REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

DISCURSO INAUGURAL

DEL AÑO ACADÉMICO 2004-2005

LEÍDO EN LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA 27 DE OCTUBRE DE 2004

POR EL ACADÉMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. MANUEL ELICES CALAFAT

SOBRE EL TEMA

LOS GOZOS Y LAS FORMAS

Reflexiones sobre la estética de las formas estructurales

MADRID
DOMICILIO DE LA ACADEMIA
VALVERDE, 22 - TELÉFONO 917 014 230
2004

Depósito legal: M. 43.905-2004

Impreso en Realigraf, S. A. - Pedro Tezano, 26. 28039 Madrid

LOS GOZOS Y LAS FORMAS

(Reflexiones sobre la Estética de las Formas Estructurales)

INDICE

1.- LOS GOZOS

1.1.- Los gozos de los místicos, artistas y científicos. 3
1.2.- La neurofisiología del gozo. 11

2.- LAS FORMAS ESTRUCTURALES

2.1.- Las formas naturales: El naturalismo. 19
2.2.- Las formas óptimas: El funcionalismo. 33

3.- LA MATERIALIZACION DE LAS FORMAS

3.1.- Cuando el material dictaba la forma. 51
3.2.- Cuando la forma dictará el material. 66

4.- REFERENCIAS 77

Excmo. Sr. Presidente, Excmos. Sres. Académicos, Señoras, Señores:
Agradezco el honor de haber sido designado para pronunciar esta lección inaugural que tratará de la estética de las *formas estructurales*, tema muy querido por los ingenieros académicos; Eduardo Torroja lo glosó, en la Real Academia de Ciencias, en su discurso inaugural del curso 1960-1961, y Carlos Fernández Casado y José Antonio Fernández Ordóñez le dedicaron un capítulo en sus discursos de ingreso en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

La primera parte de este ensayo es un diálogo entre las *formas* y el *gozo* que despiertan al **contemplarlas**; ya sea el deseo de imitarlas, de entenderlas o el arrebato místico que pueden provocar. Este gozo depende del bagaje cultural de cada uno y, también, de una cierta predisposición neuronal.

La **selección** de las *formas estructurales* por parte de los arquitectos y de los ingenieros está motivada por el tipo de *goce* evocado; en unos casos es un deseo de imitar las formas que nos muestra la naturaleza, en otros la consecuencia de creer que se ha entendido su función estructural. Naturalismo y funcionalismo son dos caras del enigmático poliedro creativo que se comentan de pasada en la segunda parte.

Una reflexión sobre la **materialización** de las *formas estructurales* cierra este discurso. No hace mucho, el material utilizado dictaba la forma estructural. En la actualidad, ya se vislumbra la posibilidad de diseñar el material para dar vida a la forma ideada por el arquitecto o ingeniero. Antes, el material dictaba la forma, a partir de ahora la forma podrá dictar el material.

Fig. 1



Simetría hexagonal de un cristal de hielo.
(Foto de Patricia Rasmussen).

1.- LOS GOZOS

1.1.- Los gozos de los místicos, artistas y científicos.

En una fría mañana de 1610, cuando Johannes Kepler cruzaba el puente Carlos, en Praga, observó sobre su gabán unos delicados cristales de hielo. El gozo evocado por las estrellas de nieve de seis puntas, que el cielo había depositado sobre sus hombros, le motivó a reflexionar sobre sus formas y a buscar una explicación de su simetría hexagonal. Kepler estaba convencido de que todo tenía una explicación —incluso la forma inanimada de un copo de nieve— y trató de asociar las formas geométricas con la armonía del cosmos y los planes del Creador. Era Navidad y estas especulaciones le proporcionaron el regalo que estaba buscando para su protector, Juan Mateo Wacker de Wackenfels, en forma de un librito titulado "Sobre los copos de nieve con seis puntas".

Las formas asociadas al número seis aparecen frecuentemente en la vida de Kepler. La observación de los cinco sólidos platónicos sugirió a Kepler que estos poliedros —inscritos o anidados uno dentro de otro— determinarían las distancias del Sol a los seis planetas conocidos en su época. Creyó haber reconocido en estas formas perfectas las estructuras invisibles que sostenían las esferas sobre las que se mueven los planetas. El Sol era una metáfora de Dios, alrededor del cual giraba todo lo demás.

La contemplación de las formas que nos muestra la naturaleza ha sugerido en muchos espíritus sensibles la presencia de un Creador. Kepler opinaba que las formas geométricas son eternas y un reflejo de la mente Divina, y que si gozamos contemplándolas es porque estamos hechos a la imagen y semejanza de Dios.

Fig. 2

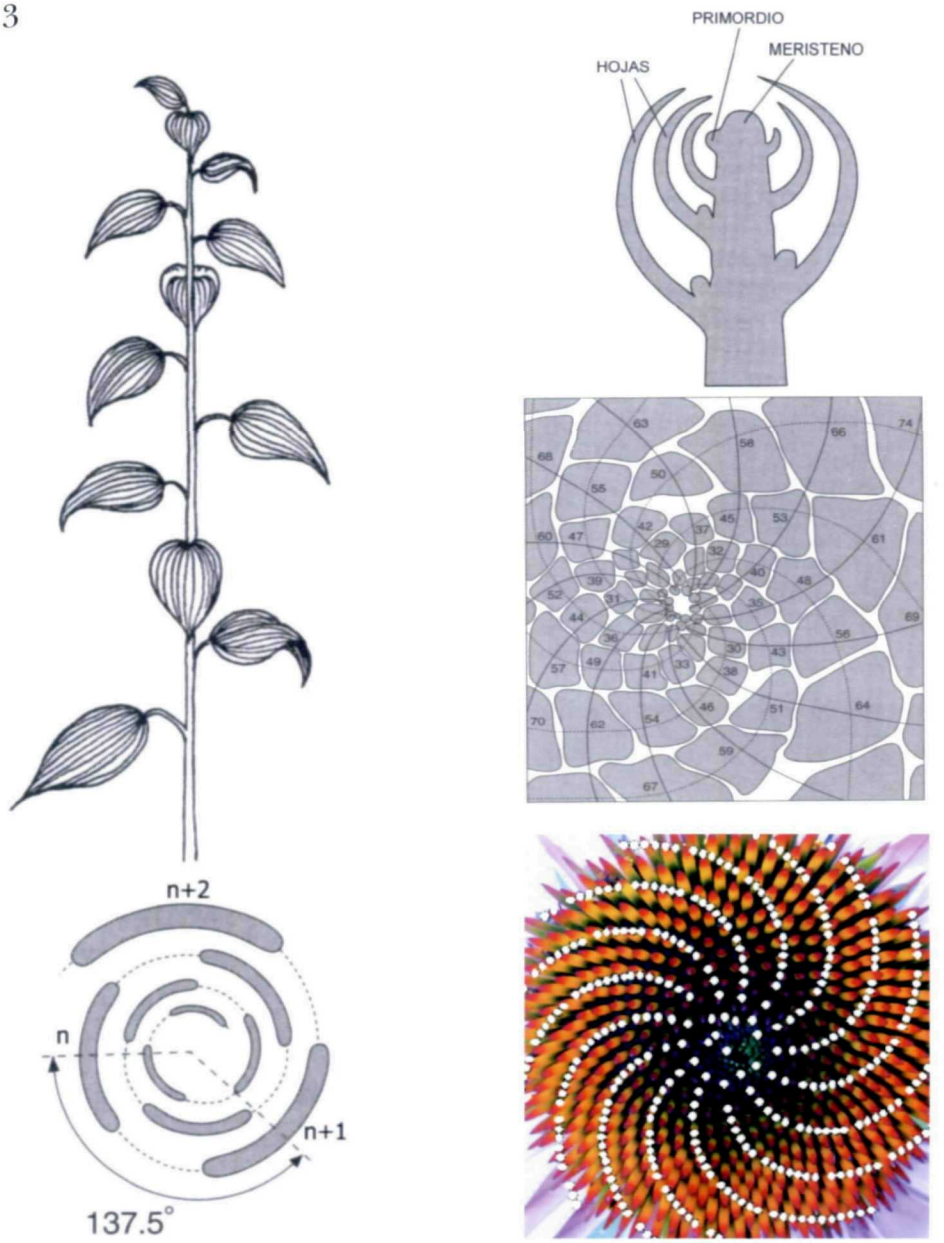


Estudio de nubes por John Constable.
En una nota fechada el 11 de septiembre de 1821 puede leerse
"Morning under the sun —clouds silvery grey, on warm ground sultry.
Light wind to the S.W. fine all day— but rain in the night following".

Para los artistas, la contemplación de las formas despierta un deseo irresistible de *imitarlas*. Las nubes han sido un motivo de inspiración para filósofos, poetas y artistas, pero John Constable —uno de los paisajistas más destacados del período romántico inglés— fue de los primeros en pintar las nubes fielmente, creando un equilibrio entre las luces y sombras producidas por la posición del Sol y el paisaje del fondo. En el dorso de alguno de sus lienzos se encontraron notas sobre el estado del tiempo en el momento de pintar el cuadro y comentarios sobre la meteorología días antes y después. Este original diario ha permitido a J. Thornes (1979) datar algunos paisajes con nubes de Constable, situándolos entre los veranos de 1821 y 1822.

De la misma forma que los científicos han utilizado a los artistas para documentar las formas que exhibe la naturaleza, algunos artistas se han apoyado en documentos científicos para entender mejor las formas que querían pintar. "We see nothing truly 'till we understand it", escribió Constable. Parece ser que Constable conocía las publicaciones del farmacéutico Luke Howard —uno de los padres de la meteorología— autor de la primera propuesta para clasificar las nubes y de varios ensayos sobre sus formas y evolución. Los estudios de nubes que pintó Constable marcaron una nueva forma de trabajar en aquellas epocas; fueron los comienzos de las pinturas al óleo al aire libre. Hasta entonces el óleo se reservaba para temas más acabados, más estáticos. Cuando los artistas trataron de imitar las fugaces nubes tuvieron que aguzar su ingenio, forzar la memoria y desarrollar nuevas técnicas para vencer el desafío de unas formas que pasaban y se desvanecían ante sus ojos.

Fig. 3



El ángulo central entre dos primordios sucesivos es el ángulo aureo (137.5°). Uniendo cada primordio con su vecino se pueden dibujar dos familias de espirales que se entrecruzan. El número de espirales en un sentido (m) y en sentido opuesto (n) son dos términos sucesivos de la serie de Fibonacci.

En las mentes más inquisidoras, el gozo producido al contemplar las formas estimula a *justificarlas*. Un buen ejemplo nos lo proporciona la disposición regular de las hojas y los pétalos de las flores alrededor del tallo; una rama de la biología llamada *filotaxis* ha despertado, desde hace siglos, el interés de filósofos, matemáticos y biólogos.

Los primeros intentos para justificar la disposición regular de las hojas y los pétalos fueron descriptivos y basados en la geometría de las formas. En la década de 1830 los hermanos Bravais —Auguste Bravais, el conocido cristalógrafo, y Lous Bravais, botánico— junto con K.F. Schimper y A. Braun iniciaron la andadura por el camino de la filotaxis. Entre otras cosas, descubrieron que la línea que une los primordios consecutivos es una espiral (o una hélice). Si ésta se proyecta sobre el plano perpendicular al tallo, el ángulo central entre dos primordios sucesivos es prácticamente constante e igual al ángulo aureo. Otro hallazgo fue darse cuenta de que si se une adecuadamente cada primordio con su vecino, se obtienen dos familias de espirales que se entrecruzan (las parastiquias). Por este procedimiento se pueden dibujar m espirales en un sentido y n espirales en sentido contrario; los números m y n son, casi siempre, dos términos sucesivos de la serie de Fibonacci. Los hermanos Bravais, en un artículo publicado en 1837, demostraron que si el ángulo entre dos primordios consecutivos era el ángulo aureo, los números m y n eran necesariamente dos términos consecutivos de la serie de Fibonacci y que estos valores dependían únicamente del crecimiento longitudinal del tallo o del número de flores en una planta compuesta.

El segundo paso en la descripción de la forma fue tratar de justificarla a partir de cómo crecen las yemas y de cómo optimizar su empaquetamiento. W. Hofmeister (1868) propuso un modelo, muy

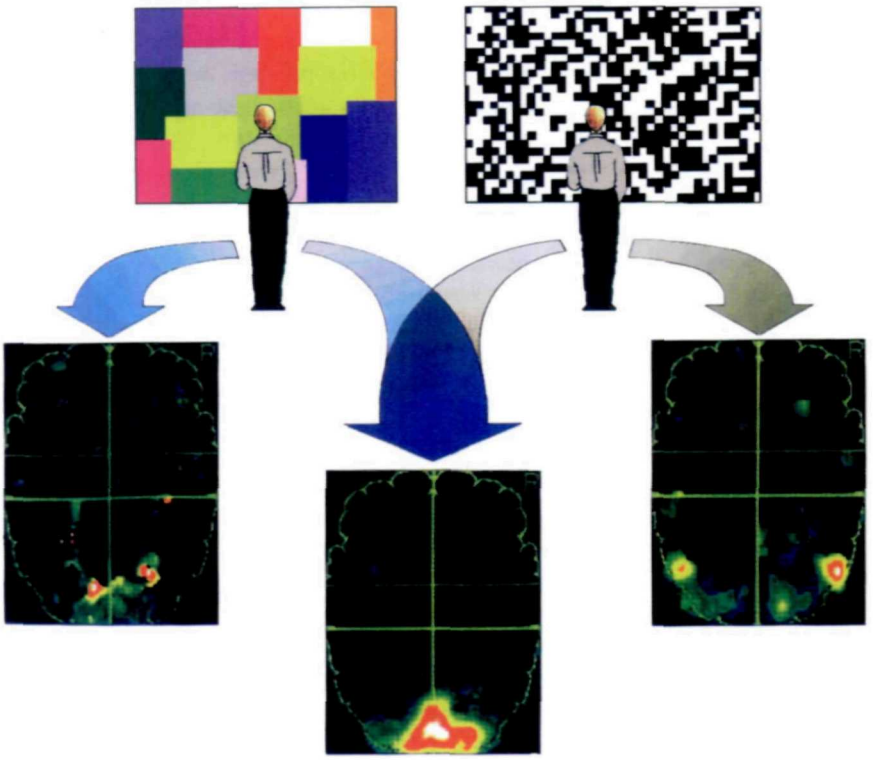
simple, suponiendo que los primordios aparecen periódicamente y se sitúan donde queda más espacio libre. En 1979, H. Vogel hizo un estudio numérico del empaquetamiento óptimo de los primordios y verificó que el ángulo adecuado era 137,5°. Recientemente S. Douady y Y. Couder (1992) han comprobado experimentalmente que la aparición del ángulo aureo es una consecuencia del empaquetamiento óptimo. Para ello utilizaron gotitas de un fluido magnético que flotaba sobre una capa de aceite. Un campo magnético perpendicular polarizaba las partículas magnéticas y las obligaba a repelerse, mientras que otro campo horizontal las forzaba a desplazarse radialmente. La disposición final de las partículas fue semejante a la de las flores de un girasol, pudiéndose trazar las dos familias de espirales, relacionadas con la serie de Fibonacci, y comprobar que el ángulo entre dos partículas sucesivas era el ángulo aureo. Solamente la dinámica del proceso —que en cierto modo simula el proceso de crecimiento de las flores— selecciona automáticamente este ángulo.

El siguiente paso va dirigido hacia la justificación de este proceso dinámico y busca los fenómenos fisiológicos responsables de la formación de los primordios y de su interacción. Una dirección prometedora es la basada en los modelos de difusión y reacción, sugeridos en 1952 por A. Turing. Recientemente, D. Reinhardt y colaboradores (2003) han propuesto que la filotaxis está regulada por proteínas relacionadas con el transporte de auxina (una hormona vegetal producida en regiones de crecimiento activo).

