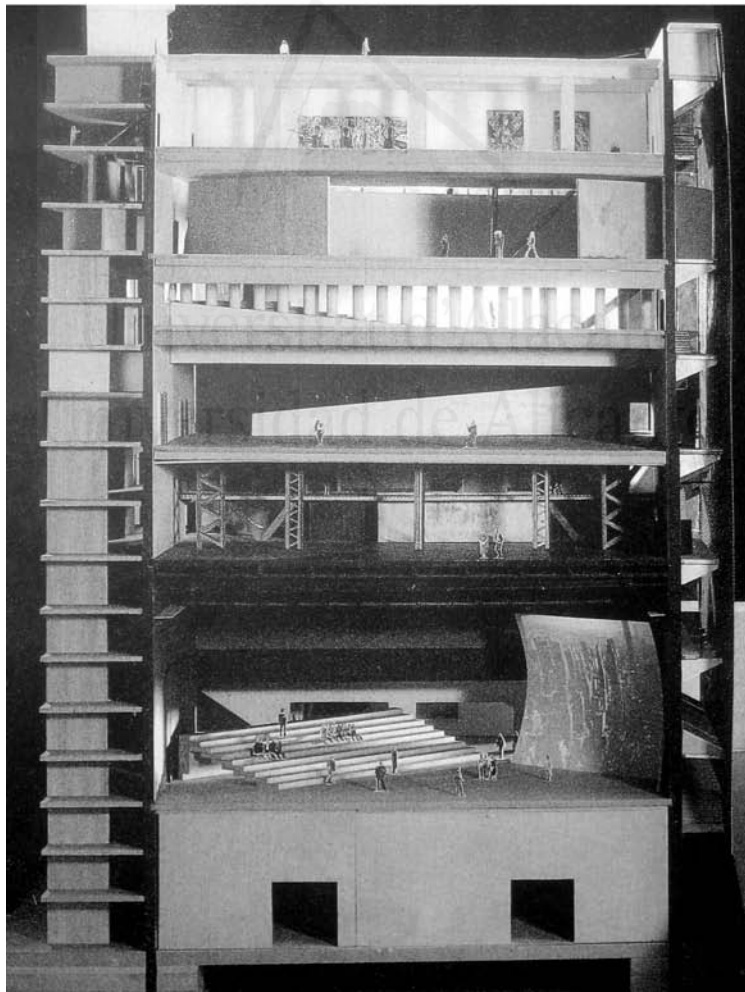
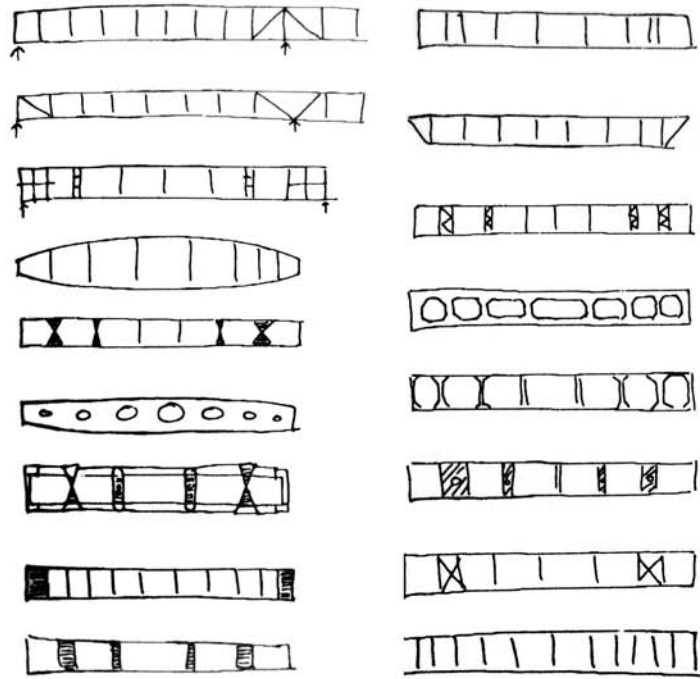


Imagen 195: Catálogo de vigas Vierendeel y maqueta seccionada del ZKM, Rem Koolhaas y Cecil Balmond. Ilustraciones extraídas de "S, M, L, XL" (Koolhaas et al., 1995, pp.681 y 694).

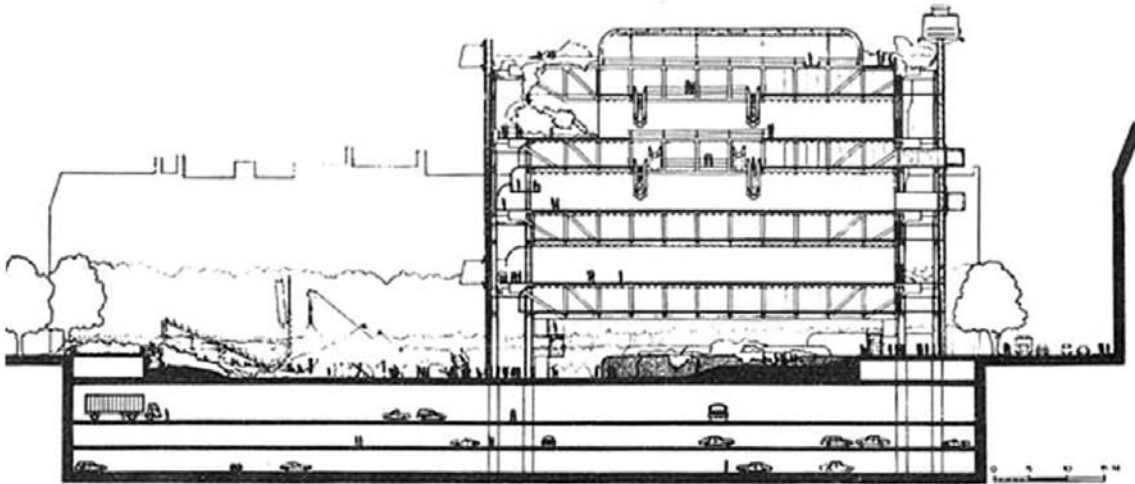


Imagen 196: Sección del Centro Pompidou presentada por Piano, Rogers y Estructuras 3, en diciembre de 1971, donde se analiza la posibilidad de utilizar vigas Vierendeel. Ilustración extraída de "La transformación del proyecto arquitectónico durante el Proceso Constructivo. La Opera de Sydney y el Centro Pompidou de Paris" (Peñin Llobel, 2007, p.143).

La idea no era novedosa, el propio Vierendeel la había sugerido 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 un edificio de gran escala, planteando el diseño de la viga en conjunto con el diseño del edificio, reforzándola e incluso agregándole diagonales allí donde la estática lo reclama y donde éstas no interfieren con el uso del espacio.

Balmond plantea un catálogo formal de diseños de vigas Vierendeel en el libro "S, M, L, XL"⁵, 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.

⁵ Ver "S, M, L, XL" (Koolhaas et al., 1995, pp.678-681).

4.4.3.2 Los proyectos de Rinaldo Semino en la década de 1960

El arquitecto italiano Rinaldo Semino se dedicó, en la década de 1960, al estudio y diseño de sistemas constructivos aptos para la edificación de megaestructuras en las que pudiesen concentrarse actividades humanas.

Las investigaciones de Semino se enfocan 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, pueda generar una macroestructura.

En el año 1973 publicó en la revista Zodiac N° 22 (Semino, 1973, pp.148-161) algunos proyectos presentados a concursos de arquitectura en los años 1960 en los que desarrolla 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.

Define de este modo **macroestructuras a partir de un elemento base y un principio de organización jerárquico** en varios niveles de complejidad creciente 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 como 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.

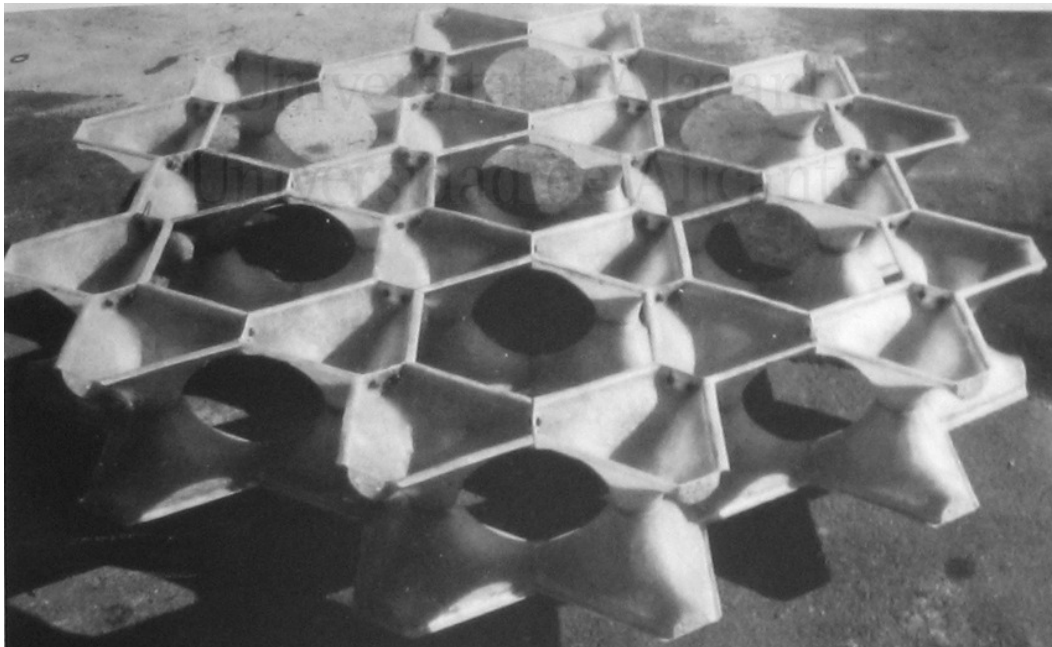


Imagen 197: Pilastra conformada por elementos de doble curvatura, fabricada por Rinaldo Semino para una prueba de carga. Ilustración extraída de *"Survey of Works"* (Semino, 1973, p.161).

Para un concurso C.E.C.A. de viviendas con estructura de acero, en 1965, Semino 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. Define así la estructura de la vivienda a una escala macro y a una escala micro.

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.

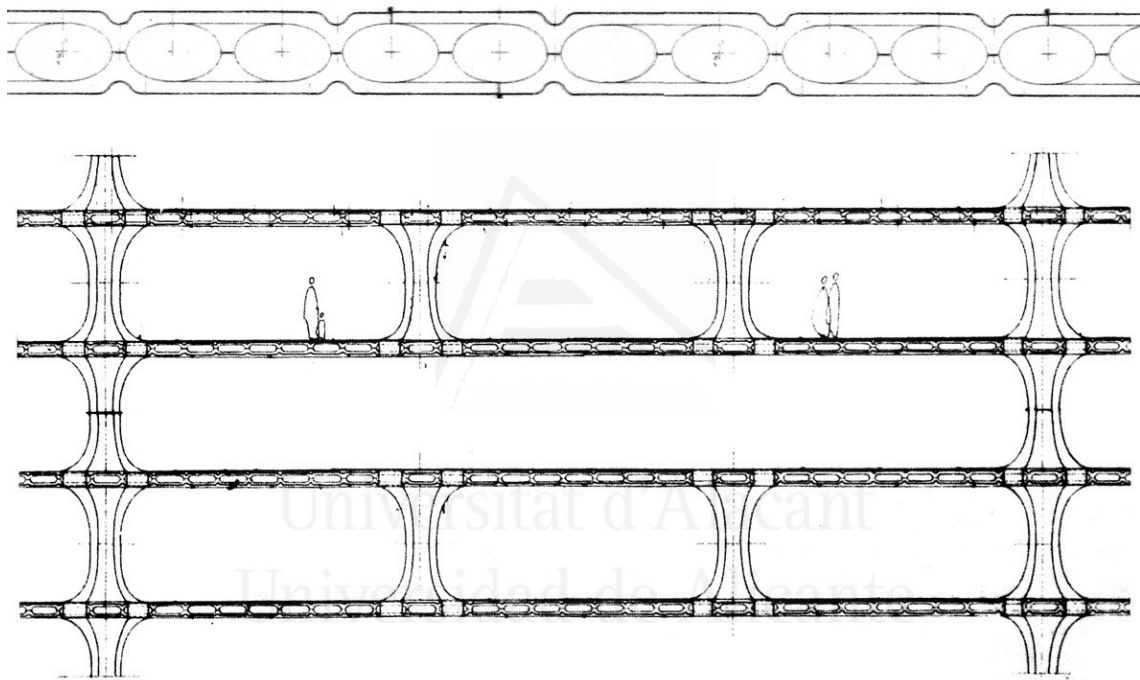


Imagen 198: Detalle de losa y sección vertical del proyecto de vivienda en acero para el concurso C.E.C.A., Rinaldo Semino. Ilustraciones extraídas de "Survey of Works" (Semino, 1973, p.151).

Con los mismos elementos diseña también 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 unidades estructurales.

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.

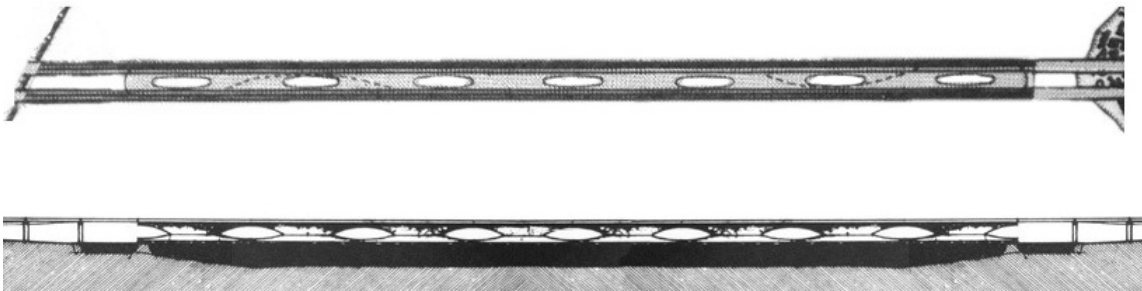


Imagen 199: Planta y vista lateral del Puente sobre el Estrecho de Messina, Rinaldo Semino (1969). Ilustraciones extraídas de "Survey of Works" (Semino, 1973, p.159).

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 de elementos de hormigón armado se apoyaba solidariamente una estructura simétrica de elementos de acero, de modo que el conjunto funcionaba como una única gran viga.

Los elementos base de ambos materiales de 2,5 metros de longitud, con huecos en su interior de aproximadamente 0,7 metros de diámetro, tenían forma tetraédrica y se encastran generando vacíos en la estructura según un diseño de malla triangular y hexagonal que permitía una notable simplificación constructiva, una gran liviandad y flexibilidad.

Los elementos de hormigón armado se montaban dejando un vacío en las uniones que se llenarían in situ, generando una estructura de doble curvatura, mientras que los de acero se obtenían ensamblando por soldadura elementos 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, de 3150 metros de longitud total, resultaba finalmente 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.

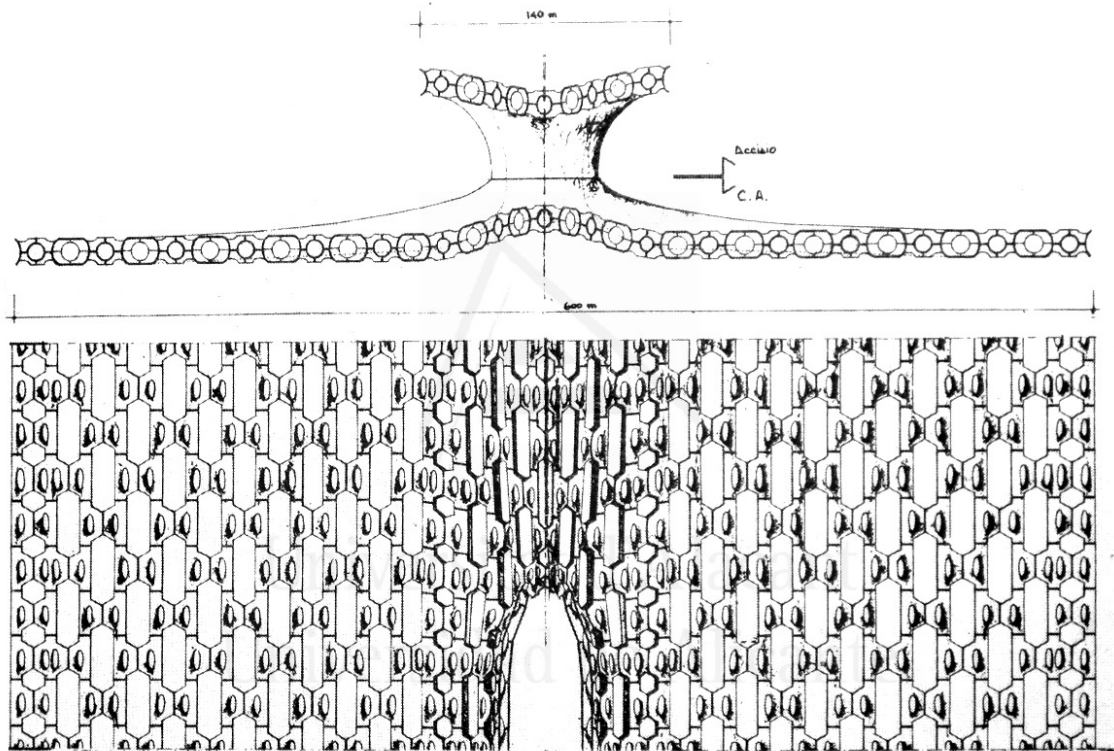


Imagen 200: Sección transversal y planta de la mitad de una pieza principal del Puente sobre el Estrecho de Messina, Rinaldo Semino. Ilustraciones extraídas de "Survey of Works" (Semino, 1973, p.156).

Las grandes estructuras proyectadas y construidas por el hombre hasta mediados del siglo XX han sido concebidas, prácticamente sin excepción, con los mismos sistemas estructurales y las mismas características geométricas que las edificaciones pequeñas. La gran escala implicaba, 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.

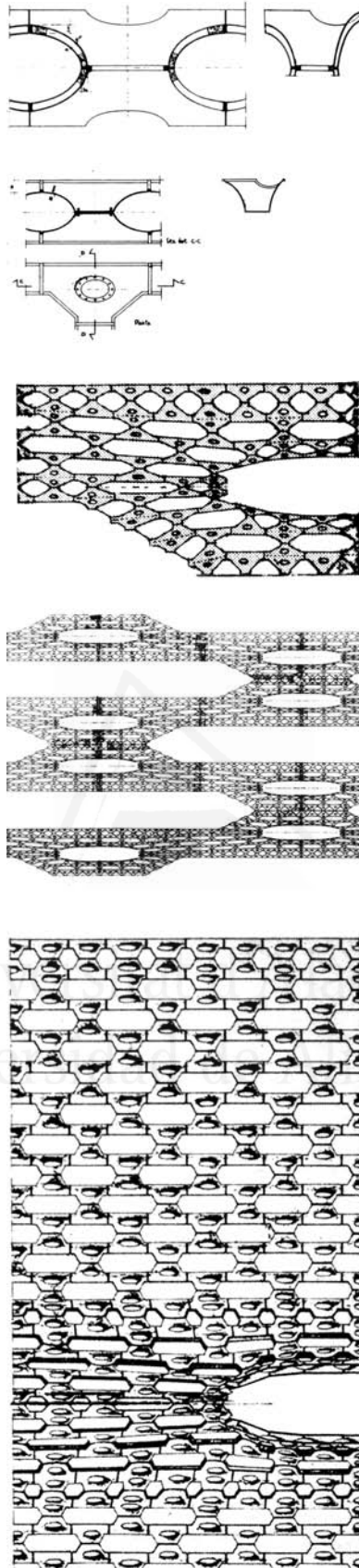


Imagen 201: Distintas escalas de diseño del Puente sobre el Estrecho de Messina, desde los elementos base hasta una porción de planta general, Rinaldo Semino. Esquema realizado con ilustraciones extraídas de "Survey of Works" (Semino, 1973, pp.156-159).

El gigante que Galileo afirmaba se derrumbaría por su propio peso, podría comenzar a levantarse de adquirir mayor ligereza y rigidez con un **aumento de los niveles de complejidad geométrica de la estructura interna** de sus huesos, con una distribución de los **huecos interiores** de su masa ósea según una malla **fractal** adecuadamente organizada y con una correcta **rigidización** del material que rodea a estos huecos.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.4.3.3 Los rascacielos de S.O.M.

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 **S.O.M.** (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 al., 1995, p.47).

Castigliano y Menabrea con sus teoremas sobre el Trabajo Mínimo, Maxwell y Betti con sus Teoremas sobre las Deformaciones Recíprocas, Mohr con sus aplicaciones del principio del Trabajo Virtual y Cross con su Método de Distribución de Momentos (ver punto 4.1) aportaron a finales del siglo XIX y principios del siglo XX los instrumentos analíticos necesarios para el cálculo bidimensional de estructuras apertadas repetitivas, aplicando la Teoría de la Elasticidad.

Como estos métodos de cálculo eran bidimensionales, los planteos estructurales de los edificios eran, en general, reducibles a una serie de estructuras bidimensionales que luego se ensamblaban en el espacio. El análisis del comportamiento mecánico tridimensional del rascacielos sólo podía realizarse por aproximaciones basadas en la observación de modelos experimentales o en razonamientos analógicos (Abalos et al., 1995, p.51).

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 ésta aumenta de tamaño.¹ Si la acción preponderante sobre una estructura es la presión horizontal de viento, a medida que ésta 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.

Se define normalmente como edificio en altura a aquellas construcciones en las que las proporciones entre el alto y el ancho son mayores a 5:1 y en las que la respuesta frente a la acción dinámica del viento es el factor determinante del diseño estructural (Rastorfer, 1985A, p.145).

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

¹ "(...) it would seem that every increase in size is accompanied by a decrease in efficiency. This is not always true, and there are many structures whose increasing efficiency due to increasing volume with proportionately decreasing surface continues up to the limits of the strength of the materials. If we consider the case of two similar obelisks of different size it can be shown that as long as the strength of the material is not exceeded the larger will resist winds that will blow down the smaller, and in the case of similar chimneys the larger may be expected to be capable of standing a greater storm than the smaller (...)" (from: Sir D`Arcy Wentworth Thompson, "On Growth and Form"). (Goldsmith, 1976, p.34)

las acciones gravitatorias como las horizontales y una estructura secundaria interior que únicamente resistía cargas gravitatorias (Goldsmith, 1976, p.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, p.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 S.O.M., Goldsmith, Kahn y Graham realizarán un análisis espacial del comportamiento mecánico del rascacielos a partir del cual optimizarán progresivamente la retícula isótropa de pilares, vigas y

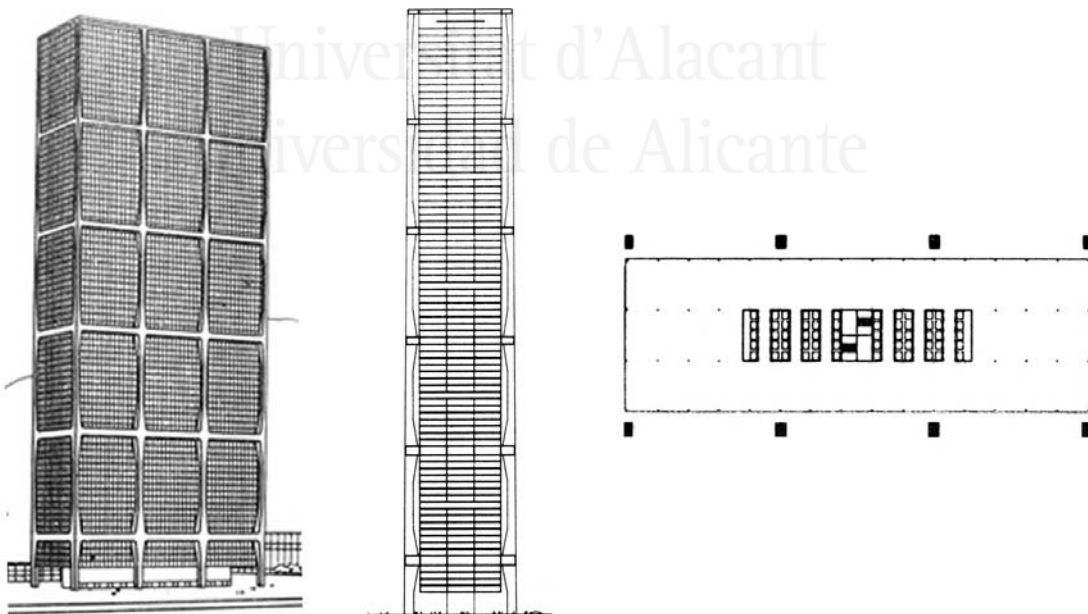


Imagen 202: Rascacielos con estructura de hormigón armado, Myron Goldsmith, 1953. Axonométrica y planta tipo. Ilustraciones extraídas de "Técnica y arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-1990" (Abalos et al., 1995, pp.58 y 59).

losas, definiendo nuevas tipologías eficaces desde un punto de vista geométrico y estático.

Goldsmith y Kahn perfeccionan los métodos analíticos y experimentales utilizados para el análisis de edificaciones en altura.

El viento, además de las solicitaciones de momento y cortante, características de la flexión, plantea otros inconvenientes difíciles de traducir en hipótesis simples de cálculo: se trata de una acción dinámica, determinable en forma semiprobabilística, cuya variación lleva a problemas de fatiga en los materiales y produce vibraciones en el edificio. El período de vibración y la oscilación en la punta son entonces algunos de los parámetros físicos que es necesario controlar, aumentando la rigidez. La presencia de sismos, por otra parte, introduce la necesidad de dotar al edificio con cierta flexibilidad. El período de oscilación debe optimizarse, por lo tanto, para atender a ambos factores cuando el edificio se construya en una zona sísmica.

El objetivo del diseño de esta tipología será lograr la máxima **eficacia**, entendida como el **mínimo aumento de la masa estructural** por efecto de las acciones horizontales (Abalos et al., 1995, pp.60-61).

En el edificio Chestnut-Dewitt Apartments (1961-1965), en Chicago, Goldsmith, Kahn y Graham construyen por primera vez una estructura en la que un tubo perforado exterior resiste las cargas horizontales y no existe, en una primera instancia, penalización por viento (Abalos et al., 1995, pp.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 al., 1995, pp.65-66).

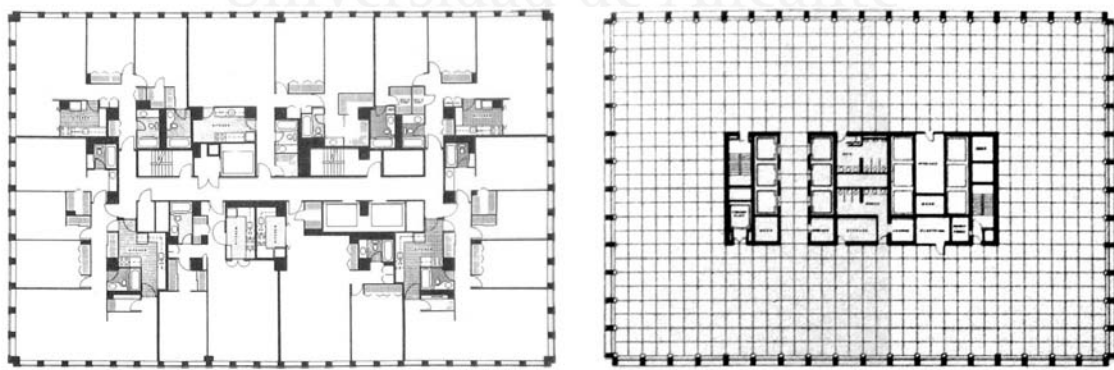


Imagen 203: Planta tipo de los Chestnut-Dewitt Apartments (1961-1965) y del Brunswick Building (1962-1966), Myron Goldsmith, Fazlur Kahn y Bruce Graham (S.O.M.). Ilustraciones extraídas de "Técnica y arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-1990" (Abalos et al., 1995, p.63) y de "Structuring the loop: A discussion of SOM's Brunswick building in the context of redevelopment of the Chicago Loop area" (Hanson, 1966, p.197).

En la planta de un edificio con estructura de "tubo dentro de tubo" pueden verse claramente 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 (1970-1974), también en Chicago, realizado por Kahn y Graham, representa el último nivel de optimización de la tipología estructural del rascacielos alcanzado por el equipo de S.O.M. 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, que evitan el "retraso" en la transmisión del cortante y la acumulación de sollicitaciones en los pilares de las esquinas (Abalos et al., 1995, pp.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.

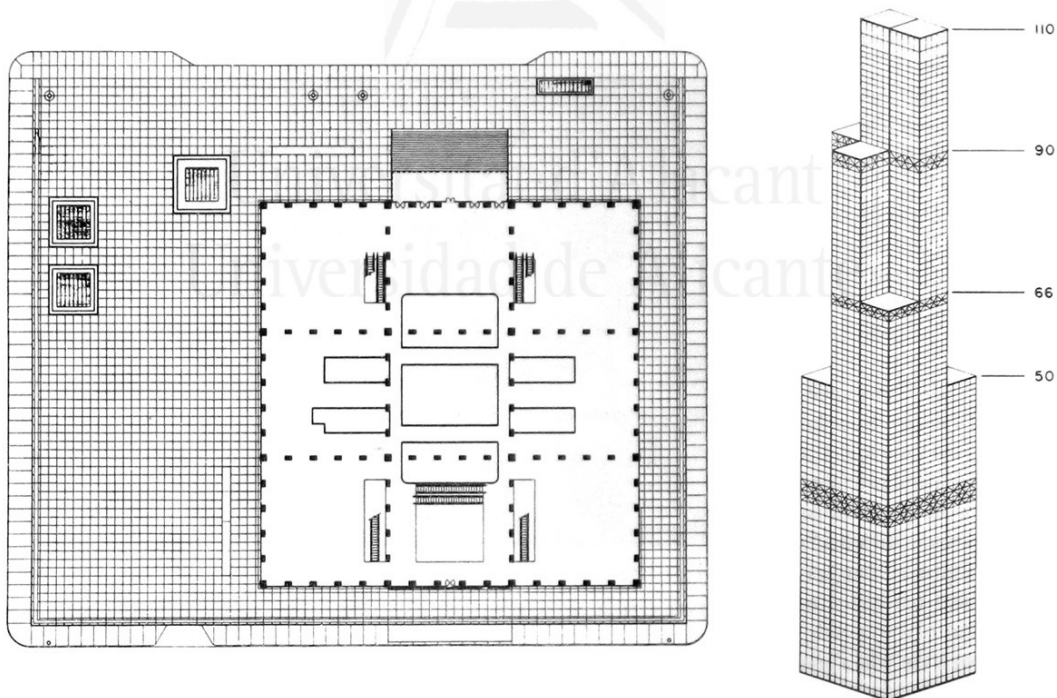


Imagen 204: Planta baja y axonométrica estructural de la Torre Sears (1970-1974), Fazlur Kahn y Bruce Graham (S.O.M.). Ilustraciones extraídas de "Técnica y arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-1990" (Abalos et al., 1995, pp.73 y 72).

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 alfombra de Sierpinski, descrita por primera vez por Waclaw Sierpinski en 1916, es una generalización a dos dimensiones del polvo de Cantor y su dimensión de Hausdorff es $\log(8)/\log(3)$, es decir, aproximadamente 1,89.

La construcción de esta figura fractal 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.

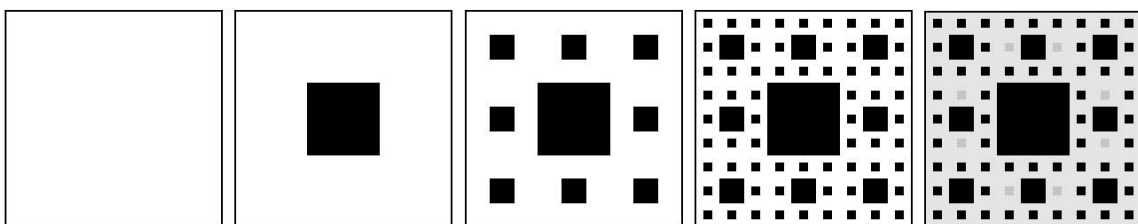


Imagen 205: Alfombra de Sierpinski, Waclaw Sierpinski, 1916. Tres iteraciones y esquema modificado de la tercer iteración. Ilustración realizada por el autor.

Si a la figura que obtenemos en la tercera iteración le quitamos 8 de los 64 cuadrados más pequeños, generados en la última iteración (marcados en gris en la última figura de la imagen 204), obtenemos 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.

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 tercer 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 tercer iteración se asemeja al esquema de un "haz de tubos", la figura que resulte de una cuarta iteración podría sugerirnos 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.

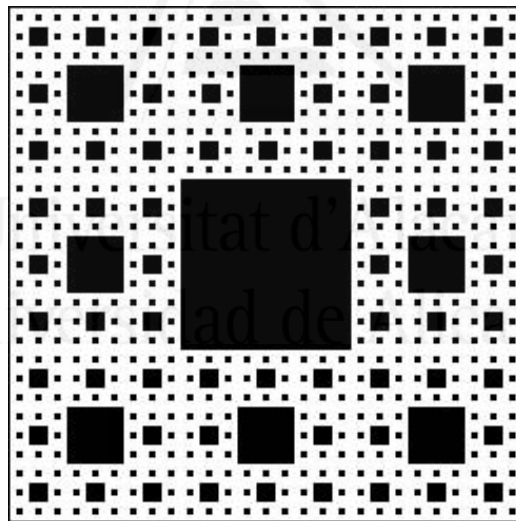


Imagen 206: Cuarta iteración de la Alfombra de Sierpinski, Waclaw Sierpinski, 1916.
Ilustración realizada por el autor.

En las décadas de los años 1970 y 1980, el desarrollo de la modelística aeroelástica permitió una profundización en la estimación de las acciones horizontales sobre las estructuras y el desarrollo de los programas informáticos y de métodos matriciales de cálculo, como el Método de los Elementos Finitos, permitió la realización de cálculos analíticos más exactos en estructuras tridimensionales con geometrías complejas (Abalos et al., 1995, p.75).

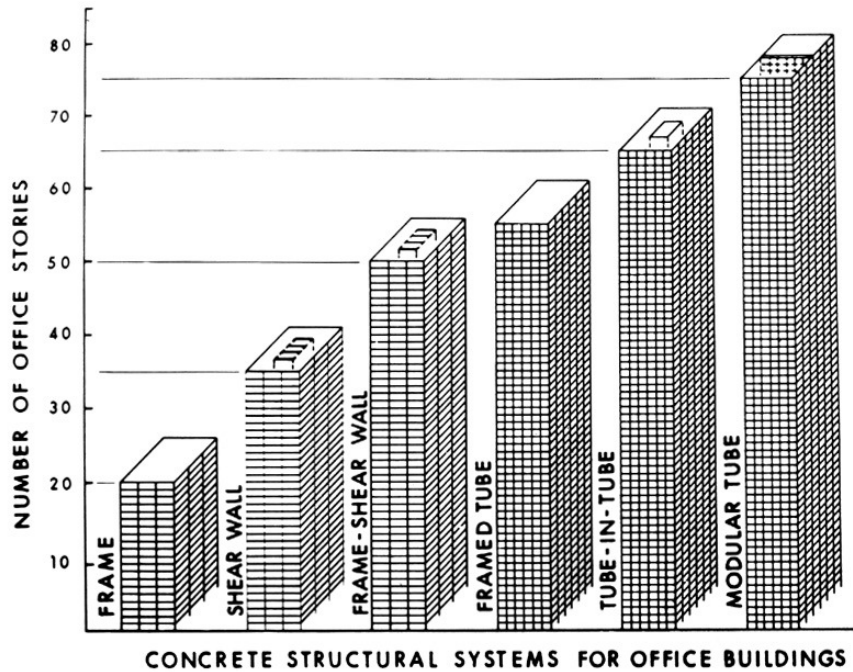


Imagen 207: Tabla comparativa de las alturas que es posible alcanzar con los distintos sistemas estructurales, según Fazlur Kahn. Ilustración extraída de "Tall buildings" (Kahn, 1976, p.53).

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 estructural¹ 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.

La fuerza lateral del viento tiende a hacer girar al edificio y a desplazarlo horizontalmente; en el esfuerzo de la estructura por resistir estas deformaciones aparece la vibración. Según LeMessurier la forma ideal para resistir el vuelco, el desplazamiento y la vibración, 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, p.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.

¹ *We have a long way to go to make the skyscraper what it really can be, and it doesn't have to be super-tall to do this. There are ways to open up space, to make it more economical and to face the problems of fire and transportation and pedestrian joy at the bottom.* LeMessurier, citado por Rastorfer (Rastorfer, 1985A, p.148)

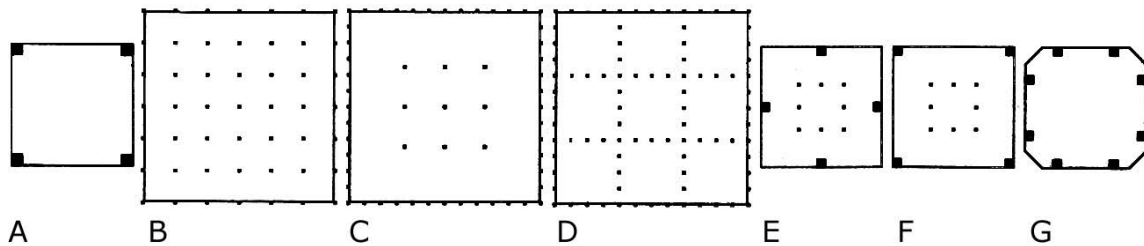


Imagen 208: Distintas configuraciones geométricas de pilares en edificios de planta cuadrada, analizadas a través del índice BRI ("Bending Rigidity Index") por William J. LeMessurier. Ilustraciones extraídas de "William J. LeMessurier's super-tall structures: A search for the ideal" (Rastorfer, 1985A, p.147).

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. Quedan aún muchos problemas por resolverse en la optimización de la tipología estructural de los rascacielos, más allá del problema de la altura.¹

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 LeMessurier, la ubicación ideal de los pilares es en las esquinas, allí donde más se alejan del centro de gravedad (Rastorfer, 1985A, p.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 imagen 207) 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 podido ser ubicados en los vértices de la planta, tal como muestra la figura F, el BRI hubiera ascendido a 56.

¹ *I get very excited about the ideal. Underlying my search for the ideal is the pursuit of elegance. Who am I designing for in the end? For my own soul.* LeMessurier, citado por Rastorfer (Rastorfer, 1985A, p.145)

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.

Estas ideas tienen un claro 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, éste sería superior a 100.

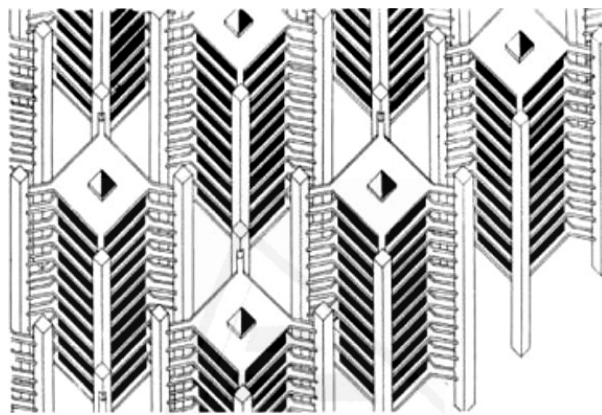


Imagen 209: La "Ciudad de la Circulación" de Theo van Doesburg (1929). Ilustración extraída de "*Arquitectura moderna en los Países Bajos, 1920-1945*" (García García, 2010, p.88).

En el proyecto para el banco Sothwest de Houston, ganador de un concurso de diseño 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, p.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 éstos 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 éstos disminuyen de sección a medida que se elevan.

El Erehwon 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 plantea el diseño de una torre lo más alta posible que pueda soportar, con un período de oscilación de 10 segundos, un huracán con vientos de hasta 225 km/hora (Rastorfer, 1985B, p.152).

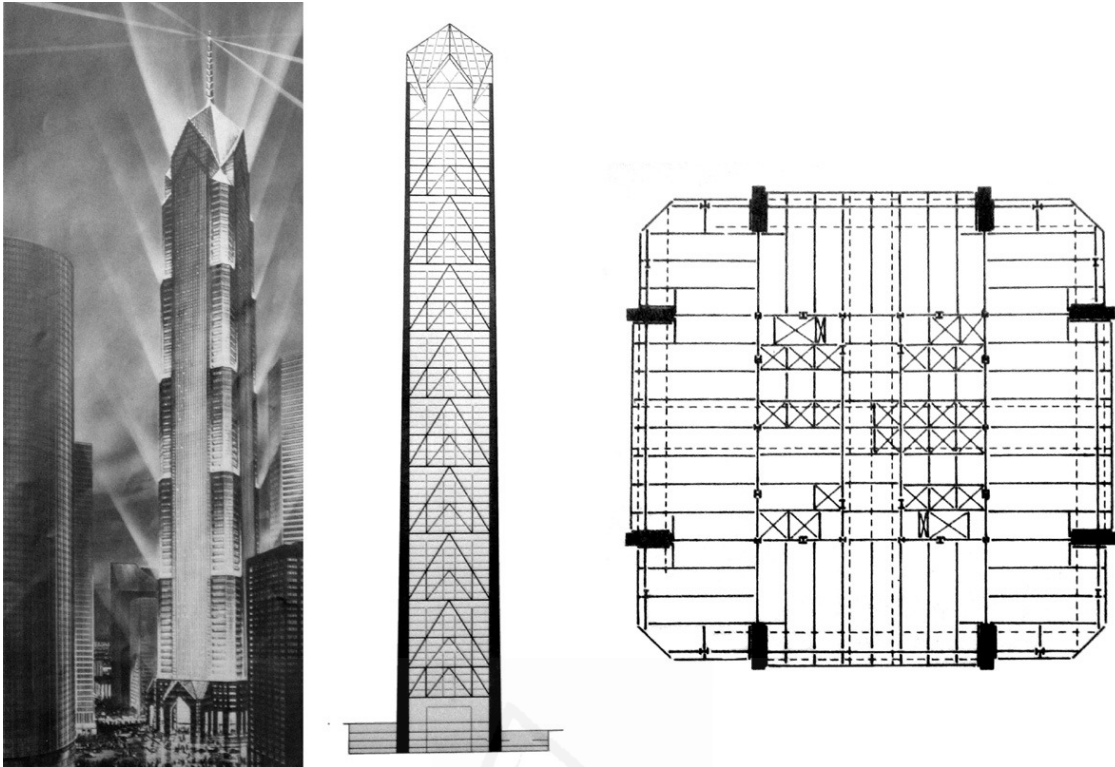


Imagen 210: Banco Sothwest de Houston, Helmut Jahn y William J. LeMessurier, 1982. Imagen, sección y planta tipo. Ilustraciones extraídas de "*William J. LeMessurier's super-tall structures: A search for the ideal*" (Rastorfer, 1985A, pp.149 y 148).

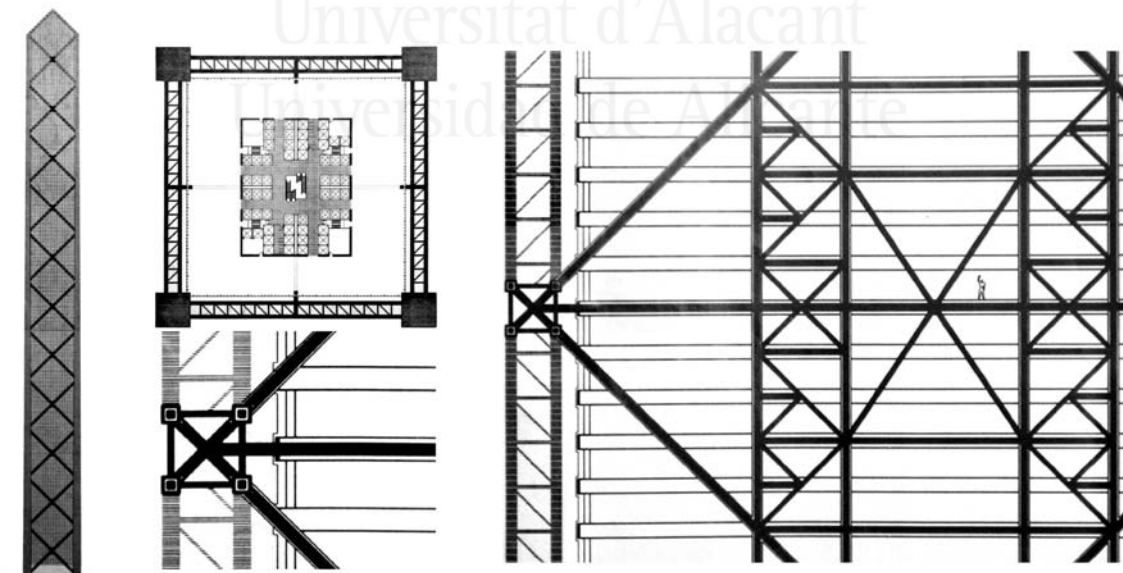


Imagen 211: Erawon Center, William J. LeMessurier, 1980. Fachada, planta tipo y detalles de las diagonales de rigidización. Ilustraciones extraídas de "*William J. LeMessurier's super-tall structures: architecture/engineering*" (Rastorfer, 1985B, p.152) y de "*William J. LeMessurier's super-tall structures: A search for the ideal*" (Rastorfer, 1985A, p.144).

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 Erehon Center en condiciones de máxima adversidad, debido a los sismos y a los tifones que afectan a la zona (Suner, 1990, p.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.

La planta del edificio se divide en cuatro triángulos a través de sus diagonales, generándose cuatro volúmenes prismáticos que alcanzan diferentes alturas y establecen un juego de dislocamiento volumétrico que acerca al suelo el centro de gravedad, modificando el período de vibración y disminuyendo la aceleración por sismo. A partir del nivel 51, únicamente un cuarto de la planta continúa hasta la cima (Abalos et al., 1995, p.83-84).

En las plantas bajas se suspenden las diagonales interiores y se reemplazan por núcleos para liberar al espacio de acceso de interferencias estructurales.



Imagen 212: 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.

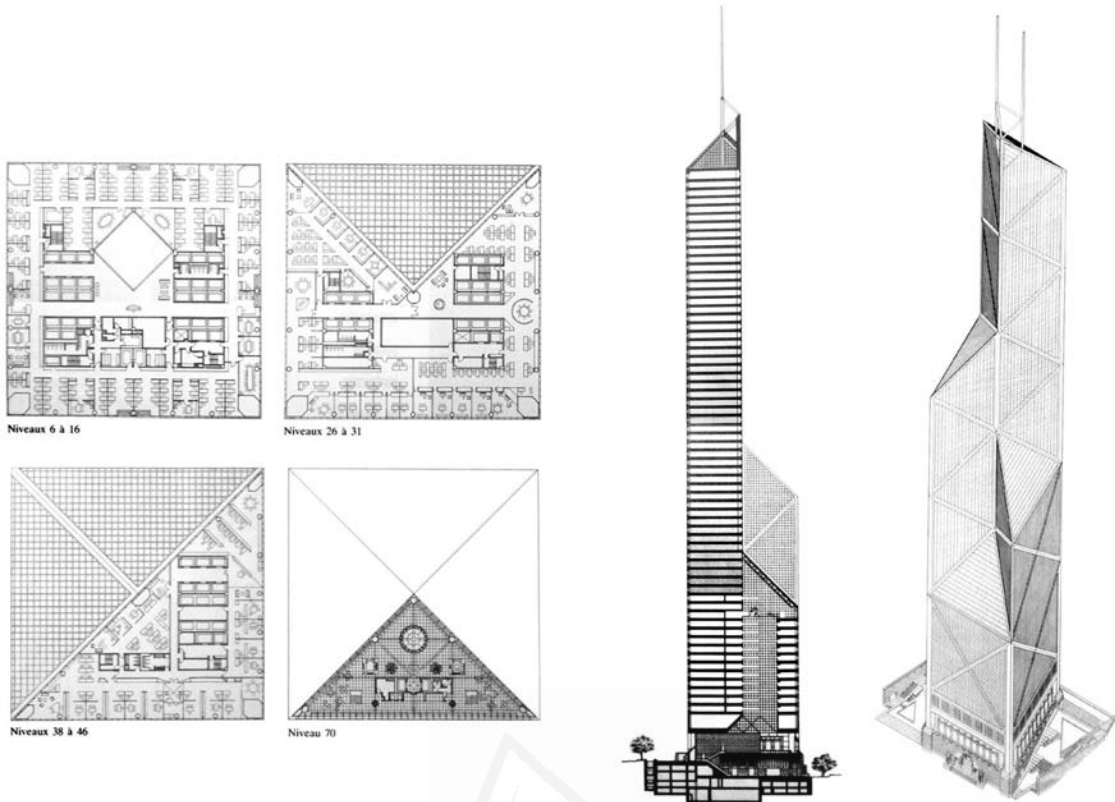


Imagen 213: Banco de China en Hong Kong (1985-1989), Ieoh Ming Pei. Plantas de los niveles 6 a 16, 26 a 31, 38 a 46 y 70, sección y axonométrica. Ilustraciones extraídas de "Banque de Chine à Hong Kong" (Suner, 1990, pp.123 y 122) y de "Ieoh Ming Pei. megastructure, symbol of the Chinese challenge" (Techniques & Architecture, 1987, p.85).



Imagen 214: "Banco de China" de Ieoh Ming Pei y "Hong Kong and Shanghai Bank" de Norman Foster, Hong Kong. Fotografía del autor.

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 de 16 pilares de hormigón armado, separados entre sí 7,9 y 10 metros alternadamente y conectados entre ellos por vigas ligeramente arqueadas (Pearson, 1999, p.99).

En el interior de cada torre existe un núcleo de hormigón armado de unos 23 metros de lado que ocupa, en promedio, aproximadamente el 23% de la planta del rascacielos, superando el 15% que ocupa el núcleo del World Trade Center de Nueva York, por ejemplo.

Los forjados, el puente que conecta ambas torres y los pináculos de la cima, fueron construidos con estructura de acero.

Desde un punto de vista tipológico no existe ninguna innovación en la estructura de estas torres, que utilizan el sistema de "tubo dentro de tubo". Pero la planta circular y las grandes dimensiones del tubo interior, que optimizan la inercia de la masa resistente, junto con el empleo de hormigón de alta resistencia: unos 70 MPa, hicieron posible alcanzar una altura inédita en su momento.

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, p.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.

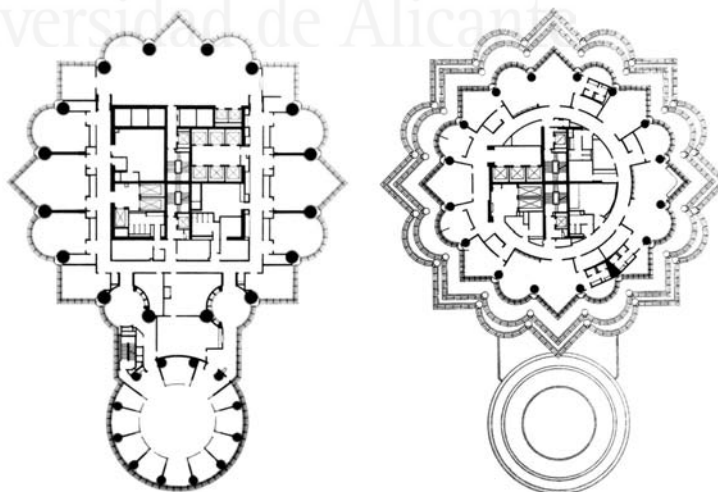
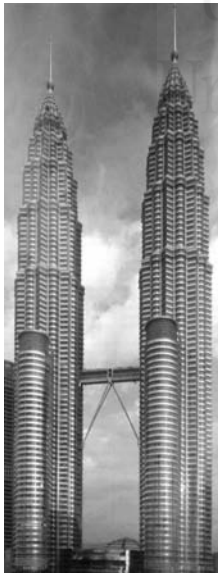


Imagen 215: Torres Petronas en Kuala Lumpur (1994-1998), César Pelli & Associates. Imagen de las torres ya construidas y dos plantas tipo: en zona del Centro de Conferencias y en zona de oficinas. Ilustraciones extraídas de *"Other than their status as the world's tallest buildings, what else do Cesar Pelli's Petrona Towers have going for them?"* (Pearson, 1999, pp.92 y 97).

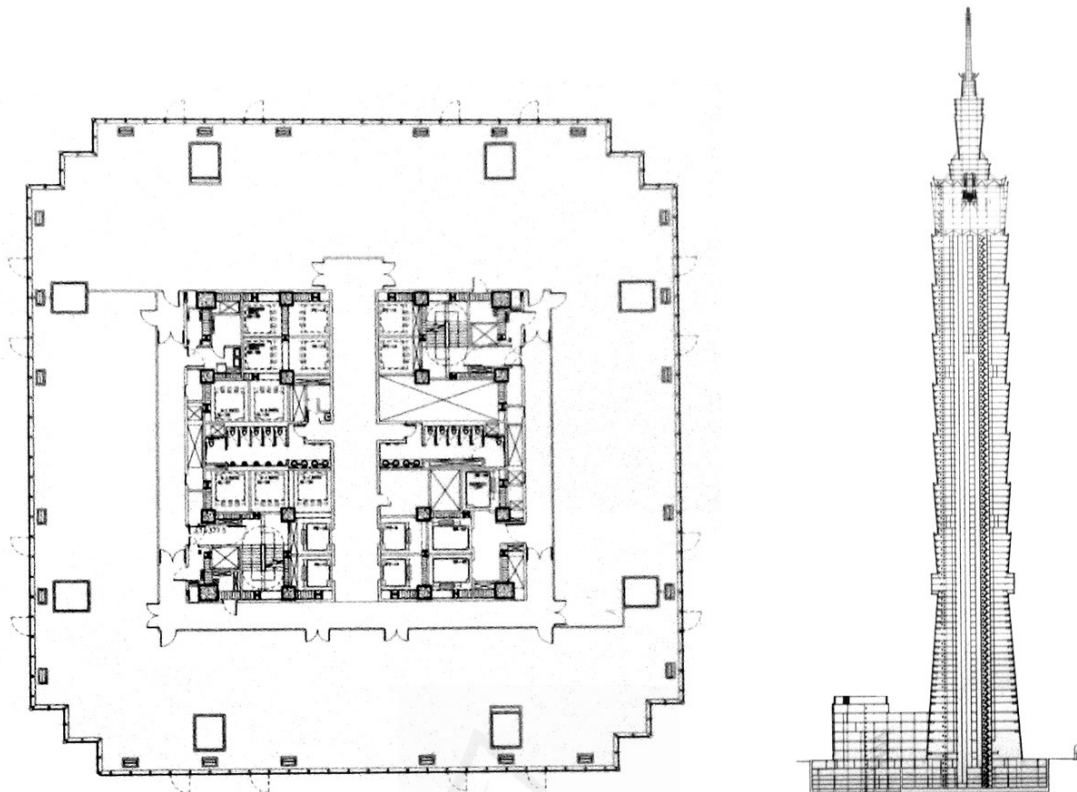


Imagen 216: Torre Taipei 101 en Taipei, Taiwan (1997-2004), C. Y. Lee & Partners. Planta del nivel 46 y sección. Ilustraciones extraídas de "C.Y.Lee & Partners / Architects & Planners. Taipei 101" (A+U, 2005D, p.113).

La Torre Burj Khalifa en Dubai (2004-2010), diseñada por Adrian Smith y George Efstathiou de S.O.M., 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, p.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, p.89) y permite optimizar las vistas desde el interior de las alas sin que existan interferencias con otros sectores del edificio.

La estructura de los primeros 155 niveles se resolvió en hormigón armado de alta resistencia (de hasta 100 MPa de resistencia característica). Por encima de este nivel y hasta la cima, la estructura continúa en acero.

La presión del viento, según el ingeniero estructuralista William Baker de la firma S.O.M, es el principal factor a tener en cuenta en el diseño de un rascacielos ¹ y puede producir tanto flexiones como rotaciones en un edificio con la forma de la Torre Burj Khalifa.

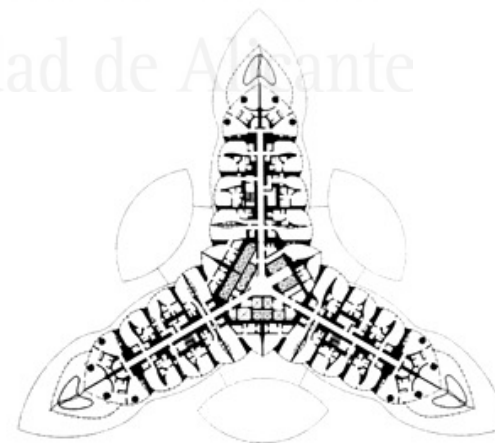
¹ "Tall building design is dominated by wind forces, even in most seismic areas where earthquakes are a major concern", Baker says. (Minutillo, 2010, p.89)



TYPICAL OFFICE FLOOR



TYPICAL RESIDENTIAL FLOOR



TYPICAL HOTEL FLOOR

Imagen 217: Torre Burj Khalifa en Dubai (2004-2010), Adrian Smith y George Efstathiou (S.O.M.). Vista del edificio en obra y plantas tipo de las zonas de hotel, viviendas y oficinas. Ilustraciones extraídas de *"Beyond limits. The Burj Khalifa's designers tackle extreme height and extreme climate to create a landmark for the 21st century"* (Minutillo, 2010, p.89) y de *"The completion of the world's tallest skyscraper raises intriguing questions about the significance of this gleaming, spiraling form"* (Kamin, 2010, p.82).

El núcleo hexagonal, por lo tanto, fue diseñado con una gran rigidez a la torsión para controlar las rotaciones del edificio.

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 y hasta prácticamente los extremos, culminando en muros transversales más gruesos a modo de martillos (Baker, 2010, p.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.

Los ingenieros Rowan Williams Davies and Irwin (RWDI) realizaron ensayos durante dos años en un túnel de viento en Ontario, Canadá, estudiando la incidencia del viento sobre el edificio según las 6 direcciones principales: en las direcciones de las alas y en las intermedias. Como resultado de estos ensayos se recomendó girar la planta 120° con respecto a su posición original y suavizar los escalonamientos en espiral de la planta, de modo de evitar la formación de vórtices.

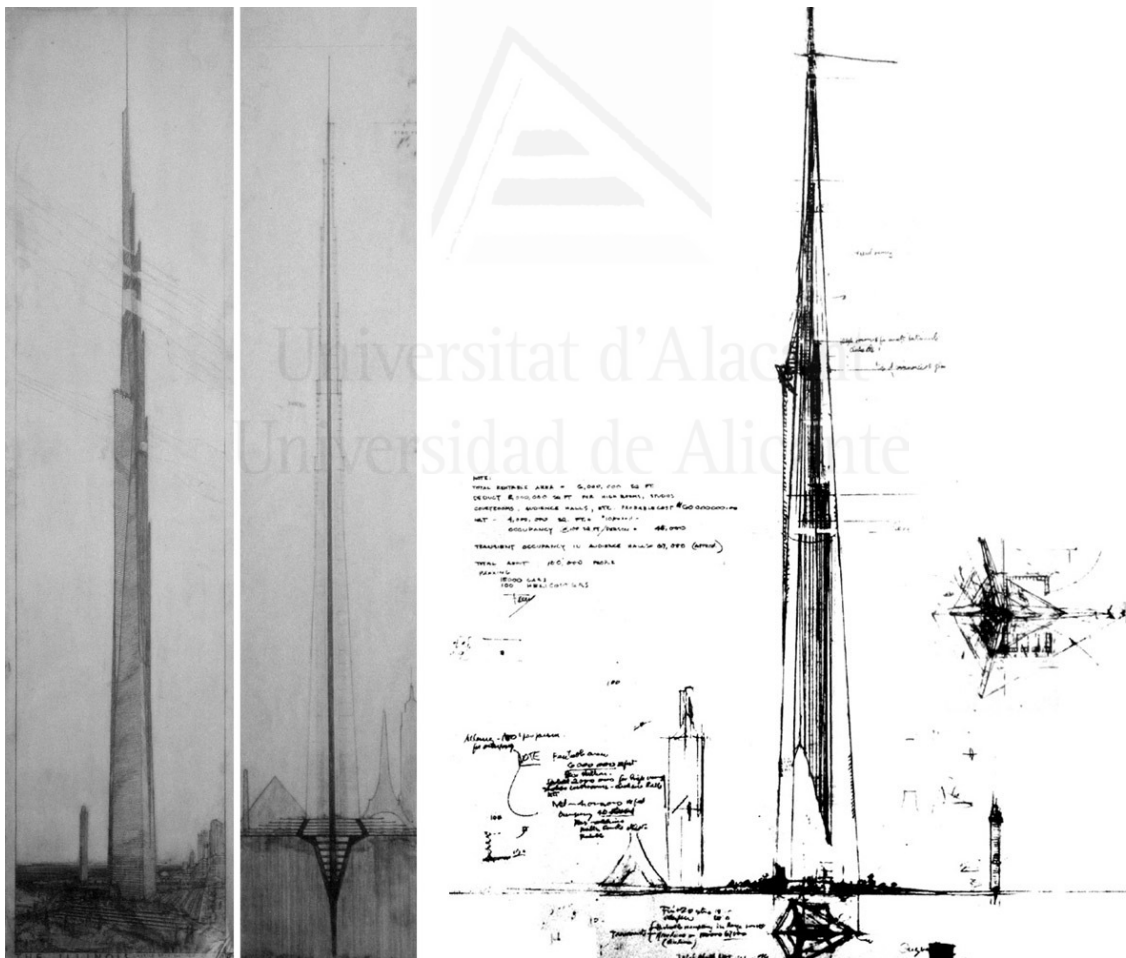


Imagen 218: Torre Illinois de una milla de altura (1956), Frank Lloyd Wright. Perspectiva, sección y croquis. Ilustraciones extraídas de "Frank Lloyd Wright" (Brooks et al., 1991, p.170) y de "Testamento" (Wright, 1961, p.199).

La estructura del Burj Khalifa es tipológicamente única y si bien recurre a sistemas estructurales convencionales,¹ tales como núcleos, pantallas y pilares, es su organización en planta según una particular disposición geométrica el principal factor que permite alcanzar, al conjunto de la estructura, tan elevados niveles de rigidez frente a las deformaciones introducidas por el viento.