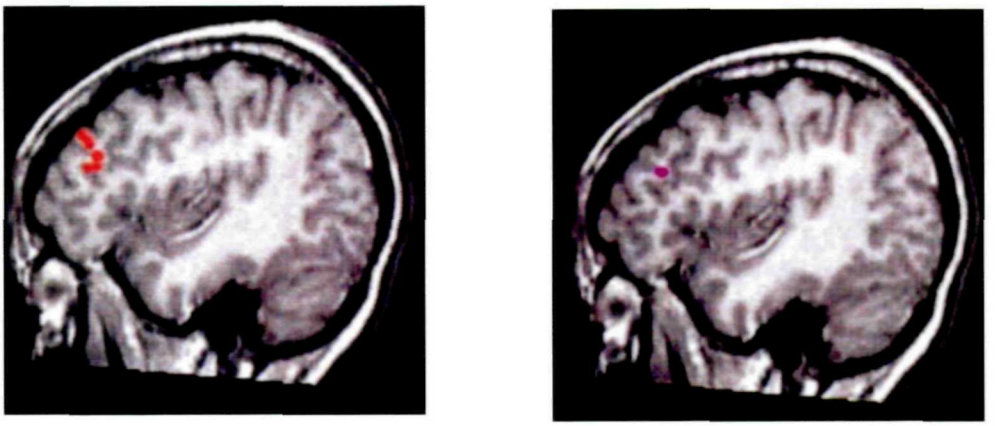
Las tres maneras de abordar el problema son complementarias; la geometría de la forma es una consecuencia de la dinámica del proceso constructivo y éste depende de las interacciones entre procesos fisiológicos. El problema sólo está parcialmente resuelto, pero todo

indica que la justificación de las agradables formas que nos brinda la naturaleza se pueden explicar a partir de procesos químicos donde la producción natural de estructuras por autoensamblaje es la clave del proceso sugerido hace cinco décadas por Alan Turing, quien optimistamente decía en una carta fechada el 28 de mayo de 1953 "... I don't know any really satisfactory account, though I hope to get one myself in about a year's time". Desgraciadamente falleció en 1954.

Fig. 4



Al observar una escena coloreada (izquierda) se activa el área V4.
Al observar una escena en movimiento es el área V5 la que se activa.



Al observar una escena bella se activa una región de la corteza dorsolateral prefrontal (izquierda). Esta zona permanece inactivada si el estímulo no evoca la sensación de belleza (derecha).

1.2.- La neurofisiología del gozo.

¿Por qué unas formas nos gustan más que otras? ¿por qué el goce de las formas despierta en unos admiración y en otros el impulso de imitarlas o el deseo de justificarlas? No cabe duda de que estas reacciones, en parte, dependen de nuestro bagaje cultural, pero es de todos conocido que distintas personas con bagajes culturales similares experimentan distintas formas de gozo; hay algo en nuestros cerebros que nos predispone más a un tipo de gozo que a otro. Se ha escrito mucho sobre las distintas actitudes que, frente a una forma atractiva, han tomado los artistas, los científicos o los místicos pero, sólo ahora, gracias a los avances neurológicos se vislumbran opciones que nos permitirán entender mejor nuestros gozos ante las formas.

Semir Zeki, neurobiólogo especialista en las áreas del cerebro relacionadas con la visión, ha tratado de relacionar la actitud de ciertos pintores con la actividad neuronal de determinadas áreas del cerebro (S. Zeki 1999, 2001). Algunos pintores abstractos —los que intentan reducir las formas del mundo visual a elementos básicos; rectas y colores, como en el caso de Mondrian— parece ser que activan solamente varios circuitos cerebrales y no todos los que utilizamos cuando contemplamos un cuadro figurativo. Lo mismo sucede al contemplar los móviles abstractos de Calder; sólo se activan algunos circuitos del área V5. Por el contrario, si con el movimiento de la escultura se generan formas reconocibles se activa un área mayor.

Cuando alguna de estas áreas está dañada el sujeto pierde la correspondiente posibilidad del goce estético. Una persona que sufra aquinotopsia —que tenga el área cerebral V5 alterada— no será sensible a los objetos en movimiento y no podrá experimentar el goce del arte

cinético. Otra persona con una lesión en V4 no podrá entender los colores aunque esto no implica que no pueda gozar de las formas, sólo ha perdido el goce de los colores.

Algo parecido sucede con el goce que experimenta el científico frente a una forma interesante y la imperiosa necesidad de intentar justificarla, o el arrebato espiritual que pueda despertar en el místico la contemplación de formas naturales y su asombro ante la armonía que le revela una inteligencia superior. Varios neurólogos, V.S. Ramachandran y M. Persinger entre otros, creen que los goces místicos se pueden reforzar cuando hay una hiperactividad en ciertas regiones del lóbulo temporal derecho (F.J. Rubia 2003). La creatividad científica también está relacionada con hiperactividad de algunas regiones cerebrales; Antonio Damasio (2001) indica que para ser creativos, además de estar motivados y poseer oficio, hace falta una habilidad ligada al funcionamiento de la corteza prefrontal del cerebro para generar —plasmar en la mente consciente— nuevas combinaciones de entidades en forma de imágenes.

Recientemente, un grupo de científicos españoles (C.J. Cela-Conde et al. 2004) han detectado que en la corteza prefontal del cerebro hay una región especialmente sensible a la percepción y al gozo de la belleza. Nuestra capacidad para asignar atributos estéticos a las formas, colores o movimientos de los objetos, parece ser que es una habilidad exclusiva de la especie humana que reside en esta región cerebral. La experimentación se ha realizado mediante magnetoencefalografía. En este estudio han participado ocho mujeres, estudiantes de neurobiología, sin formación específica en arte o historia del arte, con una media de edad de 20 años, sin ningún tipo de anomalía visual, y diestras. En todas ellas se detectó una activación selectiva de la corteza dorsolateral prefrontal *izquierda* durante la percepción de formas consideradas bellas.

Todos estos hallazgos enriquecen nuestro conocimiento sobre el placer que nos proporcionan las formas y no le privan de su encanto poético. No hay ninguna razón para temer que estos estudios nos priven de la magia y el misterio del arte. "Al contrario, —remarca S. Zeki— le confieren una profundidad añadida porque revelan toda la belleza del órgano que nos permite crear y apreciar las obras de arte". Cuando Newton, con un simple prisma, descompuso la luz blanca en un coloreado arco iris, ¿despojó del lirismo al arco iris, como le recriminó Keats en un conocido poema? Ciertamente los misterios pierden algo de su poesía cuando se resuelven, pero la solución también puede ser hermosa y, con frecuencia, cuando se resuelve un misterio salen a relucir otros, que pueden despertar gozos en otros ámbitos.

A poco que nos detengamos descubriremos que las formas despiertan el gozo en las tres dimensiones señaladas; la mística, la artística y la científica. La intensidad dependerá de la estructura neuronal del cerebro y del bagaje cultural de cada uno:

Las estrellas de nieve, que el cielo depositó sobre el gabán de Kepler, eran un reflejo de la mente Divina pero también le hicieron especular sobre su forma. Cuatrocientos años después empezamos a tener una idea de cómo cristalizan —su diagrama de fases en función de la temperatura y de la humedad— y sus caprichosas formas seguirán estimulando a los artistas y espíritus curiosos.

Las nubes, que Constable dibujó tan fielmente, siguen inspirando a los artistas. Sólo recientemente, los científicos han sido capaces de entender algunos aspectos de su evolución —suponiendo que es un sistema no lineal y caótico— con la ayuda de potentes ordenadores. Pero la nube continuará siendo "la diosa del ocioso", como dijo Aristófanes, y musa para poetas.

Fig. 5



Tres girasoles en un jarrón: Vincent van Gogh. Arles, agosto 1888.
(Oleo sobre lienzo 73 x 58 cm. Estados Unidos, colección privada).

El misterio de las espirales de los girasoles también se está desvelando poco a poco; las hormonas vegetales son, por ahora, las protagonistas del enigma. Van Gogh sucumbió al encanto —gozo— de los girasoles y no pudo resistir la tentación de imitarlos; en París nos ofrece dos cuadros con girasoles mustios pero al año siguiente, fascinado por la luz radiante del sol de Arlés, nos brinda cuatro cuadros con espléndidos girasoles llenos de una fuerza luminosa que parece surgir de su interior.

Una forma atractiva puede despertar el deseo de entenderla, de imitarla o desatar la imaginación y buscar asociaciones con otras ideas. El arquitecto y el ingeniero en el momento de concebir una forma resistente —una forma estructural— posiblemente perciben las tres actitudes, pero con distinta intensidad; el deseo de imitar predomina en el artista naturalista y el interés por entender es característico del funcionalista. En otros artistas, como en Gaudí, parece ser que las formas han estimulado intensos goces en los tres aspectos.

2.- LAS FORMAS ESTRUCTURALES

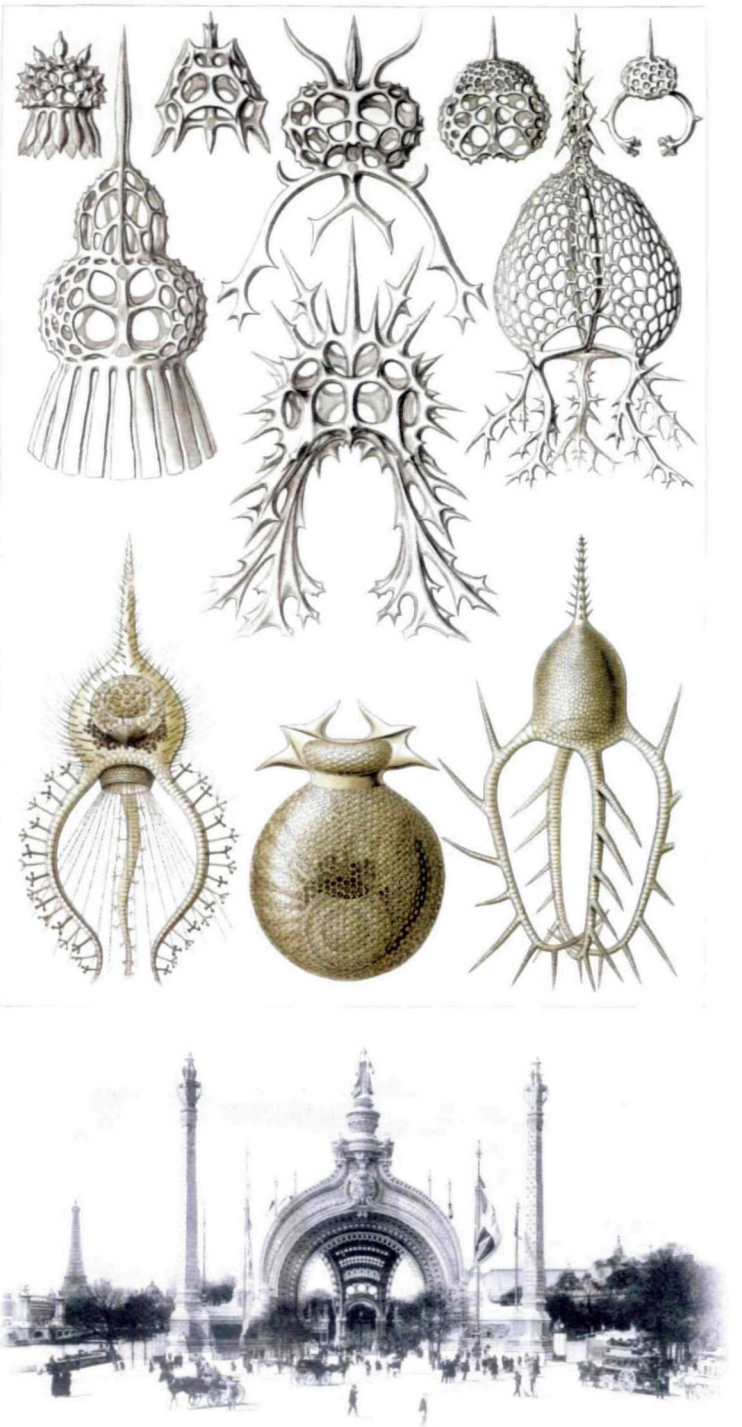
En la búsqueda de formas estructurales la razón y el amor a la belleza deberían tener objetivos comunes: J.A. Fernández Ordóñez (1990) opinaba "... que la dificultad radica en coordinar y equilibrar la *imaginación* que produce la forma con la *razón* que la determina y la fija. Hoy que las ataduras son menores, ahora que todo es calculable y construible, la búsqueda de lo verdadero es más difícil porque el camino hacia la solución formal es más oscuro, precisamente por ser más sencillo. Es como el agua que, al faltarle el cauce hendido, se extiende sin rumbo por el llano y todo lo inunda sin destino".

La inspiración para las formas hay que buscarla en la naturaleza, según los arquitectos-ingenieros *naturalistas*. La naturaleza es el gran libro que hay que esforzarse en leer y no deberíamos ignorar los resultados de su experiencia evolutiva.

La inspiración para las formas debe buscarse en su comportamiento resistente y en una buena solución constructiva, según los ingenieros-arquitectos *funcionalistas*. Las formas funcionales son atractivas y lo funcional es bello, opina este colectivo.

No es el objetivo de este ensayo dilucidar sobre las dos posturas sino continuar indagando el gozo que nos producen las formas estructurales, sean naturales o fruto de un proceso de optimización. Los senderos por donde los arquitectos e ingenieros siguen buscando sus formas todavía mantienen el misterio que se percibe cuando nos adentramos en un territorio virgen.

Fig. 6



René Binet se inspiró en los dibujos de radiolarios de Ernst Haeckel para diseñar la monumental puerta de entrada de la exposición mundial de París en 1900.

2.1. Las formas naturales: El naturalismo

El gran libro, siempre abierto y que hay que esforzarse en leer, es el de la naturaleza. (A. Gaudí).

La arquitectura orgánica

Los organismos vivos —sus formas externas y sus estructuras internas— ofrecen a los arquitectos infinidad de ideas para el diseño. Antonio Gaudí sentía curiosidad por el esqueleto humano y acostumbraba a comentar que las formas curvas de los huesos le enseñaban a diseñar los componentes estructurales de sus obras.

Muchos artistas y arquitectos se han entusiasmado con las formas de los radiolarios que dibujó Ernst Haeckel, biólogo y zoólogo de la segunda mitad del siglo XIX. Su libro más conocido, *Kunstformen der Nature*, son cien magníficas litografías editadas por Adolf Giltsch, donde aparecen todo tipo de seres vivos, aunque la mayoría son invertebrados marinos y radiolarios. Estas impresionantes ilustraciones tuvieron una repercusión inmediata en el Art Nouveau. El arquitecto René Binet se inspiró en los radiolarios para diseñar la monumental puerta de entrada de la exposición mundial de París, en 1900. El 21 de marzo de 1899 el arquitecto le escribió a Haeckel "... gracias a su trabajo he conseguido una gran información sobre organismos microscópicos, radiolarios, briozoos, hidroideos, ... que he examinado desde el punto de vista artístico, pensando en la arquitectura y la ornamentación. Ahora estoy ocupado diseñando la monumental puerta de entrada para la exhibición del año 1900 y en todo, desde la composición general hasta los más pequeños detalles, me he inspirado en sus estudios". El propio Haeckel, decoró el techo de su casa "Villa Medusa" con hermosos celentéreos.

En los últimos tiempos ha resurgido el interés por los diseños que nos ofrece la naturaleza y ello se debe a las facilidades de cálculo y a la riqueza de formas a nuestro alcance: La potencia de los ordenadores, junto con un mejor conocimiento del comportamiento de los materiales, permite abordar el cálculo y la construcción de estructuras con las formas complejas y caprichosas que nos revela el mundo orgánico y, por otra parte, los avances en todos los campos de la biología nos muestran interesantes formas estructurales que merecen ser exploradas, la microscopía electrónica, en particular, ha descubierto un mundo fascinante de formas que estimula la imaginación de arquitectos e ingenieros.

A Frank Lloyd Wright se le considera uno de los pioneros de la nueva arquitectura orgánica; desde sus primeras realizaciones hasta el Guggenheim de Nueva York, sus obras son un ejemplo de arquitectura integrada en la naturaleza. El toque escandinavo a la arquitectura orgánica vino de la mano de Alvar Aalto que incorporó las formas naturales, simples y ligeras, y fue capaz de concebir un espacio fluido que, junto con el color y la iluminación natural, creaba una atmósfera poética; el uso de materiales naturales —la madera, en particular— permitió que los materiales se expresaran por sí mismos, como le gustaba decir. Jorn Utzon, un arquitecto que trabajó con Aalto, siguió con la tendencia orgánica y ganó el concurso de la Opera House de Sydney, con las conocidas conchas blancas. Utzon comentó que "el sol, la luz y las nubes le darán vida" y los observadores "siempre verán algo nuevo". Nuestro arquitecto Antonio Gaudí, un apasionado de la arquitectura orgánica, merece que le dediquemos un poco más de atención.