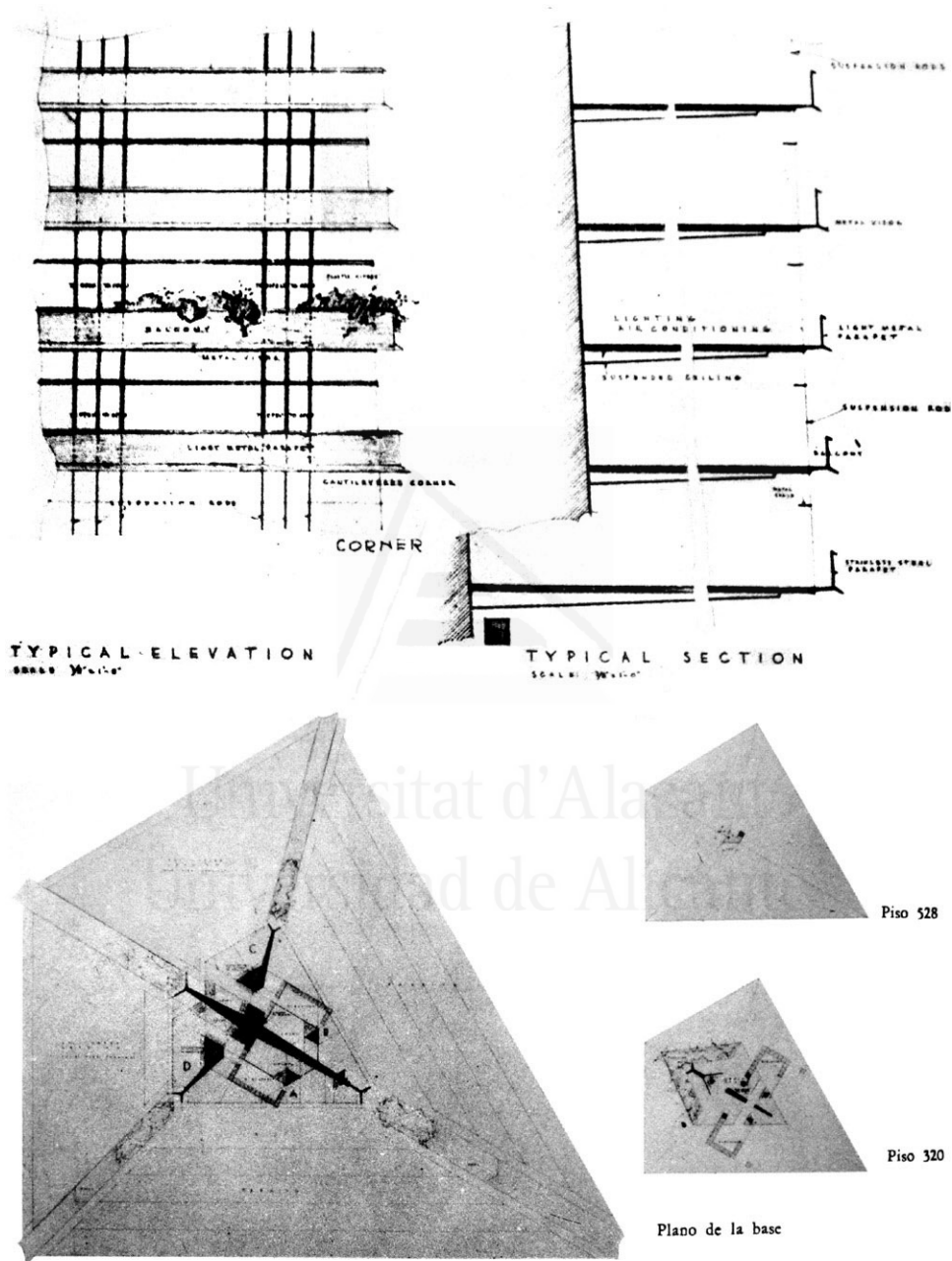


Imagen 219: Torre Illinois de una milla de altura (1956), Frank Lloyd Wright. Detalles de la fachada y de la sección y plantas: planta baja y niveles 320 y 528. Ilustraciones extraídas de "Testamento" (Wright, 1961, pp.200-201).

¹ (...) "These are very conventional systems, just arranged in a unique manner", says William Baker, structural engineer partner at SOM. (Minutillo, 2010, p.89)

Si bien formalmente no existen similitudes entre la estructura de este rascacielos y la de aquellos diseñados por William J. LeMessurier en las décadas de 1970 y 1980, pueden reconocerse en su diseño algunas de sus principales ideas: la estructura está íntimamente relacionada con la planta del edificio, su resistencia depende fundamentalmente del modo en que los pilares, pantallas y núcleos se distribuyen en planta, el momento total de inercia de toda la estructura se optimiza conformando un único sistema resistente a la flexión y toda la estructura vertical colabora para resistir tanto las cargas gravitatorias como las horizontales.

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 esta torre de una milla de altura (aproximadamente 1.600 metros), fueran siempre resistidas por las dos patas que se encontraban en el lado opuesto (Wright, 1961, pp.198-200).

Este núcleo iba disminuyendo sus dimensiones a medida que alcanzaba mayores alturas y continuaba bajo tierra hasta encontrar el lecho rocoso, de modo de asegurar la estabilidad global del edificio frente al vuelco. Su gran inercia geométrica era, por lo tanto, la principal responsable de la gran rigidez del rascacielos.

Las losas de los distintos niveles, por otra parte, descargaban sobre el núcleo central y mensulaban hacia el exterior, afinándose hacia los bordes. En sus interiores huecos se preveía la circulación de los conductos de aire acondicionado, iluminación, etc. Esta configuración había sido ya probada por Wright en el Hotel Imperial de Tokyo (1915-1922), en la Torre Price en Bartlesville, Oklahoma (1935-1936) y en la torre del Centro de Investigación de la empresa Johnson en Racine, Wisconsin (1947).

En la primer década del siglo XXI aparecen diversos edificios en altura cuyas macroestructuras consisten en tubos exteriores compuestos por mallas de geometrías complejas.

Estos tubos experimentan formas novedosas y atractivas a la vez que investigan acerca de la rigidez de múltiples configuraciones geométricas. Conceptualmente, podrían considerarse estas propuestas como exploraciones sobre las posibilidades de conformación de tubos huecos con los nuevos medios que la industria de la construcción ofrece, continuando las ideas de Le Ricolais sobre las estructuras esqueléticas y las de LeMessurier sobre la inercia estructural de los edificios en altura.

Norman Foster ha experimentado con el diseño de tubos estructurales basados en el uso de mallas de barras trianguladas en proyectos como la Torre del Milenio en Tokio (1989), de 386 metros de altura (Fernández-Galiano, 1999, p.109) 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 (ver imagen 163).

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, pp.86-87). Este patrón se repite a distintas escalas en la fachada vidriada y en la malla de protección solar, generándose una imagen fractal compleja como resultado de la superposición de estas diferentes capas.

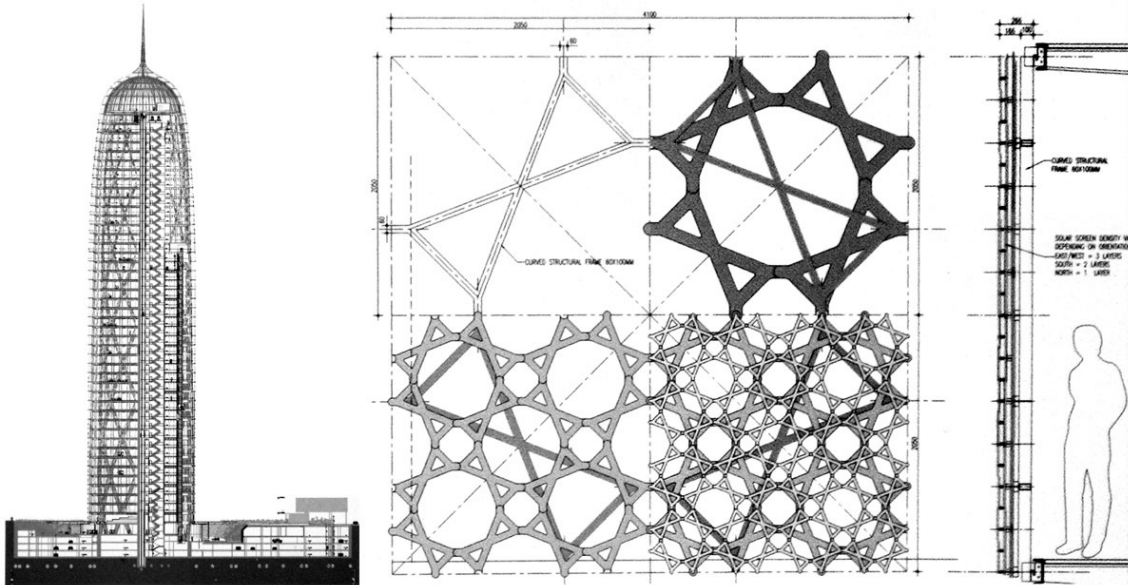


Imagen 220: Torre en Doha, Qatar (2002), Jean Nouvel. Sección y detalle de la fachada con superposición de capas: estructura, cerramiento vidriado y protección solar. Ilustraciones extraídas de "Jean Nouvel. Tower in Doha. Doha, Qatar, 2002" (A+U, 2005C, p.86).

Zaha Hadid ha realizado diversos proyectos de rascacielos en los que utiliza núcleos estructurales exteriores con geometrías 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, en Dubai, que presenta un revestimiento exterior portante con múltiples perforaciones irregulares (Bosse, 2007, p.92).

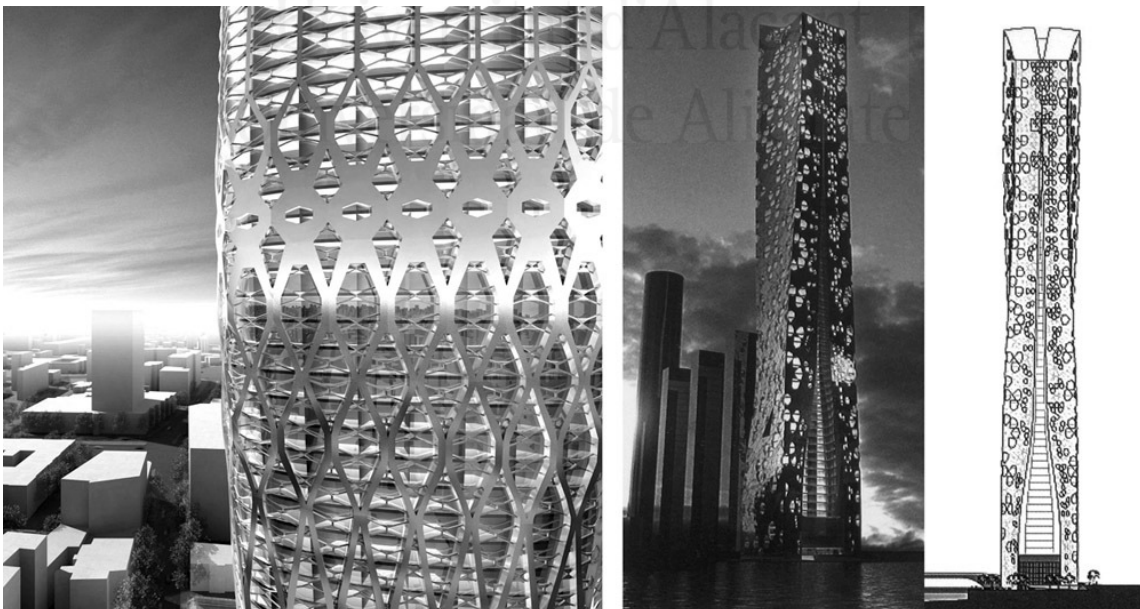


Imagen 221: Torre Dorobanti en Bucarest (2008) y Marsa Dubai Residential en Dubai (2005), Zaha Hadid. Ilustraciones extraídas de Internet < <http://www.zaha-hadid.com/architecture/dorobanti-tower/> > y de "The injection of Building Culture into the Construction Boom - New Architecture in Dubai" (Bosse, 2007, p.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, consiste en un basamento de 12 niveles, dos torres principales que se inclinan unos 6° y un remate suspendido a 36 niveles de altura con un espesor variable entre los 9 y los 13 niveles, todos ellos combinados para formar un único tubo estructural continuo (Carroll et al., 2005, pp.4-5). De este modo, la estructura adquiere la rigidez suficiente como para resistir el enorme momento de vuelco producido por las cargas de viento y sismo, junto a la gran excentricidad que por diseño presentan las cargas gravitatorias.

Dicho 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 conjunto entre 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 sollicitaciones eran menores, de modo que la imagen final del edificio refleje las tensiones a las que el volumen resulta sometido.

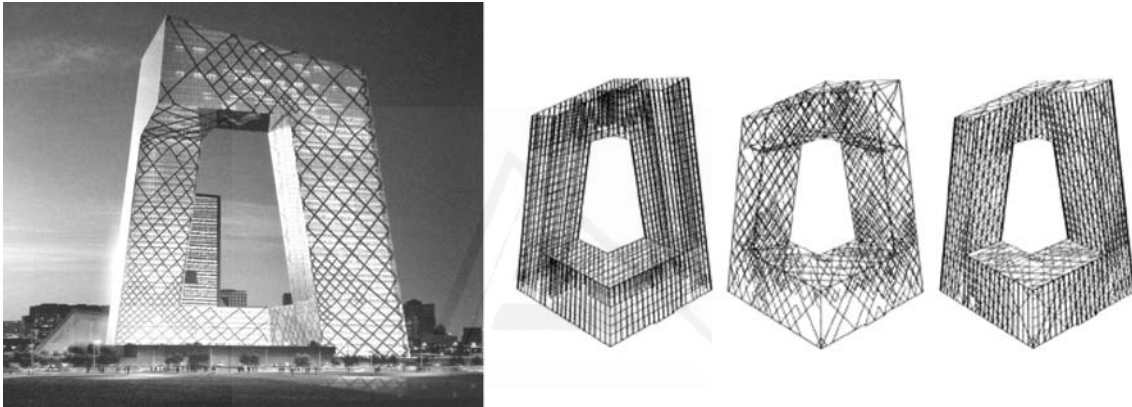


Imagen 222: Edificio para la "China Central Television" (CCTV) en Pekín, Rem Koolhaas y Ove Arup (2005-2008). Vista exterior y esquemas geométricos del tubo estructural. Ilustraciones extraídas de "CCTV New Headquarters, Beijing, China, 2003-2008" (Balmond, 2006K, p.277) y de "CCTV headquarters, Beijing, China: building the structure; Architects: OMA" (Carroll et al., 2005, p.5).

4.4.3.4 Los "Umbrella buildings"

A finales de la década de 1960 el desarrollo tecnológico ya 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 comienza 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 italiano **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, p.129).

En 1969 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, p.128).

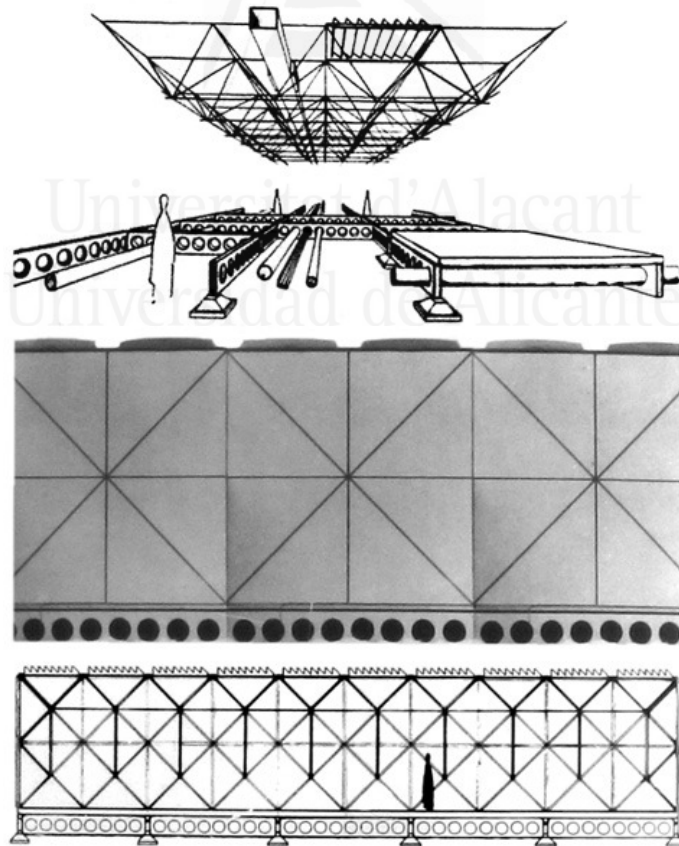


Imagen 223: Sistema abierto para Laboratorios y Oficinas (1969), Renzo Piano. Croquis, fachada y sección. Ilustraciones extraídas de "Survey of Works" (Piano, 1973A, p.128).

Cada uno de estos elementos constructivos 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 británico Richard Rogers, proyectó otro Sistema Industrializado para una fábrica, basado en 5 componentes (Piano, 1973A, pp.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 general, en grandes 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 mecánica 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. Estos deben, finalmente, integrarse de forma natural en el edificio de modo de conformar un sistema constructivo completo.

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, p.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 la década de 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 "sandwich integrado" (Mumford et al., 1967, p.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 al., 1967, p.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 ocurrirá, algunos años más tarde, con los elementos estructurales del Centro Pompidou.

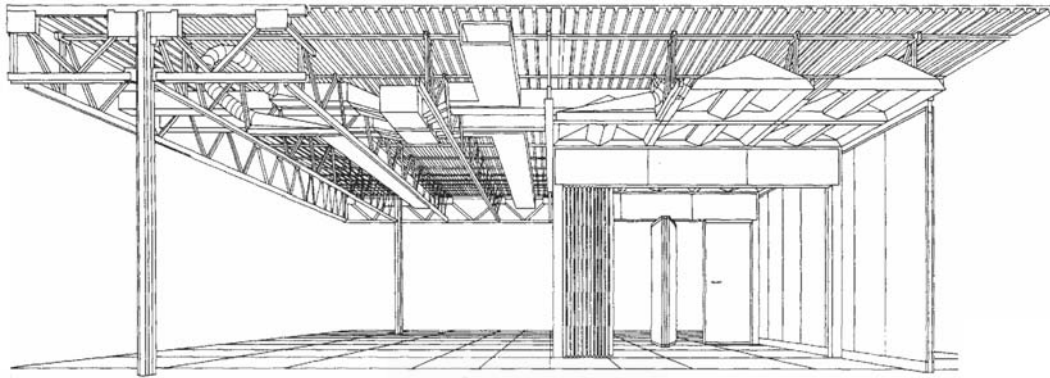


Imagen 224: Axonométrica del sistema industrializado para el SCSD (School Construction Systems Development) de Estados Unidos (1965), desarrollado por Ezra Ehrenkratz. Ilustración extraída de "SCSD: the Project and the Schools. A report from Educational Facilities Laboratories" (Mumford et al., 1967, p.59).

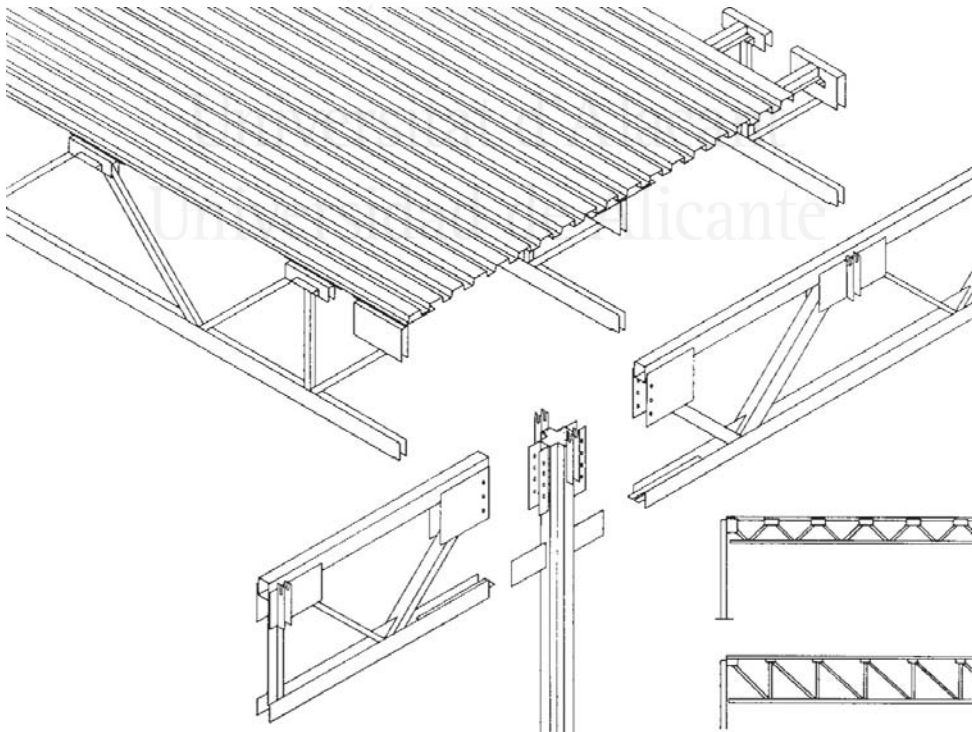


Imagen 225: Esquema estructural del sistema para el SCSD de Estados Unidos desarrollado por Ezra Ehrenkratz, 1965.

Ilustración extraída de "SCSD: the Project and the Schools. A report from Educational Facilities Laboratories" (Mumford et al., 1967, p.60).

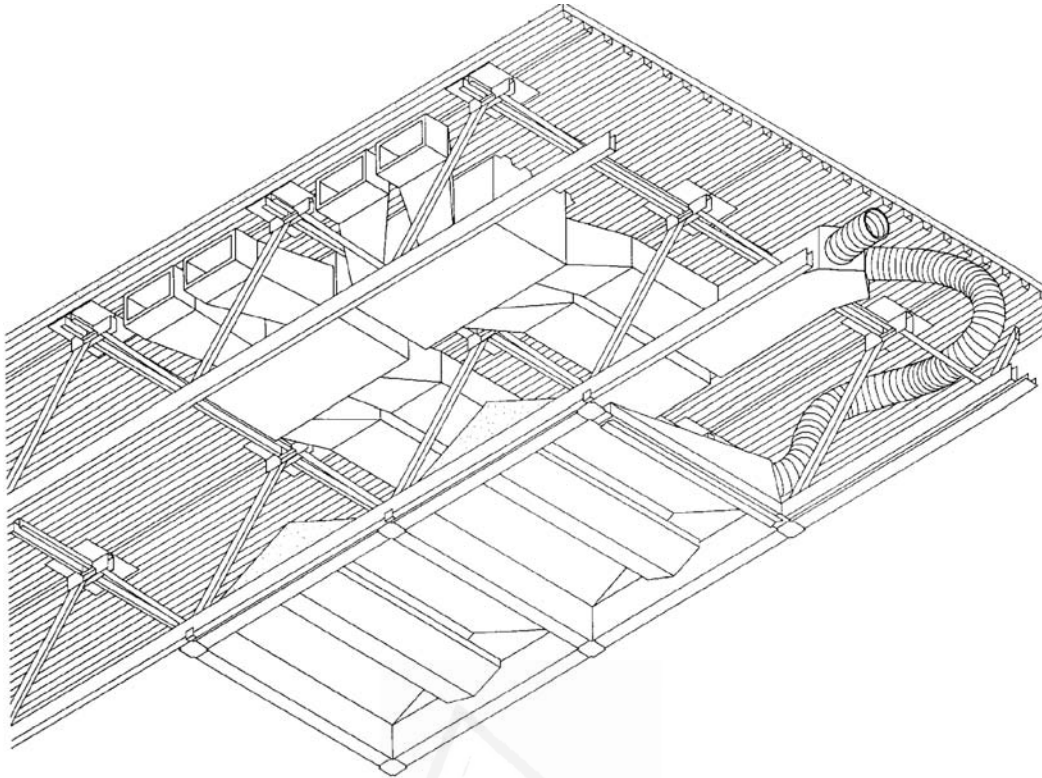


Imagen 226: Axonométrica de la cubierta "sandwich integrado" del sistema para el SCSD de Estados Unidos desarrollado por Ezra Ehrenkratz, 1965. Ilustración extraída de "SCSD: the Project and the Schools. A report from Educational Facilities Laboratories" (Mumford et al., 1967, p.62).

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 al., 1967, p.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 al., 1967, p.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. Un edificio, según Fuller, era como un microcosmos dentro del cosmos.

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, junto al mismo Fuller, el proyecto Climatroffice 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, p.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, comienza a convertirse en el ámbito de convergencia de diversas disciplinas y las innovaciones llegan de la mano de las nuevas tecnologías disponibles.

Los **"Umbrella buildings"** surgieron como una investigación sobre construcciones de grandes luces libres retomando la idea de "sandwich 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, p.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 aporricada, tanto en los tramos verticales como en los horizontales. El espesor de la estructura reticulada aporricada y la luz que es capaz de salvar definen la división entre los espacios sirvientes y servidos.

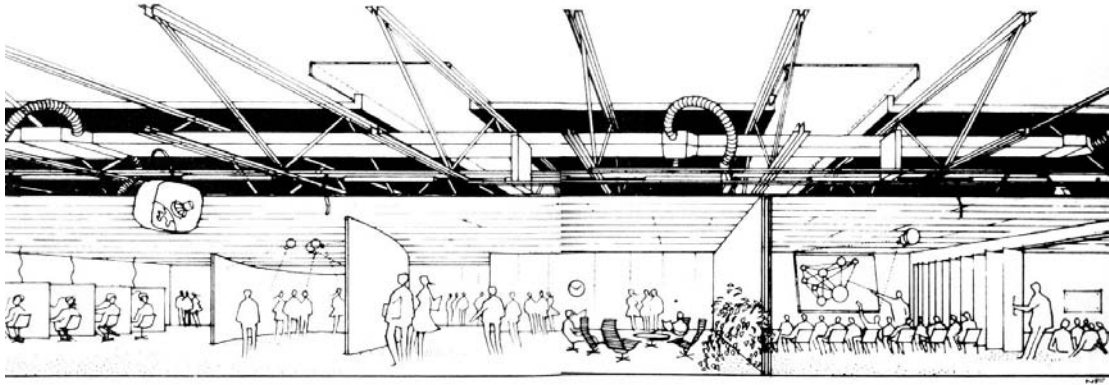


Imagen 227: Proyecto de Escuela con Local de Usos Múltiples en Newport (1967), Foster Associates. Ilustración extraída de "Norman Foster" (Fernandez-Galiano, 1999, p.30).

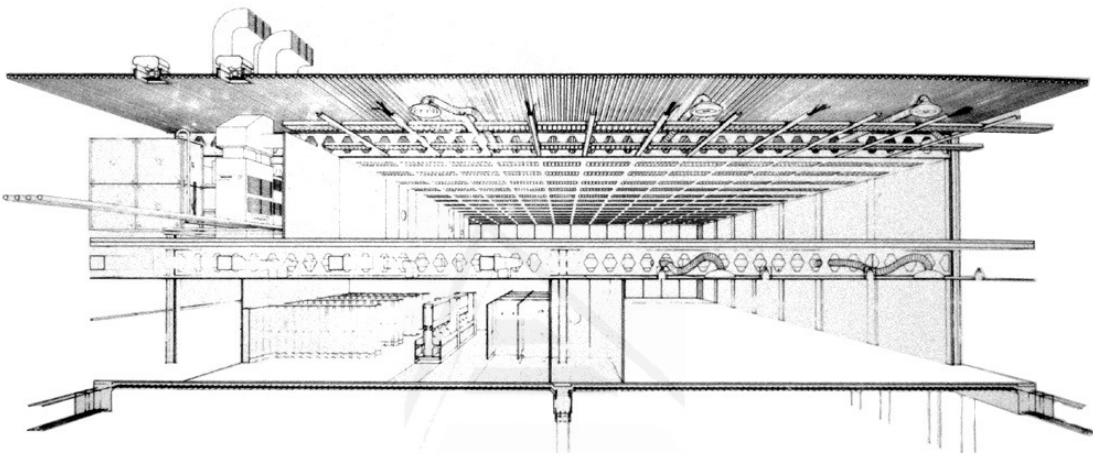


Imagen 228: Axonométrica de una Terminal de Pasajeros en los muelles de Londres (1970-1971), Foster Associates. Ilustración extraída de "Norman Foster" (Treiber, 1998, p.28).

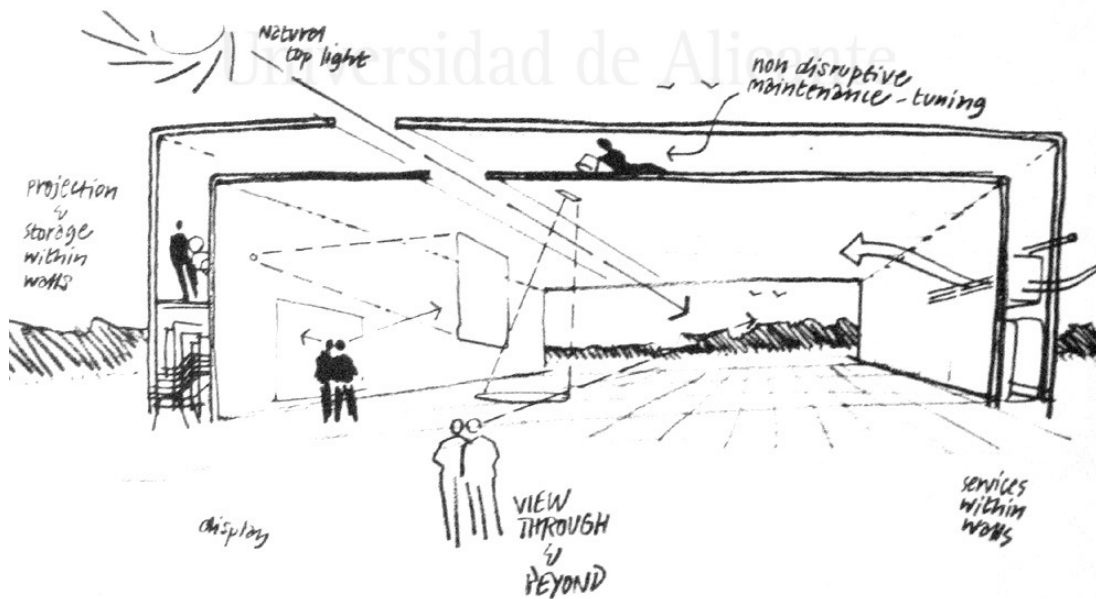


Imagen 229: Esquema de la sección del Sainsbury Centre en Norwich , Foster Associates, 1974. Ilustración extraída de "1964-1987. Norman Foster" (A+U, 1988, p.124).

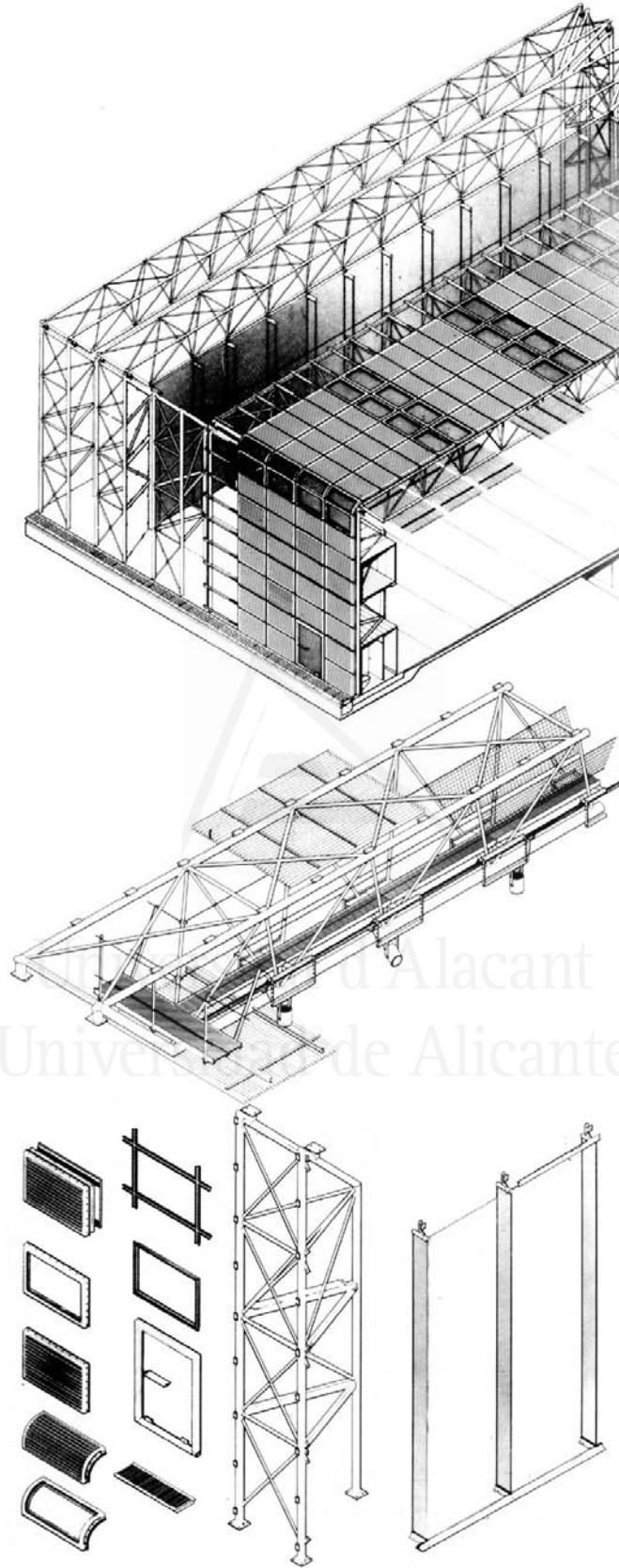


Imagen 230: Sainsbury Centre en Norwich (1974), Foster Associates. Axonómicas del sistema constructivo. Ilustraciones extraídas de "1964-1987. Norman Foster" (A+U, 1988, pp.120-121).



Imagen 231: Sainsbury Centre en Norwich (1974), Foster Associates. Ilustración extraída de "*Norman Foster*" (Fernandez-Galiano, 1999, p.48).

El edificio es totalmente prefabricado de modo que se limita el trabajo de obra al ensamblaje de los distintos elementos.

Las fachadas longitudinales y la cubierta se cierran con paneles opacos multicapa, con revestimiento reflectante al exterior y poliuretano aislante en el interior. Todos los paneles están unidos a los soportes por 6 tornillos de modo de facilitar tanto el montaje como el desmontaje.

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 de pilares de 36 x 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.

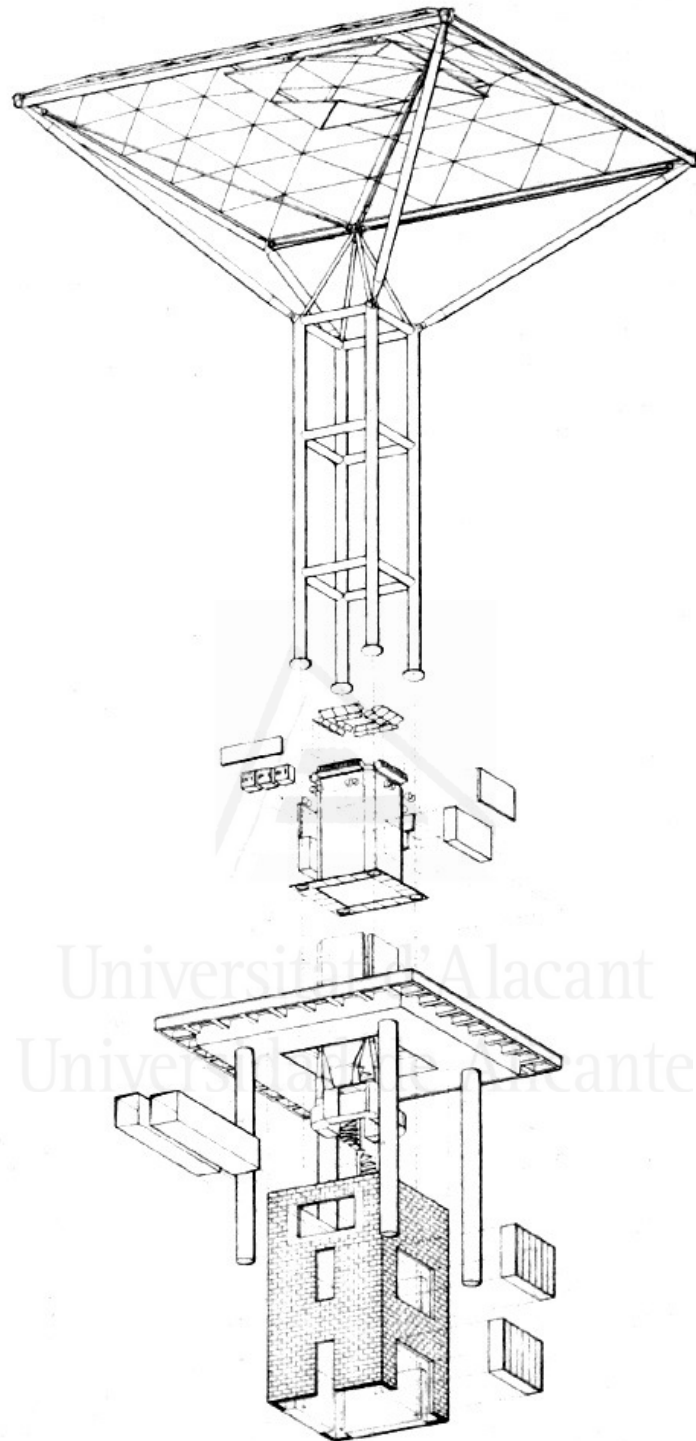


Imagen 232: Sistema constructivo del Aeropuerto de Stansted en Londres (1981-1991), Foster Associates. Ilustración extraída de "*Sir Norman Foster*" (Jodidio, 1997, p.78).



Imagen 233: Interior del Aeropuerto de Stansted en Londres (1981-1991), Foster Associates.
Ilustración extraída de "*Norman Foster*" (Treiber, 1998, p.119).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.4.4 Desarrollo reciente de las estructuras aporricadas

4.4.4.1 El Commerzbank en Frankfurt (1991-1997)

En la década de 1990 se generaliza 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.¹

La ingeniería estructural y la de sistemas ambientales estuvieron, por lo tanto, directamente involucradas en el diseño general de esta torre desde las primeras etapas de proyecto.

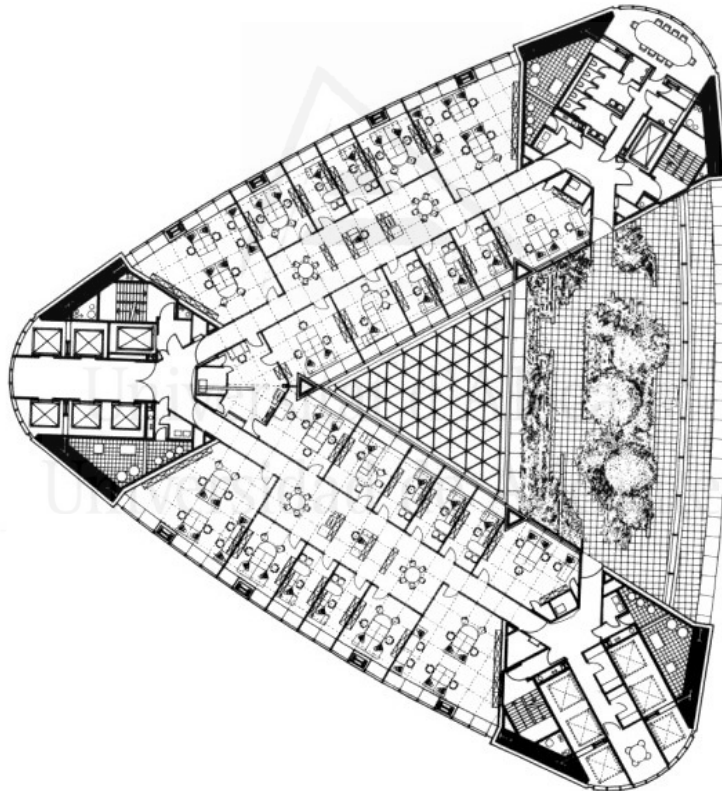


Imagen 234: Planta tipo de los niveles Kombi-Buro. Ilustración extraída de *"With its naturally ventilated skin and gardens in the sky, Foster and Partners' Commerzbank reinvents the skyscraper"* (Pepchinski, 1998, p.76).

¹ *Commerzbank was encouraged by the politicians to make its new HQ a demonstrably "green" building, and the brief for its international design competition in early 1991 stated that "the environmental friendliness of the design shall be as important as functional worth".* (Bailey et al., 1997, p.3)

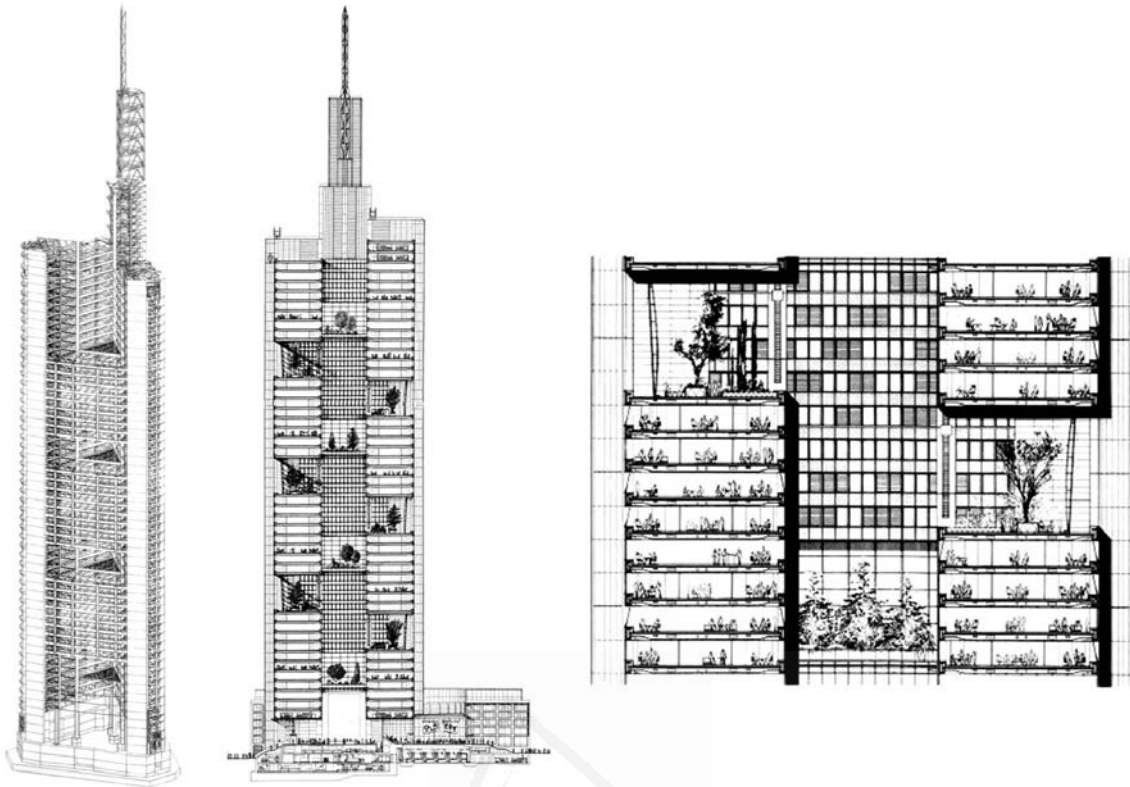


Imagen 235: Axonométrica, sección total y sección parcial. Ilustraciones extraídas de *"Reinventing the Sky-Scraper - Commerzbank Headquarters, Frankfurt, by Foster and Partners"* (Buchanan, 1998, pp.39 y 41) y de *"With its naturally ventilated skin and gardens in the sky, Foster and Partners' Commerzbank reinvents the skyscraper"* (Pepchinski, 1998, p.76).

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 medio ambientalista del proyecto (Bailey et al., 1997, p.3).

El Commerzbank de Frankfurt fue, de este modo, el tercer rascacielos proyectado y construido por Norman Foster y la primer 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, p.90).

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 en los tres lados de la planta triangular.

El Commerzbank fue el primer edificio en altura que utilizó sistemas globales y locales de ventilación natural que, junto a los elevados niveles logrados de iluminación natural, minimizan considerablemente el consumo energético global. La torre está subdividida en regiones de 8 niveles de altura en la cima de las cuales se ubican los jardines elevados.

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 al., 1997, p.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 al., 1997, p.4).

Los jardines y las oficinas se vinculan a través del patio central, generándose un circuito de ventilación cruzada en cada región del rascacielos.

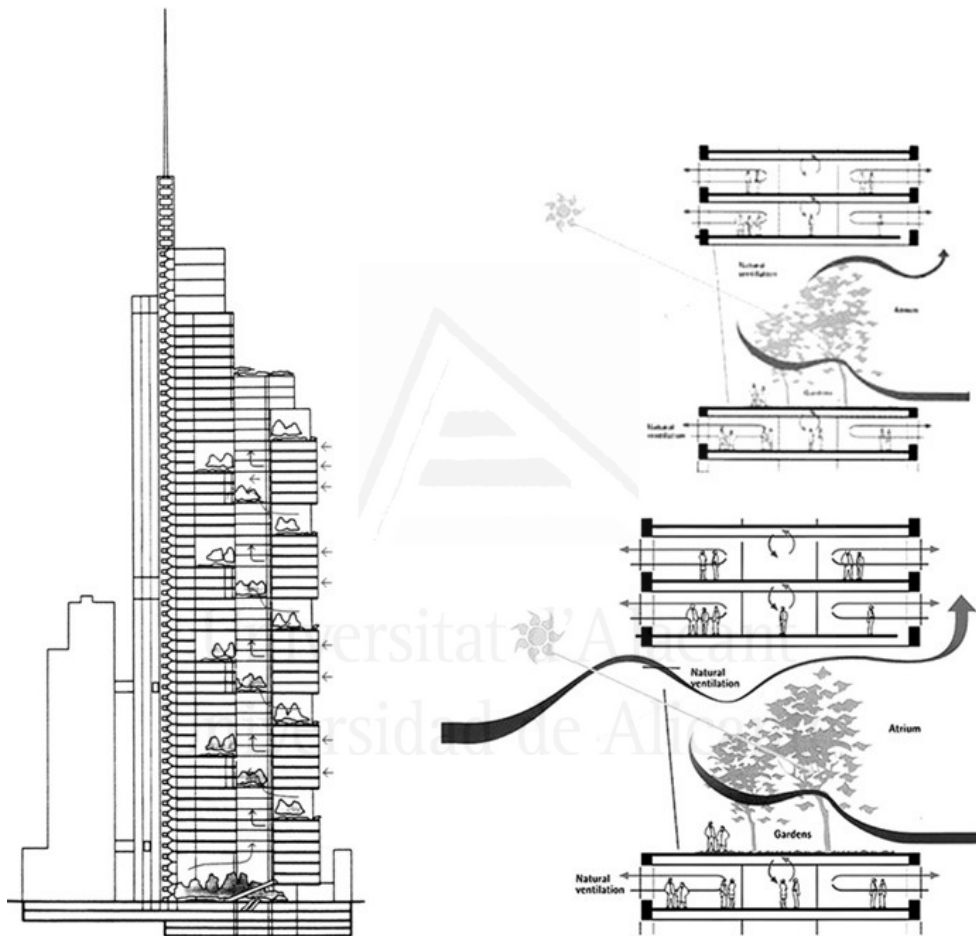


Imagen 236: Sistemas de ventilación natural del Commerzbank. Esquema general y detalles de un jardín elevado en situación de verano e invierno. Ilustraciones extraídas de *"With its naturally ventilated skin and gardens in the sky, Foster and Partners`Commerzbank reinvents the skyscraper"* (Pepchinski, 1998, p.74) y de *"Sede centrale di una banca, Francoforte [Headquarters of a bank in Frankfurt]; Architects: Foster & Partners"* (Cuadra, 1997, p.26).

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 éstos 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, éste 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. En épocas de temperaturas extremas un sistema de acondicionamiento mecánico de aire reemplaza a los sistemas naturales.

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.

De esta forma se asegura una buena iluminación natural en todas las oficinas durante una buena parte del día.

El principal objetivo del diseño estructural de este edificio fue el lograr una fuerte integración con los principales conceptos arquitectónicos y medioambientales que rigen su 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 al., 1997, p.4).

Las diferentes plantas del edificio, tanto en la zona de oficinas, en los jardines elevados, en el patio o en la planta baja, en donde se pretendía crear una plaza pública, debían ser abiertas y libres de cualquier interferencia estructural.

La superestructura del Commerzbank consiste en un gran tubo perforado exterior que se abre para alojar a los jardines elevados y que resiste tanto cargas verticales como horizontales. 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 al., 1997, p.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 al., 1997, p.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 diseño del "Hong Kong and Shanghai Bank" de Hong Kong.

Los ingenieros Rowan Williams Davies and Irwin (RWDI) realizaron ensayos en un túnel de viento en Ontario, comprobando que las cargas de viento previstas en la norma DIN 1055 Parte 4 eran conservadoras (Bailey et al., 1997, p.6), pero la legislación alemana no permitió aplicar al diseño de la torre los valores obtenidos en estos ensayos.

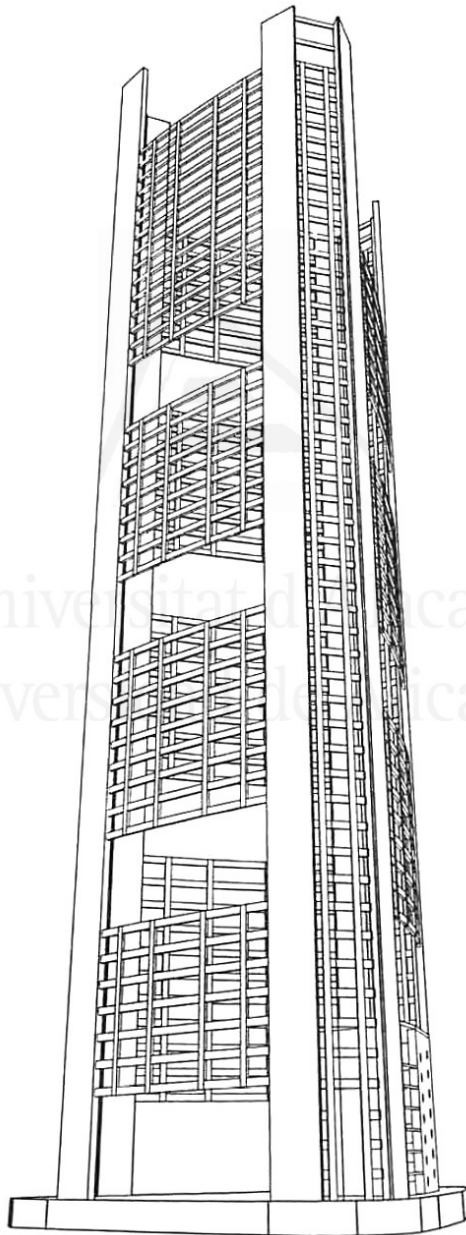


Imagen 237: Esquema del tubo perimetral del Commerzbank, formado por pantallas y dos tipos de vigas Vierendeel. Ilustración extraída de "*Commerzbank, Frankfurt; Architects: Foster & Partners*" (Bailey et al., 1997, p.5).

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.

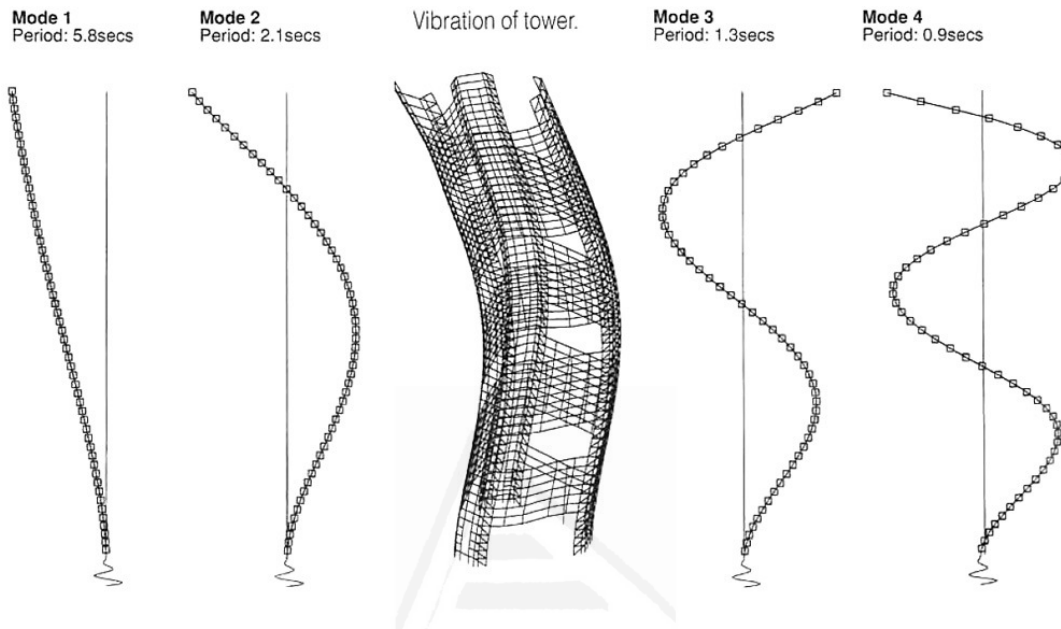


Imagen 238: Análisis de los períodos de vibración del tubo perimetral del Commerzbank. Ilustración extraída de "Commerzbank, Frankfurt; Architects: Foster & Partners" (Bailey et al., 1997, p.6).

Universitat d'Alacant

Las vigas Vierendeel principales se encuentran sometidas todas a solicitaciones similares, por lo que fueron diseñadas como 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 al., 1997, pp.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 entresijos en las zonas ahuecadas debido a las circulaciones verticales.

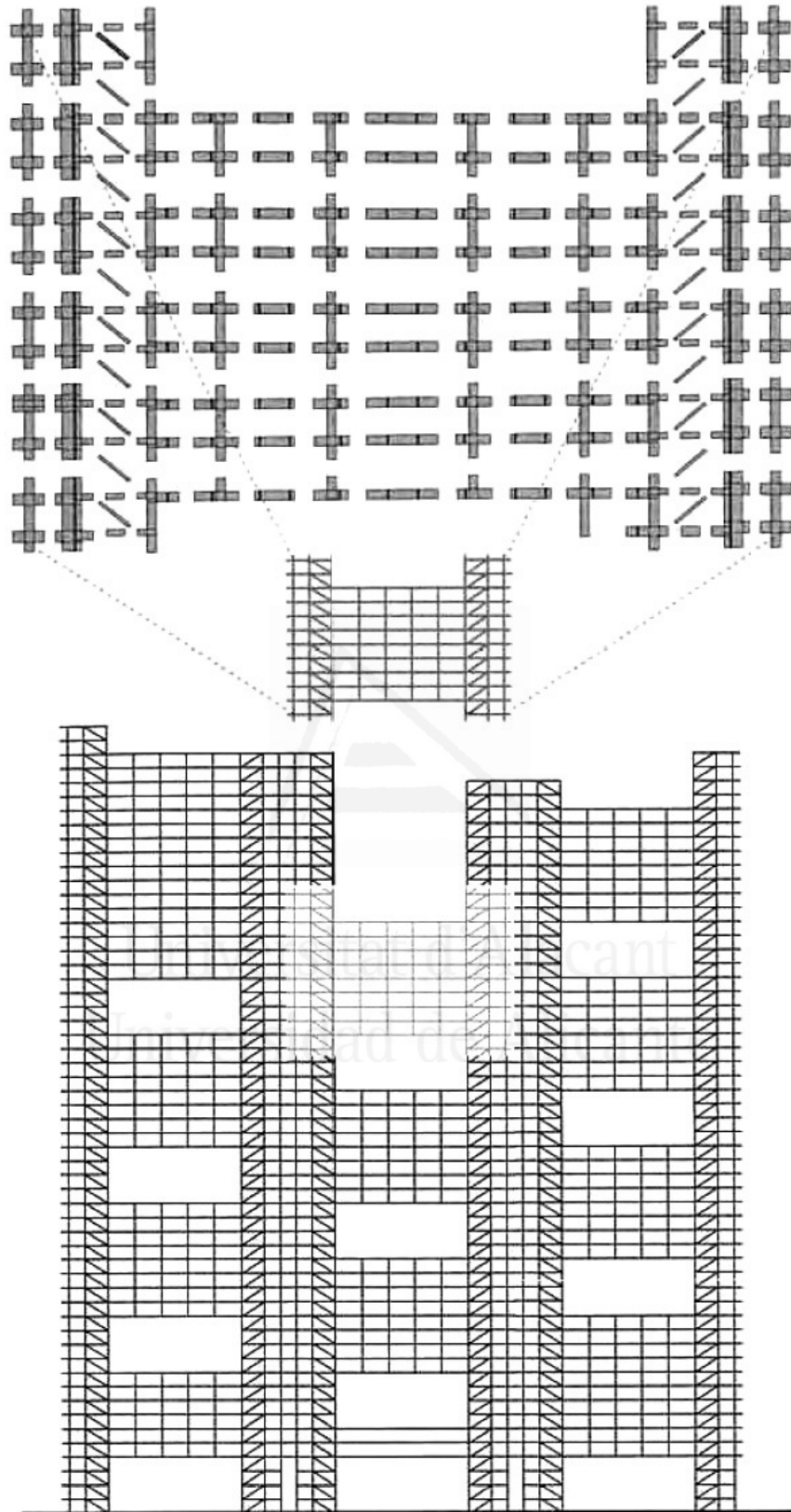


Imagen 239: Modulación de la estructura prefabricada del tubo perimetral perforado. Ilustración extraída de "*Commerzbank, Frankfurt; Architects: Foster & Partners*" (Bailey et al., 1997, p.7).

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 al., 1997, pp.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. Con el programa BUCKLE de Arup se establecieron las cargas que los entrepisos reciben debido a las restricciones de movimiento impuestas a los elementos verticales (Bailey et al., 1997, pp.7-8).

Las vigas de acero fueron diseñadas con el programa COMPOS de Arup modificado para cumplir con la normativa alemana y verificadas con el programa GSA.

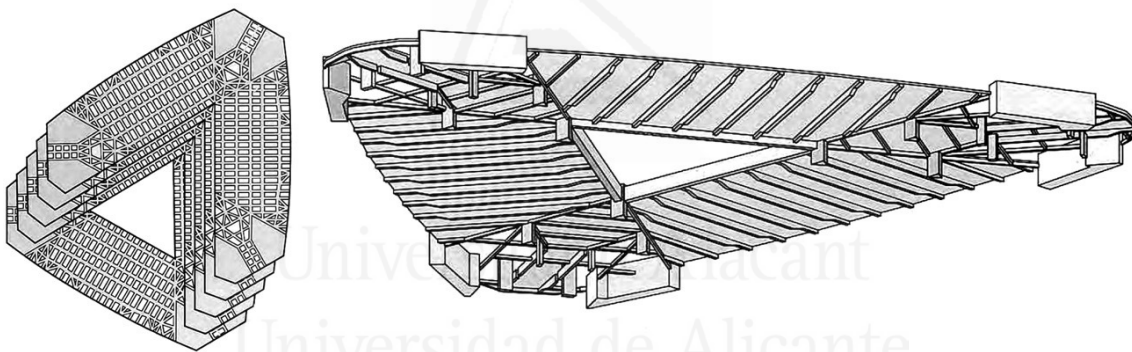


Imagen 240: Modelo de elementos finitos y esquema estructural de los entrepisos. Ilustración extraída de "Commerzbank, Frankfurt; Architects: Foster & Partners" (Bailey et al., 1997, pp.7-8).

Se estima que en la estructura de este rascacielos se utilizaron unas 18.700 toneladas de acero, es decir, unos 200 Kg/m², incluyendo las uniones entre los distintos elementos.

Si el edificio hubiese podido ser diseñado con las cargas horizontales que surgieron de los ensayos en el túnel de viento, la estructura hubiera requerido unas 15.900 toneladas de acero, es decir, unos 170 Kg/m², valor que es considerado por Arup como muy eficiente para un edificio tan ahuecado y con luces libres tan grandes (Bailey et al., 1997, p.8), comparado con el consumo de acero promedio de un edificio similar construido con sistemas estructurales convencionales.

Existe en el diseño del Commerzbank una voluntad 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 de la eficiencia del edificio, tanto desde el punto de vista del uso, como del resistente o del energético.

El diseño de este rascacielos 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.

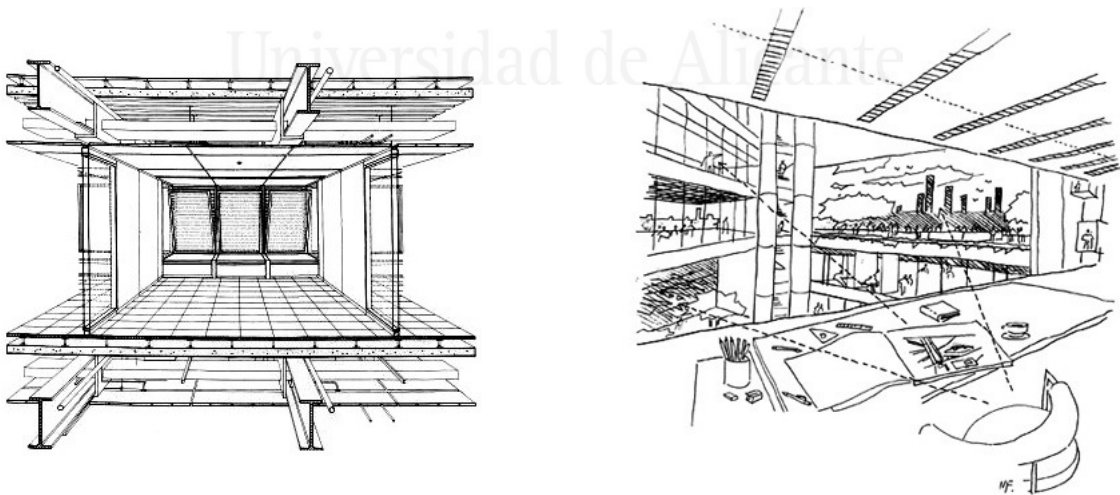


Imagen 241: Axonométrica de una oficina tipo y croquis de la iluminación natural y las vistas desde las áreas de trabajo. Ilustraciones extraídas de *"With its naturally ventilated skin and gardens in the sky, Foster and Partners Commerzbank reinvents the skyscraper"* (Pepchinski, 1998, pp.76 y 78).

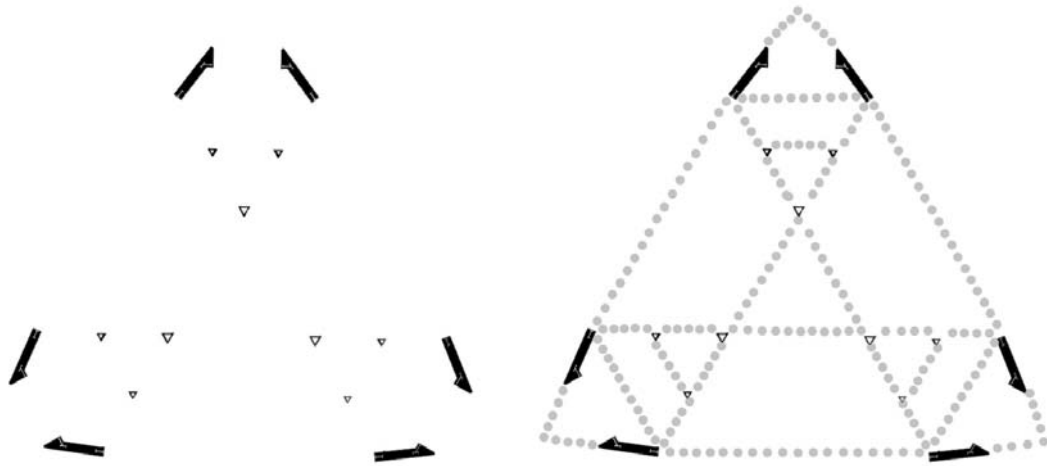


Imagen 242: Esquema estructural del Commerzbank: principales puntos de apoyo y líneas directrices. Esquema realizado por el autor.