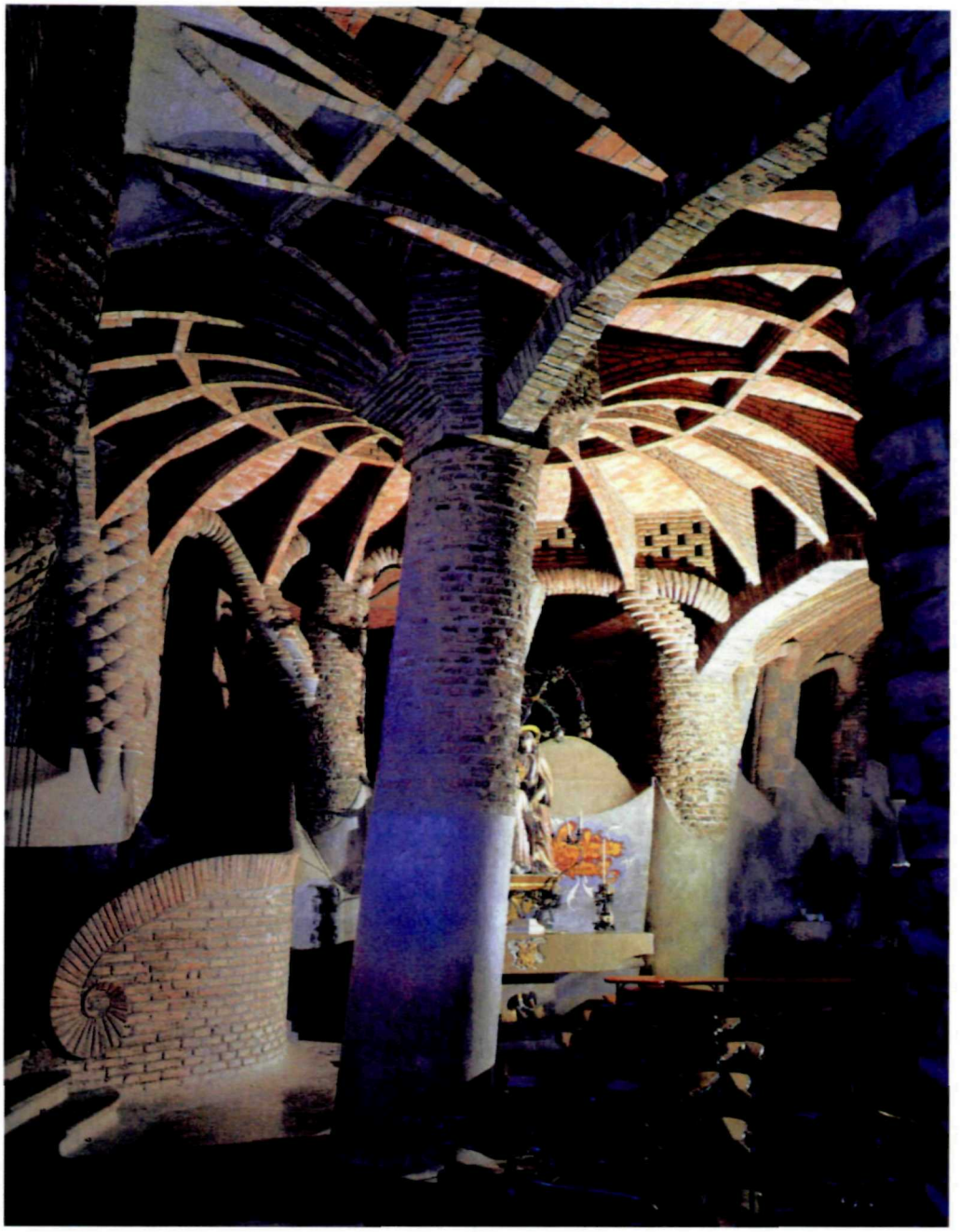
Antonio Gaudí o el naturalismo mágico

En una mañana de junio, Antonio Gaudí (1852-1926) vió la luz en el más de la Calderera, Tarragona, comarca ventosa donde la atmósfera es nítida y los colores brillantes. En su infancia sufrió fiebres reumáticas que tuvieron consecuencias importantes en su formación; le hicieron estar largas temporadas en la masía y le convirtieron en un gran observador de la naturaleza. Rodeado de campos de almendros, avellanos y olivos, el piar de los pájaros y el zumbido de los insectos, y con las montañas de Prades al fondo, el pequeño Gaudí recogió placenteras imágenes de la naturaleza que, más tarde, evocaba diciendo "El gran libro, siempre abierto y que hay que esforzarse en leer, es el de la Naturaleza".

Para Gaudí, la función —tanto utilitaria, como espiritual—, la osamenta estructural y la plástica expresiva, deben estar en completa y mutua armonía, igual que en la naturaleza, donde la función crea el órgano. "Las coincidencias entre una bella arquitectura y la construcción de los árboles no pueden por menos de llamar la atención", comenta Gaudí. Se dice que en una ocasión, contestando a un artista sobre dónde había aprendido la nueva arquitectura, y señalándole un árbol cercano a su taller, le dijo: "¡Este es mi maestro!".

Gaudí es plenamente consciente de que el árbol es una estructura perfecta: con sus raíces ancladas en el suelo, su tronco y ramaje están adaptados para resistir la acción de la gravedad y el azote del viento. La arquitectura de Gaudí es naturalista. Con referencia a la Sagrada Familia dijo: "El interior del templo será como un bosque".

Fig. 7



"El interior del templo será como un bosque" (A. Gaudí).

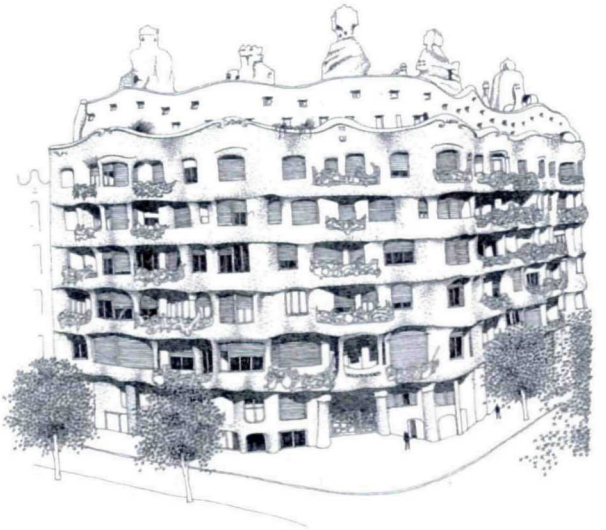
Unas breves referencias de algunas obras confirman el objetivo naturalista-orgánico de Gaudí:

La casa Milá —*la pedrera*, como se la conoce coloquialmente— es un desafío a la línea recta y parece una construcción dunar dentro de Barcelona. En su interior, la estructura recuerda la de un organismo vivo; ondulante y rítmico. La cubierta, con sus estrafalarias chimeneas, parece una obra de arte surrealista.

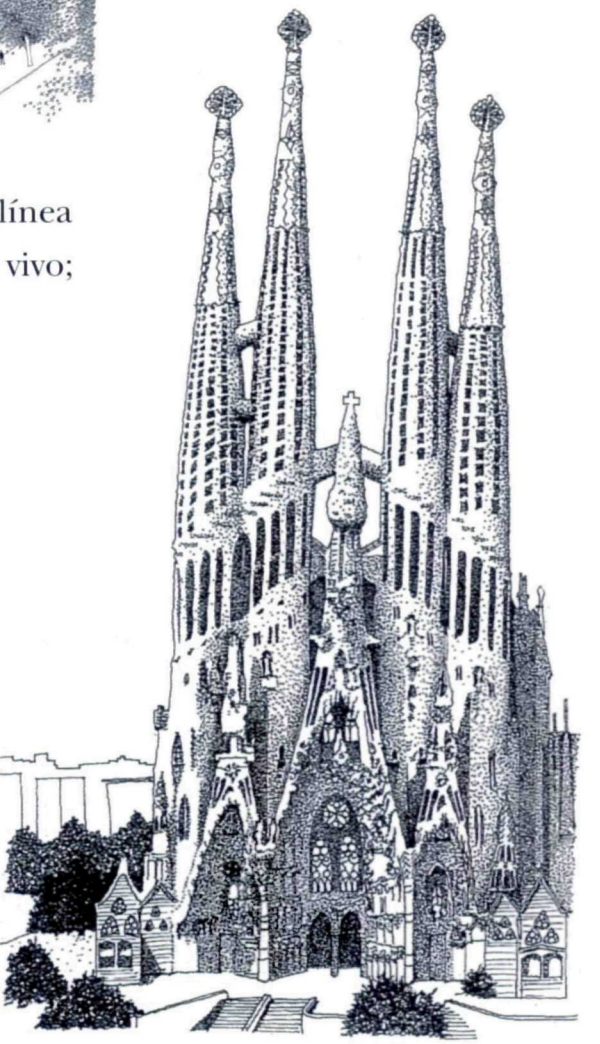
El parque Güell se puede ver como un diálogo entre forma y color, y entre curvas y mosaicos. Es una ciudad jardín, con un estilo mediterráneo-naturalista y muchos valores simbólicos añadidos. Los bancos se moldearon con una forma adaptada a la anatomía humana, propia de la Bauhaus, y una decoración que se anticipó al arte abstracto de Braque, Miró y Picasso. En los pabellones, las torres de ventilación están acabadas en forma de hongo; una de ellas, recubierta con cerámica roja y salpicada de blanco, recuerda la seta Amanita muscaria. Algunos motivos de la decoración parecen estar relacionados con la ópera Hansel y Grettel, que se acababa de representar en el Liceo; la *Amanita* recordaría la casa de la bruja, la otra torre la de los niños. Güell y Gaudí eran wagnerianos.

La idea de la Sagrada Familia es una síntesis de los símbolos de las construcciones religiosas: Por fuera, pretendió que hubiera sido una montaña con un faro. "La forma de las torres, vertical y parabólica, es la unión de la gravedad con la luz. Encima de todo el templo se colocará un gran foco luminoso, como la luz natural que también viene del cielo. Este foco, las noches de solemnidad religiosa, dará vida y suntuosidad al templo y, a su vez, constituirá el mejor ornamento de la ciudad".

Fig. 8



La casa Milá es un desafio a la línea recta y recuerda un organismo vivo; ondulante y rítmico.



La Sagrada Familia es una montaña con un faro. La forma de las torres es la unión de la gravedad con la luz.

Por dentro, un espacioso y frondoso bosque "... las columnas siguen un eje de fuerzas que es la trayectoria de su estabilidad, su equilibrio. Su generación es una sección estrellada que gira al subir ... esto mismo pasa con el tronco de los árboles ...". La intercomunicación entre dentro y fuera debía realizarse a través de una compleja red de superficies regladas, que —como puntualizó Carlos Fernández Casado— "truncan su abstracta geometría y su rigidez de membranas en una fastuosa ordenación de motivos vegetales y florales".

Antonio Gaudí gozó plenamente con las formas; tuvo, más de una vez, un arrebato místico al contemplar las formas naturales. Como buen artista intentó imitarlas y las transplantó a los componentes estructurales, a los detalles arquitectónicos, y a los adornos de las verjas. Como arquitecto competente quiso entenderlas, experimentó con ellas y trató de justificar su función.

La obra de Gaudí forma parte de nuestro patrimonio arquitectónico y su mensaje ha traspasado nuestras fronteras. Las originales soluciones estructurales —inspiradas en las formas de la naturaleza— junto con la utilización de técnicas tradicionales de construcción, son ya un capítulo de las páginas más brillantes de la arquitectura española.

Fig. 9



Tsui concibe el edificio como un organismo vivo.
Vivienda de E. Tsui en Berkeley, que imita el caparazón de un tardígrado.

La arquitectura evolutiva

La arquitectura orgánica alcanza su cenit con Eugene Tsui; él es el responsable del concepto de *arquitectura evolutiva* que no sólo se inspira en las formas naturales si no en los procedimientos que ofrece la naturaleza. Tsui define la arquitectura evolutiva como una arquitectura que utiliza la experiencia evolutiva de la naturaleza, producto de millones de años de evolución, para el diseño de la forma y la función de sus construcciones. Este enfoque le libera de las "disonancias caóticas de las tendencias actuales y de las paralelepipédicas construcciones de los estilos tradicionales" (E. Tsui 1999).

Su casa, construída entre 1993 y 1995 en Berkeley (California), es un buen ejemplo de su filosofía. La estructura global está inspirada en la de los *tardígrados*, animales diminutos, del tamaño de 1 mm, extraordinariamente resistentes y longevos. Como son poco conocidos, conviene comentar algunas de sus curiosas características: son criaturas redondeadas provistas de ocho patas y se conocen coloquialmente como "osos de agua" porque bajo el microscopio parecen moverse con la torpeza de un oso de edad avanzada (*tardus* viene del latín "lento" y *gradus* significa "paso"). Pero si alguna vez el mundo sucumbiera a un desastre ecológico, los tardígrados serían unos buenos supervivientes. Están provistos de una gruesa cubierta protectora que les permite sobrevivir en ambientes muy secos durante siglos o, posiblemente, milenios. Pueden resistir temperaturas extremas, desde –272°C hasta 100°C, y entornos muy agresivos; alcohol, eter o radiaciones ionizantes. La estructura de la vivienda tiene una forma oval, porque Tsui considera que es muy resistente, como la de los tardígrados, y además, al ser aerodinámica evita los ruidos producidos por el viento y hace menos probable el inicio de un incendio debido a rescoldos transportados por el aire.

Tsui concibe el edificio como un organismo vivo capaz de responder a las acciones del exterior. Una aplicación de estas ideas es el sistema de calefacción de su casa; durante el día el sol calienta el aire contenido en una red de tubos situados en la parte sur de la casa y durante la noche el calor almacenado se irradia a través de las paredes del dormitorio. El arquitecto dice que esta idea le vino al estudiar los huesos del *estegosaurus*; un dinosaurio de la familia de los Tireóforos, que tienen grandes hileras de placas verticales, muy porosas, por toda la cresta de la espalda. Se cree que las placas servían para controlar la temperatura de estos monstruos mediante un procedimiento similar al descrito.

Tsui también ha proyectado estructuras que se mueven; se pliegan o despliegan según las condiciones climáticas. La reforma de la residencia de Vince y Remy Reyes es un buen ejemplo: La cubierta del solarium imita las alas de una libélula que se pueden abrir o cerrar con una manivela. Este techo móvil permite crear un ambiente agradable al dejar pasar la brisa y la luz solar. Con las palabras de Tsui "... la intención que hay en esta idea es conseguir que se pueda observar directamente cómo cambia la luz y se mueven las nubes, y que se vea el sol, la luna y las estrellas. Poéticamente, es una ventana al firmamento, siempre diáfano y encantador".

Santiago Calatrava ha adoptado una postura más ecléctica; aunque su lenguaje es orgánico no mimetiza las formas naturales, se inspira en ellas y trata de utilizar las soluciones estructurales que le sugiere la naturaleza. Las formas arquitectónicas de Calatrava se gestan a través de un equilibrio entre la escultura, la arquitectura y la ingeniería. Varias veces ha comentado "Al igual que Fellini o Kurosawa hacen dibujos antes de comenzar a rodar sus filmes, yo hago esculturas".

Uno de los primeros trabajos de Calatrava, la estación de ferrocarril de Stadelhofen en Zurich, es un ejemplo de su arquitectura bio-inspirada. El conjunto se caracteriza por su unidad orgánica. Como un extravagante dinosaurio volador que ha anidado en un flanco de la colina, la estructura se articula con enormes pórticos que conducen al centro comercial subterráneo, donde el visitante pronto tiene la impresión de encontrarse en el vientre de hormigón de la ballena de Jonás. Aunque la estación de Stadelhofen pueda dar la impresión de haber sido concebida como una metáfora de dinosaurio, Calatrava lo desmiente diciendo "... el proyecto se basa en el lenguaje formal de las fuerzas estructurales. Los pilares inclinados, aunque parezcan una solución estética, se deben a una necesidad estructural. Naturalmente había diversas soluciones para este tipo de soporte —por ejemplo, habría podido diseñar simples cilindros— pero preferí articularlos como los dedos de una mano. Aquí es donde la cuestión de la metáfora gana interés: ¿qué mejor modo de expresar esta función de los pilares que colocándolos de un modo que recuerden el gesto físico de sostener?".

La terminal del tren de alta velocidad en Lyon-Satolas (1989-1994) es otro ejemplo de su arquitectura bio-inspirada. La estación está situada en el aeropuerto de Satolas, en ella confluyen el ferrocarril, el avión y los medios de transporte locales. La estructura sugiere la forma de un pájaro en pleno vuelo y es muy parecida a una escultura abstracta de Calatrava, que él llamó *El pájaro*. La planta del complejo, incluyendo la conexión con el aeropuerto, también recuerda la forma de una manta raya.

Fig. 10

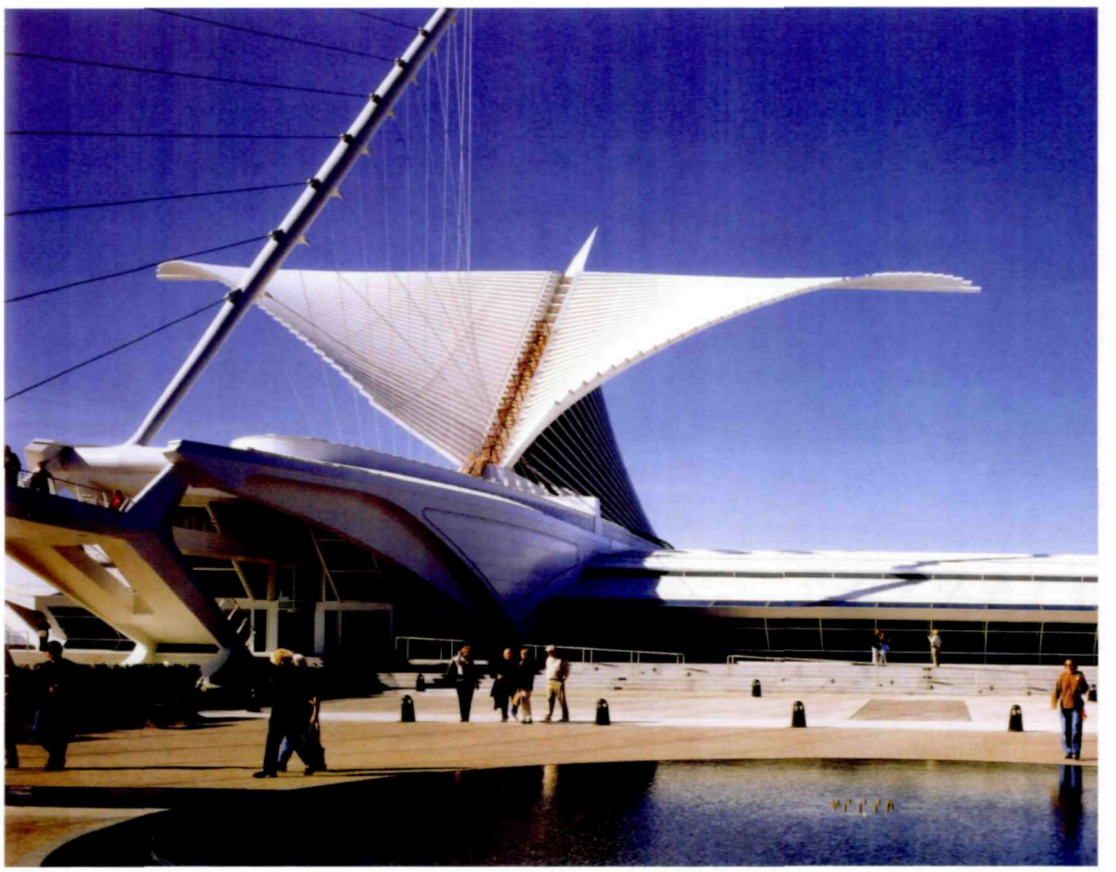


Terminal del tren de alta velocidad en Lyon-Satolas (S. Calatrava). La estructura sugiere la forma de un pájaro en pleno vuelo y es muy parecida a la escultura *El pájaro.*

Cuando se le pregunta por estos simbolismos, Calatrava responde "... honradamente, yo no busco metáforas, ni tampoco pensé en un pájaro, sino en los estudios previos que a veces pretenciosamente llamo esculturas".

Calatrava no se sustrae de las formas móviles bio-inspiradas y, al igual que Tsui, las incorpora en sus proyectos y realizaciones. La cúpula del parlamento alemán en el Reichstag (Berlín) —proyecto que no llegó a realizarse— tenía elementos similares a pétalos que se abrían y cerraban, como en una flor, para difundir la luz del día a la Sala de Plenos. La ampliación del Art Museum en Milwaukee, sí llegó a realizarse: En 1994 se propuso crear una nueva entrada al museo que fuera majestuosa y un punto de referencia para los visitantes. Santiago Calatrava ganó el concurso al presentar un vestíbulo de cristal y acero cubierto por una pantalla solar móvil (llamada *Burke Brise Soleil*), que al plegarse y desplegarse recuerda las alas de un cisne o, según otros, la grandiosa cola de una ballena. Al pedirle a Calatrava que diera una justificación funcional al techo móvil y preguntarle si no había otras formas más simples y estáticas para conseguir una zona de sombra en un día soleado, la respuesta del arquitecto fue: "La arquitectura debe ser funcional, de lo contrario sería escultura.", y añadió que el techo móvil, además de cumplir una función práctica, tenía otra función; simbólica y emocional. "El movimiento le da una nueva dimensión a la forma. Le da vida. En vez de ver un edificio como algo inanimado, como una roca, deberíamos compararlo al mar, con sus olas, o a una flor, cuyos pétalos se abren al amanecer. Esta es una nueva forma, más poética, de entender la arquitectura".

Fig 11



"En vez de ver el edificio como algo inanimado, deberíamos compararlo a una flor, cuyos pétalos se abren al amanecer".
Pantalla solar móvil del Art Museum, en Milwaukee (S. Calatrava).

2.2.- Las formas óptimas: El funcionalismo

Si la forma indica netamente el objeto y hace comprender la finalidad con que está producido esta forma es bella. (Viollet Le Duc, 1863).

Funcionalismo estricto y funcionamiento tolerante

¿Qué tienen las formas óptimas —las que surgen al optimizar alguna propiedad de la estructura— que nos atraen? Arquitectos e ingenieros han intentado, en vano, descubrirlo. Pier Luigi Nervi comentó a este respecto "Es muy difícil explicar la razón de nuestra inmediata admiración por determinadas formas procedentes del mundo físico, con las que a primera vista nada tenemos que ver. ¿Por qué nos satisfacen y nos conmueven esas formas de la misma manera que los objetos naturales —como las flores, las plantas y los paisajes— a los que nos hemos acostumbrado en el curso de innumerables generaciones? Estas formas naturales tienen en común una *esencia estructural*; la necesaria ausencia de cualquier decoración ... aunque soy consciente de la dificultad de encontrar las palabras adecuadas para expresar este concepto". Nervi nos confiesa, de una forma velada, su funcionalismo; basta la esencia estructural, la decoración es superflua y el criterio económico no añade nada a la valoración estética. Lo funcional es bello.

Entrar en la discusión sobre si las formas funcionales son necesariamente bellas —nos producen gozo— es adentrarse en un terreno resbaladizo y alejarnos del propósito de este ensayo. Para algunos ingenieros y arquitectos el funcionalismo ya está superado, para otros es el objetivo de sus obras. J.A. Fernández Ordoñez (1990) arremete contra el funcionalismo estricto al comentar que Nervi, "... un honrado e ingenuo funcionalista, creía en la natural expresividad estética de una buena solución constructiva. Para Nervi, una buena organización estructural

era, sin excepciones, la condición necesaria y suficiente para conseguir la belleza. No obstante, pienso que existen, sobre todo en los dos últimos siglos, suficientes ejemplos históricos de lo contrario". Quizás estos ejemplos a los que se refiere Fernández Ordóñez sean las excepciones, o las consecuencias de un funcionalismo mal entendido, o excesivamete estricto.

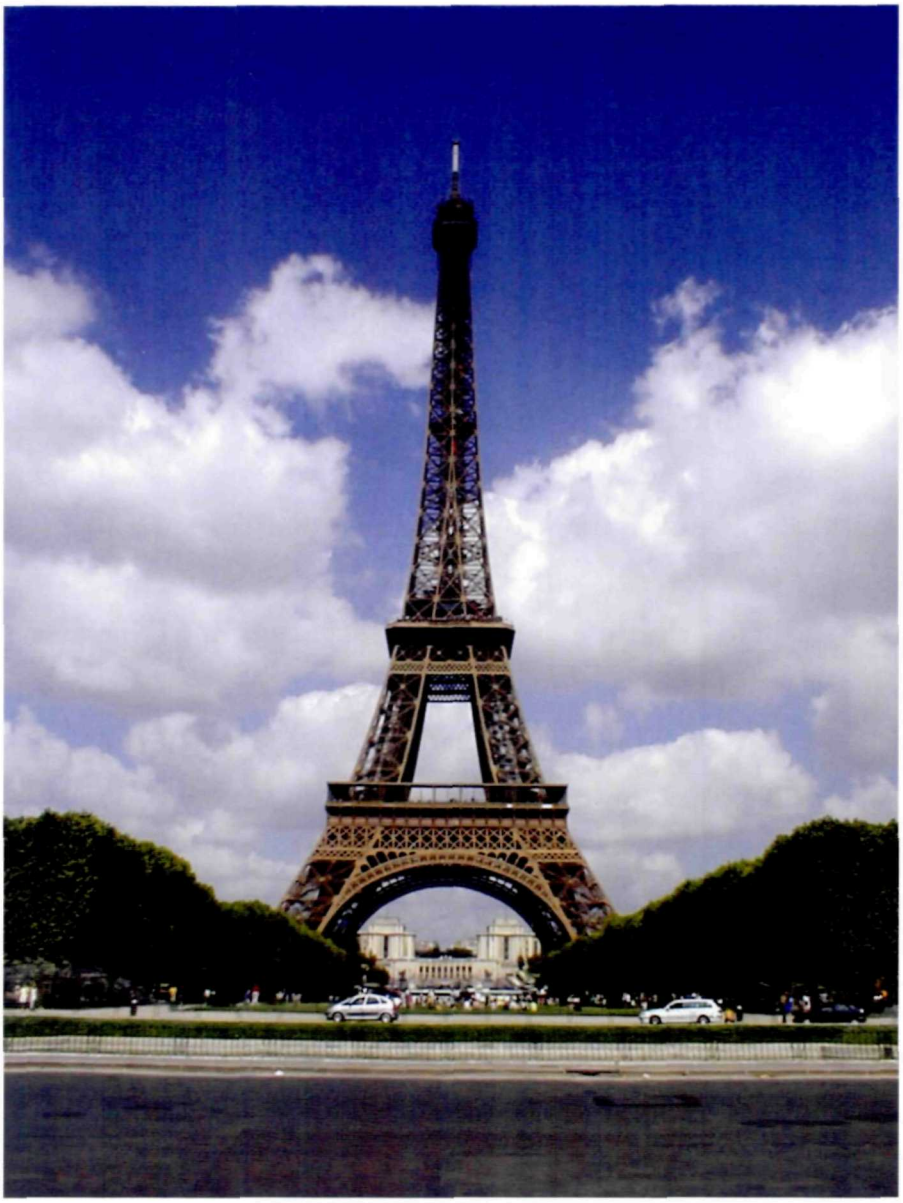
Cuando los problemas estructurales están bien planteados y dependen de pocas variables, las soluciones funcionales suelen proporcionar formas agradables; las presas y los puentes se prestan a ello; "El origen de la forma de una presa bóveda es su comportamiento resistente y el resultado es una forma hermosa" (J. Manterola 2002). Torroja, otro funcionalista no tan ingenuo, afirmaba que "es extremadamente raro que se pueda estar seguro y demostrar que no existe más que una solución funcional que resuelva el problema", y por eso añadía que en estos casos la creación de formas estructurales "escapa del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración". No obstante, estos dos ingenieros *funcionalistas* —Nervi y Torroja— nos han dejado obras maestras como el Palacio de los Deportes de Roma, el Frontón Recoletos o las cubiertas del Hipódromo de La Zarzuela. Ellos aplicaron un *funcionalismo tolerante*; añadir toda la verdad en el problema estético es deseable pero limita el campo de las posibles soluciones. Conscientes de que no podían optimizar tantas variables optaron —y, ahí entra la inspiración del artista— por seleccionar unas pocas o sólo una.

Semir Zeki, el neurofisiólogo citado en la primera parte, cree que la atracción —el gozo— que nos producen ciertas formas es porque encontramos en ellas una constancia, una continuidad. La satisfacción estética con las formas óptimas, que plasman la esencia de la propiedad considerada, puede tener, con este enfoque, una base biológica.

Resulta interesante observar como *naturalismo* y *funcionalismo* pueden converger cuando se plantean problemas similares. No es raro descubrir que arquitectos e ingenieros han proyectado formas estructurales muy parecidas a las formas naturales sin habérselo propuesto. Norman Foster nos proporciona un ejemplo reciente; el espectacular rascacielos de 40 pisos en Londres, apodado *el pepinillo*, tiene un gran parecido con un tipo de esponjas, las llamadas vítreas. El edificio —un bulbo vertical— posee un exoesqueleto formado por una celosía tridimensional de acero, como el exoesqueleto de la esponja formado por espículas de sílice (de ahí su nombre). El parecido va más allá de la forma porque también se detecta una semejanza funcional; la esponja, anclada en el fondo del mar, tiene que soportar las corrientes marinas a su alrededor, absorbe agua por la parte inferior y la expulsa por el ósculo, orificio situado en la parte superior. En ese recorrido interior el agua aporta nutrientes, oxígeno y arrastra productos de desecho. La forma curva del edificio de Foster también es aerodinámica. Por su interior circula aire —en vez de agua— que se calienta y asciende hasta los últimos pisos y permite ahorrar energía. Foster ignoraba estos paralelismos al diseñar el edificio, lo que sucedió es que algunos de sus problemas eran similares a los que se enfrentan las esponjas desde hace millones de años.

Naturalismo y funcionalismo no están tan distanciados; la imitación es un ingrediente muy importante para concebir la forma y, en el fondo, sólo podemos imitar a la naturaleza. En estos casos el atractivo del naturalismo radica en que sugiere la posibilidad de una buena integración entre forma y función.

Fig. 12



La Torre Eiffel (1889).
"Considero que la curvatura de las cuatro aristas, consecuencia de los cálculos matemáticos, dará una gran impresión de resistencia y belleza" (G. Eiffel).

Interacción con fluidos; formas óptimas

Muchas formas óptimas son bellas, y esto suele ser más cierto cuantas menos variables se pretenden optimizar a la vez. La belleza de una presa bóveda, donde el parámetro dominante es la función resistente, o el casco de un velero de competición, donde los parámetros dominantes son la resistencia hidrodinámica y la maniobrabilidad, lo avalan. Los fuselajes del Concorde, o del DC-8, han merecido el calificativo de esculturas volantes por su belleza y pureza de líneas.

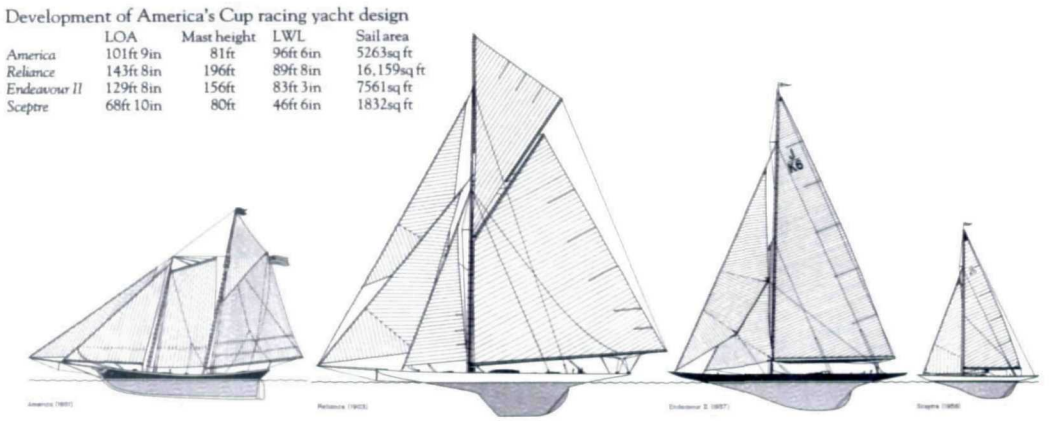
La forma de la Torre Eiffel es una forma óptima, obtenida al equilibrar el máximo momento debido al empuje del viento con el momento debido al peso propio. La Torre Eiffel se construyó con motivo de la exposición universal de 1889 para conmemorar el centenario de la revolución francesa. Cuando se inauguró, en marzo de 1889, fue —con sus 300 metros— el edificio más alto del mundo y mantuvo el récord hasta mayo de 1930. Se lo arrebató el rascacielos de la Chrysler, en Nueva York, con 319 m. y al año siguiente el récord pasó al Empire State Building, con 381 m.

La torre, de sección cuadrada, se apoya en cuatro arcos. Tiene tres pisos; a 57 m., 115 m. y 275 m. En el último piso hay varias habitaciones que utilizó Gustave Eiffel; en una de ellas recibió a Thomas Edison en 1899. La torre está coronada por una escalera de caracol y un mástil. La altura total es de 312 m. Cuando le preguntaron a Eiffel con qué criterio había diseñado la forma de la torre, contestó: "La resistencia al viento. Considero que la curvatura de las cuatro aristas, consecuencia de los cálculos matemáticos, dará una gran impresión de resistencia y belleza". El tiempo le ha dado la razón y la forma óptima se considera bella, pero no siempre fue así. Antes de que se terminara la obra se presentó una

Fig. 13



Silueta del *Resolute* (superior) que ganó la Copa de América en 1920, después de una reñida competición con el *Shamrock IV* (inferior). A la derecha ambos veleros compitiendo (el *Resolute* va delante).