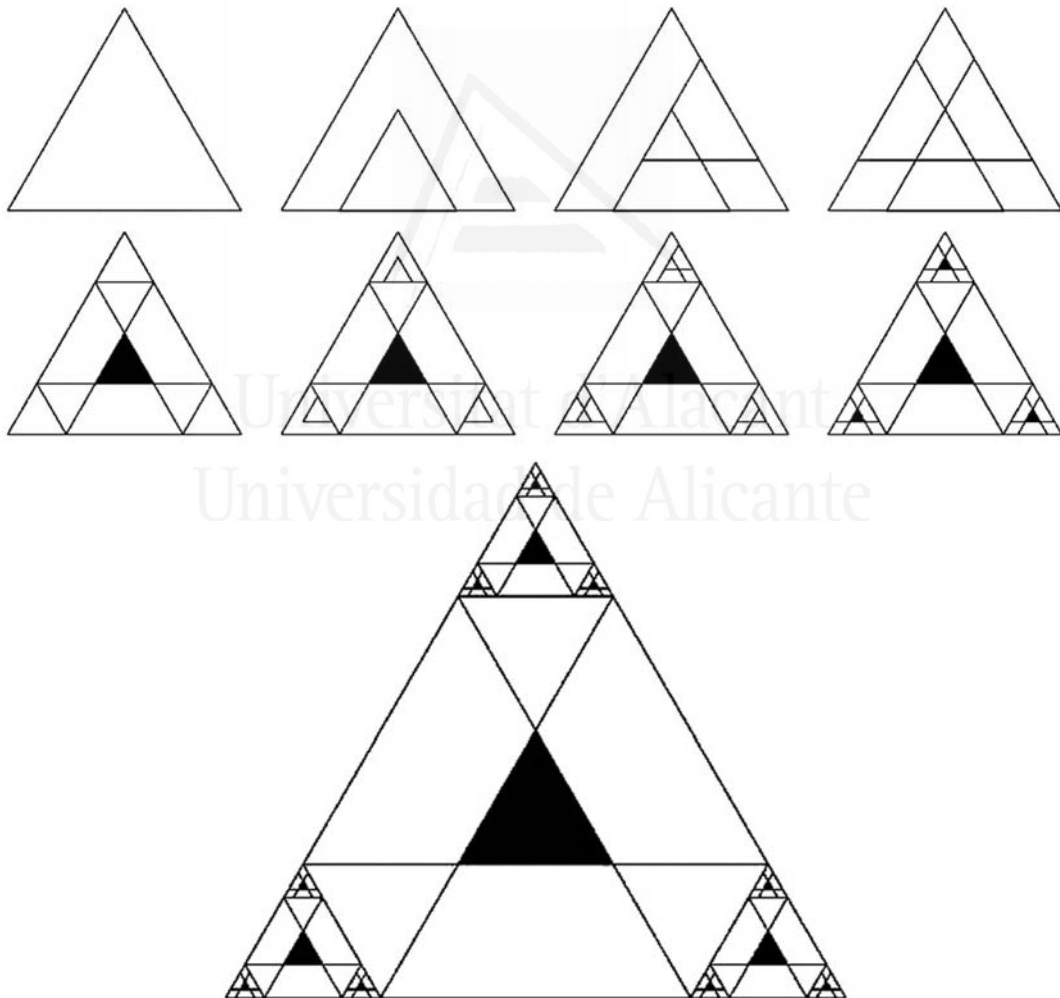


Imagen 243: Triángulo fractal inspirado en la geometría de la estructura del Commerzbank, que podría ser utilizado como base para el diseño de un sistema estructural de haces de tubos triangulares. Esquema creado y dibujado por el autor.

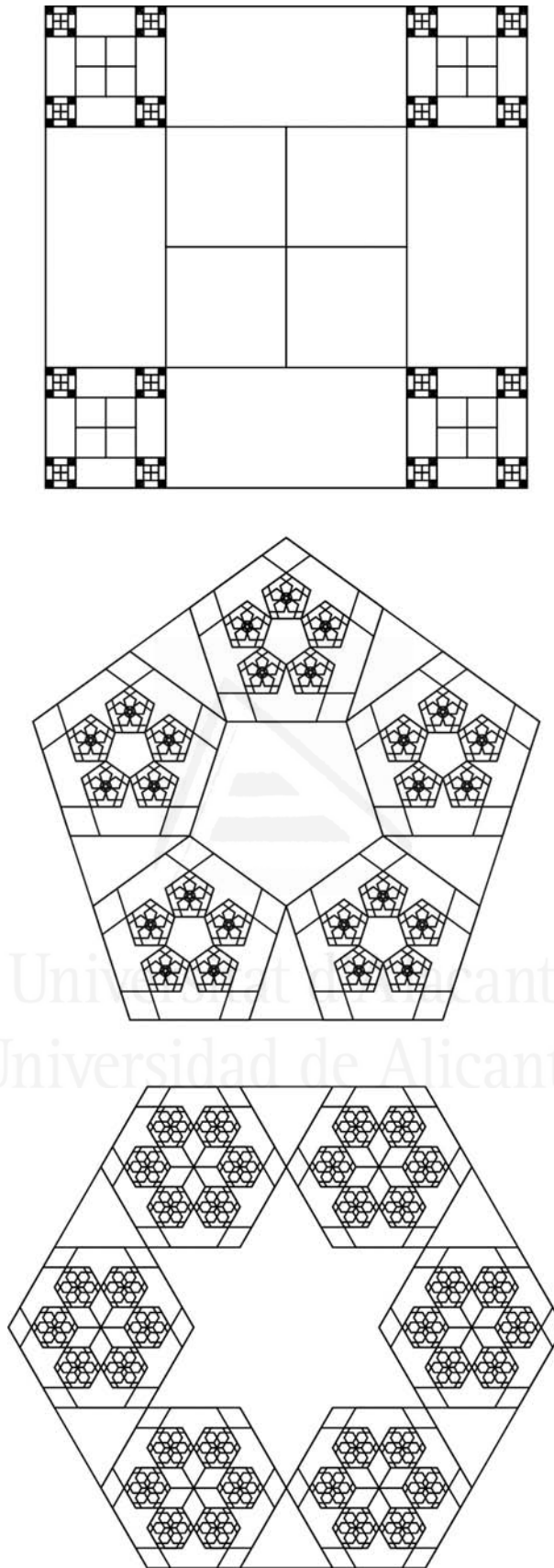


Imagen 244: Cuadrado, pentágono y hexágonos fractales que podrían ser utilizados como bases para el diseño de sistemas estructurales de haces de tubos con huecos a distintas escalas. Esquemas creados y dibujados por el autor.

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 ser entendida como un tubo de sección triangular macizo al que se le sustraen progresivamente, en 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 trazamos, centrados sobre cada uno de sus lados, copias de él mismo reducidas a la mitad de su tamaño original, extraemos luego el triángulo central que surge de la intersección de las tres copias y, a continuación, repetimos 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 de escala, obtendremos finalmente una figura fractal (ver imagen 236) 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 imagen 237) que podrían utilizarse como base para el diseño de tubos perforados y ahuecados con distintas configuraciones geométricas.

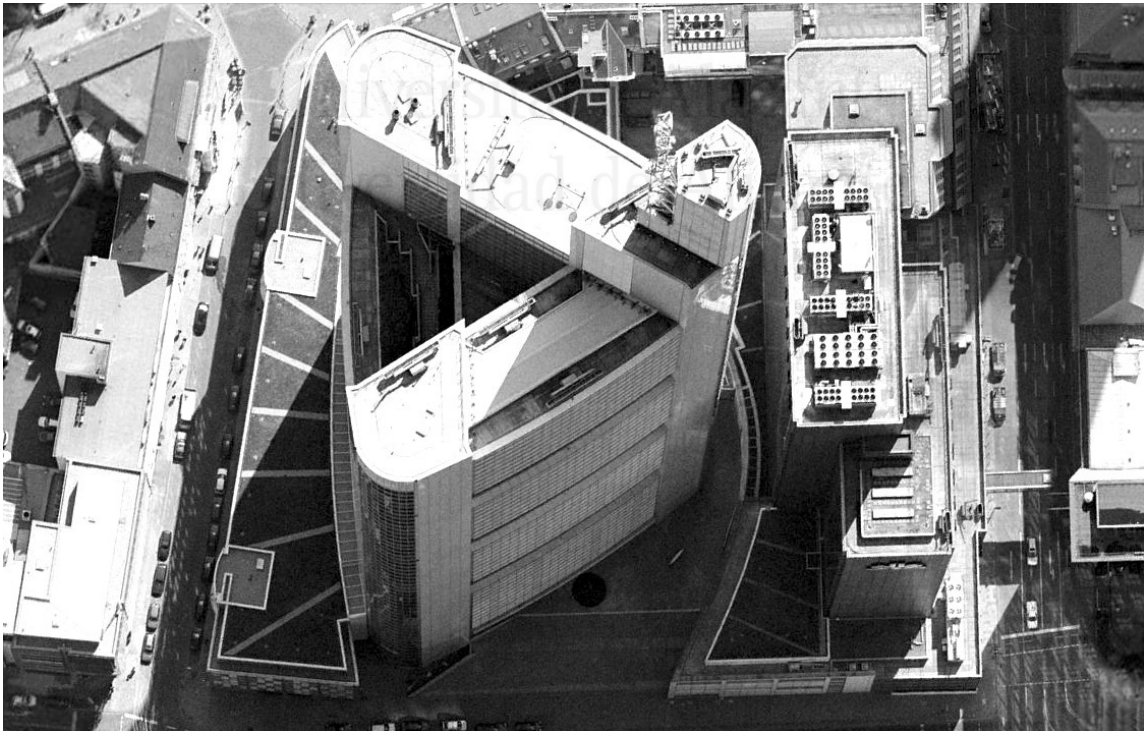


Imagen 245: Vista aérea de la cubierta del Commerzbank de Frankfurt. Imagen obtenida en enero de 2012 con el programa Google Earth.

4.4.4.2 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, próximo al parque de Kotodai y a algunos de sus principales edificios públicos. 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, pp.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.

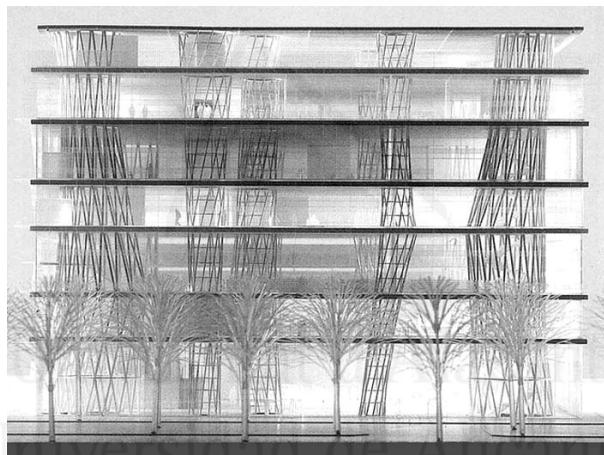


Imagen 246: Maqueta del proyecto de Toyo Ito, ganador del concurso para la Mediateca de Sendai. Ilustración extraída de "Mediateca en Sendai" (2G, 1997, p.29).

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^{1 y 2} gracias a la indeterminación de sus espacios, tal como el

¹ Nuestra propuesta de concurso es un prototipo simple y claro. "Prototipo" significa un sistema que puede responder a cualquier situación, en lugar de ser un edificio que tiene una configuración determinada respondiendo únicamente a un programa específico. En concreto, la arquitectura de la Mediateca de Sendai consiste en tres elementos: plancha de metal (suelo), tubo (columna) y piel (fachada o muro exterior). (Ito, 2000, p.228)

² En Sendai lo primero que intentamos fue eliminar al máximo el espacio compartimentado de las "habitaciones", adoptando una composición espacial basada en los tubos y las planchas horizontales que forman los pisos. El espacio de 50 x 50 metros cuadrados es básicamente el correspondiente a una habitación y es un espacio donde podemos crear un lugar para varios actos. Es un espacio que crea el usuario y se transforma con el paso del tiempo. (Ito, 2000, p.236)

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.

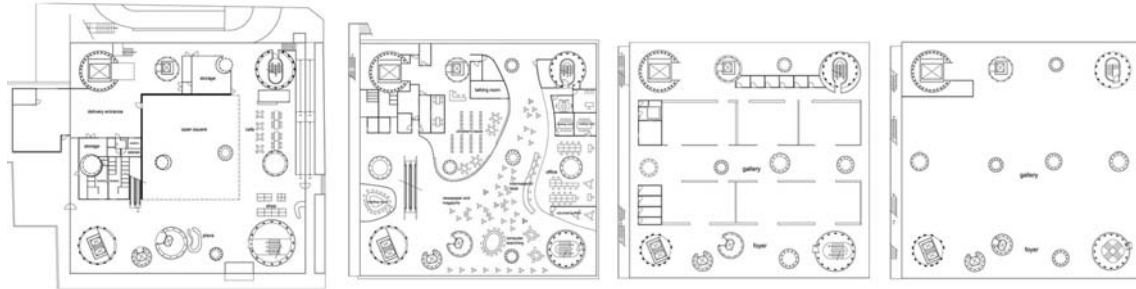


Imagen 247: Plantas de los niveles Planta Baja, Primero, Cuarto y Quinto. Ilustraciones extraídas de *"Building profile: Sendai Mediatheque; Architects: Toyo Ito Architect & Associates"* (Melvin, 2001, p.105).

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, pp.229-230).

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, p.58), fueron diseñados para sustentar el edificio.

En planta, estos pilares se distribuyen según una composición aparentemente aleatoria que varía en los distintos niveles,¹ acentuando el carácter espontáneo del diseño arquitectónico y evitando la uniformidad del espacio (Ito, 2001B, p.7).

¹ La sensación es similar a la experiencia que se tiene cuando se camina por un bosque. Por la presencia de los árboles, se producen diferencias entre cada lugar, y se seleccionan los lugares donde la gente realiza sus actividades. Desde antaño, la gente ha escogido el lugar para vivir dentro del espacio que fluye llamado naturaleza. (Ito, 2000, p.232)

Poseen un carácter escultórico que da fluidez al espacio interior homogéneo y flexible, componiendo distintos lugares con distintas características en donde los usuarios pueden libremente instalarse.¹ y ² En sección adquieren una expresión orgánica al inclinarse según diferentes ángulos.³ La altura libre entre los forjados, reforzando esta idea, es diferente en los distintos niveles.

Geoméricamente 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 de esta manera la idea de Le Ricolais de la columna automórfica hueca como elemento principal a compresión de una superestructura.

En el proyecto presentado a concurso existían doce pilares distribuidos en planta de forma totalmente aleatoria. En la etapa de definición del proyecto de ejecución se agregó un nuevo pilar y la distribución en planta fue regularizada: si bien no es uniforme y varía en las distintas plantas, se conformaron claramente tres líneas de apoyo.

Los cuatro pilares mayores se ubicaron en las esquinas de la planta cuadrada y fueron 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.

Dado que la rigidez a la flexión y a la torsión de un tubo es proporcional a la cuarta potencia de su diámetro, el aporte de los pilares centrales (con menores dimensiones) es prácticamente despreciable para resistir las cargas horizontales y se considera que quedan sometidos, por lo tanto, exclusivamente a cargas verticales.

Los pilares mayores fueron 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.

¹ *Por su naturaleza, los actos humanos son complejos y no debemos limitar ningún acto a ningún espacio determinado. (...) En mi opinión, el hecho de que aún podamos seguir discutiendo sobre las actividades que se van a desarrollar aquí, todavía a estas alturas en que se está construyendo el edificio, es porque hemos evitado al máximo crear "habitaciones". Evidentemente tiene que haber espacios que por su función deben estar cerrados. Sin embargo, en comparación con los edificios públicos normales, en el caso de Sendai, las habitaciones cerradas son muy pocas. Y lo que lo hizo posible fue la presencia de los tubos.* (Ito, 2000, p.232-233)

² *Los forjados de los diversos pisos están atravesados por tubos. A diferencia de los edificios de oficinas normales, en donde no hay relación vertical, aquí por la intervención de los tubos se relacionan entre sí tanto visual y auditivamente como por el espacio de comunicación vertical. Se puede decir también que proporciona transparencia. Los forjados entre sí son borrosos y difuminados.* (Ito, 2000, p.236)

³ *The "tubes" of the Sendai Mediatheque aspire to be treelike natural organisms.* (Ito, 2001B, p.7)

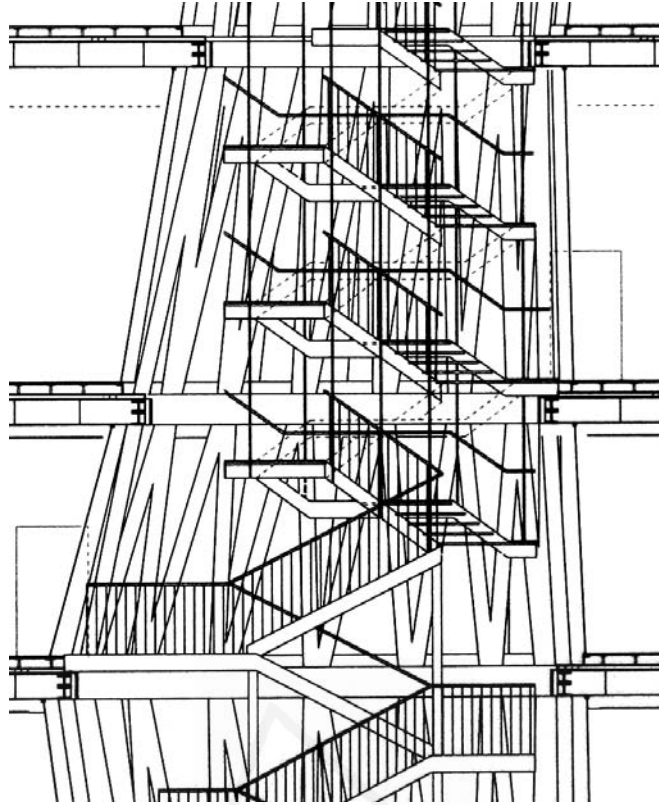


Imagen 248: Vista lateral de una escalera alojada en el interior de un pilar tubular. Ilustración extraída de "Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000" (Ito et al., 2001A, p.31).

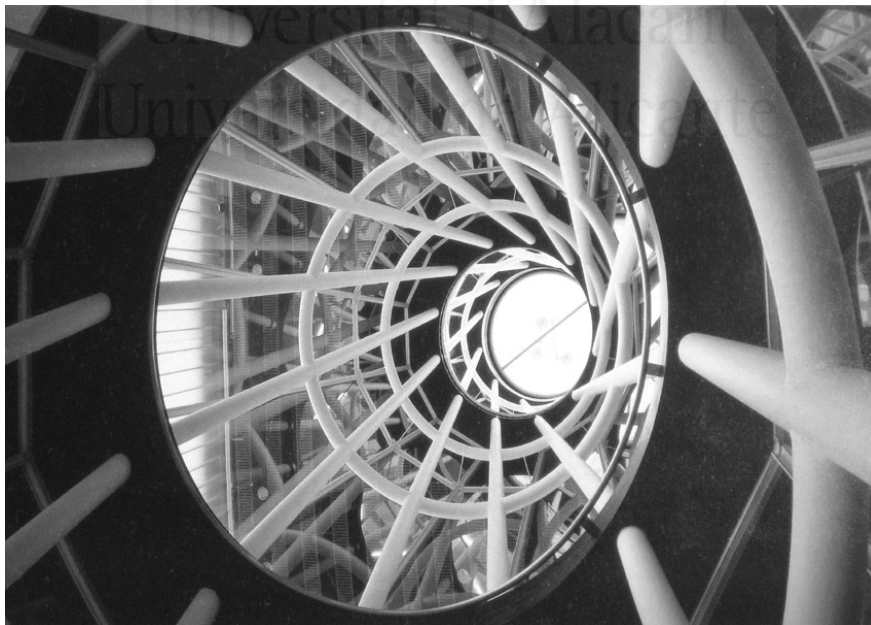


Imagen 249: Vista de uno de los pilares centrales desde abajo. Ilustración extraída de "Toyo Ito. La mediateca di Sendai: un organismo scomposto " (Maffei, 2000-2001, p.161).

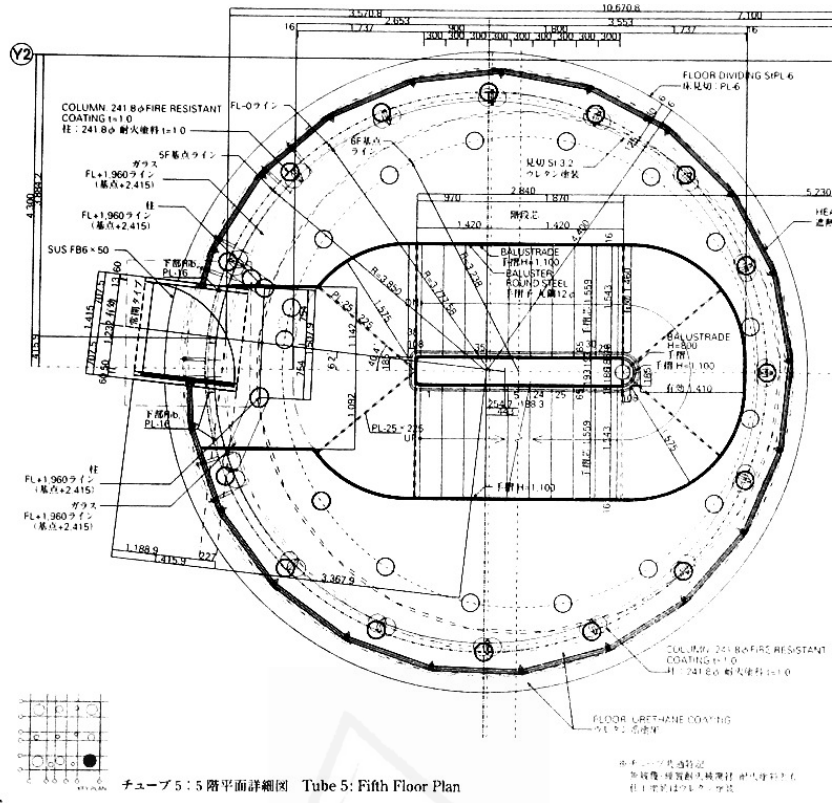


Imagen 250: Detalle de un tubo de esquina. Ilustración extraída de "Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000" (Ito et al., 2001A, p.46).

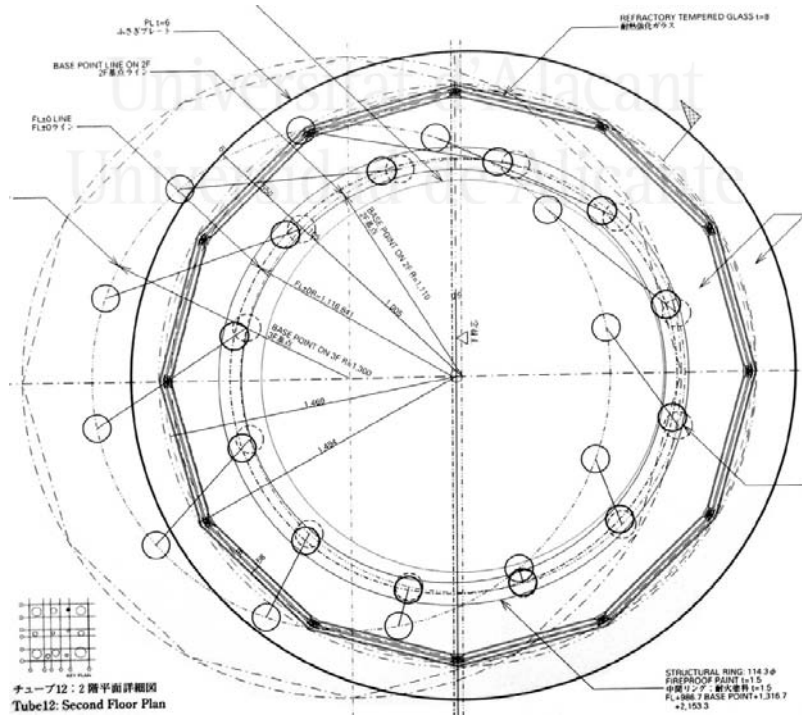


Imagen 251: Detalle de un tubo central. Ilustración extraída de "Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000" (Ito et al., 2001A, p.50).

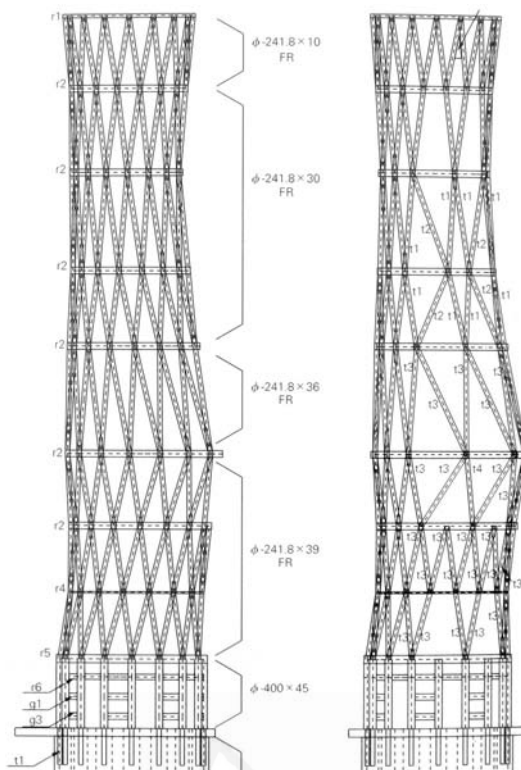


Imagen 252: Vistas frontales de un tubo de esquina. Ilustración extraída de "Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000" (Ito et al., 2001A, p.58).

Los nueve pilares centrales, con menores diámetros, fueron diseñados como haces de tubos paralelos, rigidizados por anillos horizontales para evitar problemas localizados de pandeo (Sasaki, 2001, p.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.^{1 y 2}

¹ *Apenas significa nada en medio de la tensión nuclear que vive Japón (...). Pero para el mundo de la Arquitectura, 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, (...). Un vídeo grabado por uno de los usuarios de la mediateca durante el terremoto y publicado por el diario Los Angeles Times muestra cómo el movimiento de tierra genera una tremenda oscilación del edificio que, sin embargo, no llega a provocar su colapso. Por las imágenes se comprueba cómo el terremoto agita con fuerza el edificio, cuyo techo cimbreo como lo harían los árboles azotados por el viento. Pero apenas caen pequeñas partículas de yeso y otros materiales. (...) El vídeo muestra como el falso techo se mueve casi a discreción mientras las paredes permanecen inmóviles. "La luz no se va casi en ningún momento, y 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)

² *(...) 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)

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, pp.5-6), hubiera afectado a la homogeneidad del espacio ¹; 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.

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, p.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, p.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.

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, p.59).

En todo el perímetro de los forjados se dispusieron, finalmente, bandas con celdillas cuadradas similares a aquellas de las fajas de refuerzo.

Las luces libres máximas que estos forjados llegan a salvar son de aproximadamente 20 metros.

Esta configuración formal de los forjados metálicos 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 los forjados, de modo que finalmente todo el acero queda sometido a tensiones similares.

¹ *The following is a quite specific list of what I now realize the work expresses.*

1. *A desire not to create joints.*

2. *A desire not to create beams.*

3. *A desire not to create walls.*

4. *A desire not to create rooms.*

5. *A desire not to create architecture.*

(...) *I want to create continuous, uninterrupted planes and spaces.* (Ito, 2001B, p.5)

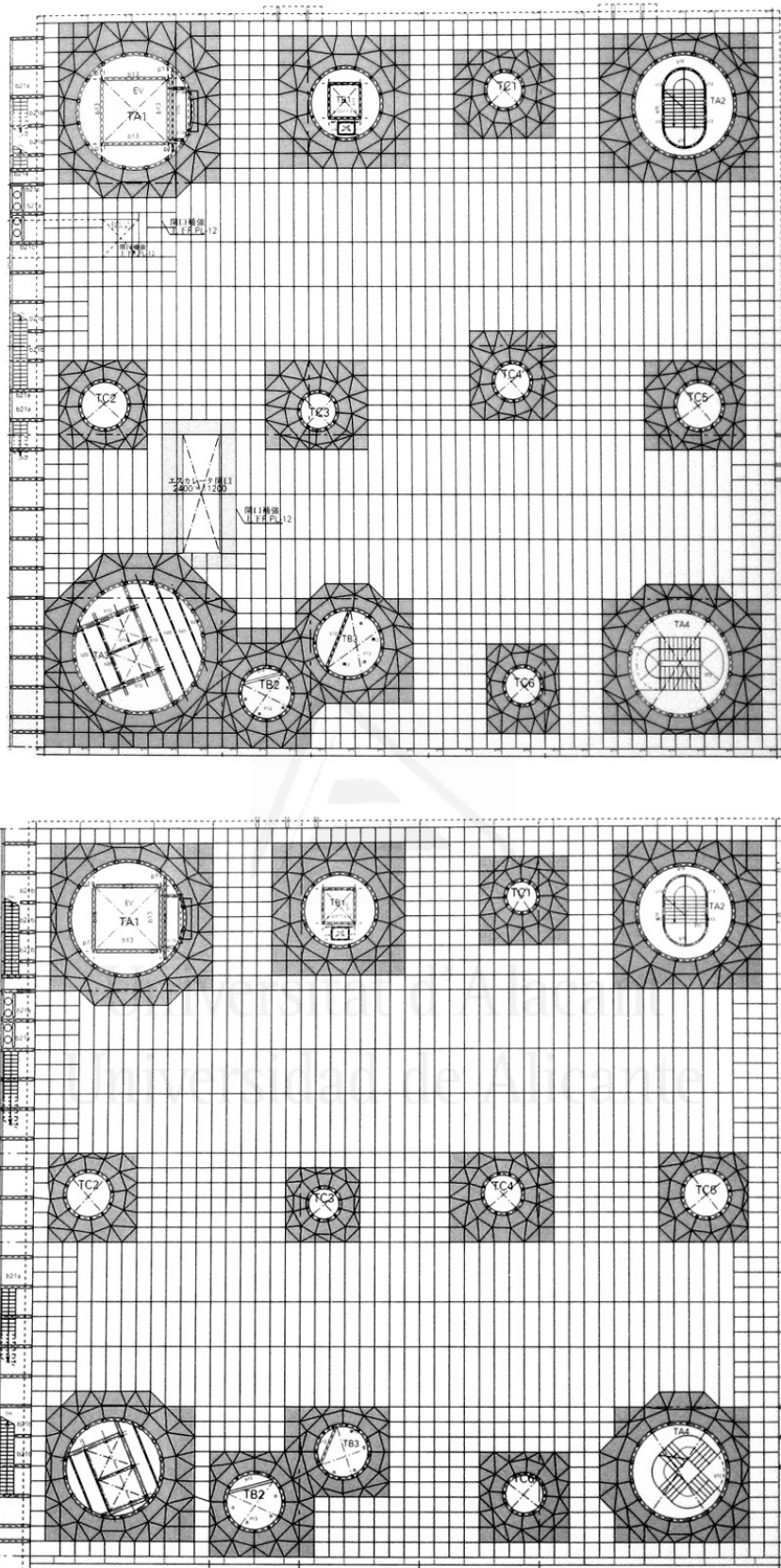


Imagen 253: Plantas de los forjados del tercer y sexto nivel. Ilustraciones extraídas de "Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000" (Ito et al., 2001A, pp.61 y 62).