Evolución de algunos veleros que ganaron la Copa de América. De izquierda a derecha: *América* (1851), *Reliance* (1903), *Endeavour* (1937), *Sceptre* (1958).

protesta firmada por 300 artistas —uno por cada metro de la torre— solicitando que se parara la construcción porque era una torre "inútil y monstruosa".

Las formas de los cascos de los veleros suelen ser hermosas. El diseño de las carenas trata de minimizar —optimizar— la resistencia hidrodinámica y todavía, entre los ingenieros o arquitectos navales, se considera un arte. La primera función del casco es asegurar la flotabilidad de la nave. Después se pretende conseguir una buena maniobrabilidad y máxima velocidad; para lo último hay que minimizar las fuerzas creadas por el agua que se oponen a su avance.

El problema de la optimización es más complejo en un velero que en un barco de motor, porque el casco de un velero adopta diferentes posiciones respecto al agua según la marcha del barco: Cuando el viento sopla de través o de cara, las fuerzas creadas por el empuje del viento en las velas tienen una componente transversal importante; el barco se escora y la parte sumergida del casco ya no tiene la misma geometría que cuando está derecho. La forma del casco debe continuar minimizando la resistencia al avance y, además, crear un momento de adrizamiento capaz de equilibrar el momento de zozobra debido a la fuerza lateral de las velas. También en este caso el casco tiene que generar una fuerza transversal —llamada antideriva— que equilibra la componente lateral de la fuerza aerodinámica, para que el velero pueda desplazarse en la dirección correcta.

Para optimizar la forma de la carena se actúa en tres frentes: Tratar de reducir la *resistencia del rozamiento* con el agua que depende, en gran parte, de la superficie mojada del casco y de los remolinos de la estela. Intentar reducir la *resistencia de ola*, para ello un parámetro importante es

la longitud de carena en la línea de flotación; a igual volumen y velocidad, un casco más largo crea menos resistencia de ola. Finalmente, también se procura reducir la *resistencia inducida* y mejorar la estabilidad lateral; cuando el velero avanza en deriva, el casco y sus apéndices funcionan como un ala y si son profundos crean menos resistencia inducida. Como el barco se desplaza a una velocidad variable según la fuerza del viento, se tiene que obtener un buen rendimiento en todas las circunstancias.

El diseño de veleros de la clase ACC (America's Cup Class) está bastante acotado lo que, en cierto modo, simplifica la optimización de la forma. De nuevo, estamos frente a un ejemplo de *funcionalismo tolerante*; la función justifica bastante la forma, pero queda lugar para entrar en las secretas fronteras de la inspiración. Su longitud, en la línea de flotación, su desplazamiento y la superficie del velamen están limitados y relacionados entre sí por una fórmula sencilla. La anchura y el calado también están limitados. En consecuencia, los cascos son muy afilados, las secciones sumergidas se aproximan al semicírculo, lo que minimiza la superficie mojada y reduce la resistencia al rozamiento. El casco estrecho y alargado reduce la resistencia a la ola, y la estabilidad lateral se consigue con una quilla profunda rematada con un bulbo de plomo, que en estos veleros representa el 75% del peso total. Una mirada retrospectiva a las formas de los cascos que han ganado la Copa de América, desde hace más de un siglo y medio, sigue impresionando por su belleza.

Cubiertas y carpas: Formas minimales

En 1967, el arquitecto-ingeniero Frei Otto realizó una cubierta colgante para el pabellón alemán de la feria de Montreal que fue un hito en la historia de estas estructuras. Pocos años después, en 1972, construyó otra cubierta singular para el estadio olímpico de Munich. La forma de estas bellas estructuras era óptima —el área de la cubierta era mínima—. Desde entonces, las elegantes cubiertas y carpas de Frei Otto y sus colaboradores han ganado el respeto y la admiración de los ingenieros y arquitectos.

No es una casualidad que las formas generadas por las superficies minimales sean bellas; "La Naturaleza ama la simplicidad", decía Newton, y Dante escribió "Todo lo superfluo desagrada a Dios y a la naturaleza". Los matemáticos han tratado de traducir este aserto metafísico mediante ecuaciones. Tres matemáticos suizos marcaron, a comienzos del siglo XVIII, el camino para buscar formas óptimas: los hermanos Jacques y Jean Bernoulli y el alumno de Jean, Leonhard Euler. Ellos iniciaron el cálculo variacional.

Los matemáticos se han sentido atraídos por los problemas que plantean las superficies minimales. Lagrange, sucesor de Euler en la corte de Federico II, fue quien dedujo en 1760 la ecuación de la *superficie minimal.* El físico belga J.A.P. Plateau hizo interesantes experimentos con películas líquidas que despertaron el interés de muchos matemáticos. Cuando una lámina jabonosa se encuentra en equilibrio estable es porque su energía potencial está en un mínimo. Puesto que la energía potencial es proporcional al área, las superficies matemáticas que modelizan las películas jabonosas serán superficies de área mínima.

Fig. 14



La "Tanzbrunnen", cubierta minimal diseñada por Frei Otto (Colonia 1957).



La "Star-wave", otra cubierta minimal diseñada por Bodo Rash y colaboradores.
(Arabia Saudita 1991).

Una superficie mínima se caracteriza por tener menos área que cualquier otra superficie cercana tendida sobre el mismo marco. Las atractivas formas de las películas de jabón y de sus modelos matemáticos nos ofrecen llamativos ejemplos de cómo funciona un principio variacional.

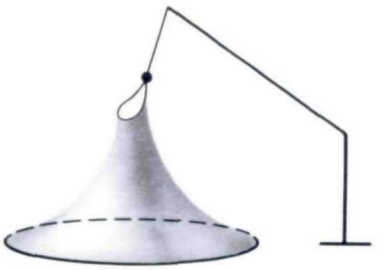
Plateau observó que todo contorno cerrado de alambre, sea cual fuere su forma (siempre que no fuera muy grande), limitaba una película jabonosa cuando menos y los matemáticos se preguntaron ¿será cierto que sobre toda curva cerrada trazada en el espacio queda tendida al menos una superficie minimal? Esta pregunta es conocida como el *problema de Plateau* y no fue contestada satisfactoriamente hasta 1930 por Tibor Radó e, independientemente, por Jesse Douglas (quien recibió la medalla Fields en 1936). Si en vez de una sola curva soporte consideramos dos o más, también se obtienen hermosas superficies minimales; dos círculos generan una *catenoide*. El mundo de las superficies minimales es un pozo sin fondo y de vez en cuando aparecen afinidades insospechadas, como la observación de que las intercaras entre materiales orgánicos e inorgánicos de los esqueletos de los equinodermos se parecen a ciertas formas minimales periódicas. Pero volvamos a las cubiertas.

La naturaleza proporciona un instrumento ideal para obtener superficies de forma óptima que se tienden sobre un contorno dado; basta dejar que una película jabonosa se tienda sobre este contorno. Si la película no se rompe fácilmente es que está en equilibrio estable y, por lo tanto, es una superficie minimal, de área mínima. Frei Otto y sus colaboradores emplearon películas jabonosas como modelos a escala reducida para diseñar sus cubiertas. Estas estructuras utilizan la mínima cantidad posible de material y en consecuencia son livianas y económicas.

Fig. 15



Parte de la cubierta minimal del pabellón alemán en la feria de Montreal 1967. (F. Otto y R. Butbrod).





Cubierta del instituto de Estructuras Ligeras, Vaihingen (F. Otto).

Además, se prestan a ser erigidas, desmontadas y transportadas con facilidad. Su estado tensional es relativamente simple; trabajan a tracción, sólo unas pocas partes —como los mástiles o los arcos de soporte— soportan compresiones. En las cubiertas, al colgar los cables de un puntal, se tiene más libertad en la distribución de la planta y la imaginación del arquitecto está menos coartada. Aún así, el proyectista tiene bastantes restricciones porque forma y estructura crean una unidad indivisible.

Uno de los primeros proyectos de Otto y sus colaboradores fue una carpa para una pista de baile, rodeada por una fuente anular. Cubría una superficie de 684 m2 y estaba soportada por seis mástiles. Aunque se proyectó para un solo verano, la carpa todavía sigue en pie. La cubierta inicial, de algodón, se ha cambiado por otra de poliéster y la "Tanzbrunnen", como se la conoce, ya se ha convertido en un símbolo de Colonia. Recientemente, en 1991, Bodo Rasch ha construido una variante de esta carpa en Arabia Saudí. La estructura fue diseñada, construida, transportada y montada en sólo tres meses.

El pabellón alemán de la feria mundial de Montreal en 1967, diseñado por Frei Otto y Rolf Gutbrod, fue una estructura singular. La cubierta, una superficie minimal de altura variable, estaba soportada por ocho mástiles y anclada al suelo. La membrana pretensada, de poliéster recubierto con PVC, colgaba de la red de cables de acero. La superficie del pabellón era de 8000 m2 y la estructura estaba prevista para ser utilizada durante dos años, pero no se desmontó hasta pasados seis por necesidades de espacio. Un año antes, Frei Otto había construido en el campus de Stuttgart-Vaihingen una pequeña estructura para experimentar. Como en ocasiones anteriores se había inspirado en modelos con láminas de agua con jabón; era una lámina soportada por

un ojal, anclado a un mástil, y apoyada en un contorno circular (la red metálica de la estructura estaba anclada en doce puntos). Esta sencilla lámina plantea un problema todavía no resuelto satisfactoriamente por métodos matemáticos, aunque sí de forma experimental; ¿cuál es el punto más alto que puede alcanzar una película jabonosa alzándola mediante un ojal desde un contorno planar? Frei Otto desmontó la estructura al cabo de dos años y la volvió a montar dos kilómetros más lejos para la sede de su instituto de Estructuras Ligeras. La operación fue relativamente sencilla: la red se plegó alrededor del mástil y se transportó todo el conjunto con una grúa al nuevo emplazamiento, y se volvió a montar la red en un solo día. El instituto todavía está operativo.

Las cubiertas del estadio olímpico y de la piscina olímpica de Munich (1972), un conjunto de graciosas carpas del mismo estilo que la de Montreal, son otras estructuras singulares. En 1980 se construyó, por el mismo procedimiento, una enorme carpa en Arabia Saudita; la superficie cubierta es de 7500 m2 y está soportada por ocho mástiles de 30 metros de altura. Eduardo Torroja no llegó a ver estas estructuras pero las intuyó, porque a finales de la década de los cincuenta al contemplar unos bocetos dijo "son solamente un destello inicial de la aurora que se anuncia".

De nuevo, ¿qué tienen estas formas cuya contemplación despierta gozo? Ya se ha comentado la opinión del neurofisiólogo Semir Zeki que, además, ha acuñado el término neuroestética. Según él, el cerebro se limita a retener las características esenciales de las cosas y, en el fondo, también es lo que hace el artista. Las formas óptimas retienen lo esencial de la propiedad optimizada y es posible que por ahí esté la pista para entender el placer estético que nos producen. Hasta es factible que estas reflexiones tengan aspectos comunes con el gozo que despiertan las

simetrías en la física y, en particular, en la física cuántica. Se sabe que existe una profunda conexión entre las leyes de conservación y las simetrías a través de un principio extremal. El principio de la mínima acción es uno de los instrumentos más importantes para formular con elegancia, claridad e invariancia las ecuaciones fundamentales de la física. Estas simetrías que fascinan a los físicos y matemáticos también tienen su génesis en un principio variacional, igual que las formas óptimas.

Este ensayo podría detenerse aquí, una vez que se han comentado algunos aspectos de las intrincadas relaciones entre las motivaciones que guían el diseño de las formas estructurales y los distintos goces que despiertan las formas en la mente de los artistas, pero para dar vida a las formas estructurales hay que materializarlas.

La personalidad de cada material impone constricciones a las posibles formas, hasta el punto de que en algunos casos imposibilita su realización. El material ha dictado, o por lo menos ha restringido, la forma durante mucho tiempo. Sólo ahora entrevemos la posibilidad de que la forma dicte el material. Estas reflexiones justifican el siguiente capítulo donde los conceptos de forma y material están íntimamente ligados.

3.- LA MATERIALIZACION DE LAS FORMAS

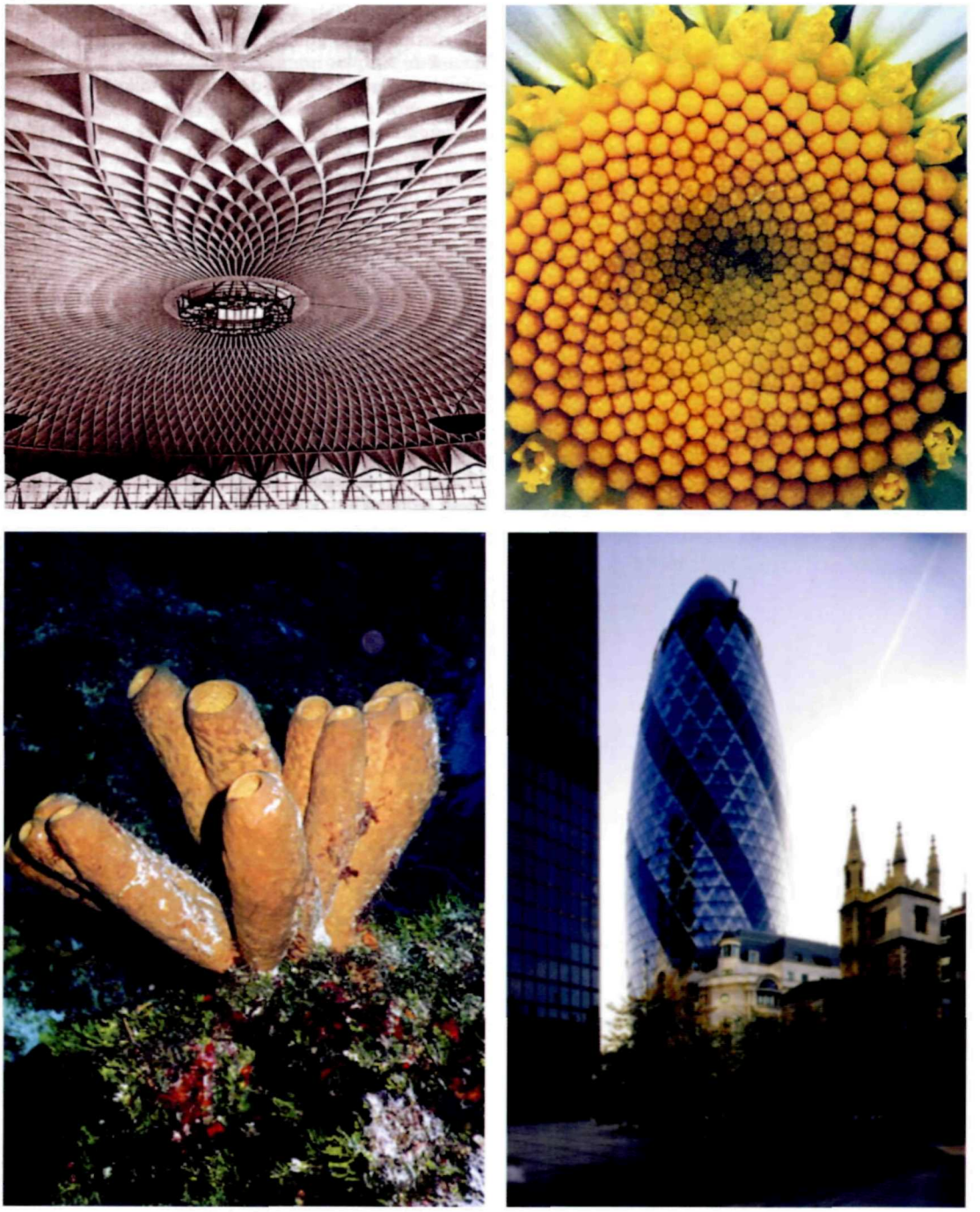
Las formas estructurales, al final, hay que materializarlas y el material utilizado impone la forma: con dovelas de piedra podemos construir arcos, bóvedas y hasta cúpulas, si sabemos zuncharlas. Con cables podemos fabricar tendones y mallas, y con madera o acero, vigas de muchos tipos y celosías espaciales.

Los avances realizados en la segunda mitad del siglo XX ya nos permiten diseñar algunos materiales con las propiedades mecánicas deseadas. Estos logros dan más libertad al proyectista porque le ayudan a concebir formas estructurales nuevas, o con menor dependencia de los materiales tradicionales. Lo mismo ha sucedido con el cálculo; hoy en día el cálculo de una forma estructural, por compleja que sea, ya no es un impedimento para no proyectarla.

Los nuevos materiales que darán vida a las nuevas formas serán, muy posiblemente, materiales compuestos. El hormigón armado, nacido a comienzos del siglo XX, fue un precursor de la nueva estirpe. Las hermosas y elegantes láminas, de mediados del pasado siglo, son formas que se pudieron materializar gracias al hormigón armado. Las estructuras adaptativas del futuro requerirán materiales que, además de resistir, puedan detectar amenazas y actuar en consecuencia; son los llamados, eufemísticamente, materiales inteligentes.

Antes el material dictaba la forma, a partir de ahora la forma dictará el material.

Fig. 16



Naturalismo y funcionalismo pueden converger cuando se plantean problemas similares.

3.1.- Cuando el material dictaba la forma

Cada material crea sus formas resistentes.

(E. Torroja 1957).

Materiales que sólo resisten compresiones

Las *formas* fruto de materiales que solamente pueden soportar compresiones —como las piedras o los ladrillos— son los *pilares, arcos, bóvedas* y *cúpulas.*

"Si el pilar o la columna, es arte, el arco es técnica", como comenta E. Torroja en *Razón y Ser,* y añade "sin que esto quiera decir, ni que a la columna le falte técnica , ni que el arco sea incapaz de vivísima expresión estética". El arco, fabricado solamente con sillares, fue un logro genial; la idea de ir colocando dovelas sobre apoyos provisionales de forma que, al retirarlos, las reacciones pasen por los arranques no es fácil. Para construir el arco hace falta sostener todas las dovelas hasta colocar la clave, sólo entonces entra el arco en acción y se logra el equilibrio.

La *forma* de este tipo de arco, donde la única carga que se considera es el peso propio, se obtiene a partir de una catenaria —una forma minimal, de nuevo—. Robert Hooke publicó en 1675 un anagrama, incluido en un libro sobre relojes solares, que dice "Del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así, pero invertido, se sostendrá el arco rígido". La forma de la cadena suspendida que soporta su propio peso a tracción (funicular de cargas) es la misma —pero invertida— que la del arco que soporta las cargas de compresión (antifunicular de cargas). De ahí el nombre de catenaria para la directriz del arco.

Fig. 17



"El arco, fabricado solamente con sillares, fue un logro genial".
Acueducto romano, en Segovia (E. Torroja, *Razón y Ser*, foto M. García Moya).

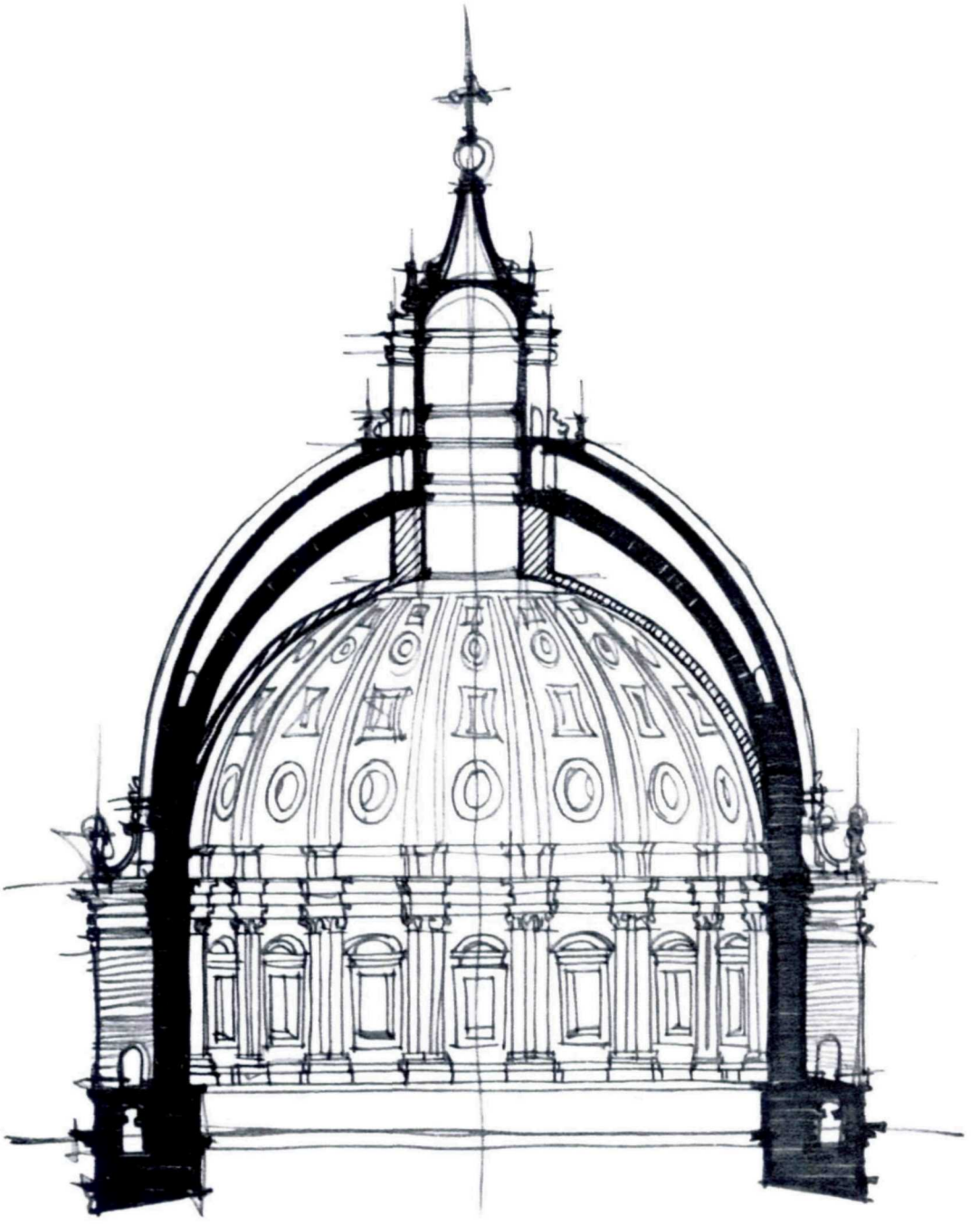
En un arco de fábrica, el antifunicular de cargas debe quedar dentro de los límites de la construcción —entre el trasdós y el intradós— para evitar que aparezcan tracciones que el material no podría soportar.

La forma de la bóveda es una extrapolación del arco. Sin embargo, su continuidad a lo largo de las generatrices, cuando los arcos están trabados, le permite trabajar en flexión en esta dirección. Las intersecciones de bóvedas de cantería dan lugar a un fascinante bosque de formas que producen goces de todo tipo; cuando Gaudí decía que el interior de su iglesia sería un frondoso bosque, seguramente estaba influido por las nervaduras y las intersecciones de las bóvedas en las catedrales góticas.

La cúpula es la solución más sencilla para cubrir un área sin soportes intermedios y con el mínimo material. Su forma natural es la de planta circular, con apoyo en todo el contorno, y directriz apuntada, cuando se hace con materiales que no resisten a tracción; la directriz circular da tracciones en los paralelos de riñones y la rebajada las da en el anillo extremo. La cúpula puede imaginarse trabajando como unos gajos cuya flexión está impedida por anillos horizontales; en las zonas donde los gajos quieren hundirse hacia adentro los anillos se lo impiden trabajando a compresión y donde los gajos quieren abrirse, los anillos lo evitan resistiendo a tracción.

La poca resistencia a tracción de los materiales pétreos es la responsable de la aparición de grietas meridionales en las cúpulas. La solución adoptada por los arquitectos medievales y renacentistas fue la de rodearlas con gruesos estribos de fábrica o zuncharlas con anillos de hierro forjado o cadenas.

Fig. 18

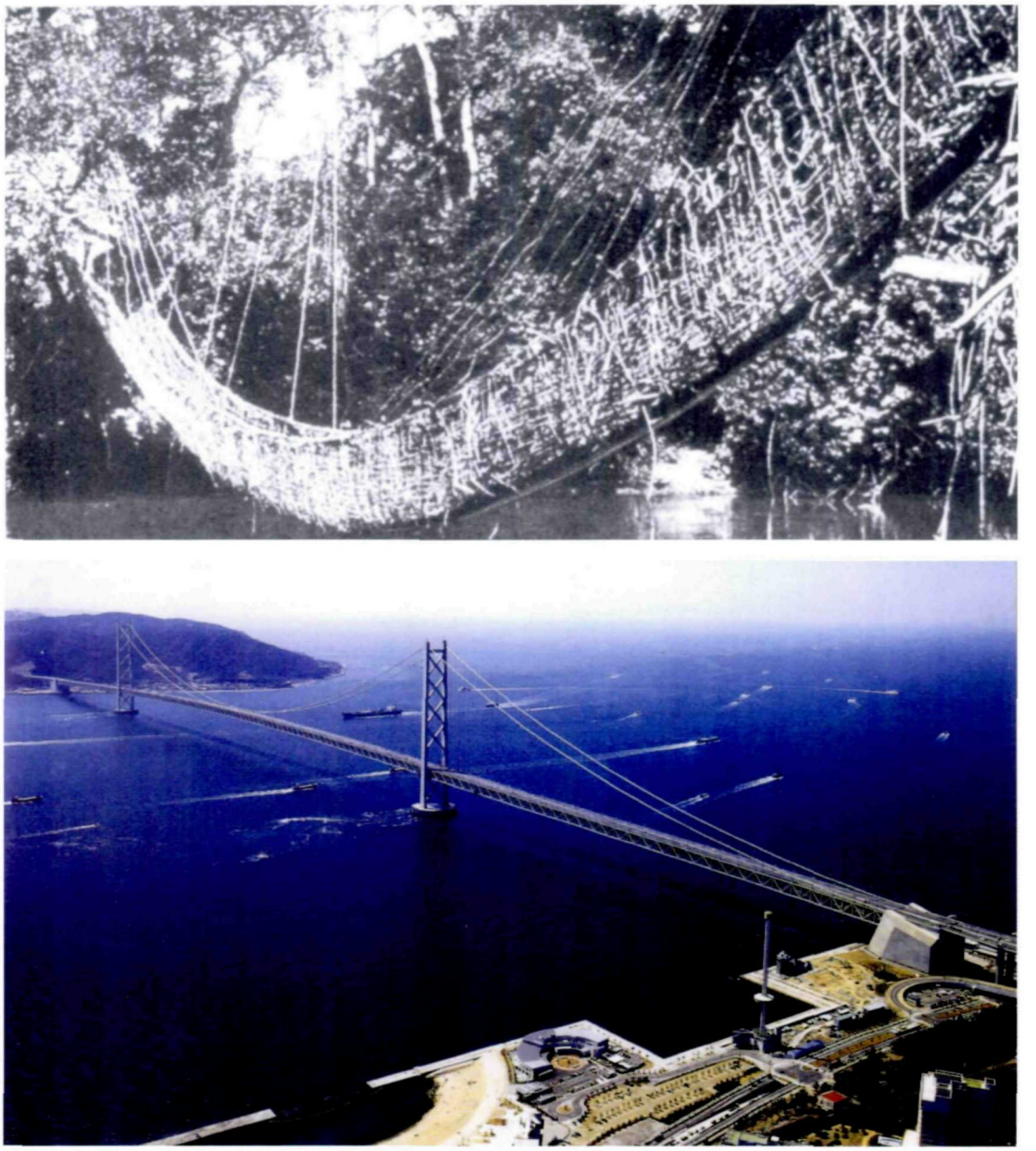


La cúpula de San Pedro en Roma, diseñada por Miguel Angel.
(E. Torroja, *Razón y Ser.* Dibujo G. Echegaray, M. Barbero).

Esta situación nos da pie a reconsiderar la estética de las formas y la idea del funcionalismo tolerante, antes mencionada. La verdad es una perfección más que aportar a la obra pero no es una condición necesaria. La cúpula de San Pedro en Roma, diseñada por Miguel Angel, era incapaz de soportar, con sólo sus sillares, las tracciones en los paralelos de riñones con la directriz adoptada y hubo que reforzarla con zunchos de hierro. "No apareciendo estos elementos al exterior, ni siendo natural que el ojo los prevea, no puede hablarse de acertada o exacta expresión resistente; pero, no por esto la cúpula deja de ser bella. Miguel Angel conocía de antemano el punto neurálgico de su estabilidad y, sin embargo, no dudó en trazarla así; si bien disminuyó el defecto respecto a trazados anteriores" (E. Torroja 1957).

En 1748 Poleni escribió un conocido informe donde analizaba las grietas de la cúpula de San Pedro, casi doscientos años después de su terminación. Observó que las grietas ya habían dividido la cúpula en gajos y estudió su estabilidad utilizando la idea de la catenaria, comprobando que la línea de empuje estaba contenida dentro de la fábrica; "che dentro alla solidità della volta la nostra catenaria tutta intiera sia situata". A partir de estos resultados Poleni demostró que la cúpula de San Pedro era segura en el estado agrietado. Anteriormente, tres famosos matemáticos habían valorado la seguridad de la cúpula y habían concluido que los zunchos estaban a punto de romper, "che non si voleva neppure un minuto intero di tempo per far andare la mole tutta per terra" (B. Bassegoda 1974).

Fig. 19



(Superior). Puente colgante con cables de fibras vegetales.
(Inferior). Puente colgante con cables de acero.
(Akashi Kaikyo, 1998. Longitud del vano principal 1991 m).

Materiales que sólo resisten tracciones

Las *formas* engendradas con materiales que sólo soportan tracciones — como los cables o los tejidos— son los *tendones* y las *mallas.*

Los puentes colgantes primitivos estaban formados solamente por cables de fibras vegetales. Los cables de acero, fabricados a finales del siglo XX, han facilitado la construcción de puentes colgantes de dos kilómetros de luz, como el de Akashi Kaikyo.

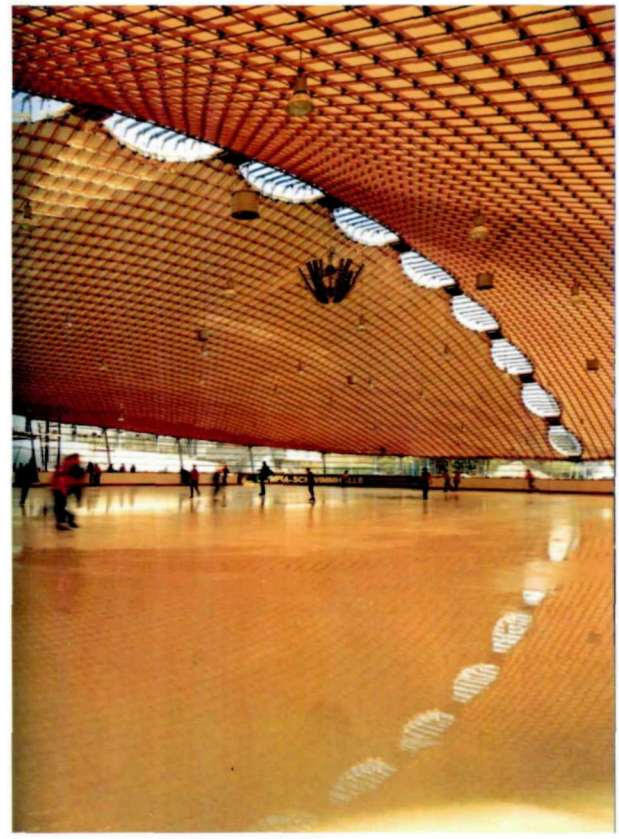
Eduardo Torroja, en su discurso inaugural del curso 1960-1961, comentaba que las mayores luces de puentes se salvarán con estructuras colgantes y que las mayores áreas sin apoyos intermedios también se cubrirán con malla-tesa. Su fe en los tendones era tal que añadió "Me atrevería a decir que [estas formas durarán] tanto tiempo cuanto la Humanidad tarde en encontrar otro material y otro tipo estructural capaz de aventajar a éstos".

La aparición de la malla-tesa no es una consecuencia lógica de los avances en el cálculo estructural, sino que procede directamente de la aparición de un nuevo material; el alambre de alta resistencia. La malla-tesa está formada, esencialmente, por dos familias de cables anclados por sus extremos a un determinado contorno que se cruzan entre sí en dos direcciones para formar una malla, que sirve de sustentación a un material de cobertura. Para que todos los cables estén en tracción, la superficie resultante es de doble curvatura; es decir, con una familia de cables sustentantes colgados de un determinado contorno con su concavidad hacia arriba, y otra de cables rigidizantes con la concavidad hacia abajo. Por este procedimiento, la tensión dada a los rigidizantes pone en carga a los sustentantes.

Fig. 20



Malla del pabellón alemán en la feria de Montreal, 1967 (F. Otto y colaboradores).