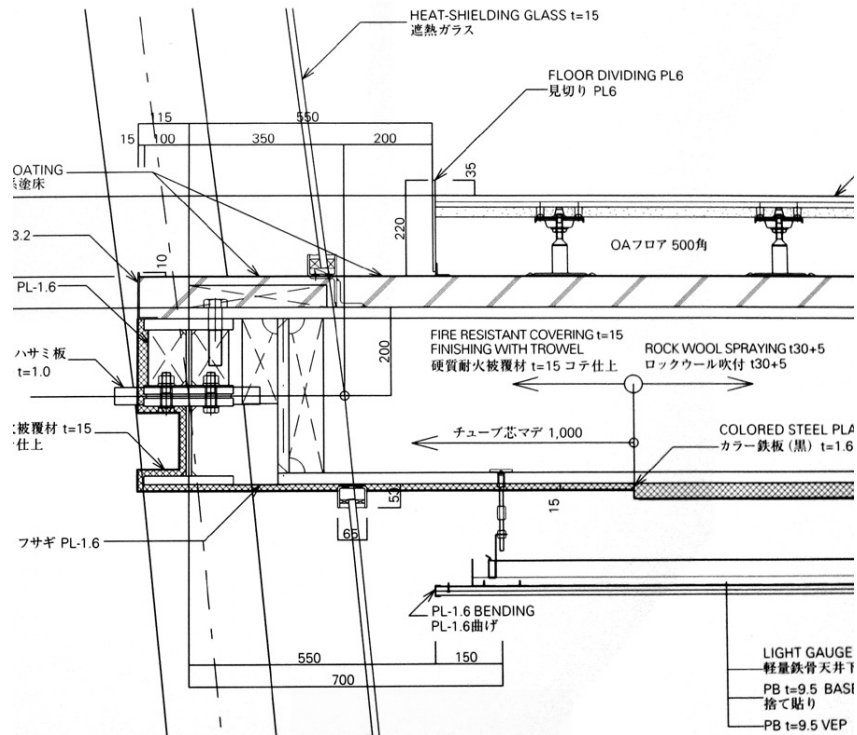


Imagen 254: Detalle de apoyo del forjado del quinto nivel en un pilar tubular. Ilustración extraída de "Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000" (Ito et al., 2001A, p.58).

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 pre-montaron 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, p.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.

¹ 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, p.76)

La imagen final de la Mediateca seguramente dista bastante del espacio líquido y fluido que Ito pretendía inicialmente materializar ¹, 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 vacíos de distintas escalas que, adquiriendo una gran inercia, definen 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.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.4.4.3 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, vuelven a participar de forma activa en el proceso de diseño arquitectónico (Bernabeu, 2007, pp.34-36), entablando intensas relaciones de colaboración con arquitectos que resultan indispensables para el desarrollo de proyectos complejos.

Sus primeras colaboraciones se remontan a sus trabajos con Rem Koolhaas en la Terminal de Zeebrugge, el Kunsthal y la Biblioteca de Jussieu y han continuado luego 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 integrados, es decir, la desaparición de las 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 al., 2002, p.11). Plantea así un enfoque dinámico de las organizaciones estructurales basado en conceptos como emergencia y no-linealidad, surgidos de las ciencias de la complejidad, combinando de esta manera 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 al., 2002, pp.114-123).

El concepto de "informal" es definido en dicho libro como las características no-lineales del diseño arquitectónico (Balmond et al., 2002, p.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.^{1 y 2}

Estudia mecanismos que le permiten modificar los sistemas clásicos de mallas y tipologías estructurales tales como la yuxtaposición, hibridación y puesta en valor de

¹ 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, p.40).

² 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, p.48)

las características locales y utiliza algoritmos matemáticos como herramientas para definir formas no-lineales.

En el *Kunsthal* 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.



Imagen 255: Análisis morfológico de hojas. Ilustración extraída de "*Element*" (Balmond, 2007, p.238).

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, p.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, 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, p.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, la estrategia debiera ser el comenzar por la forma más simple posible. Cuánto 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, según Balmond, son la abstracción perfecta (Balmond, 2007, p.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 quienes mejor la describirían.

El procedimiento que la naturaleza ha utilizado para la optimización de sus estructuras podría ser entonces 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 al., 2002, p.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 al., 2002, p.134).

En su libro *"Informal"* Balmond recrea el proceso de diseño llevado a cabo para la definición de dicha cubierta y sus soportes (Balmond et al., 2002, pp.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

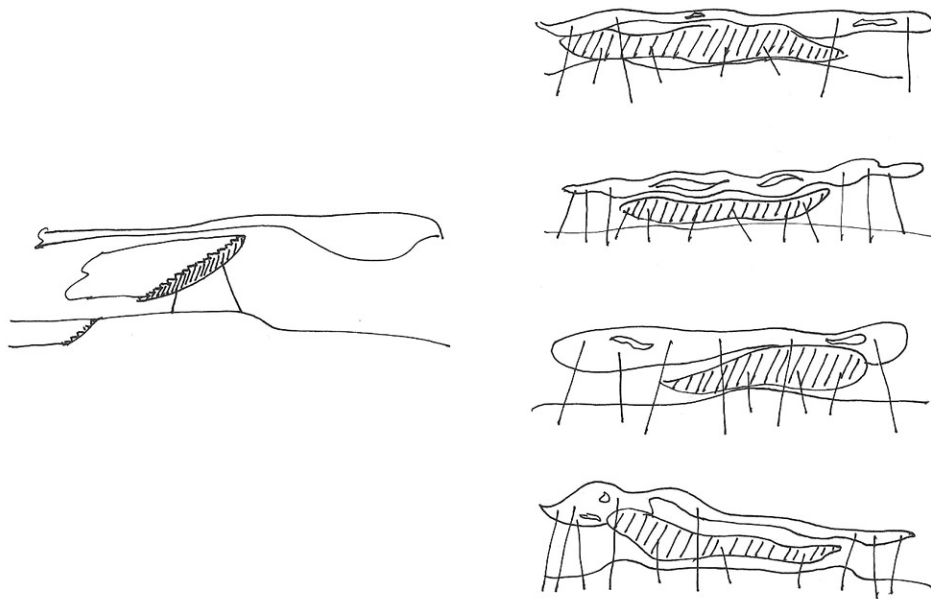


Imagen 256: Croquis iniciales para el estadio en Chemnitz, Peter Kulka, Ulrich Königs y Cecil Balmond. Ilustraciones extraídas de "Informal" (Balmond et al., 2002, pp.130-131).

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 al., 2002, pp.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.

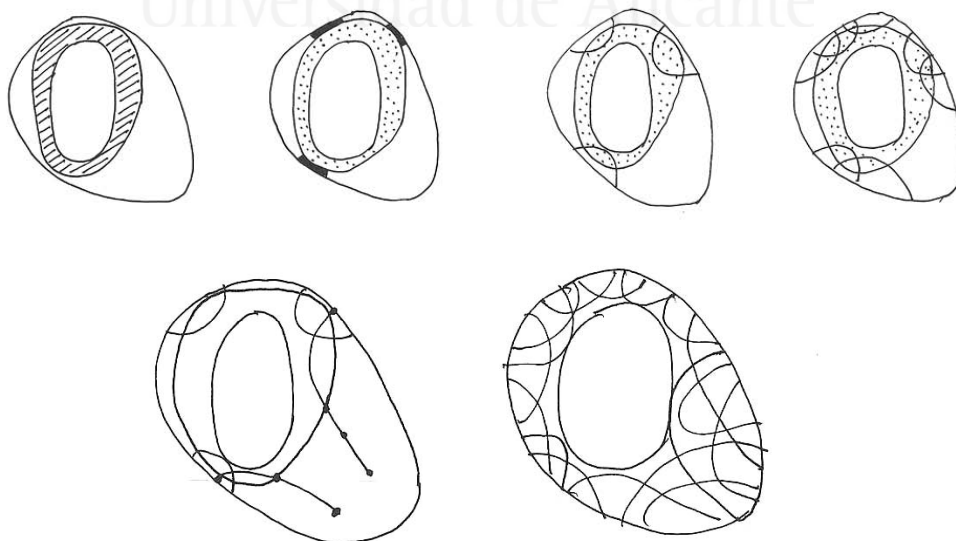


Imagen 257: Proceso de diseño del patrón estructural de la cubierta. Ilustraciones extraídas de "Informal" (Balmond et al., 2002, pp.138, 139 y 142).

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 sólo 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 y propuso la alternativa de un disco con dos puntos marcados en su superficie que se desplaza entre dos bordes fijos, los bordes exterior e interior de la cubierta, expandiéndose y contrayéndose a medida que gira (Balmond et al., 2002, p.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 entonces manipularse iterativamente para optimizar el resultado final.

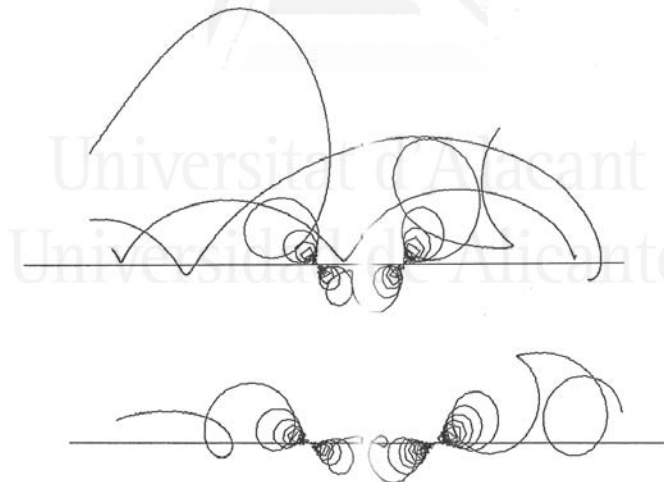


Imagen 258: Trayectorias de dos puntos en un disco rotatorio desplazándose sobre una recta. Ilustraciones extraídas de "*Informal*" (Balmond et al., 2002, pp.156-157).

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 nuestro 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 sólo 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 de la manera de operar de la naturaleza.

Según Whitehead el proceso, más que la sustancia, es el constituyente fundamental de la naturaleza (Whitehead, 2007, p.53-54).

La autoorganización es la principal causa de la emergencia de la complejidad (Fromm, 2004, p.21), propiedad que permite a los organismos adaptarse a su entorno, sobrevivir y evolucionar (ver punto 3.2.3.3).

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 sollicitaciones 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.



Imagen 259: Trayectoria de dos puntos en un disco rotatorio que se expande y se contrae, desplazándose a lo largo de un borde curvo. Ilustración extraída de *"Informal"* (Balmond et al., 2002, p.159).

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 al., 2002, p.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.

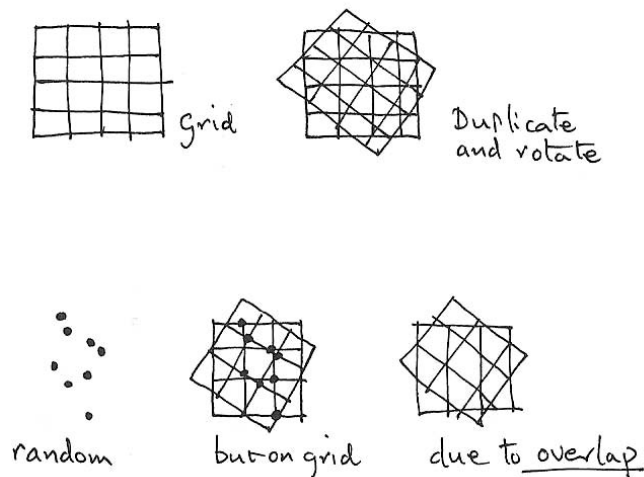


Imagen 260: Superposición de mallas para la determinación de un patrón de puntos de apariencia aleatoria. Ilustraciones extraídas de "Informal" (Balmond et al., 2002, p.147).

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. Las zonas más solicitadas se refuerzan con una mayor densidad de materia tal como ocurre con las trabéculas que definen la estructura interna de los huesos.

La inclinación de los pilares ayuda, por otra parte, a equilibrar a la cubierta frente a las cargas horizontales de viento.

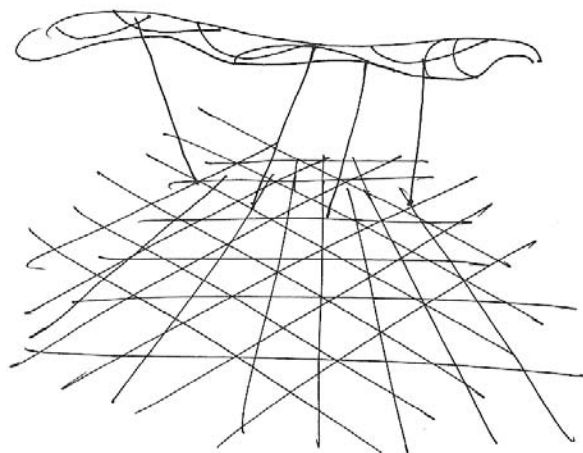


Imagen 261: Esquema de la solución adoptada para la cubierta y sus apoyos. Ilustración extraída de "Informal" (Balmond et al., 2002, p.150).

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 finalmente 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 conducirían a resultados finales muy diferentes.

Debido al proceso algorítmico seguido para el diseño de la forma, que emula a algunos procesos naturales de generación de formas, es posible según Balmond percibir un cierto sentido de orden¹ en la aparente aleatoriedad del proyecto.

La belleza de este proyecto podría entenderse como inscrita en la concepción aristotélica del término. 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 son empleados por la naturaleza a la hora de crear. En este sentido, los métodos de diseño de Balmond podrían igualmente entenderse en la línea del pensamiento de Alberti.²

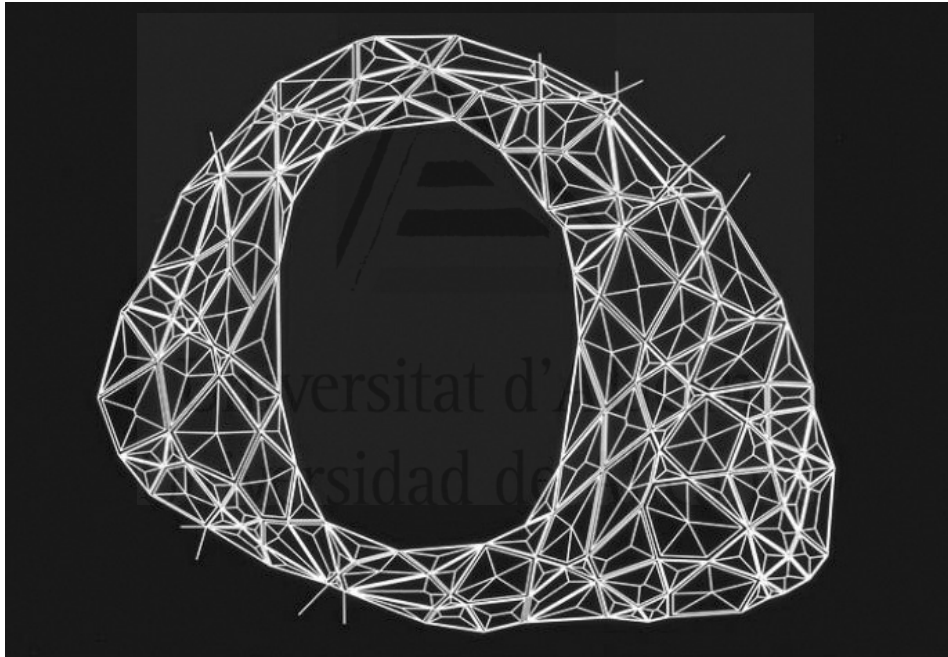


Imagen 262: La cubierta del estadio en la etapa de diseño más avanzada que fue finalmente alcanzada. Ilustración extraída de "Informal" (Balmond et al., 2002, pp.168-169).

¹ 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, 2000, p.46)

² 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, p.385).

4.4.4.3 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 al., 1995, p.18).

El gran edificio está compuesto 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 totalmente 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.

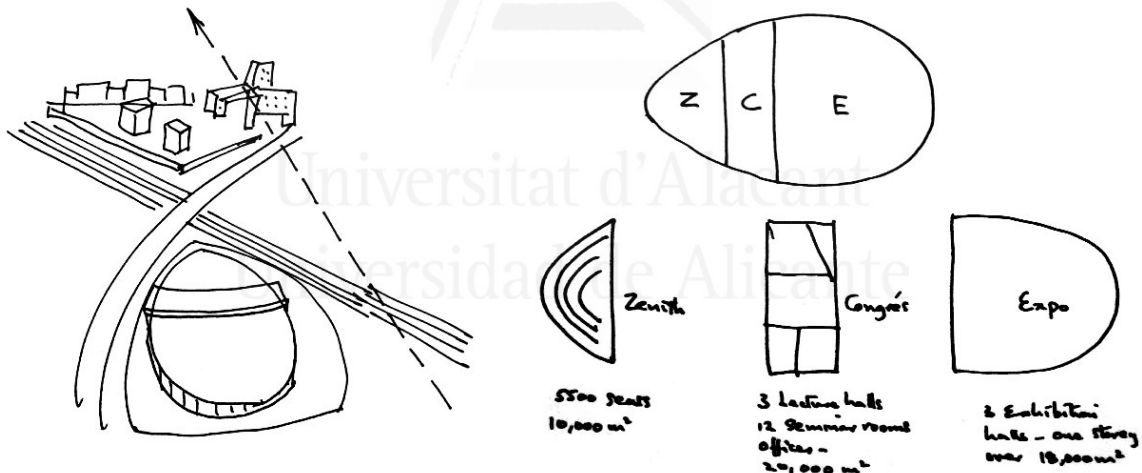


Imagen 263: Croquis del Congrexpo y esquema de los tres edificios componiendo un gran óvalo. Ilustraciones extraídas de "Informal" (Balmond et al., 2002, pp.274 y 280).

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 al., 2002, p.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".

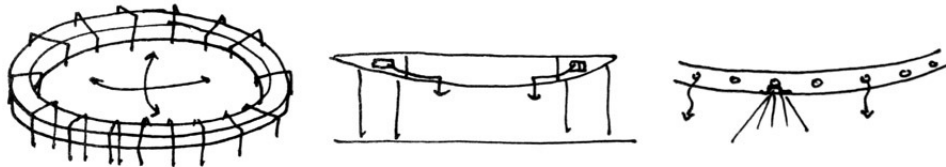


Imagen 264: Una de las soluciones inicialmente manejada para la cubierta del Congrexpo. Ilustraciones extraídas de "Informal" (Balmond et al., 2002, p.282).

Pero por motivos fundamentalmente económicos se decidió finalmente 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.

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 al., 1995, p.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. De este modo las luces de las vigas de la cubierta pudieron mantenerse constantes.

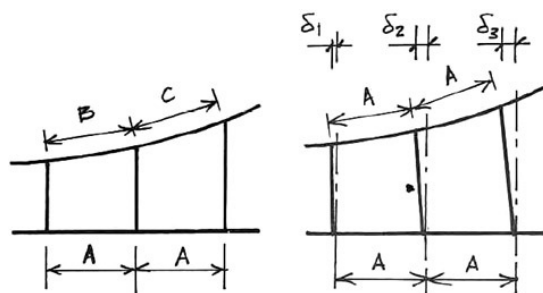


Imagen 265: Solución de cubierta con vigas de luces constantes debido al ángulo introducido en la grilla de pilares. Ilustraciones extraídas de "Lille Grand Palais: Zenith/Congres/Expo; Architects: Rem Koolhaas" (Mc Gowan et al., 1995, p.22).

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. Éstas impulsan el aire tratado

hacia abajo por el interior de los mismos, que se difunde finalmente en la zona inferior del edificio, donde se encuentran los usuarios (Balmond et al., 2002, p.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.

Para evitar problemas de durabilidad fueron galvanizados tanto por dentro como por fuera.

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 al., 1995, p.22).

De ocultarse las cortinas con un falso techo, la reglamentación establecía que éste 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.

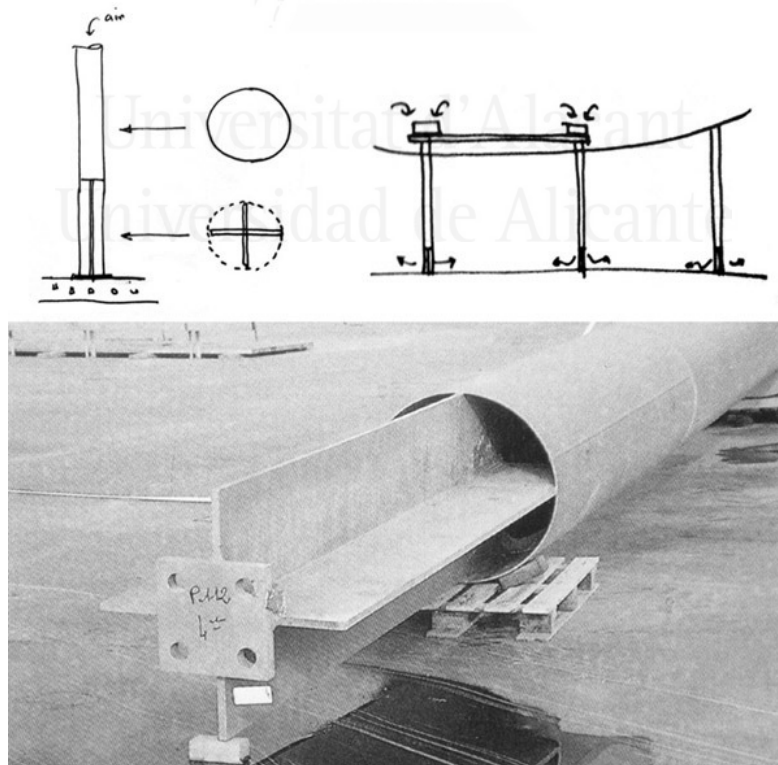


Imagen 266: Esquema de difusión del aire tratado a través de los pilares e imagen de un pilar previo a su posicionado en obra. Ilustraciones extraídas de "Informal" (Balmond et al., 2002, p.294) y de "S,M,L,XL" (Koolhaas et al., 1997, p.782).

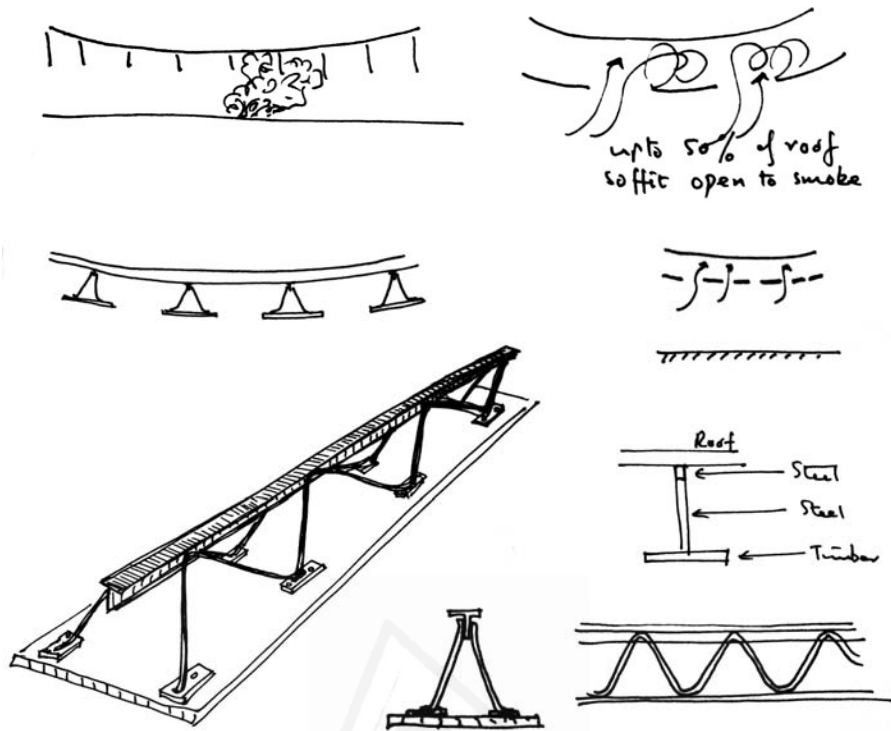


Imagen 267: Diseño de las vigas compuestas de la cubierta. Ilustraciones extraídas de "Informal" (Balmond et al., 2002, pp.284, 285 y 286).

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.

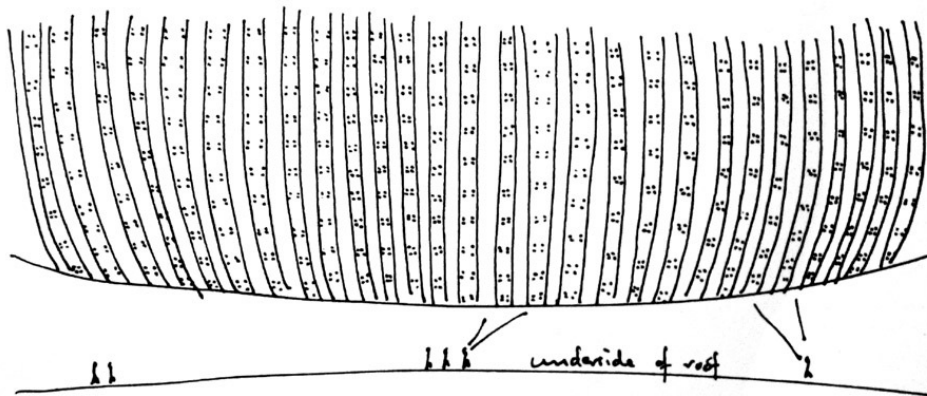


Imagen 268: Croquis interior de la cubierta. Ilustración extraída de "Congrexpo (Lille Grand Palais). Lille, France, 1994" (Balmond, 2006H, p.255).

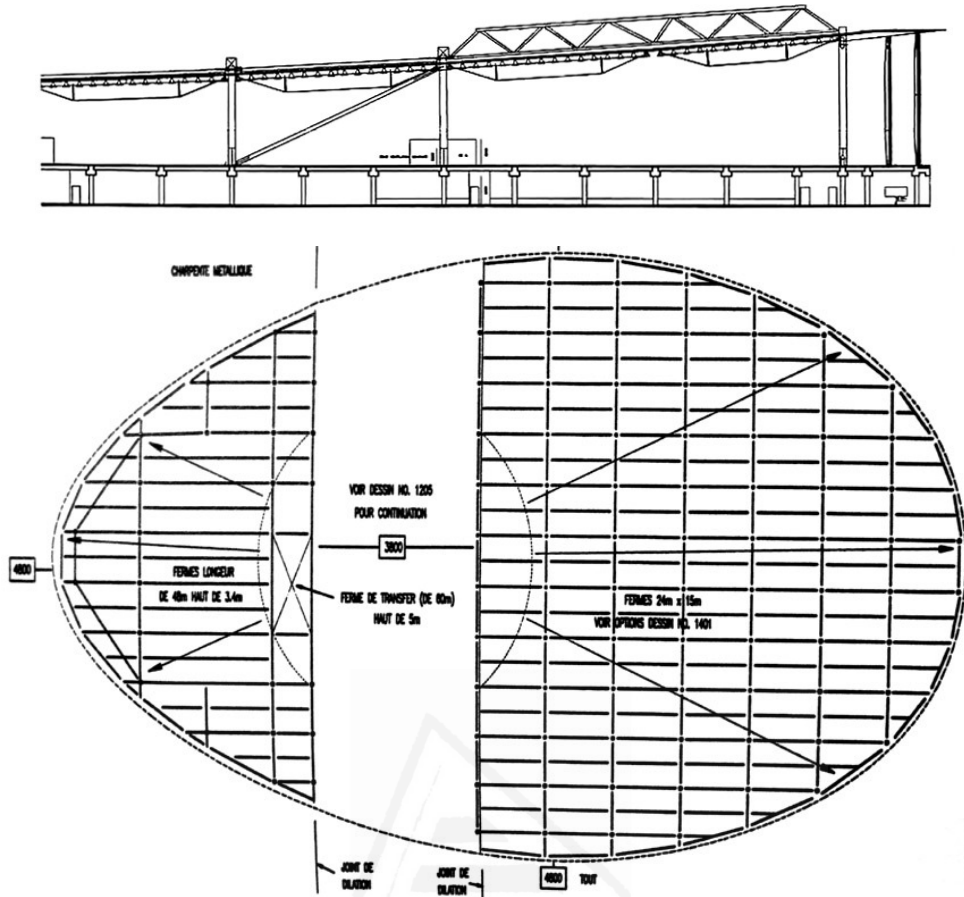


Imagen 269: Sección longitudinal parcial del edificio Expo y planta esquemática de la cubierta. Ilustraciones extraídas de "Informal" (Balmond et al., 2002, p.281) y de "Lille Grand Palais: Zenith/Congres/Expo; Architects: Rem Koolhaas" (Mc Gowan et al., 1995, p.19).

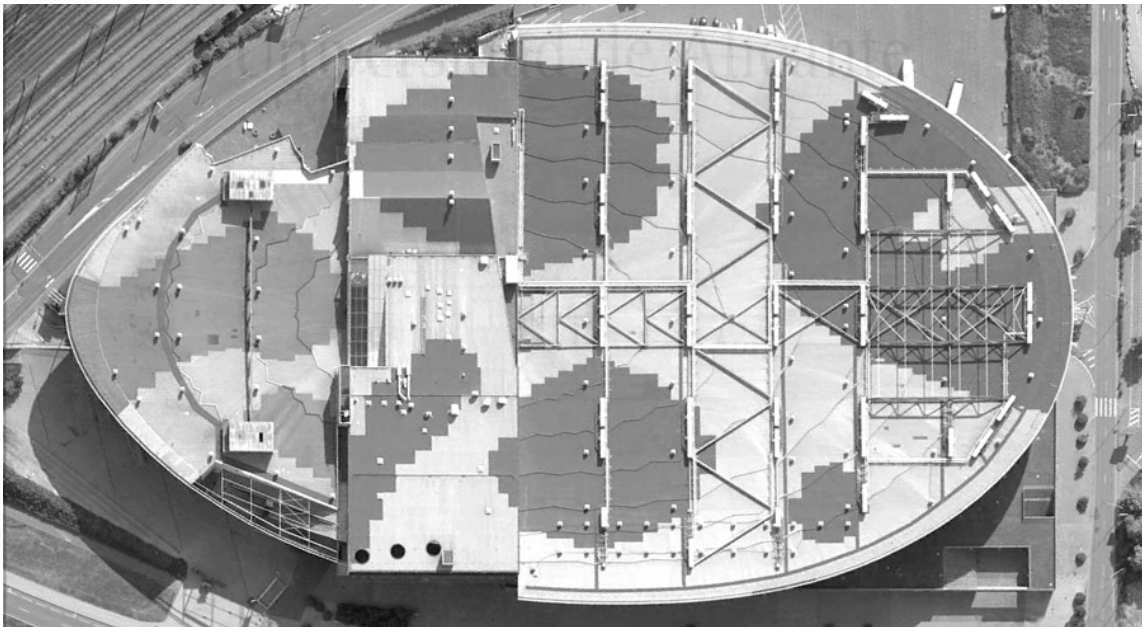


Imagen 270: Vista aérea de la cubierta del Congrexpo desde 250 metros de altura. Imagen obtenida en enero de 2012 con el programa Google Earth.

La solución propuesta consiste 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 conforman las diagonales interiores.

Los cordones inferiores de 75 cm de ancho, dispuestos cada 1,5 metros, generan 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 al., 1995, p.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 al., 1995, pp.22-23).

Las vigas compuestas salvan las luces de 15,6 metros existentes entre las vigas principales mientras que éstas, 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.

A último momento el cliente solicitó que se generara una zona con luces libres de 48 metros, por lo que se omitieron algunos pilares y se añadieron cerchas en el exterior de la cubierta para reforzar dicha zona, sin alterar la estructura general.



Imagen 271: Vista interior del edificio Expo. Ilustración extraída de "*Lille Grand Palais: Zenith/Congres/Expo; Architects: Rem Koolhaas*" (Mc Gowan et al., 1995, p.23).

Los pilares sobresalen de la cubierta para soportar una estructura exterior de acero que sirve de apoyo a las unidades de acondicionamiento del aire.

Una serie de arriostramientos en diagonal fue dispuesta tanto en la cubierta como en el interior del edificio de modo de garantizar la estabilidad global frente a las cargas de viento (Mc Gowan et al., 1995, p.22).

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 integración entre estructura y difusión de servicios al espacio interior 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.

El esquema inicialmente estudiado, consistente en un anillo comprimido y torsionado que definía una zona perimetral de servicios y una cubierta colgante de ductos, definía una clara separación entre espacios sirvientes y espacios servidos coordinados con el espacio necesario para el funcionamiento de la estructura. El diseño de esta cubierta traccionada ya anticipaba la idea finalmente utilizada para el diseño de los pilares, integrando estructura y distribución del sistema de aire acondicionado.



Imagen 272: El Congrexpo de Lille, Rem Koolhaas y Cecil Balmond.
Fotografía del autor.

4.4.5 Evolución reciente en el diseño de las estructuras aporticadas

En la segunda mitad del siglo XX el diseño de las estructuras aporticadas se vuelve más complejo con el surgimiento de organizaciones alternativas a la tradicional grilla uniforme de pilares, vigas y losas. Comienzan a explorarse, en este período, distintas disposiciones de los componentes materiales de un edificio con el objetivo de optimizar su capacidad de responder a determinadas necesidades, tales como la de crear espacios flexibles de grandes luces sin interferencias estructurales, generar megaestructuras aptas para usos múltiples o alcanzar grandes alturas.

Distintas tipologías arquitectónicas surgen y evolucionan, optimizándose progresivamente el comportamiento estructural, el uso de los materiales, los modos de producción, los métodos de puesta en obra, la interacción entre los distintos componentes, la organización espacial, etc., observándose una tendencia general hacia el **aumento de la complejidad formal** de las estructuras y de sus diferentes unidades.

Desde un punto de vista estructural, este aumento progresivo de la complejidad podría ser descrito a través del surgimiento y la evolución de cinco conceptos: el de **formas adaptadas a las solicitaciones físicas**, el de **integración de funciones**, el de **jerarquía espacial**, el de **organización fractal** y más recientemente el de **diseño algorítmico**.

En la obra de Robert Maillart aparecen claramente expresados, por primera vez, los conceptos de continuidad y de **formas adaptadas a las solicitaciones físicas**. Las características físicas del hormigón armado inducen a imaginar y diseñar estructuras cuyos componentes pueden considerarse como un todo continuo, cuyas formas pueden acercarse a la línea de presiones del sistema de cargas que sobre ellas actúan y cuyas secciones pueden deducirse de las tensiones actuantes, es decir, del comportamiento mecánico de la estructura.

Este nuevo modo de concebir las estructuras, surgido a principios del siglo XX a partir del uso generalizado del hormigón armado y de la evolución de los puentes en arco, representará un cambio radical en el diseño de estructuras.

La evolución del diseño de los puentes en arco parece seguir la idea que más adelante Le Ricolais expresará de diseñar una estructura partiendo de un bloque y trabajar por medio de escisiones. Podría considerarse que 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.

Todo el conjunto se comporta como una unidad, el eje de la estructura tiende a coincidir con la línea de presiones del sistema de cargas que actúa y tanto la altura como el ancho de las secciones pueden variar, ya que el hormigón armado toma su forma del molde en el que es vertido en estado fluido.

Las secciones de los arcos de Maillart se vuelven cada vez más complejas y toda la materia que no resulta necesaria para la estabilidad de la estructura va desapareciendo progresivamente, lo cual aumenta notoriamente la **eficacia** y la **economía** de sus obras.

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 de acero plegada que fabricaba en sus talleres de Maxéville. Los pórticos en forma de V o de U invertida, que constituían el principal elemento de soporte de la mayoría de sus proyectos de

viviendas prefabricadas, eran construidos en chapa plegada con secciones variables de modo de reducir la cantidad de material utilizado y aumentar su rigidez.

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, el proceso de montaje y desmontaje de las distintas piezas y consideraciones estáticas, se convirtieron en los factores que determinaban la forma de sus construcciones.

Prouvé consideraba a los formalismos como una negación de la arquitectura, sólo consideraciones de tipo técnico debían determinar la forma de una obra.

Las costillas de hormigón prefabricado diseñadas para las cubiertas de la Opera de Sydney y las vigas Gerber de acero fundido del Centro Pompidou son otros ejemplos paradigmáticos de modelado de la forma de los elementos estructurales de acuerdo a las variaciones de las solicitaciones físicas, en busca de la eficacia y la economía.

Por otra parte, a partir de mediados del siglo XX las estructuras aporticadas dejan de ser concebidas como esqueletos independientes cuya única función es la de garantizar la estabilidad y la durabilidad de la forma de los edificios en el tiempo y comienzan a pensarse como uno más de los tantos componentes que necesitan ser coordinados a efectos de una **optimización** constructiva.

La integración de sistemas, es decir, el diseño de **componentes que cumplen múltiples funciones**, implica un importante ahorro de energía y de materiales.

La Maison Tropicale de Jean Prouvé es uno de los primeros ejemplos de desarrollo de un sistema constructivo con una sorprendente integración entre estructura y acondicionamiento climático natural.

La chapa de acero superior del "sandwich integrado" del sistema constructivo estadounidense SCSD era a la vez revestimiento y estructura. Este sistema optimizaba los materiales estructurales al punto de emplear menor cantidad de acero por metro cuadrado que cualquier otro sistema industrializado de su tiempo.

En la década de 1980 comienza 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 la optimización del consumo energético, tal como ocurre con el diseño de las formas vivientes en la naturaleza. Los distintos componentes resultantes de un proceso de este tipo 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, es más que la suma de sus partes individuales.

En el Commerzbank de Frankfurt la ingeniería estructural y la de sistemas medioambientales estuvieron directamente vinculadas con el proyecto global del edificio desde las primeras etapas del proceso de diseño. 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 abovedada 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.

La cubierta traccionada originalmente ideada para el Congrexpo de Lille integraba estructura con distribución del sistema de aire acondicionado. Las vigas compuestas construidas en la cubierta del edificio Expo 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 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 análisis del comportamiento 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.

¹ Ver "*Stadtverwaltungsgebäude in London. City Hall in London*" (Foster, 2002, pp.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, pp.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 "sandwich integrado", diseñada en Estados Unidos por el arquitecto 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 de generar una nave de planta libre con una gran flexibilidad espacial. 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 esquema inicialmente estudiado para la estructura de la cubierta del Congreppo de Lille, consistente en un anillo comprimido y torsionado, soportado por un pórtico perimetral, hubiera definido una zona externa de servicios y un gran espacio interior libre. La cubierta colgante de ductos, tal como ocurre en los "Umbrella buildings", hubiera servido de soporte a las redes de instalaciones que abastecen a este gran espacio.

El espacio entre las fachadas exteriores e interiores del CNRP en Pekín, en el interior de la malla de acero, se utiliza como una gran cámara de aire ventilada. El diseño estructural de este edificio se integra con el diseño de los sistemas de acondicionamiento natural y los huecos de distinta escala que se generan definen también 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 claramente un modelo de **organización espacial** con características **fractales**.

Algunos de sus diseños surgen de la idea de repetición a distintas escalas de un mismo modelo geométrico, definiendo la estructura a una escala macro y a una escala micro. Otras veces define sus mega-estructuras a partir de un elemento base y un principio de organización jerárquico en varios niveles de complejidad 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 fractal 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 determina 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 S.O.M. en la década de 1960, podrían considerarse igualmente 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 interior de espacios como la estructura y el sistema de ventilación natural del Commerzbank de Frankfurt, diseñado por Norman Foster, siguen un patrón formal con características fractales. La estructura de este edificio 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 regulan según la magnitud de las sollicitaciones estáticas.

La estructura de este edificio se convierte en una compleja secuencia de vacíos de distintas escalas que, adquiriendo progresivamente inercia, definen espacios con distintas características, aptos para alojar distintas funciones.

La acumulación y repetición a distintas escalas de determinados patrones formales, eficaces para distintos propósitos, podría ser interpretado como uno de los procedimientos que la naturaleza ha utilizado para la optimización de sus estructuras.

La naturaleza, para Cecil Balmond, es un conjunto de patrones en continua evolución que interactúan y es precisamente esa interacción la que dirige sus caminos evolutivos en un proceso que resulta no-lineal y caótico. Nuevas configuraciones materiales con geometrías cada vez más complejas, emergen continuamente como resultado de estos procesos.

Balmond se plantea entonces la posibilidad de utilizar procedimientos **algorítmicos** no-lineales como herramientas para definir 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 un equipo permanente compuesto por un arquitecto, tres ingenieros, un matemático y un científico, con el objetivo de investigar sobre el diseño de formas y estructuras geoméricamente complejas y con un interés específico en el desarrollo y uso de algoritmos, matemáticas fractales y no-linealidad en el diseño de estructuras.

En el año 2005 creó el Instituto de Investigación No-Lineal (NLSO) en la Universidad de Pensilvania con objetivos similares a los del AGU: 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, se convirtieron finalmente en el resultado de un proceso algorítmico que emula a ciertos procesos naturales de generación de formas. Por este motivo es posible percibir un cierto sentido de orden en la aparente aleatoriedad de este diseño.

En el pabellón para la Serpentine Gallery del año 2002 ¹, 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 ², 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 Arnhem ³ como en el del Parque Chavasse de Liverpool ⁴, 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 inscrita en la concepción aristotélica del término, ya que se trata de representaciones personales del universo por haber sido generados a través de procedimientos análogos a los que sus diseñadores entienden que son empleados por la naturaleza para la generación de formas.

Los procesos tradicionales de diseño, proyecto y construcción edilicia no son aptos para trabajar con obras de geometrías complejas, por lo que la labor en grupo de un equipo multidisciplinario de especialistas y el diseño de estrategias constructivas junto a los contratistas es fundamental.

A la tarea de diseñar un edificio van integrándose un número cada vez mayor de especialistas en variadas disciplinas. La tendencia hacia un **diseño integral** va convirtiendo al proyecto arquitectónico en una tarea cada vez más compleja en la que converge un volumen cada vez mayor de información; las barreras entre las distintas disciplinas comienzan a disolverse, los roles se confunden y surgen prácticas de diseño integradoras.

El surgimiento de las grandes empresas de ingeniería multidisciplinaria que trabajan a escala mundial hace posible esta operativa de trabajo.

El ingeniero Ove Arup, en su discurso del 9 de julio de 1970 ⁵, 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.

¹ Ver "*Grid*" (Balmond, 2006C, pp.26-33).

² Ver "*Numbers*" (Balmond, 2006F, pp.124-135).

³ Ver "*The generative line*" (Balmond, 2006D, pp.72-75) e "*Informal*" (Balmond et al., 2002, pp.345-368)

⁴ Ver "*The generative line*" (Balmond, 2006D, pp.76-81).

⁵ Ver "*The Key Speech*" (Arup, 1970).

Arup planteaba que un proceso de trabajo con estas características podía llevarse a cabo exclusivamente con profesionales de su propia oficina o trabajando en colaboración con otras firmas o empresas.

Este desafío implicaba expandir los campos de actividad a que su oficina solía dedicarse hasta la fecha y aventurarse en disciplinas como la arquitectura, la planificación, la ingeniería de suelos, la ingeniería medioambientalista, la programación informática, la planificación de obra, etc. Esta voluntad de expansión profesional de la empresa obedecía a una búsqueda de optimización de la calidad del trabajo, reconociendo que la íntima **integración de varias disciplinas** es el camino hacia el diseño de una buena obra de arquitectura.

Para alcanzar este objetivo, decía Ove Arup, es necesario contratar personal altamente calificado en diversas disciplinas, con capacidad de trabajar en equipo. La sede de Arup & Partners de Escocia fue la primera empresa en comenzar a ofrecer servicios de ingeniería multidisciplinaria para la edificación en el año 1970. Hoy en día *Arup* se ha convertido en una firma mundial, con sedes en 33 países de los cinco continentes.

Generalmente los problemas que se enfrentan en este tipo de proyectos son únicos y los grupos de trabajo se forman con miembros de los diferentes equipos permanentes de diseño junto a otros profesionales colaboradores, según la problemática particular.¹

Los contratistas más reconocidos a escala mundial por dedicarse a la construcción de obras con geometrías complejas, tales como Waagner Biro, Hochtief Aktiengesellschaft, Grands Travaux de Marseille, etc., han debido trabajar en colaboración con las grandes firmas de arquitectos e ingenieros, repensando los procedimientos habituales de construcción y fabricación edilicias.²

Muchas compañías han desarrollado, en los últimos años, sus propias herramientas digitales y sus propias técnicas para la integración del modelado digital con la fabricación asistida por ordenador (procedimientos CAD/CAM). Esta técnica ha permitido la rápida y económica construcción de maquetas a escala real para la realización de ensayos destructivos de algunos componentes estructurales, tal como los ensayos a escala real que Torroja realizaba para la verificación de sus cálculos aproximados.

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX aparecieron los primeros instrumentos analíticos necesarios para el cálculo bidimensional de estructuras aporricadas complejas que aplicaban la Teoría de la Elasticidad.

Muchas obras de cierta complejidad geométrica fueron construidas en esta época basadas en la intuición de sus proyectistas y en cálculos aproximados ya que resultaba evidente la aptitud de su diseño para resistir las solicitaciones físicas, si bien no era matemáticamente posible analizarlas con exactitud.

A partir de la segunda mitad del siglo XX el vertiginoso desarrollo de los programas informáticos y de los métodos matriciales de cálculo, tales como el Método de la Rigidez o el Método de los Elementos Finitos, puso al alcance de los especialistas en

¹ Ver *"The Buro Happold Tapes"* (Castle, 2002, pp.67-78).

² Ver *"Manufacturing Complexity: Johann Sischka in Conversation with the Emergence and Design Group"* (Hensel et al., 2004E, pp.72-79).

estructuras una herramienta idónea para el manejo rápido y confiable de grandes volúmenes de datos permitiendo la realización de cálculos analíticos exactos en estructuras tridimensionales con geometrías complejas.¹

En general, la necesidad de resolver algunos proyectos excepcionales con determinadas problemáticas particulares, tales como la Opera de Sydney, el Centro Pompidou, los rascacielos de los años 1960 o el CNRP de Pekin, ha sido el principal impulso para el desarrollo y la evolución de estos programas que, una vez creados, pasan a ser utilizados para el diseño de edificios comunes.

La disponibilidad de este tipo de herramientas ha permitido optimizar enormemente el uso de los materiales, permitiendo determinar con mayor exactitud las cargas actuantes, la rigidez, las solicitaciones y las deformaciones de las estructuras en general y particularmente de aquellas con geometrías complejas.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

¹ Ver "Arups and the computer" (Povl, 1968, p.3).

5 Conclusiones provisionales



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

A partir de mediados del siglo XX comienza a vislumbrarse un nuevo modo de entender los criterios de **eficacia** y de **optimización** en el ámbito de las estructuras arquitectónicas con la adopción y reformulación de algunos conceptos surgidos en el seno de la Teoría General de Sistemas tales como complejidad, azar, autoorganización, emergencia, no-linealidad y fractalidad.

Algunos de estos conceptos pueden encontrarse en edificios y estructuras construidos con anterioridad a este período y diseñados, en general, como resultado de una búsqueda de la eficacia y la optimización formal de una determinada tipología constructiva.

En la evolución de los perímetros amurallados europeos puede percibirse la emergencia de geometrías con características fractales, durante los siglos XVI y XVII, como respuesta a la repentina aparición de una nueva arma: el cañón. Una forma más compleja emerge 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 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 era capaz de construir grandes estructuras con un procedimiento que fue 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.

Las cubiertas suspendidas con forma de paraboloides hiperbólicos y las torres con forma de hiperboloides de revolución que Vladimir Shukhov construyó en Rusia, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, recurrían a la autoorganización de la materia para la definición de su geometría. A partir de la puesta en obra de elementos lineales simples y estandarizados, como son los perfiles normalizados de acero, Shukhov construyó superficies complejas de doble curvatura, inéditas hasta el momento en el campo de la construcción y con extraordinarias cualidades resistentes.

A fines del siglo XIX Antoni Gaudí comenzó a diseñar sus construcciones utilizando procedimientos empíricos basados en la autoorganización de la materia para encontrar formas optimizadas frente a las cargas gravitatorias.

La iglesia de la Colonia Güell fue, seguramente, el primer proyecto diseñado y calculado a través de un modelo formado por una malla suspendida de alambres que, sometido a su propio peso, adoptaba la forma de un arco catenario tridimensional.

En los puentes diseñados por Robert Maillart, a principios del siglo XX, aparecen por primera vez los conceptos de continuidad y lo que se denominó en este trabajo como *formas adaptadas a las solicitaciones físicas*.

Las características del hormigón armado indujeron a Maillart a imaginar y diseñar estructuras cuyos componentes pueden considerarse como un todo continuo, cuyas formas se acercan o coinciden con la línea de presiones del sistema de cargas actuantes y cuyas secciones se deducen de las solicitaciones físicas.

En la medida en que el comportamiento de la materia es quien fundamentalmente determina la forma de la estructura y la geometría de sus secciones, podría considerarse que los métodos de diseño empleados por Maillart, si bien son analíticos y no utilizan experimentos materiales, recurren igualmente al concepto de autoorganización de la materia para reducir la cantidad de material en las estructuras.

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

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

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

Las superficies de doble curvatura, por otra parte, siempre resultan más eficaces que las de simple curvatura.

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 y en él es posible descubrir que las fuerzas mecánicas actúan sobre las estructuras naturales volviéndolas más eficientes y que las estructuras diseñadas por el hombre pueden seguir estos mismos principios. Si bien D`Arcy Thompson no utiliza explícitamente el concepto de fractalidad, en varios de sus análisis y dibujos sobre organismos y procesos naturales aparecen formas con características fractales, como por ejemplo en los análisis de gotas de un líquido diluyéndose en otro líquido, de la formación de los esqueletos de algunas especies de radiolarios, de la constitución de ciertos tejidos, o en los esquemas de los tentáculos de las medusas, de las nervaduras de las alas de las libélulas, de los cristales de la sal común o de las líneas de sutura de los caparzones de las amonitas triásicas.

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, en diversos ámbitos del saber.

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.

De este modo, 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.

A partir del estudio de la materia ósea descubre la importancia de los huecos. Cuanto más se expande un elemento estructural en el espacio, mayor inercia y rigidez adquiere; una buena forma de diseñar estructuras es, por lo tanto, partir de elementos huecos, livianos y con una gran rigidez.

Los huecos en el interior de las unidades estructurales, por otra parte, pueden utilizarse para alojar funciones de servicio. La geometría de la estructura puede definir, entonces, un sistema de vacíos a distintas escalas que determine la organización espacial del edificio.

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 espacio interior contenido. 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.

A partir de la segunda mitad del siglo XX aparecen en el ámbito de las ciencias naturales la Teoría General de Sistemas, la Teoría del Caos y la No-Linealidad, la Teoría de las Catástrofes, la Teoría de la Autoorganización y la Teoría de los Fractales, que comienzan a reflexionar sobre una serie de conceptos tales como complejidad, azar, autoorganización, emergencia, no-linealidad y fractalidad, que rápidamente se trasladan al ámbito del diseño de las estructuras arquitectónicas **promoviendo, en la búsqueda de la eficacia y la optimización, el desarrollo de formas complejas.**

Si bien algunos de estos conceptos ya fueron aplicados previamente en este ámbito, de un modo intuitivo y con el objetivo de mejorar la eficacia o de optimizar el diseño de algunas construcciones, será en los últimos 60 años cuando se apliquen sistemáticamente a las distintas tipologías estructurales.

El vertiginoso desarrollo de los programas informáticos de dibujo y de cálculo que en este período se produce, favorece este proceso, ya que posibilita la manipulación y el intercambio de grandes volúmenes de información con gran precisión y de un modo sencillo.

En las investigaciones recientes sobre la **eficacia** de las estructuras se observa una adopción recurrente de los conceptos de **autoorganización** y de **fractalidad**.

Los conocimientos acerca de los procesos de **autoorganización** de la materia son fundamentales para el diseño de cualquier estructura traccionada.

Frei Otto retomó, a partir de la construcción de sus primeras tensoestructuras en la década de 1950, los experimentos de "form finding" que Gaudí había inventado a finales del siglo XIX para el diseño de estructuras. Estos experimentos consisten en procedimientos físicos que utilizan los procesos de autoorganización de la materia bajo un determinado sistema de cargas para encontrar formas eficaces para determinadas funciones.

Entre 1964 y 1991, como director del "*Institut für Leichte Flächentragwerke*" (IL) de Stuttgart, desarrolló y dirigió una enorme variedad de experimentos de este tipo. Se destacan, entre otros, los experimentos con películas de jabón para producir modelos de tensoestructuras de membranas y de redes de cables pretensados con áreas mínimas, los experimentos con membranas traccionadas por aire o agua hechas con materiales capaces de endurecer luego de inflados, los experimentos con cadenas para hallar formas de construcciones colgantes estabilizadas por su propio peso y cáscaras comprimidas con la forma inversa de formas traccionadas suspendidas, los experimentos con hilos para investigar estructuras ramificadas, los experimentos con montañas de arena para estudiar construcciones con barro y los experimentos con discos giratorios para investigar la estabilidad de las construcciones de mampostería frente a las cargas horizontales.

Para la construcción de tensoestructuras de membrana, de redes de cables o de bóvedas comprimidas con materiales flexibles, tales como tablas de madera o tubos de cartón, es necesario diseñar, además de procesos de diseño, procesos de montaje en obra que recurran a la autoorganización de la materia para poder dar a la obra su forma final.

Lars Spuybroek, director del grupo holandés Nox, desarrolló también una serie de procesos de "form finding" para diseñar algunos de sus proyectos, reproduciendo mecanismos naturales de autoorganización que conducen a formas eficaces para determinadas funciones. Pero además de los clásicos experimentos que encuentran una forma sometiendo un conjunto de materiales a la deformación que produce un sistema de cargas, diseñó algunos procesos en los que la deformación de los sistemas materiales pasan por un instante crítico en el que sufren algún cambio cualitativo trascendente y procesos en los que interviene activamente la selección del proyectista, de modo de permitir una calibración más precisa de los resultados obtenidos.

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

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

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

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 por Buckminster Fuller para resolver la estructura de cúpulas y domos geodésicos, están inspiradas en la observación de esqueletos de radiolarios. Estas figuras geométricas se forman, en dichos esqueletos, por sedimentación de sílice en las paredes y aristas de vesículas que se empaquetan en estado líquido tal como ocurre en una espuma, es decir, autoorganizándose según leyes naturales como la del área mínima.

El concepto de autoorganización se encuentra presente, por lo tanto, en el diseño de proyectos recientes que continuaron este tipo de investigaciones, tales como la cubierta sobre el Patio Reina Elizabeth II en el Museo Británico de Norman Foster, el Proyecto Edén de Nicholas Grimshaw, la piel estructural del proyecto "*obliqueWTC*" de Nox o la malla del Centro Nacional de Natación de Pekín de PTW Architects y Ove Arup.

Los estudios preliminares para el diseño de la forma de la cubierta sobre el patio del Museo Británico incluyeron, además, la construcción de una maqueta con una película de jabón inflada entre el borde interior circular y el exterior cuadrangular, que fue medida y utilizada como base para la definición de la forma final por ordenador.

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 esta malla permite a la estructura del CCNP adquirir una gran rigidez y resistir sin inconvenientes 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 Opera de Sydney, de las vigas Gerber de acero fundido del Centro Pompidou y de los pórticos y los muebles de chapa de acero plegada 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 procedimiento para el 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 implican 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 de 20 metros de lado 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 diseño 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, tales 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 las caparazones de algunos virus, formadas a partir de la agrupación de subunidades más simples.

Con cada nuevo nivel de complejidad que surge, emergen propiedades que no pueden ser explicadas únicamente a partir de las características de sus componentes, de modo que el todo es siempre más que la suma de sus partes.

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 S.O.M., 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".

En el punto 4.4.4.1, por otra parte, se propuso una serie de polígonos fractales inspirados en el diseño del Commerzbank de Frankfurt que podrían utilizarse como base para el diseño de las plantas de un 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.

En las búsquedas recientes sobre la **optimización** de las estructuras, consideradas como uno de los tantos componentes constructivos que necesitan ser coordinados en una obra arquitectónica, se observa una tendencia al **diseño integrado** de ciertos elementos de modo de ser capaces de responder a múltiples funciones, a la **coordinación espacial jerárquica** de los programas arquitectónicos con los huecos que la estructura genera y al **diseño algorítmico**.

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

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

Para la cubierta sobre el patio del Museo Británico, un equipo formado por integrantes de Foster & Partners y de Buro Happold trabajaron en el diseño de un sistema optimizado 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, sino compleja; están siempre estrechamente vinculados a múltiples sistemas y su diseño está pautado por la optimización de sus múltiples funciones.

Las áreas de servicios y circulaciones, en donde es posible ubicar grandes pantallas y núcleos sin interferir con las áreas servidas de oficinas, se trasladan a los vértices de la planta triangular de modo que la superestructura 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.

Tanto la distribución interior de espacios como la estructura y el sistema de ventilación natural, por otra parte, siguen un patrón formal con características fractales.

En el nuevo Ayuntamiento para la ciudad de Londres, el trabajo en conjunto de los técnicos de Foster & Partners y de Arup hizo posible el diseño de una estructura Diagrid formada por una malla de perfiles tubulares en tres direcciones que, además de soportar la fachada vidriada norte de la Cámara de la Asamblea, juega un papel de primer orden en el sistema de acondicionamiento 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, 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, como en la de montaje o en el posterior desempeño del edificio. En este sentido son destacables los aportes de Buckminster Fuller, con sus investigaciones sobre domos geodésicos y sobre el concepto de "dymaxion" y el trabajo de Norman Foster, quien permanentemente investiga el desarrollo de nuevos sistemas constructivos que, además de integrar estructura con cerramientos y sistemas de instalaciones, recurren a procedimientos industrializados de fabricación y de montaje en obra y pretenden realizar un uso eficiente de la energía.

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

La **coordinación espacial jerárquica** de los programas arquitectónicos con los huecos que la estructura genera, es una idea que surge a partir de las observaciones de Le Corbusier de las formas naturales y de sus investigaciones acerca de la isotropía y la inercia de las estructuras.

Louis Kahn retoma esta idea y la convierte 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 de dicha materia con el medioambiente y con las fuerzas físicas, la emergencia de formas.

Estos procesos de autoorganización son no-lineales, por lo que rara vez es posible observar en la naturaleza dos formas vivas completamente idénticas.

La naturaleza parece seleccionar, a través de procesos evolutivos, formas eficaces para determinados objetivos y proporciones fáciles de codificar, como la áurea.

El número áureo: 1,61803398874989484... es un número irracional que teóricamente se determinaría iterando infinitas veces un algoritmo muy sencillo: $1 + 1/[1 + 1/(1 + 1/...)]$, definido también por la serie de Fibonacci. Según el número de veces que se itere, surge un valor diferente, de modo que un mismo proceso de generación de formas basado en este algoritmo o en la serie de Fibonacci, podría conducir a resultados diferentes.

Balmond trata de emular estos procesos algorítmicos 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 sollicitaciones físicas derivadas de su geometría irregular. Pequeñas variaciones en las condiciones iniciales de este tipo de procedimientos pueden conducir a resultados muy distintos, de modo que tienen características no-lineales y es el diseñador quien decide cuáles son los resultados que mejor satisfacen las necesidades del proyecto.

Dado que estos diseños 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.

Las ideas de Sócrates y de Aristóteles sobre la belleza se entremezclan si partimos del concepto de 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 representación del universo o 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 optimización con los demás componentes constructivos, en el caso de las estructuras arquitectónicas en la Era Moderna), tienden 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 optimización.

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, además, son complejas en múltiples escalas. Cada uno de sus componentes cumple con más de una función. Los sistemas naturales y sus partes están optimizados para satisfacer varias necesidades a la vez aunque no necesariamente nos resulten éstas evidentes.

Es decir que los organismos naturales se desarrollan en estrecha relación con su entorno, con coherencia funcional, estructural y formal. Todos los procesos biológicos, por otra parte, están optimizados energéticamente ya que la energía disponible en el medio ambiente es limitada.

Según Hickman, Roberts y Larson existen siete propiedades generales que caracterizan a los seres vivos (Hickman et al., 2001, pp.3-10):

Singularidad química: la evolución de la materia viva ha desarrollado el ensamblaje de grandes moléculas, conocidas como macromoléculas, que poseen un nivel de complejidad mucho mayor al de las pequeñas moléculas que conforman la materia inerte. Estas macromoléculas, sin embargo, están compuestas por los mismos átomos y enlaces químicos que las pequeñas moléculas y obedecen a las mismas leyes fundamentales de la química. Es la compleja organización estructural lo que las hace únicas.

Complejidad y organización jerárquica: los átomos y moléculas se combinan en la materia viva en patrones que no existen en la materia inerte. En los sistemas vivos se puede identificar una jerarquía de niveles que incluye, en orden ascendente de complejidad, macromoléculas, células, organismos, poblaciones y especies. Cada nivel está basado en el nivel inferior y tiene su propia estructura interna, que a menudo también es jerárquica: a nivel del organismo, por ejemplo, las células se combinan en tejidos, éstos en órganos y a su vez en sistemas de órganos. Cada nivel de organización jerárquica está compuesto por unidades del nivel anterior, pero las propiedades de ningún nivel pueden ser obtenidas de un conocimiento completo de las propiedades de sus componentes. La aparición de nuevas características en un nivel se denomina *emergencia*.

Interacción con el medio ambiente: todos los seres vivos interactúan y responden a estímulos en su medioambiente. La vida y el medio ambiente son inseparables. No se puede aislar la historia evolutiva de un organismo del entorno en el que ocurrió.

Metabolismo: los organismos vivos se mantienen a sí mismos obteniendo nutrientes de su medio ambiente.

Desarrollo.

Reproducción.

Programa genético.

Al menos tres de estas siete propiedades: singularidad química, organización compleja y jerárquica e interacción con el medio ambiente, son características que el diseño estructural arquitectónico está actualmente investigando e intentado desarrollar, de modo que podría afirmarse que la naturaleza continúa siendo uno de los principales referentes para la disciplina. Nuevas organizaciones espaciales, nuevos materiales y una cierta capacidad de interacción o de adaptación a las leyes de la naturaleza, son temas de los que hoy día se ocupan numerosos diseñadores e investigadores.

Personalidades como Robert Le Ricolais en la Universidad de Pensilvania, Frei Otto en el IL de la Universidad de Stuttgart, Cecil Balmond en la Unidad de Geometría Avanzada de Arup y en el Instituto de Investigación No-Lineal de la Universidad de Pensilvania, se han dedicado a descubrir nuevas configuraciones geométricas en la naturaleza que puedan tener aplicaciones novedosas en el ámbito de las estructuras arquitectónicas.

Algunos modelos estructurales desarrollados en los últimos años, paradójicamente, han llegado a ser adoptados en el ámbito de las ciencias naturales para explicar mejor el comportamiento de algunas formas naturales.

La estructura de las células, de los átomos de carbono, de algunas proteínas y virus, e incluso de la espina dorsal o del esqueleto humano completo, han sido recientemente explicadas como estructuras tensegrity.¹ Los huesos de un esqueleto podrían considerarse como piezas comprimidas, aisladas e interconectados a través de tejidos continuos en tracción, como los músculos, los ligamentos y las fascias.

Las investigaciones realizadas por Frei Otto acerca de la morfología de las estructuras neumáticas, por otra parte, han sido útiles para comprender mejor los procesos de generación de algunas formas primitivas de vida.

La complejidad de las formas naturales es todavía asombrosa para nuestras mentes. El número de lecciones que aún tenemos por descubrir, encerradas en la morfología del más sencillo de los organismos, es sin lugar a dudas enorme. Si el código genético almacenado en una semilla es capaz de extraer del barro todo el material necesario para formar una planta y a partir del reino vegetal pueden surgir todas las formas del reino animal, si la diferencia fundamental 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 de esos átomos, es evidente lo ínfimos que aún son nuestros conocimientos acerca de la forma.