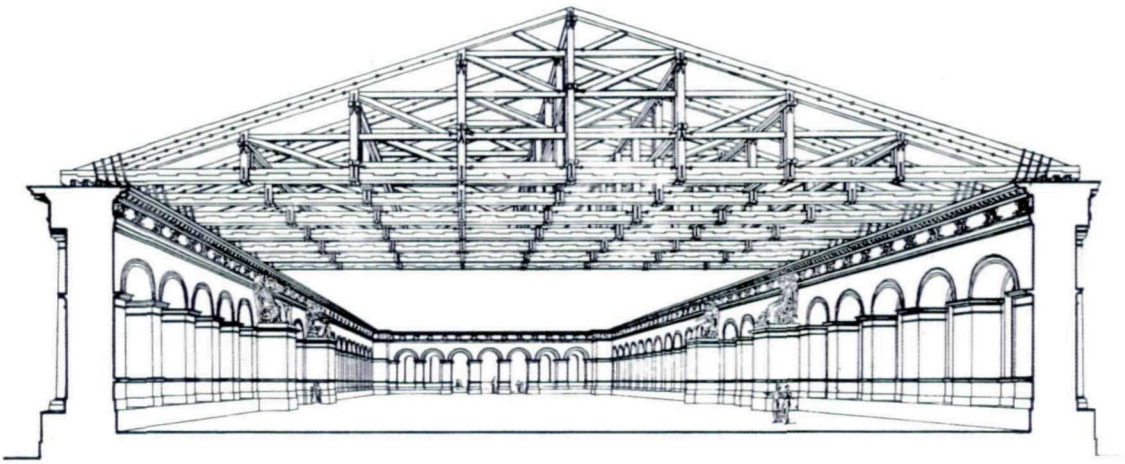


Malla de la cubierta de la pista de patinaje sobre hielo en Munich, 1985 (J. Schlaich y Ackermann).

La cubierta colgada del estadio de Raleigh (1953) fue una de las primeras realizaciones espectaculares con una malla-tesa, soportada por dos arcos parabólicos cruzados. La superficie cubierta era alrededor de 10.000 m2. El proyecto fue del arquitecto H. Deitrick y del ingeniero M. Nowicki. El pabellón alemán de la feria mundial de Montreal (1967) y las cubiertas del complejo olímpico de Munich (1972) de Frei Otto, anteriormente comentadas, son dos mallas-tesas de referencia.

Una obra más reciente, la pista de patinaje sobre hielo en Munich (1985) está cubierta por una malla-tesa colgada de un arco de 104 m de luz y 18,5 m de altura. El proyecto es de Jörg Schlaich y Ackermann. La pista es elíptica y sus ejes miden 88 m y 67 m. La superficie cubierta es de 4200 m2. El arco soporta la malla y ésta rigidiza el arco. Esta simbiosis permite una estructura elegante, muy ligera y esbelta. Schlaich cree que estas formas tienen futuro y afirma que las mallas-tesas todavía no han colmado todas las espectativas que despertaron a mediados del siglo XX.

Fig. 21





Perspectiva de la cercha, formada por vigas triangulares, diseñada por Betancourt para la cubierta de la sala de ejercicios ecuestres del picadero de Moscú.

Materiales que resisten a compresión y a tracción

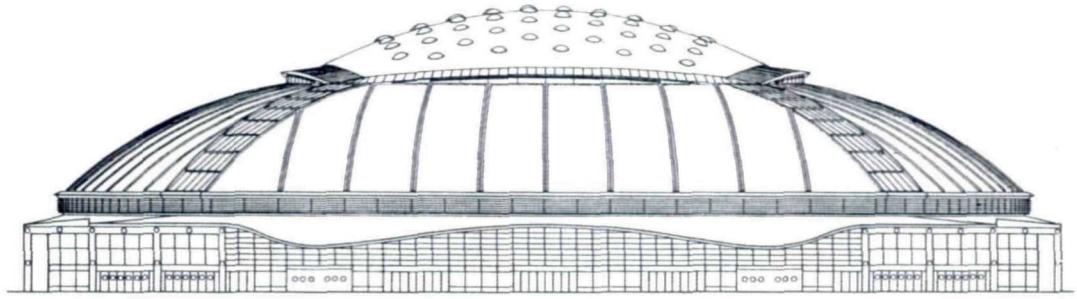
Las *formas* específicas generadas con materiales que pueden soportar compresiones y tracciones —como la madera o el acero— son la *viga* y la *celosía.*

La forma de las vigas depende de las luces que se quieran cubrir, del material utilizado, del proceso constructivo y de los aspectos económicos:

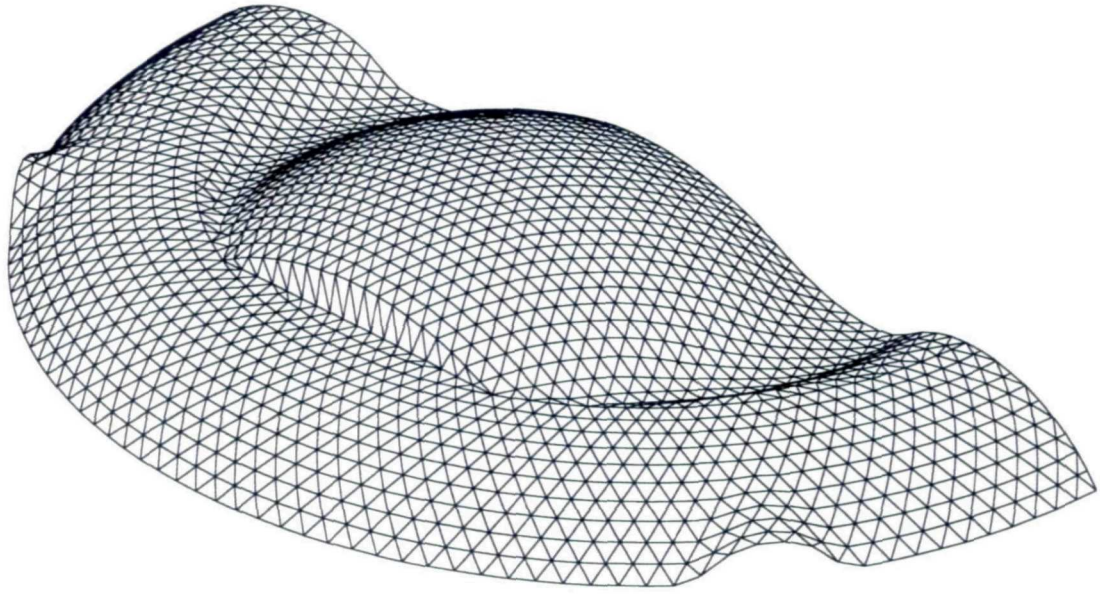
Las escuadrías y las longitudes disponibles de la madera limitan bastante las posibilidades y con frecuencia hay que recurrir a vigas compuestas o a vigas trianguladas. La cubierta del Picadero de Moscú, diseñada por Agustín de Betancourt en 1817 con motivo de la visita del Zar Alejandro I a la ciudad, es un buen ejemplo de cómo se podía salvar en aquellas épocas una luz importante —48 m— con vigas de madera utilizando una forma triangulada. Esta gran nave, por sus dimensiones —166 x 48 m— y por la originalidad de su cubierta, no tuvo rival en Europa durante muchos años. La forma de la estructura impresionó tanto al escultor ruso Ivan Vitali que decidió reproducir en bronce la imagen de Betancourt.

Los perfiles metálicos permiten utilizar mejor el material y han generado formas típicas; las vigas con sección en forma de doble T es un ejemplo. Para grandes luces, las vigas de sección en cajón son muy resistentes y el aspecto exterior, más clásico, puede hasta resultar agradable. Las estructuras trianguladas con perfiles metálicos encontraron muy pronto su nicho estructural; la Torre Eiffel (1889) con sus 300 m de altura y el puente del Firth of Forth (1890) con dos tramos centrales de medio kilómetro de luz, dan buena prueba de ello.

Fig. 22



La cubierta del Palau Sant Jordi es una celosía espacial.
(A. Isozaki, M. Kawaguchi).



Esquema de la celosía espacial de la cubierta del palacio de deportes de Pallafolls.
(A. Isozaki, J. Martínez-Calzón).

La triangulación podría considerarse como otra forma estructural. Es más, la triangulación ha originado la *celosía espacial* al inscribir en superficies cilíndricas o abovedadas triangulaciones de poco espesor. La cúpula de R. Buckminster Fuller, de 76 m de diámetro, del pabellón de EE.UU. en la Expo-67 de Montreal fue una de las primeras realizaciones, pero los primeros ejemplos de celosías espaciales se remontan a estructuras construidas por Graham Bell (el del teléfono) en 1907, posiblemente influido por su interés por las cometas.

Las instalaciones deportivas de los juegos olímpicos de Barcelona en 1992 ofrecieron muchas oportunidades para materializar celosías espaciales. Una de las críticas a estas formas es que sólo son rentables para cubiertas planas y de base rectangular, pero la cubierta del Palau Sant Jordi sirvió para refutar esta opinión. El arquitecto Arata Isozaki y el ingeniero Mamoru Kawaguchi ganaron el concurso, en 1983, con una celosía espacial y con un procedimiento constructivo original. El estadio puede albergar 15.000 espectadores sentados. La cubierta, de contornos curvos, tiene una longitud máxima de 128 m, una anchura máxima de 106 m, y la altura máxima es de 45 m. La celosía espacial, de 2,50 m de espesor, está formada por 9.190 tubos de acero (con diámetros que van desde 76 mm hasta 267 mm y tolerancias de 0,3 mm) unidos mediante 2.403 nudos. Aparte de la belleza de la forma, que a los autores les recordaba una concha protectora que resguardaba a los atletas y espectadores del tórrido sol del verano catalán, uno de los aspectos más destacables fue el proceso constructivo —ideado por Kawaguchi y llamado *Pantadome*— que consiste en ensamblar la celosía en una forma plegada parcialmente y desplegarla a medida que iba subiendo la cubierta.

Otra cubierta, del mismo estilo, es la del palacio de deportes de Palafolls, obra de Arata Isozaki y Julio Martínez-Calzón. Es una intrincada celosía

espacial —mezcla de cúpula y toro— de planta semicircular, de 70 m de diámetro. La celosía está formada por barras tubulares y nudos esféricos.

Estos ejemplos muestran que, después de medio siglo, las celosías espaciales pueden proporcionar formas hermosas y económicas. La fabricación programada de los componentes —donde el corte, mecanizado y taladrado se hace controlado por ordenador— evita restringirse a las formas estandarizadas y le ofrece mayor libertad al proyectista. Las celosías espaciales no han agotado, todavía, todo su potencial.

En el horizonte asoman las formas estructurales basadas en la tensegridad, nombre poco agraciado que mimetiza la palabra inglesa tensegrity (formada a partir de **tens**ional int**egrity**) acuñada por B. Fuller. Las formas recuerdan una celosía, y la estructura está construida con barras, que soportan las compresiones, y tendones, que soportan tracciones. La definición, en sentido estricto, de estas formas es: "estructuras donde cada barra se conecta sólo con cables, pero no con otra barra (excepto en el contorno)". Con este concepto restringido, el sistema de barras es completamente disjunto.

Estas formas estructurales han fascinado a los arquitectos y a los ingenieros desde su aparición, pero hasta la fecha no se han construido estructuras importantes. Kenneth Snelson ha realizado varias esculturas que se exhiben en el Museo de Arte Moderno en Washington DC y en Baltimore, frente al Museo de Ciencias de Maryland. Se está estudiando la posibilidad de construir celosías espaciales de doble capa, muy ligeras,

basadas en la tensegridad, pero el paso de la maqueta al tamaño real presenta problemas aún no resueltos. Una ventaja evidente de estas celosías es que se pueden plegar muy fácilmente y esto las hace muy atractivas para estructuras desmontables. La tensegridad también ha despertado el interés de los biólogos al sospechar que este concepto puede ser muy útil para entender el comportamiento mecánico del citoplasma celular (P. García Barreno 2003).

3.2.- Cuando la forma dictará el material

Si el material ha condicionado, hasta ahora, la forma estructural ¿por qué no imaginamos una forma estructural y diseñamos —si podemos— el material que la hubiera condicionado?

Si partimos de una forma estructural y analizamos su comportamiento mecánico comprobaremos que, en general, hay regiones sometidas a esfuerzos de compresión y otras a esfuerzos de tracción y que los valores difieren de un punto a otro. Está claro que un material que sólo resiste a compresión no nos servirá, como tampoco otro que sólo resista tracciones. Si utilizamos un material que resiste a tracción y a compresión es muy posible que esté infrautilizado en muchas partes de la estructura. Lo ideal sería disponer de un material capaz de soportar tracciones donde haga falta y compresiones donde sea necesario; estamos imaginando un material *heterogéneo* y *compuesto*. Así surgió el hormigón armado a comienzos del siglo pasado y, desde entonces, el ingenio de los científicos ha concebido nuevos materiales con unas propiedades sorprendentes capaces de dar respuesta a las formas que idean los proyectistas.

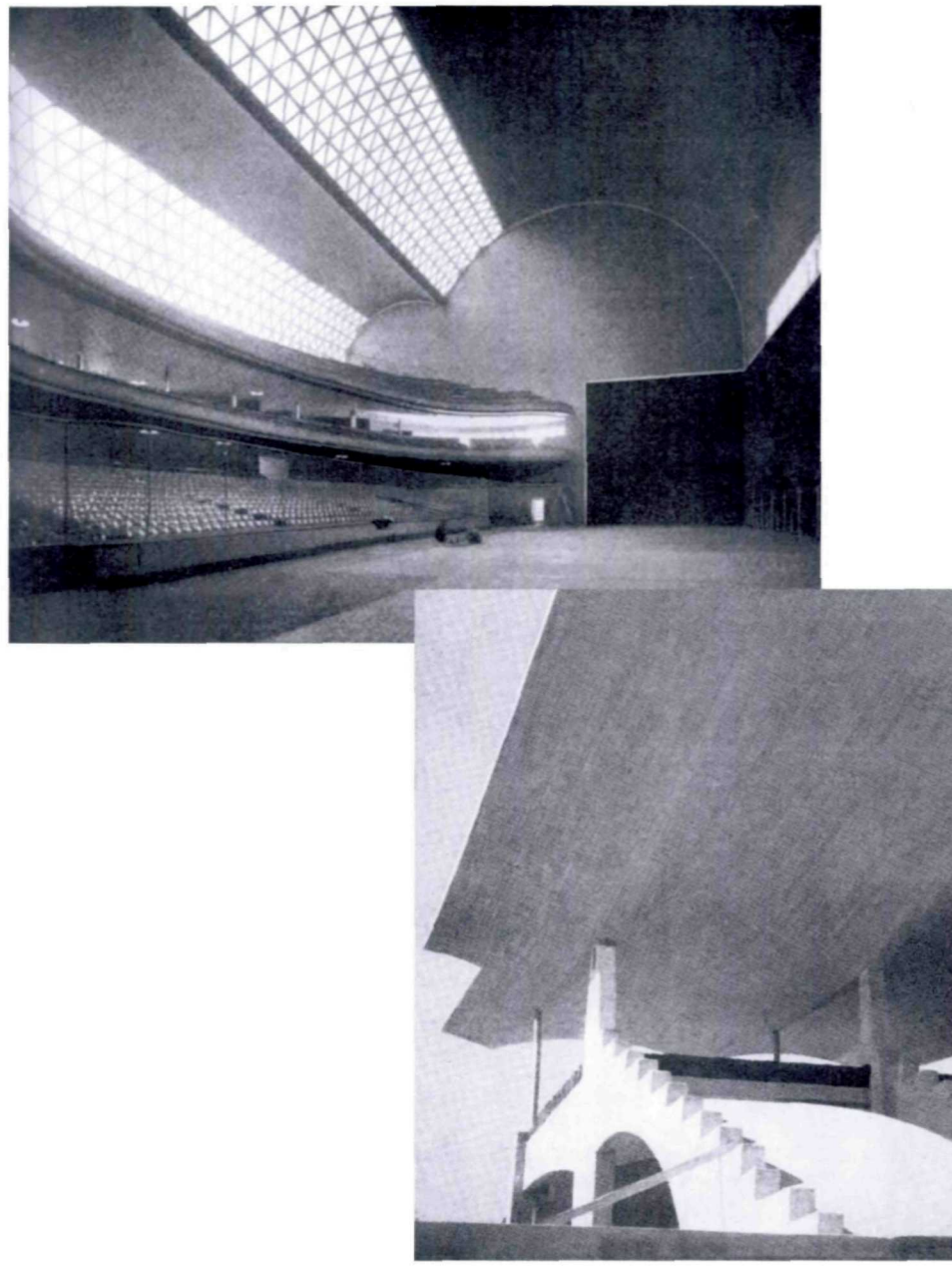
La situación se complica si la forma puede ser variable en función de las circunstancias y queremos que la estructura sea continua; es decir, sin componentes rígidos unidos por mecanismos. Para ello hacen falta materiales *sensibles* —que sean capaces de detectar la circunstancia cambiante— y *activos* —que puedan modificar su forma o respuesta en función de los estímulos recibidos. A estos materiales singulares y novedosos se les suele llamar inteligentes y tendrán un gran protagonismo en las formas estructurales del futuro.

Cuando Monier, en 1852, introdujo alambres en sus macetas de mortero poco se imaginaba que estaba creando un nuevo material —el hormigón armado— que iba a revolucionar el mundo de las formas estructurales. El hormigón armado es el prototipo de material compuesto donde las tracciones son resistidas por las armaduras de acero y las compresiones por el hormigón. Con palabras de Torroja: "El hormigón armado es una piedra orgánicamente constituida, dentro de cuya masa el complejo tendinoso de la armadura se distribuye óptimamente, se dosifica para prestar al hormigón la resistencia a la tracción que necesita en cada punto, y se orienta y se refuerza según las exigencias del plexo tensional previsto" (E. Torroja 1957).

El hormigón armado ha permitido dar vida a hermosas formas estructurales que difícilmente se hubieran fabricado con otros materiales por dificultades de proyecto, construcción, o económicas. Las estructuras laminares son el mejor ejemplo. Dos láminas geniales de E. Torroja vienen al caso; J.A. Fernández Ordóñez (1990) hizo una glosa de ellas que se resume a continuación:

La cubierta del Frontón Recoletos de Madrid es una lámina cilíndrica cuya directriz son dos arcos de círculo con radios desiguales que producen una misteriosa sensación de desequilibrio irresoluble. Y por si fuera poco, en la zona aparentemente más necesitada de hormigón [armado], Torroja rompe la opacidad de la lámina y la vuelve transparente por medio de dos lucernarios longitudinales triangulados, inundando de luz el espacio interior. El trozo de lámina intermedio entre los lucernarios, de 8 cm de espesor y 55 m de luz con una esbeltez de 1/700 [la esbeltez de una cáscara de huevo de gallina es 1/100], queda colgado del aire, volando prodigiosamente sobre nuestro asombro.

Fig. 23



El hormigón armado ha permitido dar vida a hermosas formas estructurales: (superior) lámina cilíndrica del Frontón Recoletos que produce una misteriosa sensación de desequilibrio irresoluble, (inferior) láminas hiperboloides del Hipódromo de la Zarzuela que permanecen volando sobre el monte de El Pardo.

Las marquesinas del Hipódromo de la Zarzuela, láminas hiperboloides, son el segundo gran ejemplo del funcionalismo poético que practica Torroja. La estructura presentaba una novedad tal que su cálculo era en aquellos años prácticamente inabordable, dificultad que afrontó Torroja construyendo un módulo a tamaño natural, ensayo que consideró suficiente para su construcción definitiva. Ahí permanece volando sobre el monte de El Pardo esta estructura laminar, expresando la graciosa potencialidad tensional de que es capaz.

Torroja elevó el hormigón armado a las misteriosas cotas del arte y con las láminas —sus láminas— alcanzará la gloria.

La necesidad de construir formas con unas propiedades mecánicas muy exigentes —cascos de aeronaves, por ejemplo— ha forzado el desarrollo de materiales compuestos mucho más sofisticados que el hormigón armado. Ahora las armaduras se han transformado en pequeñas fibras metálicas, cerámicas o poliméricas, y lo mismo le sucede a la matriz que las arropa. Para satisfacer las exigencias de la forma, los materiales compuestos más avanzados han dejado de ser homogéneos y se diseñan situando más refuerzo donde hace más falta; son materiales con una microestructura variable cuyas propiedades cambian gradualmente de una región a otra (*functionally graded materials*). Muchas formas naturales, los huesos por ejemplo, muestran esta microestructura.

La naturaleza es una buena fuente de inspiración para el diseño de materiales compuestos, donde frecuentemente resulta difícil distinguir entre *material* y *estructura* porque se trata de materiales muy

jerarquizados, cuyas características estructurales pueden ir desde nanómetros (fibras de tropocolágeno con 10–9 m de diámetro) hasta 10 metros (el diámetro de algunos pinos gigantes) (M. Elices, 2000). La pala del rotor de un helicóptero es un ejemplo donde, a veces, resulta difícil distinguir entre material y estructura, al estar formada por muchos materiales distintos jerárquicamente estructurados.

Uno de los ejemplos más conocidos de diseño de un material —forzado por la forma y la función del componente estructural— es el de los álabes de una turbina moderna. Debido a las altas temperaturas, la vida de las palas suele estar limitada por su resistencia a la fluencia y a la oxidación. La evolución del material utilizado para las palas muestra, claramente, los esfuerzos de diseño que se han hecho para ir resolviendo este problema: Las primeras palas eran de una aleación de níquel de grano fino, después de grano grueso, posteriormente granos alargados en la dirección de la pala y, finalmente, se acabó con palas monocristalinas. La razón de todo ello es porque la fluencia depende de las fronteras de grano y la manera de paliarla es reducirlas al máximo. En los álabes monocristalinos la fluencia queda limitada a la producida por el movimiento de las dislocaciones.

Formas activas; materiales inteligentes

El vuelo del halcón peregrino es familiar para los amantes de la naturaleza; los lentos devaneos mientras busca una presa, la parada cuando la detecta y el vuelo en picado cuando se lanza por ella. En su vuelo de inspección, la rapaz despliega las alas para ahorrar energía y cuando se lanza en picado, las aprieta contra su cuerpo. A los ingenieros aeronáuticos les gustaría imitar esta estrategia para lograr mejores prestaciones de vuelo y para ello deberían diseñar un avión con alas de forma variable.

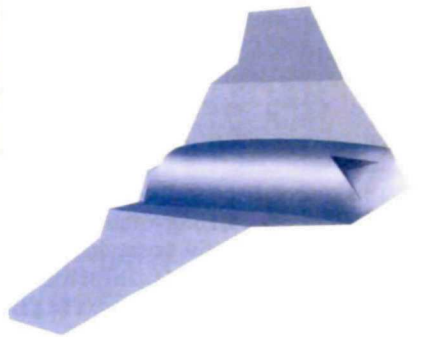
La NASA, Lockheed, Raytheon y NextGen ya investigan este tipo de aviones (*morphing planes*). Estas aeronaves tendrán una *forma activa* capaz de responder a los cambios de presión mediante sensores distribuidos en toda la superficie alar, imitando los nervios sensoriales de las aves. Estos sensores generarán desplazamientos mediante actuadores, como los músculos del ala de un pájaro, y optimizarán la forma del ala: Cuando el avión tenga que volar a gran velocidad, las alas se replegarán hacia atrás para reducir la resistencia del aire. A baja velocidad, las alas se desplegarán y aumentarán el grosor y la envergadura. Durante el aterrizaje, las puntas de las alas se doblarán para controlar mejor los vórtices de punta del ala que consumen mucha energía.

Para materializar estas *formas variables* es preciso diseñar nuevos materiales compuestos con sensores y actuadores incorporados. De momento, los materiales de partida son: aleaciones con memoria de forma, que responden a cambios térmicos, materiales piezoeléctricos, electroactivos y magnetoestrictivos, que se contraen o dilatan debido a campos eléctricos o magnéticos, y fluidos electroreológicos o magnetoreológicos, capaces de soportar esfuerzos cortantes bajo la

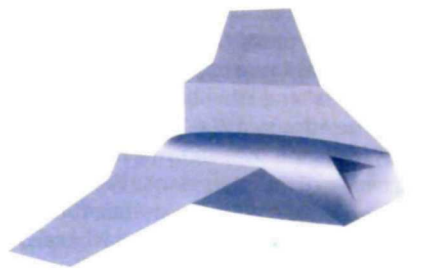
Fig.- 24

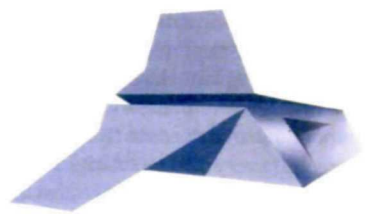






Los materiales inteligentes permitirán la fabricación de alas de geometría variable para poder imitar el vuelo del halcón peregrino.





acción de un campo eléctrico o magnético. Los materiales con memoria de forma se conocen desde 1930, pero las alas de forma variable van a necesitar una nueva generación de materiales con memoria de forma mucho más elásticos a base de polímeros y no de metales.

También hará falta diseñar materiales compuestos —capaces de sentir y actuar— para *formas activas* no necesariamente de geometría variable pero posiblemente algo diferentes de las formas estáticas consideradas al comienzo de este apartado. Las tendencias actuales van dirigidas a entender, proyectar, y saber construir formas activas donde forma, función, y material están integrados, como sucede en los organismos biológicos: Estas formas activas tendrán sus propios sensores, como el Ya se utilizan sensores embebidos en el material para detectar la corrosión y otras agresiones ambientales. Actuadores basados en materiales piezoeléctricos, fluidos electro-reológicos o materiales con memoria de forma, ya forman parte de esta generación de materiales inteligentes. Igualmente, los microchips, para el control de todos ellos, deberán integrarse en estos nuevos materiales.

Al llover, las hojas coriáceas del loto siempre se muestran limpias, cuando otras hojas suelen aparecer cubiertas de barro. Se ha observado que las hojas de loto están recubiertas con unos microscópicos pelos revestidos de cera y, cuando cae la lluvia, estos pelos impiden que las gotas de agua sucia mojen las hojas. Este proceso natural ha dado una pista para el desarrollo de una pintura que no se ensucia, llamada *Lotusan.* El vídrio Pilkington Activ es un vídrio con un recubrimiento que escupe la humedad y no necesita limpiarse. Estos nuevos materiales influirán en las

formas estructurales; si las superficies están pintadas con materiales que no se ensucian o acristaladas con los nuevos vidrios, ya no será preciso proyectarlas para que sean accesibles a la limpieza. Todo esto proporcionará mayor libertad a los arquitectos a la hora de diseñar las estructuras.

Es difícil pronosticar cuándo las formas activas construidas con los modernos materiales compuestos se utilizarán habitualmente. Los aspectos económicos serán decisivos, pero ya se han fabricado algunas estructuras y componentes estructurales activos que demuestran su viabilidad: Los hormigones reforzados con fibras de carbono, además de sus excelentes propiedades mecánicas, son conductores eléctricos y su conductividad varía con la tensión mecánica, propiedad que se puede utilizar para conocer el estado tensional. También se han fabricado hormigones capaces de detectar cuando se fisuran y de liberar un material que polimeriza y sella las grietas. Hay pinturas que avisan cuando aparecen grietas superficiales, porque cambian de color. Las fibras ópticas, con redes de difracción incorporadas, se han introducido en los componentes estructurales para medir sus deformaciones y ya hay varios puentes monitorizados por este procedimiento. Se han incorporado actuadores para amortiguar las oscilaciones de edificios y puentes; las torres del puente de Akashi Kaikyo están provistas de amortiguadores. En Japón, un país muy sensibilizado por los problemas sísmicos, se han construido varias estructuras a escala natural con formas activas que han mostrado un comportamiento satisfactorio cuando se han ensayado simulando seísmos Ya ha nacido una rama en la ingeniería estructural —la adaptrónica— basada en el control activo de las estructuras.

Las estructuras del siglo XX son mudas, sordas y ciegas, pero es posible que las que se construyan en este siglo sean capaces de detectar las agresiones del exterior y sepan reaccionar para evitar una catástrofe o para cicatrizar sus heridas. Estas estructuras, fabricadas con *materiales inteligentes*, podrán sentir el dolor producido por las agresiones externas o por el envejecimiento progresivo y, si no son capaces de resolver sus problemas, gritar, por lo menos, cuando necesiten ayuda. Así, aquellas formas estructurales que nos causaron gozo podrán seguir vivas en el patrimonio que vamos a legar.

AGRADECIMIENTOS

A Gustavo V. Guinea Tortuero y a Miguel A. Astiz Suárez por la atenta lectura del manuscrito y valiosas sugerencias. A José Miguel Martínez Palacio por la ayuda prestada en las ilustraciones y a Rosa Mª Morera Bosch por la esmerada edición del texto.

4. REFERENCIAS

Alarcon E. (2004) *Matemáticas, Ingeniería y Arquitectura.* Universidad de Valladolid. Lección de investidura doctorado Honoris Causa.

Almgren F. (1966) *Plateau's Problem: An Invitation to Varifold Geometry.* Benjamin.

Bassegoda B. (1974) *Algunos Ensayos sobre Técnica Edificatoria.* Universidad Politécnica de Barcelona.

Bergós J., Llimargas M. (1999) *Gaudí. El Hombre y la Obra.* Lunwerg.

Bravais L., Bravais A. (1837) Essai sur la disposition des feuilles curviseriees. *Annals Sci.* Nat. Bot.: **7**, 42-110, 193-221, 291-348. **8** 11-42.

Cela-Conde C.J. *et al.* (2004) Activation of the prefrontal cortex in the human visual aesthetic perception. *PNAS* **101**, 6321-6325.

Damasio A.R. (2001) Some notes on brain, imagination and creativity. En *The Origins of Creativity* (K.H. Pfenninger y V.R. Shubik Eds.). Oxford University Press.

Donady S., Couder Y. (1992) Phyllotaxis as a self-organized growth process. *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2098-2101.

Elices M. (2002) (Ed.) *Structural Biological Materials.* Pergamon. Elsevier Science.

Fernández Casado C. (1931) Teoría del arco. *Revista de Obras Públicas,* 287-292, 354-358.

Fernández Casado C. (1976) *Estética de las Artes del Ingeniero.* Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

Fernández Casado, C. (2002) en Gaudí, Estructura y Naturaleza. *OP Ingeniería y Territorio* **59**, 6-15

Fernández Ordoñez, J.A. (1990) *El Pensamiento Estético de los Ingenieros. Funcionalidad y Belleza.* Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

Feynman R.P. (2000) *El Placer de Descubrir.* Drakontos. Crítica.

García Barreno, P. (2003) Contestación al discurso de Luis Franco Vera, *El Rostro Humano de la Ciencia.* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Haeckel, E. (1998) *Art Forms in Nature.* Prestel.

Hofmeister W. (1868) *Allgemeine Morphologie der Gewachse, Handbuch der Physiologischen Botanik* 1 (Engelman, Leipzig) 405-664.

Hooke, R. (1676, *sic*, realmente 1675) *A Description of Helioscopes, and some other Instruments.* Londres.

Jodidio, P. (1998) *Santiago Calatrava.* Taschen.

Koch A.J., Meinhardt H. (1994) Biological patern formation: from basic mechanisms to complex structures. *Reviews of Modern Physics* **66**, 1481-1507.

Livingstone M. (2002) *Vision and Art. The Biology of Seeing.* Harry N. Abrams, Inc.

Manterola, J. (2002) Problemas sobre la Estética de los Puentes. *OP Ingeniería y Territorio* **58**, 60-67.

Nervi, P.L. (1965) *Aesthetics and Technology in Building.* Harvard University Press.

Otto, F. y Rasch, B. (1995) *Finding Form.* Axel Menges.

Plateau J.A.F. (1873) *Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires.* Gauthier-Vilars, Trubner et Cie., F. Clemm.

Poleni, G. (1748) *Memorie Istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano.* Padua (Edición facsímil. INTEMAC. 1982).

Rubia F.J. (2003) *La Conexión Divina.* Drakontos. Crítica.

Thompson D'Arcy W. (1961) *On growth and Form* (Edición resumida por J.T. Bonner) Cambridge Univ. Press.

Thornes J.E. (1979) The weather dating of Constable's cloud studies. *Weather* **34**, 308-315.

Torroja, E. (1957) *Razón y Ser de los Tipos Estructurales.* Ediciones de CSIC.

Torroja, E. (1960) *La Evolución de las Formas Estructurales, en relación con sus Materiales, a lo largo de la Historia de la Construcción.* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Tsui, E. (1999) *Evolutionary Architecture.* John Wiley & Sons, Inc.

Turing A. (1952) The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Trans. Roy. Soc. B* **237**(32), 5-72.

Vogel H. (1979) A better way to construct the sunflower head. *Mathematical Biosciences* **44**, 179-189.

Vogel, S. (1992) Copying nature: A biologist's cautionary comments. *Biomimetics* **1**, 63-79.

Zeki S. (1999) *Inner Vision: An exploration of Art and the Brain.* Oxford University Press.

Zeki S. (2001) Artistic creativity and the brain. *Science* **293**, 6 July 51-52.