La materia viva emplea muy pocos materiales para resistir esfuerzos: la celulosa, el colágeno, la quitina y la seda, y casi todos ellos están formados por fibras compuestas con densidades muy inferiores a las de los materiales utilizados en la industria de la construcción.

El excelente desempeño de estos materiales se debe a la organización geométrica jerárquica a distintas escalas de sus fibras. Las fuerzas físicas fundamentales que los organismos experimentan a lo largo de sus vidas van produciendo un depósito selectivo de material allí donde es necesario. Dichas fuerzas son cuatro: la gravedad, el electromagnetismo y las dos fuerzas nucleares, una débil y una fuerte, que actúan sobre la materia a distintas escalas.

¹ Ver: "Tensegridad: estructuras tensegríticas en ciencia y arte" (Gomez Jauregui, 2007) y "Tensegridad" (Torné, 2008).

Algunas hipótesis sobre las que se basan los métodos de cálculo derivados de la Teoría de la Elasticidad, tales como la continuidad, la homogeneidad y el isotropismo de los materiales o la distribución homogénea de tensiones en determinados casos, resultan burdas si pensamos en la complejidad geométrica de las formas naturales. Nuestras modelizaciones sobre la geometría, las cargas actuantes, el comportamiento de los materiales, las reacciones de la materia, los vínculos, las deformaciones, etc., consisten en general en simplificaciones muy básicas.

Es necesario investigar el comportamiento de nuestros materiales estructurales a distintas escalas. Éstos pueden ser diseñados a escala micro en conjunto con la escala macro de las estructuras edilicias.

El hombre ya ha emprendido el estudio de los nanomateriales y sus posibles aplicaciones si bien éstos no han sido trasladados aún, prácticamente, al ámbito de la arquitectura.

Es necesario emprender con seriedad el diseño estructural a distintas escalas si pretendemos abordar el problema de la forma como medio para alcanzar un nuevo nivel de eficacia y optimización en nuestras construcciones arquitectónicas. Debemos, para ello, tener en cuenta la influencia de las distintas sollicitaciones en la materia provocadas a distintas escalas por las cuatro fuerzas fundamentales, establecer una íntima relación entre la malla jerárquica de huecos que emergerá (a efectos de la optimización resistente de la materia) y el uso del espacio, y abordar el diseño de dispositivos con múltiples funciones.

Una tarea de diseño de este tipo implicaría la participación de técnicos de diversas disciplinas, tales como matemáticos, físicos, químicos, informáticos, ingenieros de todas las especialidades y arquitectos. El ordenador, potentes programas de dibujo, de cálculo estructural y de diseño de instalaciones, sofisticados métodos CAD/CAM de fabricación y una sólida base en química, física y matemáticas fractales serían, seguramente, las herramientas indispensables. El objetivo final de la disciplina, 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 planteaba Eladio Dieste, la plenitud del hombre.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6 Bibliografía y fuentes



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.1 Bibliografía

ABALOS, Iñaki y HERREROS, Juan (1989). "La técnica contenida. En torno a Myron Goldsmith", en revista Arquitectura Viva N°4, pp.34-35, Arquitectura Viva S.L., Madrid, enero 1989. ISSN: 0214-1256.

ABALOS, Iñaki y HERREROS, Juan (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°418, pp.3-9, Electa, Milán, octubre 1976. ISSN: 0008-7181.

ADAM, Andreas (1976B). "Chicago Story", en revista Casabella N°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° 1, p.3, Ove Arup Partnership, Londres, enero 1968. ISSN: 0951-0850.

ALBERT, Marie-Douce (2010). "Une nomade aux Tuileries; Architects: Jean Prouve", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N° 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, no. 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.

ANDERSON, Stanford (2006). "Dieci idee su Dieste", en revista Domus Nº 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, Nº 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 nº 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 Nº 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, Jarpoyo 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 Nº3, 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 Nº3, 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, Nº 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 Nº 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 nº9/10, pp.88-96, VCH Publishers, Chichester, Inglaterra, septiembre / octubre 1997. ISSN: 0003-8504.

BALMOND, Cecil (1998A). *Number 9: The Search for the Sigma Code*, Editorial Prestel, Berlín. ISBN: 978-3-7913-4067-8.

BALMOND, Cecil (1998B). "Informale e nuove strutture" en revista Lotus Nº98, Elemond S.p.A., pp.70-83, Milán, setiembre 1998. ISSN: 1124-9064.

BALMOND, Cecil (1999). "La nueva estructura y lo informal", en revista Quaderns Nº 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 Nº 17, p.2, ATC Ediciones, Madrid. ISSN: 1136-0062.

BALMOND, Cecil (2006A). "Deep Structure", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.16-21, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006B). "Structure as music", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.22-23, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006C). "Grid", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.24-59, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006D). "The generative line", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.60-115, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006E). "Chemnitz Stadium. Chemnitz, Germany, 1995", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.62-67, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006F). "Numbers", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.116-135, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006G). "Definition", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.130-135, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006H). "AGU. Advanced Geometry Unit", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.136-137, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006I). "Span", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.240-245, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006J). "Congrexpo (Lille Grand Palais). Lille, France, 1994", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.254-255, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (2006K). "CCTV New Headquarters, Beijing, China, 2003-2008", en revista A+U Nº 06:11 Special Issue: Cecil Balmond, pp.274-279, A+U Publishing, Tokyo, noviembre 2006. ISSN: 0389-9160.

BALMOND, Cecil (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.

BANHAM, Reyner (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.

BANHAM, Reyner (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 Nº 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 Nº 1, p.19, Ove Arup Partnership, Londres, enero 1968. ISSN: 0951-0850.

BECKMANN, P. (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°1, 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° 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° 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° 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° 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 N°19, pp.20-57, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

BOTTERO, María (1972). "Ricerca tecnologica e architettura", en revista Zodiac N° 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° 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° 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.

BROWNLEE, 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°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.

BUCHANAN, Peter (1998). "Reinventing the Sky-Scraper - Commerzbank Headquarters, Frankfurt, by Foster and Partners", en Revista A+U N°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, Nº 6, pp. 960-964, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

BURKHARDT, Berthold (2000B). "There's still plenty of scope - an interview with Frei Otto on the future of tent construction", en revista Detail vol. 40, Nº 6, pp. 965-970, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

BURKHARDT, Berthold (2000C). "The Eden project, Cornwall (Nicholas Grimshaw & Partners)", en revista Detail vol. 40, Nº 6, pp. 987-989, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

BURKHARDT, Berthold (2000D). "Japanese Pavilion at the Expo in Hannover (Shigeru Ban)", en revista Detail vol. 40, Nº 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 Nº. 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, Nº 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, Nº 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, Nº 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 Nº454, 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, Nº 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, Nº 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* Nº6, 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, Nº 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, Nº 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* Nº 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 Mc Gill-Quenn's University Press, Montéal, 1965. Primera edición en castellano: Gustavo Gili S.A., Barcelona, 1970. Traducción: Ignasi de Solá-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* Nº418, pp.15-23, Electa, Milán, octubre 1976. ISSN: 0008-7181.

CORRADINI, Antonella (ed.) y O`CONNOR, Thimoty (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 no. 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, Nº 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, Nº 1205, pp. 26-35, Emap Construct, Londres, julio 1997. ISSN: 0003-861X.

DAVEY, Peter (1997B). "Commerzbank environmental control", en revista Architectural Review, Vol. 202, Nº 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 Nº 335, pp. 28-29, Jean-Michel Place, Paris, julio / agosto 2001. ISSN: 0003-8695.

DAVOINE, Gilles (2001). "Jean Prouve et la mediterranee", en revista Moniteur Architecture AMC Nº 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, nº3, 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 Nº 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 Nº 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, Nº 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, Nº 684/685, pp. 69-87, Electa, Milán, diciembre 2000 / enero 2001. ISSN: 0008-7181.

DIESTE, Eladio (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.

DIESTE, Eladio (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.

DIESTE, Eladio (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.

DIESTE, Eladio (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.

DIESTE, Eladio (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* Nº12, vol. 65, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, diciembre 1984. ISSN: 0033-0752.

DORFLES, Gillo (1971). "Eero Saarinen: Recent Work", en revista *Zodiac* Nº 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* Nº 280, pp. 93-169, Jean-Michel Place, Paris, abril 1992. ISSN: 0003-8695.

DOUTRIAUX, Emmanuel (2004). "Informatique. La modelisation 3d et le projet. Entretien avec Jean Angelini, Cellule 3D, Agence AJN", en revista *Moniteur Architecture AMC* Nº 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, Nº 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.

EKHOUT, Mick (1972). "Frei Otto and the Munich Olympic Games (from the measuring experimental models to the computer determination of the pattern)", en revista *Zodiac* Nº 21, pp.12-73, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

EKELAND, Ivar (1999). "El caos existe, lo podemos descubrir", en revista Quaderns Nº 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 Nº 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.

FERNÁNDEZ-GALIANO, Luis (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.

FERNANDEZ-GALIANO, Luis (1999). "Norman Foster", revista AV Monografías, Nº 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 Nº 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 Nº44 "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, Nº 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, Nº3, pp.6-10, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1980. ISSN: 0951-0850.

FORSTER, Brian (1985). "The engineered use of coated fabrics in long span roofs", en revista The Arup journal, Vol. 20, Nº3, 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, Nº 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, no. 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* Nº 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* Nº. 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* nº 19, pp.58-74, Edizioni di Comunità, Milán. ISSN: 0394-9230.

FULLER, Buckminster (1969B). "R. Buckminster Fuller: recent works", en revista *Zodiac* nº 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, Nº 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, Nº 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 Nº 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 Arrijoa 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, Nº 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.
Disponibile en Internet <<http://www.giovannardierontini.it/Pubblicazioni.htm>>, [Acceso: 15 de marzo de 2011].

GIOVANNARDI, Fausto (2007B). "*Robert Maillart e l'emancipazione del C.A.*", Borgo San Lorenzo.
Disponibile en Internet <<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°418, 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, no. 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 materiaux. De l'acier moulé au polycarbonate. Entretien avec Peter Rice", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui n°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°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° 3, pp. 22-29, Corporate Communications Group, Londres. ISSN: 0951-0850.

GREGOTTI, Vittorio (1988). "L'architettura della nuova ingegneria", en revista Casabella N° 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 Diaz. Barcelona.

GRIMSHAW, Nicholas (1998). "Eden Centre, Cornwall, Grande-Bretagne, Grimshaw & Partners", en revista Techniques & Architecture N°437, pp.80-82, Jean-Michel Place, Paris, abril 1998. ISSN: 0373-0719.

GRINO, Sylvia y PERSON, Bruno (2000). "Eladio Dieste: 34 degres de latitude sud", en revista Moniteur architecture AMC N° 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° 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° 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°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°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°3, pp.6-9, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

HENSEL, Michael; MENGES, Achim y WEINSTOCK, Michael (2004B) "Frei Otto in Conversation with the Emergence and Design Group", en revista Architectural Design Vol. 74 n°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°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°3, pp.65-71, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

HENSEL, Michael; MENGES, Achim y WEINSTOCK, Michael (2004E) "Manufacturing Complexity: Johann Sischka in Conversation with the Emergence and Design Group", en revista *Architectural Design* Vol. 74 nº3, 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 nº9/10, pp.44-51, VCH Publishers, Chichester, Inglaterra, septiembre / octubre 1997. ISSN: 0003-8504.

HO, Mae-Wan (1999). "La nueva era del organicismo", en revista *Quaderns* Nº 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* Nº 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, Nº 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, Nº2 Toyo Ito Sección 1997, pp.121-144, Gustavo Gili, Barcelona. ISSN: 1136-9647.

ITO, Toyo (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. I.S.B.N.: 84-89882-12-6.

ITO, Toyo y SASAKI, Mutsuro (2001A). "Toyo Ito, Sendai Mediatheque, Miyagi, Japan, 1995-2000", en *Global Architecture Detail*, GA International A.D.A. 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 A.D.A. 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.

JENCKS, Charles (1997A) "Nonlinear Architecture. New science=New architecture?", en revista *Architectural Design* Vol.67 nº9/10, p.7, VCH Publishers, Chichester, Inglaterra, septiembre / octubre 1997. ISSN: 0003-8504.

JENCKS, Charles (1997B). "Complexity definition and nature's complexity", en revista *Architectural Design* Vol.67 nº9/10, pp.8-9, VCH Publishers, Chichester, Inglaterra, septiembre / octubre 1997. ISSN: 0003-8504.

JENCKS, Charles (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.

JENCKS, Charles (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* Nº 336, pp. 38-43, Info Prese, Paris, febrero 1980. ISSN: 0293-9274.

JODIDIO, Philip (1997). *Sir Norman Foster*, Editorial Benedikt Taschen Verlag GmbH, Colonia, Alemania, 1997. Traducción al castellano: Gonzalo Zubiaga. ISBN: 3-8228-8061-2.

JODIDIO, Philip (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.

JORDÁ, Carmen (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°31, pp.70-80, MIT Press, Massachusetts. ISSN: 0079-0958.

KAHN, Fazlur R. (1976). "Tall buildings", en revista *Casabella* N°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°2, pp.10-27, MIT Press, agosto 1953. ISSN: 0079-0958.

KAHN, Louis (1962). "Community and sports centre, Trenton, New Jersey; Architect: L. Kahn", en revista *L'Architecture d'aujourd'hui* n°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.

KAHN, Yasmin Sabina (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°237, Groupe Expansion, Paris, febrero 1985. ISSN: 0003-8695.

KAPLICKI, Jan (2002). *Confessions: Principles, Architecture, Process, Life*, Wiley-Academy Press, West Sussex, Inglaterra. ISBN: 0471495417.

KAPPLINGER, Claus (1996). "Kulka & Konigs: stade de Chemnitz [Chemnitz Stadium]; Winning architects: Peter Kulka, and Ulrich Konigs", en revista *L'Architecture d'aujourd'hui* N° 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°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° 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 Prouve's 'maisons tropicales' at the Pompidou centre in Paris", en revista *L'Architecture d'aujourd'hui* N° 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.

KOOLHAAS, Rem (1995A). "Koolhaas: Congrexpo a Lille [Euralille Congrexpo, or Grand Palais]", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N° 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° 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° 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° 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: Victor 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°108, pp.85-101, Groupe Expansion, Paris, junio / julio 1963. ISSN: 0003-8695.

LE RICOLAIS, Robert (1968). "La nature des choses", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N° 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° 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°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° 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° 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°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° 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° 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 Nº 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, Nº 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, Nº 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 Nº 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.

MANDELBROT, Benoît (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 Nº252, 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, Nº 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 Nº22, 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.

Mc CLEARY, Peter (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, Nº 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, Nº 5, pp. 104-108, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

MELVIN, Jeremy (2008A). "Height: Between possibility and responsibility", en revista Architectural Review Nº 1340, pp.38-41, Emap Construct, Londres, octubre 2008. ISSN: 0003-861X.

MELVIN, Jeremy (2008B). "Burj Dubai, Dubai, United Arab Emirates. Skidmore, Owings and Merrill", en revista Architectural Review Nº 1340, pp.80-83, Emap Construct, Londres, octubre 2008. ISSN: 0003-861X.

MELVIN, Jeremy (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, Nº 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 Nº 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, Nº 2, pp. 111-123, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, febrero 2003. ISSN: 0003-858X.

MERKEL, Jayne (2008). "Practice Profile - Pelli Clarke Pelli", en revista Architectural Design Nº6 "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 Nº 223, pp. 6-9, Groupe Expansion, Paris, octubre 1982. ISSN: 0003-8695.

MINKE, Gernot (1968). "Montréal 67", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui Nº 141, pp. 36-41, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

MINKE, Gernot (1972). "Tensegrity-Tragwerke. Ulm 1970-71", en revista Zodiac Nº 21, pp.132-145, Edizioni di Comunitá, 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 Nº 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 Nº8, 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, Nº32, Nueva Forma, Madrid, septiembre de 1968. ISSN: 0029-5825.

MONEO, Rafael (1993). "Geometría como única morada", en revista AV monografías Nº44 "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.

MONTANER, Josep Maria (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° 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° 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° 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°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° 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° 64, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

OTTO, Frei (1958). *Cubiertas colgantes*, Editorial Labor S.A., Barcelona. Traducción al castellano: Francisco Folguera.

OTTO, Frei (1962). "Imagination and architecture", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N° 102, pp. 89-93, Groupe Expansion, Paris. ISSN: 0003-8695.

OTTO, Frei (1963). "Pavilions for international garden exhibition, Hamburg", en revista Architectural Design, pp. 539-542, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres. ISSN: 0003-8504.

OTTO, Frei (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° 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° 223, pp. 48-59, Groupe Expansion, Paris, octubre 1982. ISSN: 0003-8695.

OTTO, Frei (1988). "Une recherche experimentale", en revista Techniques & Architecture N° 379, pp. 35-37, Jean-Michel Place, Paris, agosto / septiembre 1988. ISSN: 0373-0719.

OTTO, Frei (1999). "On nature, the model", en revista Domus N° 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° 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° 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, Nº 5, pp.102-105, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, mayo 1992. ISSN: 0033-0752.

PAPADEMETRIOU, Peter (2001). "Eero Saarinen. TWA Terminal. Il calcolo e l`invenzione", en revista Casabella, vol. 65, Nº 695-696, pp.21-33, Electa, Milán. ISSN: 0008-7181.

PARK, Jonathan (1976A). "Lightweight heavies", en revista Architectural Design, vol. XLVI nº9, pp.518-521, The Standard Catalogue Co. Ltd., Londres. ISSN: 0003-8504.

PARK, Jonathan (1976B). "Lightweight and tensile", en revista Architectural Design, vol. XLVI nº12, 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, no. 7, pp. 92-102, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, enero 1999. ISSN: 0003-858X.

PEARSON, Clifford (2008). "National Swimming Center. PTW Architects, CSCEC+Design and Arup", en revista Architectural Record, vol. 196, no. 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, no. 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 Nº98, 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, Nº 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 Nº 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 Nº22, 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 nº 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, Nº 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 Nº 807, pp.52-66, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1998. ISSN: 0012-5377.

PICCHI, Francesca (2001). "Jean Prouve, the anti-aesthete", en revista Domus Nº 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, Nº 5, pp. 191-201, McGraw-Hill Companies Inc., Nueva York, mayo 2001. ISSN: 0003-858X.

POLLOCK, Naomi (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 Nº 818, pp.3-16, Editoriale Domus, Milán, septiembre 1999. ISSN: 0012-5377.

POUSSE, J. F. (1987). "SOM. La prodigalité moderne", en revista Techniques & Architecture Nº372, 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.

POWELL, Kenneth (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, Nº32, 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].

PRIGOGINE, Ilya (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, Nº109-110, pp.98-101, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

PTW ARCHITECTS (2008). "Beijing National Aquatics Center. PTW Architects + CSCEC + Arup", en revista A+U Nº454, pp.112-129, A+U Publishing, Tokyo, julio 2008. ISSN: 0389-9160.

PTW ARCHITECTS (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.

RASTORFER, Darl (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, nº3, 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, Nº 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, nº4, pp.6-10, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

RICE, Peter (1977). "La structure metallique" en "Beaubourg" de Hélène Demoriane y François Barré, en revista L'Architecture d'Aujourd'hui Nº 189, pp. 60-65, Groupe Expansion, Paris, enero 1977. ISSN: 0003-8695.

RICE, Peter (1980). "Lightweight structures", en revista Arup Journal, Vol.15, nº3, pp.2-5, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1980. ISSN: 0951-0850.

RICE, Peter (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.

RICE, Peter (1998B). "Le rôle de l'ingénieur", en revista Moniteur Architecture AMC Nº. 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 Nº 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, Nº2, 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.

SABINI, Maurizio (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, N°32, 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° 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.

SASAKI, Mutsuro (2002). "Structures légères: histoire d`une filiation", en revista L`Architecture d`Aujourd`hui N° 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° 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.

SCULLY, Vincent (1993). "Jehová en el Olimpo. Louis Kahn y el final del Movimiento Moderno", en revista AV monografías N°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°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° 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 Tipa Lizarraga. ISBN: 3-8228-2866-1.

SHAND, P. Morton (1940). "Robert Maillart, 1872-1940", en revista Architectural Review, vol. 88, N°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° 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° 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° 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.

SOLÁ-MORALES, Ignasi (1993). "High tech. Funcionalismo o retorica?" en revista Lotus N°78, Elemond S.p.A., Milán. ISSN: 1124-9064.

SOLÁ-MORALES, Ignasi (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°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.

SONGEL, Juan María (2008). *Frei Otto: conversacion con Juan Maria Songel*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2008. ISBN: 9788425222054.

SONGEL, Juan María (2010). "Frei Otto y el debate sobre la génesis de la forma arquitectónica", en revista EGA: Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica Nº 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 Nº 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 Nº796, pp.28-33, Editoriale Domus, Milán. ISSN: 0012-5377.

SPUYBROEK, Lars (1998A). "Pabellón de Agua Dulce", en revista Quaderns Nº218: Rethinking Mobility, pp.4-14, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

SPUYBROEK, Lars (1998B). "Delta Expo, Haamstede, Pays Bas, Nox et K. Oosterhuis", en revista Techniques & Architecture Nº437, pp.76-79, Jean-Michel Place, Paris, abril 1998. ISSN: 0373-0719.

SPUYBROEK, Lars (1998C). "Beachness", en revista Architectural Design, vol.68, Nº11/12, pp.35-39, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

SPUYBROEK, Lars (2000). "Off the Road - 5speed", en revista Architectural Design, vol.70, Nº3, pp.56-61, Wiley, Chichester, Inglaterra. ISSN: 0003-8504.

SPUYBROEK, Lars (2001). "wetGRID / D-Tower", en revista A+U: Architecture and Urbanism Nº370, pp.27-33, A+U Publishing, Tokyo, julio 2001. ISSN: 0389-9160.

SPUYBROEK, Lars (2002). "SoftOffice", en revista A+U: Architecture and Urbanism Nº385, pp.96-101, A+U Publishing, Tokyo, octubre 2002. ISSN: 0389-9160.

SPUYBROEK, Lars (2004). *NOX: machining architecture*, Editorial Thames & Hudson, Londres. ISBN: 0 500 28519 5.

SPUYBROEK, Lars (2008). *The Architecture of Continuity*, V2_/NAi Publishing, Rotterdam. ISBN: 978 90 5662 637 2.

SPUYBROEK, Lars (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*, nº1, pp.20-32, Alicante. Disponible en Internet <<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 (2000B). "Construcción de cometas tetraédricas con materiales sencillos", en Revista *Al final del Hilo. Boletín de historia de la cometa*, Nº1, pp.33-41, Alicante. Disponible en Internet <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%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* Nº 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* Nº265, pp.198-211, Groupe Expansion, Paris, octubre 1989. ISSN: 0003-8695.

SUNER, Bruno (1990). "Banque de Chine à Hong Kong", en revista *L'Architecture d'Aujourd'hui* Nº270, 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*, Nº2 "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* Nº 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* Nº 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.

TATARKIEWICZ, Wladislaw (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.

TATARKIEWICZ, Wladislaw (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, Nº2 "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). "Tensegriudad", en Revista IPP Nº 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 nº19, 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, Nº52, pp.22-25, Nueva Forma, Madrid, mayo de 1970. ISSN: 0029-5825.

VASCONI, Claude (2003). "Vauban le magnifique", en Revue Technique Luxembourgeoise nº1, pp.20-31, enero de 2003, ALIAI, Luxemburgo. ISSN: 035-4260.

VERNES, Michel (1983). "Jean Prouve: architect-mechanic", en revista Architectural Review Nº 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 Nº 201, pp.42-60, Fontalba, Barcelona. ISSN: 0211-3058.

WAGENSBERG, Jorge (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 nº3, 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 al. 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, Nº 7, pp. 1202-1212, Reed Business Information, Munich, octubre / noviembre 2001. ISSN: 1578-5769.

WILLFORD, Michael (1985). "The derivation of overall design loads form the wind tunnel test results", en revista The Arup Journal Vol. 20, Nº 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 Nº369, 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° 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°53, Special issue. OMA / Rem Koolhaas, 1987-1993, pp. 6-31, El Croquis Editorial, Madrid. ISSN: 0212-5683.

ZAERA, Alejandro (1994B). "OMA 1986-1991. Notas para un levantamiento topográfico", en revista *El Croquis* N°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.

ZIENKIEWICZ, O.C. y TAYLOR, R.L. (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° 4, pp. 2-26, Ove Arup Partnership, Londres. ISSN: 0951-0850.

ZUNZ, Jack (1988A). "Sydney revisited", en revista *The Arup Journal*, vol.23 N°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° 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° 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, Nº2 "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.

A+U (2003). "PTW Architects + CSCEC Design + Arup Group. National Swimming Center", en revista A+U Nº 399, pp.26-33, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

A+U (2005A). "PTW Architects + CSCEC Design + Arup. National Swimming Center, Beijing, China 2003-2007", en revista A+U Nº 412, pp.124-129, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

A+U (2005B). "Nox / Lars Spuybroek. Son-O-House y D-tower", en revista A+U Nº 412, pp.76-87, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

A+U (2005C). "Jean Nouvel. Tower in Doha. Doha, Qatar, 2002", en revista A+U Nº 421 "Tall buildings", pp.86-87, A+U Publishing, Tokyo, octubre 2005. ISSN: 0389-9160.

A+U (2005D). "C.Y.Lee & Partners / Architects & Planners. Taipei 101", en revista A+U Nº 421 "Tall buildings", pp.110-113, A+U Publishing, Tokyo, octubre 2005. ISSN: 0389-9160.

A+U (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 Nº 440 "Recent Projects", pp.110-119, A+U Publishing, Tokyo, mayo 2007. ISSN: 0389-9160.

A+U (2007). "China Central Television (CCTV) Headquarters. Rem Koolhaas and Ole Scheeren / OMA", en revista A+U Nº 454, pp.90-111, A+U Publishing, Tokyo. ISSN: 0389-9160.

ARQUITECTURA VIVA (2000). "Eladio Dieste, 1917-2000", en revista Arquitectura Viva Nº 72, pp. 7-83, Arquitectura Viva S.L., Madrid, mayo / junio 2000. ISSN: 0214-1256.

ARQUITECTURA VIVA (2008A) "Nido de pasiones. Estadio nacional Olímpico", en revista Arquitectura Viva Nº 118-119, pp.82-101, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0214-1256.

ARQUITECTURA VIVA (2008B) "Calado de espuma. Centro Nacional de Natación", en revista Arquitectura Viva Nº 118-119, pp.102-117, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0214-1256.

ARQUITECTURA VIVA (2008C) "Bucle mediático. Sede de la CCTV", en revista Arquitectura Viva Nº 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 Nº17 "Paris, Francia", pp.42-47, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

AV MONOGRAFÍAS (1993A). "Galería de Arte de la Universidad de Yale", en revista AV monografías Nº44 "Louis I. Kahn", pp.32-35, noviembre / diciembre 1993, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

AV MONOGRAFÍAS (1993B). "Centro para la Comunidad Judía", en revista AV monografías Nº44 "Louis I. Kahn", pp.36-38, noviembre / diciembre 1993, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

AV MONOGRAFÍAS (1993C). "Laboratorios Médicos Richards", en revista AV monografías Nº44 "Louis I. Kahn", pp.39-43, noviembre / diciembre 1993, Arquitectura Viva S.L., Madrid. ISSN: 0215-487X.

AV MONOGRAFÍAS (1993D). "Instituto Salk de Estudios Biológicos", en revista AV monografías Nº44 "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, Nº 6, pp. 987-989, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

DETAIL (2000B), "Japanese Pavilion at the EXPO in Hanover", en revista Detail vol. 40, Nº 6, pp. 1012-1017, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

DETAIL (2000C), "Millennium Dome in London", en revista Detail vol. 40, Nº 6, pp. 1018-1023, Reed Business Information, Munich, septiembre 2000. ISSN: 1578-5769.

DETAIL (2002). "Temporärer Pavilion in London. Temporary Pavilion in London. Arch. Toyo Ito & Associates", en revista Detail vol. 42, no. 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 Nº53, Special issue. OMA / Rem Koolhaas, 1987-1993, pp. 126-143, El Croquis Editorial, Madrid. ISSN: 0212-5683.

EL CROQUIS (1994B). "Centre International D`Affaires - Congrexpo. Proyecto de Ordenación Urbana y Palacio de Congresos y Exposiciones. Lille, Francia, 1988/1991", en revista El Croquis Nº53, Special issue. OMA / Rem Koolhaas, 1987-1993, pp. 166-189, El Croquis Editorial, Madrid. ISSN: 0212-5683.

EL CROQUIS (1996). "Congrexpo [Lille Grand Palais], Lille", en revista El Croquis Nº79, 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 Nº 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 Nº105, pp.4-5, Groupe Expansion, Paris, diciembre 1962 / enero 1963. ISSN: 0003-8695.

L'ARCHITECTURE D'AUJOURD'HUI (1962-1963B). "Centre social et sportif à Trenton. 1955-1956", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N°105, pp.8-9, Groupe Expansion, Paris, diciembre 1962 / enero 1963. ISSN: 0003-8695.

L'ARCHITECTURE D'AUJOURD'HUI (1962-1963C). "Laboratoires Richards, Philadelphie. 1957-1961", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N°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°105, pp.29-34, Groupe Expansion, Paris, diciembre 1962 / enero 1963. ISSN: 0003-8695.

L'ARCHITECTURE D'AUJOURD'HUI (1963). "Pavillon pour les Florales Internationales de Hambourg, Allemagne. Frei otto, Architecte", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N°108, p.103, Groupe Expansion, Paris, junio / julio 1963. ISSN: 0003-8695.

L'ARCHITECTURE D'AUJOURD'HUI (1971). "Concours International du Plateau Beaubourg", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N° 157, pp.VI-X, Groupe Expansion, Paris, agosto / setiembre 1971. ISSN: 0003-8695.

L'ARCHITECTURE D'AUJOURD'HUI (1982). "Siège social de la Hongkong and Shanghai Banking Corporation", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N° 223, pp. 30-39, Groupe Expansion, Paris, octubre 1982. ISSN: 0003-8695.

L'ARCHITECTURE D'AUJOURD'HUI (2007). "WaterCube, Centre national olympique de natation, Beijing, Chine. PTW Architects avec CSCEC+Design ey Arup", en revista L'Architecture d'Aujourd'hui N° 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°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.

PROGRESSIVE ARCHITECTURE (1980B) "Form and circumstance", en revista Progressive Architecture, p.46-49, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, diciembre 1980. ISSN: 0033-0752.

PROGRESSIVE ARCHITECTURE (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° 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp.50-53, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

QUADERNS (1999B). "Victoria & Albert Museum. Libeskind", en revista Quaderns N° 222, Espirales. Tiempo abierto, tiempo fractal, pp.54-61, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona. ISSN: 0211-9595.

TECHNIQUES & ARCHITECTURE (1987). "Ieoh Ming Pei. megastructure, symbol of the Chinese challenge", en revista Techniques & Architecture N°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.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.2 Fuentes

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.

GALILEI, Galileo (1976). *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Editora Nacional, Madrid. Traducción: Javier Sábada Garay. Versión original: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638. ISBN: 84-276-1316-4.

GALILEI, Galileo (1984). *El ensayador*, Editorial Aguilar, Buenos Aires. Traducción: José Manuel Revuelta. Versión original: *Il Saggiatore*, 1623. ISBN: 848204012X.

GALILEI, Galileo (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.

HAECKEL, Ernst (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.

HAECKEL, Ernst (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, Nº17, 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.

VITRUVIO POLLINO, Marco (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>>.

Buckminster Fuller Institute, patentes:
<<http://www.bfi.org/aboutbucky/resources/bibliographic/r-buckminster-fuller-usa-patents>>.

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>.

S.O.M., 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>>.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante