El vientre de un arquitecto

Raúl Ibáñez Torres

Universidad del País Vasco

"Para que un objeto sea altamente bello es preciso que su forma no tenga nada de superfluo, sino las condiciones que lo hacen útil, teniendo en cuenta el material y los usos a prestar. Cuando las formas son más perfectas exigen menos ornamentación."
A. Gaudí

INTRODUCCIÓN

Podríamos decir que la Geometría, y más generalmente la Matemática, ha estado presente en la Arquitectura desde el momento en el que el hombre siente la necesidad de construir un hogar donde guarecerse de las inclemencias de la naturaleza, descansar o mantenerse alejado de sus enemigos, ya sea excavando en cuevas, construyendo chozas o montando tiendas, y siente además la necesidad de construir lugares especiales para enterrar y venerar a los muertos o adorar a los dioses, como los dólmenes, los túmulos o los monumentos megalíticos (por ejemplo, Stonehenge). Presencia que a lo largo de la historia nos ha dejado obras de gran belleza (aparte de su utilidad), como la acrópolis ateniense con el Partenón, la Basílica de Santa Sofía de Constantinopla, la Alhambra de Granada, la Torre Eiffel, el Guggenheim de Bilbao, y un largo e interesante etcétera.

Parece evidente para cualquiera que, siendo la forma y la estructura tan importantes en el diseño de las obras arquitectónicas, la Geometría y las Matemáticas sean una parte fundamental de la Arquitectura. Podemos separar las aportaciones de éstas en dos tipos:

(i) como herramienta de cálculo, por ejemplo para determinar la estructura y forma de la obra arquitectónica, a la hora de estudiar el equilibrio, resistencia o estabilidad de un edificio, puente u otra construcción, para determinar las condiciones de luminosidad, temperatura y acústica, etc.

(ii) como fuente de inspiración y en el desarrollo de la creatividad, imaginación e inventiva del arquitecto.

El diseño y construcción de una obra arquitectónica es un complejo proceso en el que el arquitecto ha de beber de diferentes fuentes, entre las que se encuentran las Matemáticas. En este proceso, el arquitecto deberá tener en cuenta las diferentes dimensiones de la obra arquitectónica:

- las tres dimensiones clásicas de Vitruvio (*Diez Libros de Arquitectura*): funcional, estructural y estética;
- las tres dimensiones de J. Ackerman (*International Design Conference*, Aspen, Colorado, 1974): individual, ambiental y cultural;
- otras tres dimensiones más: social, económica y artística.

Dimensiones todas ellas en las que la Geometría (cálculo o creatividad) jugará un papel destacado.

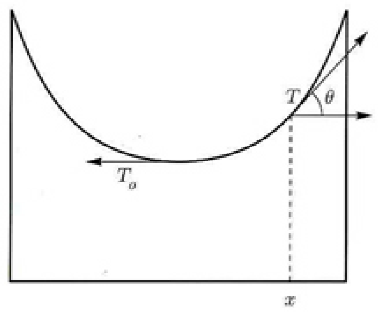
Pero realizar un estudio de las aportaciones de la Geometría en la Arquitectura es una tarea que excede el tiempo de esta charla. Por ello nos vamos a centrar en la utilización de la Geometría de curvas y superficies en la Arquitectura moderna, intentando mostrar que la forma no es superflua y que, además de belleza, le da estabilidad a la obra arquitectónica. La llegada de nuevos materiales más flexibles, más fáciles de manipular y menos pesados (hormigón, fibra de vidrio, nylon, terylene,...), así como la existencia de movimientos Arquitectónicos más abiertos (por ejemplo, la Arquitectura Orgánica) hace que la presencia de nuevas y sugerentes formas sea habitual en la Arquitectura del siglo XX.

En esta charla centraremos nuestra atención en los siguientes objetos geométricos: catenaria, cónicas, espiral, hélice, la esfera, el toro y algunas superficies regladas (cono, cilindro, helicoide, paraboloide hiperbólico, hiperboloide,...). Para cada uno de estos objetos mostraremos algunas propiedades geométricas y construcciones arquitectónicas en las cuales se haya utilizado. En algunas de las obras hablaremos de la justificación matemática que existe para la utilización del objeto geométrico; sin embargo, en otros simplemente admiraremos la utilización de la geometría y la belleza de la construcción. Hemos elegido ejemplos de grandes arquitectos e ingenieros (que creemos interesante que el público conozca), como son **A. Gaudí, E. Torroja, F. Candela, S. Calatrava, F. Lloyd Wright, Le Corbusier, R. B. Fuller, E. Saarinen, N. Foster, ...**

Para terminar esta breve introducción me gustaría mencionar que no sólo el estudio de la Geometría es importante y necesario para los arquitectos e ingenieros, sino que también lo es que el matemático conozca la utilización de su ciencia en otros contextos, como la Arquitectura, lo que le dará otra perspectiva de su trabajo e incluso le puede sugerir problemas que se derivan del diseño arquitectónico y en los cuales de otra forma no repararía.

LA CATENARIA

Es la forma que adopta una cuerda o cadena cuando se cuelga de dos puntos y sólo soporta su propio peso. Veamos el dibujo que se muestra en la Figura 1.



$$T.\cos\theta = T_0,\ T.\operatorname{sen}\theta = w.s(x)$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\theta = \frac{w.s}{T_0}$$

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \frac{T_0}{w}.\frac{d^2y}{dx^2}$$

$$\text{catenaria : } y = a\ \cosh\left(\frac{x}{a}\right)$$

Figura 1.

Consideremos un sistema de referencia cuyo centro está en el extremo de la curva y cuyo eje de abscisas es el paralelo al dibujado. Las fuerzas que se ejercen sobre el segmento $0x$ que va del origen hasta un punto de la curva de coordenada x son: la tensión del cable, T; su peso, que es $w\cdot s$ —donde w es la densidad lineal del cable y $s=s(x)$ es la longitud del segmento de cable—; y la fuerza horizontal de tensión del cable, T_0. El equilibrio nos da una igualdad de fuerzas, que aparece en la imagen, y un argumento sencillo de geometría diferencial de curvas nos lleva a la ecuación diferencial, cuya solución es la fórmula de la catenaria.

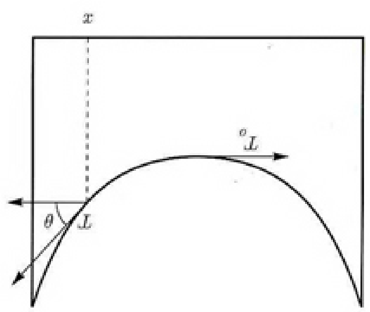


Figura 2.

El estudio de la estática del arco catenario invertido nos dice que éste se sostiene a sí mismo, luego es la forma óptima (debido a su estabilidad) para construir arcos que se soporten por su propio peso. Si estudiamos la estática de un arco que se sostiene a sí mismo descubrimos que el diagrama de fuerzas es el opuesto al de la catenaria, luego el equilibrio sigue manteniéndose. En la Figura 2, las fuerzas que actúan sobre el segmento $0x$ son las opuestas a las mostradas y el peso, que apunta hacia abajo (al voltear el diagrama anterior esa flecha quedaría hacia arriba).

A pesar de la óptima calidad del arco catenario, así como de otras formas estáticamente estables (parábola invertida y otros arcos antifuniculares), durante mucho tiempo se consideró que tales formas eran poco elegantes y no se emplearon en la arquitectura tradicional, siendo sustituidas por arcos semicirculares, elípticos, apuntados, etc. Sí fueron utilizadas ocasionalmente en ingeniería, en relación con la construcción de puentes.

Uno de los primeros arquitectos que investiga y hace uso de la catenaria y de otros arcos antifuniculares es **Antoni Gaudí** (1852-1926), uno de los mejores arquitectos del mundo en su tiempo. Intentar explicar a **Gaudí** en tan breve espacio es imposible, pero intentemos dar cinco claves:

(i) Formación técnica en su juventud (diferentes materias de matemáticas y geometría, en particular).
(ii) La naturaleza como referente (formas geométricas imitativas, nuevas formas geométricas inspiradas por la naturaleza, y la obra arquitectónica considerada en su entorno natural).
(iii) Experimentación geométrica como método creativo.
(iv) Nuevas creaciones estructurales (mediante estática gráfica o experimentalmente). Gaudí no imita o toma soluciones ya existentes, sino que va a la raíz del problema y obtiene sus propias soluciones, sus propias estructuras, y, finalmente, hace coincidir la forma con la estructura.
(v) Contacto directo con los trabajadores y talleres involucrados.

Me gusta pensar en **Gaudí** como el último arquitecto anterior a la arquitectura moderna (por el uso de materiales y algunas técnicas artesanales de la arquitectura de siglos anteriores; por ejemplo, en la época del hormigón sólo empezó a utilizarlo en la Sagrada Familia) y el primer arquitecto moderno. Entre otras cuestiones, podemos considerarle uno de los padres de la Arquitectura Orgánica y de la Arquitectura Racional.

La utilización que **Gaudí** hace de la catenaria está justificada ya en los anteriores puntos: forma que emana de la naturaleza, estabilidad, simplicidad en los cálculos, sencillez de realización para los carpinteros y otros trabajadores. José Bayó comentó la construcción de la catenaria de la Casa Milá: "*Primero revocaron y enlucieron un amplio paramento. Entonces, Canaleta daba la luz de cada arco y Bayó clavaba un clavo en cada extremo de la luz del arco, en la parte alta del muro. De estos clavos se suspendía una cadena de tal manera que su punto más bajo coincidiera con la flecha del arco. Entonces se dibujaba sobre la pared el perfil que por sí sola trazaba la cadena, y sobre este perfil el carpintero Casas hacía la cercha correspondiente. Luego se daba la vuelta a la cercha y se colocaba en su sitio. Sobre ella se hacían hiladas de ladrillo puesto de plano y las enjutas se hacían con hiladas horizontales de ladrillo*".

Para **Gaudí**, "*la catenaria da elegancia y espiritualidad al arco, elegancia y espiritualidad para la construcción entera. La función autoestable de la catenaria evita contrafuertes, el edificio pesa menos, gana una gracia vaporosa y se aguanta sin raros accesorios ortopédicos*" [6]. **Gaudí** utiliza los arcos catenarios en el Colegio de las Teresianas (1889), en la casa Batlló (1904-1906), en la casa Milá, "La Pedrera" (1905-1910), etc...

Figura 3. A. Gaudí: Casa Batlló (i), Casa Milá (c) y Colegio de las Teresianas (d).

Figura 4. Construcción de figuras geométricas con el *Supermag*.

Pero detengámonos un instante y analicemos, aunque sea superficialmente, la relación entre estabilidad y forma (fundamental en Arquitectura y, como veremos, en buena parte de la Arquitectura moderna). Para ello vamos a utilizar un sencillo ejemplo. Tomemos alguno de estos juegos que hay para construir figuras, como, por ejemplo, el *Supermag*, que utiliza bolas de hierro e imanes (Figura 4), y realicemos un cubo, que es la forma tradicional de las construcciones arquitectónicas. Descubriremos que es bastante inestable y que con un mínimo de presión se rompe o se desmorona. Luego, al construir un edificio con esta forma tendremos que valernos de "accesorios ortopédicos" (contrafuertes, vigas, gruesos muros,...) para que no se derrumbe (pensemos que esta ha sido la realidad en las construcciones arquitectónicas clásicas). Sin embargo, si realizamos un tetraedro, observamos que esta es una forma muy estable, que no se descompone a menos que le apliquemos una fuerza considerable. Para recoger este pensamiento gaudiniano vamos a recurrir a uno de los grandes teóricos del siglo XX, **Eduardo Torroja**: *“La construcción, la arquitectura, no pueden prescindir de la realidad del fenómeno físico, esto es, de las leyes de la estática. Su belleza se funda esencialmente sobre la verdad, sobre la racionalidad de la estructura; debe, por tanto, poderse lograr sin adiciones ni ornamentaciones externas. Pero, para obtenerla, es necesario un esfuerzo largo y tenaz, en el sentido de las íntimas razones de resistencia de las formas. El resultado genial de un momento de inspiración es siempre el epílogo de un drama, que frecuentemente está constituido por toda una vida de trabajo”* [...] *“La obra mejor es la que se sostiene por su forma”.*

Gaudí utilizó principalmente dos estrategias en el diseño estructural: el método de la maqueta colgante y el método gráfico. El método de la maqueta colgante lo utilizó en el diseño de la iglesia de la Colonia Güell. **Gaudí** diseñó una maqueta a base de pesos, cuerdas,... que buscaba la estabilidad fruto de su propio peso y luego, al igual que en el caso de la catenaria, se invertía la forma para obtener la forma óptima y estable para el edificio.

Figura 5. Iglesias de la Colonia Güell (i, c) y de la Sagrada Familia (d).

La maqueta de la iglesia de la Colonia Güell tenía una longitud de 6 metros y una altura de 4 metros, y su escala era 1:10 (mientras que la escala de peso era 1:10.000). **Gaudí** tardó 10 años en realizarla: 1898-1908. En las imágenes que se muestran en la Figura 5 vemos una fotografía de la maqueta y el diseño que **Gaudí** hizo de la iglesia sobre una fotografía invertida de la maqueta. Sin embargo, después de esta experiencia, **Gaudí** desarrolló el diseño de la Iglesia de la Sagrada Familia utilizando el método gráfico sobre el papel. En ambos casos, estas soluciones estructurales las intentaba interpretar después utilizando superficies sencillas, en particular las superficies regladas, como el hiperboloide o el paraboloide hiperbólico.

Otro arquitecto que utilizó la catenaria en su obra fue **Eero Saarinen**, uno de los grandes maestros de la arquitectura norteamericana del siglo XX. Muy criticado por otros modernistas contemporáneos, sin embargo la siguiente generación de modernistas le consideró ya uno de los grandes. Contó con el beneplácito de la sociedad, realizando obras de gran impacto social. Aquí presentamos dos de sus trabajos (Figura 6):

(i) Jefferson National Expansion Memorial —"Gateway Arch"— (Saint Louis, Missouri, 1947-1960). Fue la mayor construcción de su tipo en aquellos días. Cuando **Saarinen** recibió el encargo su idea fue crear un monumento que tuviese una importancia duradera y que fuera un hito de nuestro tiempo. El arco curvado pretendía expresar una monumentalidad atemporal y un dinamismo actual. Además, este arco simbolizaba la entrada al Oeste (Gateway Arch: "Arco de Entrada", "Puerta"). Tiene una altura de 192'15m.

(ii) Dulles International Airport (Chantilly, Virginia, 1958-1962). Fue el aeropuerto más grande de los Estados Unidos en su tiempo y, lo que es más importante, fue el primer aeropuerto comercial diseñado específicamente para *jets*. De nuevo, debido a su importancia, **Saarinen** se decide por una estructura monumental. Según su autor, "*es como una gran hamaca atada a grandes árboles*". Pero el tejado con forma de catenaria es importante tanto estéticamente como funcionalmente: además de la estabilidad, flexibilidad y firmeza de la estructura, su forma tiene la cualidad acústica de hacer que el sonido se disperse rápidamente, algo de gran valor en una terminal de aviones; su forma también permite evitar algunos efectos perniciosos del viento.

Figura 6. E. Saarinen: Gateway Arch (i) y Dulles International Airport (d).

LAS CÓNICAS

Son las curvas que se obtienen como intersección de un cono circular recto y de ángulo variable y un plano perpendicular a una de las rectas generadoras del cono que no pase por el vértice (Figura 7). Son curvas de gran sencillez matemática, ya que son solución de una ecuación de segundo grado en el plano ($ax^2+bxy+cy^2+d=0$), y poseen una gran riqueza geométrica (propiedades métricas, de reflexión,...).

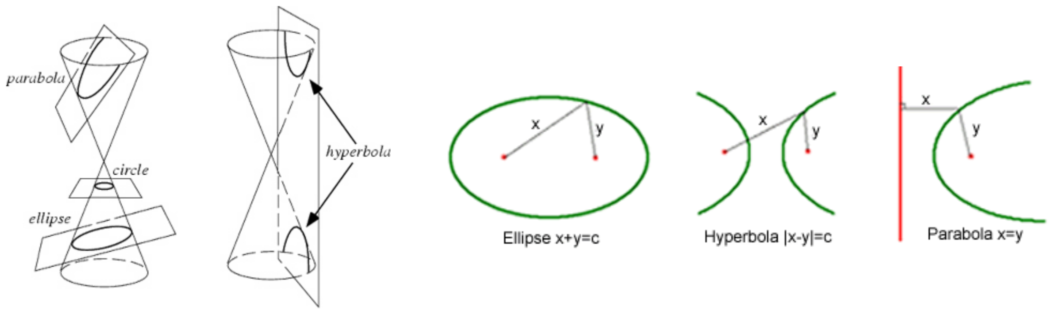


Figura 7. Secciones cónicas.

LA ELIPSE

Como ejemplo de utilización de la elipse mostramos el Foro Internacional de Tokio, construido por **Rafael Viñoly** en 1996 (Figura 8). Este edificio alberga actuaciones musicales, de teatro y de danza, convenciones, ferias comerciales, reuniones de negocios, recepciones, oficinas, centros de información cultural y espacios públicos. Es el edificio más caro y grande (más de 130.000 m^2) del mundo de los de su tipo, y pudo realizarse justo antes de que se viniera abajo el *boom* inmobiliario japonés. La construcción se compone de cuatro edificios cúbicos de distintos tamaños y un quinto edificio cuya forma consiste en dos elipses de vidrio y acero que se cortan formando un enorme vestíbulo central de 210 metros de longitud. Las formas están escogidas para que el edificio se adapte perfectamente al entorno. Las formas cúbicas están cercanas a otros edificios también cúbicos de la ciudad, mientras que la estilizada forma del vestíbulo, fruto de las elipses, sigue el curso de las vías del tren que tiene a su lado. La cubierta está formada por arcos (¿parabólicos?) los cuales describen una gran elipse que se apoya en dos inmensas columnas y que soportan el edificio.

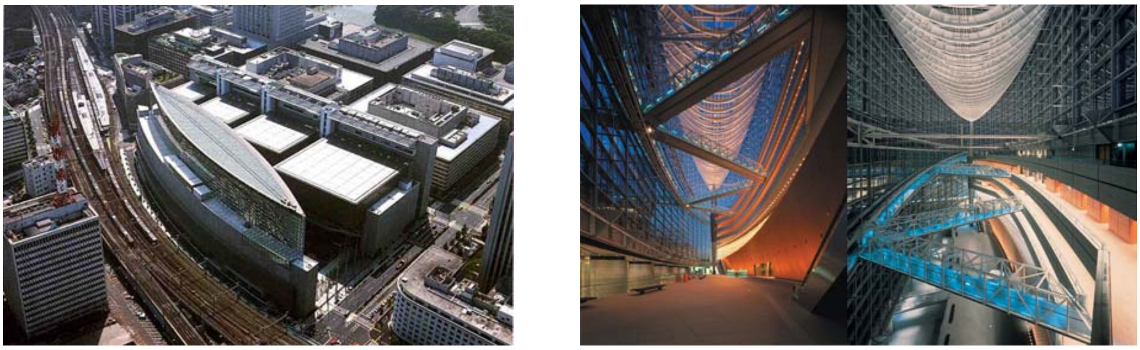


Figura 8. R. Viñoly: Foro Internacional de Tokio.

Otros edificios con formas elípticas son el Edificio *Lipstick* —"Lápiz de labios"— (Nueva York, 1986), de **Philip Jonson,** y el Ayuntamiento de Londres (2002), de **Norman Foster**.

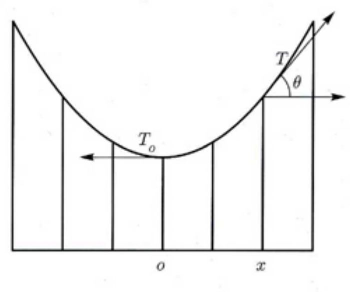


Figura 9.

LA PARÁBOLA

La parábola es la forma que adopta una cuerda o cadena cuando se cuelga de dos puntos y soporta una carga distribuida uniformemente; es decir, el puente de suspensión (Figura 9). Por ejemplo, podemos apreciar su forma en puentes como el *Golden Gate* de San Francisco (1937), reproducido en la Figura 10.

Figura 10.

La parábola y la catenaria son muy similares, aunque la expresión matemática de la parábola es más sencilla: $y=kx^2$ (Figura 11).

De igual forma que hicimos con la catenaria, la parábola como arco antifunicular es el arco que se sostiene bajo el peso de una carga distribuida uniformemente. El diagrama de la Figura 9 invertido nos lleva a obtener la parábola como solución estática de las siguientes dos situaciones: la carga realizada desde arriba, o tirando desde abajo (Figura 12).

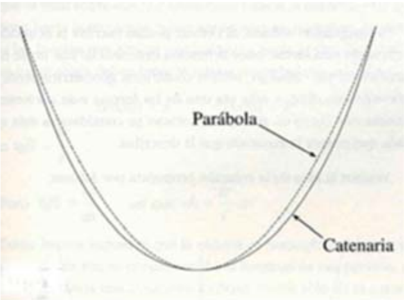


Figura 11.

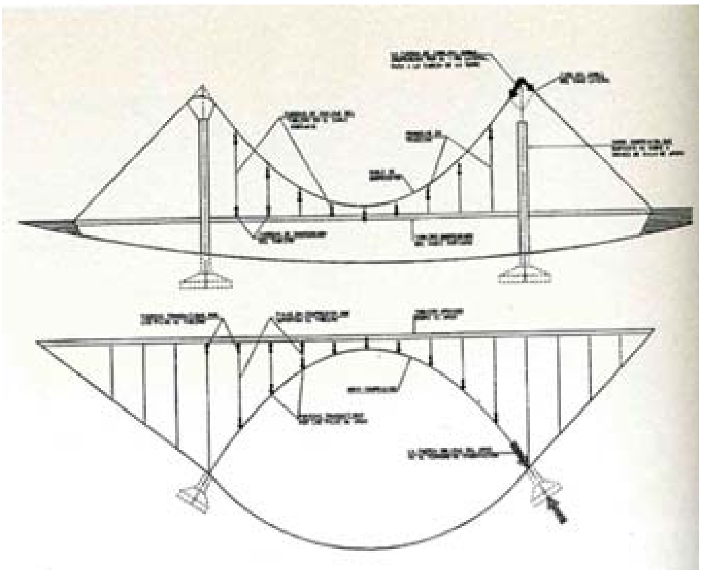


Figura 12.

Como ejemplos de esto vemos en la Figura 13 dos puentes de **Eduardo Torroja,** uno de los ingenieros españoles más significativos a nivel internacional: el Puente del Pedrido, en La Coruña (1940), y el Viaducto del Esla (1942).

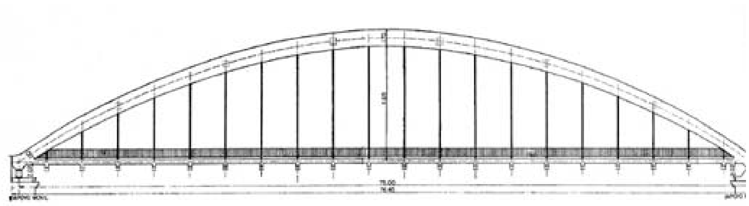


Figura 13. E. Torroja: Puente del Pedrido (i, c) y Viaducto del Esla (d).

Otros ejemplos los encontramos en algunos de los siete puentes que hay sobre el río Tyne entre Newcastle y Gateshead, desde el clásico y funcional Puente del Tyne hasta el moderno y más artístico Puente Báltico del Milenio (Figura 14, (i)).

Por otra parte, en los puentes llamados lenticulares se produce una situación mixta. La forma que se le da al puente es de nuevo parabólica; véase, por ejemplo, el Puente de Smithfield (1883), en Pittsburg (Figura 14, (d)).

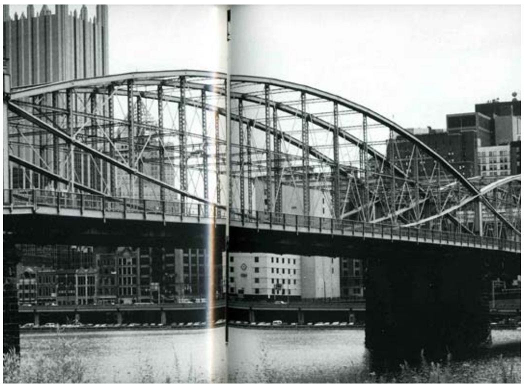


Figura 14. Puente Báltico del Milenio (i) y Puente de Smithfield (d).

No podemos dejar de mencionar a uno de los arquitectos e ingenieros españoles más significativos de nuestros días, **Santiago Calatrava**. El arquitecto e ingeniero valenciano ha mantenido una carrera profesional vertiginosa. Las posturas de la crítica y de la opinión pública sobre su obra han sido radicales. Su obra no pasa desapercibida para nadie y crea pasiones. De nuevo, definirlo en unas pocas palabras es imposible, pero intentémoslo:

(i) **Calatrava** interviene en todo el proceso creativo de la obra arquitectónica, como ingeniero, arquitecto y artista que es, mezclando todos estos intereses.
(ii) En él se dan profundos conocimientos técnicos, así como una gran inquietud artística. Como vemos en muchos de sus puentes, utiliza la parábola, que, *a priori*, es solución para el diseño de éstos; sin embargo, juega con las parábolas, las tumba para crear sensación de movimiento, y cambia las fuerzas que intervienen en el diseño, lo cual puede darnos una idea de por qué es tan criticado por los ingenieros.
(iii) Algunos aspectos importantes de su obra son: la geometría, la anatomía, la naturaleza, el movimiento, la belleza,...

Podemos definirlo como arquitecto orgánico. Su obra nos lo presenta como admirador de **Gaudí**, **Candela**, **Freyssinet**,... Algunos de sus puentes donde podemos apreciar la utilización de parábolas (Figura 15) son el Puente de ZubiZuri en el Campo Volantín de Bilbao (1997), el Puente de Bach de Roda en Barcelona (1987), o el Puente de la Alameda en Valencia (1995).

Figura 15. S. Calatrava: Puentes de ZubiZuri (i), Bach de Roda (c) y la Alameda (d).

Figura 16. S. Calatrava: Galería BCE Place

También podemos apreciar la utilización de la parábola en algunos edificios de **Calatrava**, como, por ejemplo, la Galería BCE Place (1992) de Toronto, donde se puede ver cierta influencia de **Gaudí**. Si nos fijamos en la imagen de la Galería (Figura 16), uno puede apreciar cierto parecido con imágenes del Colegio de las Teresianas o del interior de la Sagrada Familia. Además, las vigas, que luego se cierran en un arco parabólico, recuerdan a los árboles (de nuevo, la presencia de **Gaudí**); más concretamente, la Galería nos muestra un "camino entre árboles" que la comunica con la ciudad. La Galería se cierra con una cubierta acristalada por la que entra la luz natural.

La parábola como buen arco antifunicular que se corresponde con una situación de estabilidad en la construcción arquitectónica fue también utilizada por **Gaudí**, por ejemplo, en los arcos de la entrada del Palau Güell o en los arcos de la cooperativa La Obrera Mataronense.

Para terminar, mencionemos algunos ejemplos de construcciones arquitectónicas donde la cubierta tiene forma parabólica, como solución óptima al problema estructural: los Hangares de Orly (1924) de **Eugéne Freyssinet**, obra clave en la arquitectura del siglo XX, es una cubierta parabólica de hormigón de 9cm de espesor y con una luz de 88 m, además de 65 m de altura y 175 de largo (una construcción grandiosa, a pesar de lo sencilla que parece, y con muchas innovaciones estructurales, de la que **Le Corbusier** comentó que al entrar en ella sintió lo mismo que si entrara en una gran catedral); la iglesia de San Francisco de Asís (1942) en Pampilha, Brasil, de **Oscar Niemeyer**, también cubierta de hormigón; o las más recientes *Berliner Bogen* (2000), Hamburgo, de **Bother, Richter y Teherami**, y la Estación de Bomberos de Houten, Holanda (2000), de **Philippe Samyn**, ambas cubiertas de cristal.

LAS ESPIRALES

Tomemos como posible definición de espiral aquella curva plana que comienza en un punto y cuya curvatura va disminuyendo progresivamente a medida que aumenta su distancia al punto de origen. Algunos ejemplos son la *espiral de Arquímedes*, la *espiral de Durero* o la *espiral logarítmica* (Figura 17).

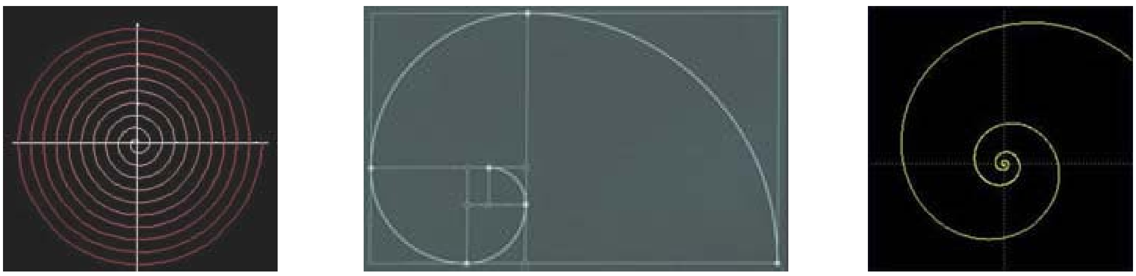


Figura 17. Espirales de Arquímedes (i), Durero (c) y logarítmica (d).

Si admitimos la definición de espiral en el espacio obtenemos dentro de esa familia las hélices cónicas. Recordemos que la hélice circular, que descansa sobre un cilindro, es una curva espacial que se caracteriza por tener curvatura y torsión constantes (Figura 18).

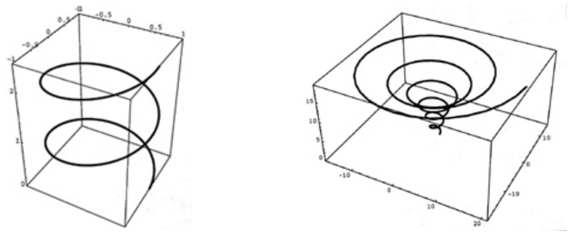


Figura 18.

Por la propia naturaleza de la espiral y el hecho de que ésta aparece en la naturaleza relacionada con procesos de crecimiento (nautilus, girasol,...), la espiral se ha convertido en símbolo de crecimiento, de movimiento, de progreso,..., aunque por otra parte podemos pensar que la espiral "recoge" o "empaqueta" (pensemos en los helechos o en las trompas de las mariposas, que se recogen para no ocupar espacio). La hélice agarra: "*Lo que agarra es la fricción y se describe con la ley de Euler: la fuerza que hay que hacer en el extremo de una hélice enrollada en torno a una superficie para sostener un peso en el otro extremo decrece exponencialmente con el número de vueltas (de espiras) de la hélice en cuestión*". Pensemos en las cuerdas que utilizamos habitualmente, que son cuerdas más pequeñas trenzadas para construir una más resistente.

Empecemos con uno de los arquitectos actuales más interesados por las espirales: **Zvi Hecker**. Uno de sus edificios es "La Casa Espiral de Apartamentos", construido en 1990. Este edificio es como una escalera en "espiral" llevada a las dimensiones de un edificio que se inicia a nivel del suelo y sube en "espiral", y además está formado en su parte exterior por un gran número de escaleras de caracol. Según su autor, el nombre de *Casa Espiral* es físico, pero también simbólico, ya que este es un trabajo de precisión incompleta porque es tan precisa que no puede ser realmente terminada. No hay límite a la precisión que uno puede conseguir. La incompletitud de la espiral es también su poesía.

Otras obras de este autor son:

- La Escuela Judía de Primaria de Berlín (1995), que fue diseñada con forma de flor como regalo a los niños de Berlín. La construcción trata de imitar al girasol, ya que sigue la órbita del sol para que los rayos del sol iluminen todas las clases a lo largo del día.
- El Girasol de Ramat Asaron, Tel Aviv, Israel (1989) es un complejo de apartamentos que también tiene forma de flor, y cuyos patios y terrazas siguen la forma geométrica del girasol (Figura 19).
- La nueva sinagoga de Mainz, Alemania (1999) está diseñada sobre la vieja sinagoga destruida por los nazis, aunque con un aspecto diferente, ya que el

espacio de la vieja sinagoga es ahora el vacío del patio del que emerge la nueva sinagoga con forma espiral, simbolizando la expansión.

Figura 19. Z. Hecker: El Girasol de Ramat Asaron.

Más ejemplos arquitectónicos:

- Monumento a la Tercera Internacional de **Vladimir Tatlin** (modelo 1919-20). Tatlin eligió la espiral para expresar el dinamismo de la revolución rusa (Figura 20, (i)).
- "Iglesia Reorganizada de Jesucristo de los Santos de los Últimos Días", por **Hellmuth Obata & Kassabaum**, Independence, Missouri (1993). En ella encontramos diferentes simbologías de la espiral: por un lado, la espiral en el sentido de recogimiento, ya que la iglesia recoge en ella a los feligreses; en el sentido de crecimiento, de expansión de esta religión, de esta iglesia; y además, la espiral de la cubierta se va acercando a Dios (Figura 20, (d)).

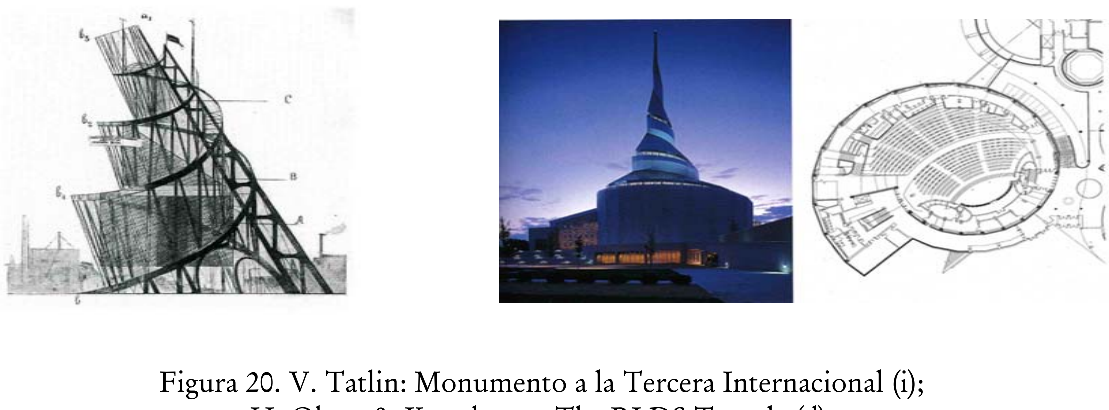


Figura 20. V. Tatlin: Monumento a la Tercera Internacional (i);
H. Obata & Kassabaum: The RLDS Temple (d).

Fijemos nuestra atención en la escalera de caracol, que no es más que un helicoide, es decir, la superficie reglada que se obtiene al considerar las rectas que pasan por un punto de la hélice circular y otro del eje de la hélice de forma que las rectas sean todas paralelas al plano perpendicular al eje de la hélice. La utilización de las escaleras de caracol en la arquitectura es algo habitual, y el motivo es doble: por una parte, la hélice es una curva de curvatura y torsión constantes (luego, ideal para subir), y además la escalera de caracol ocupa poco volumen entre los dos planos en los que se encuentra. Por poner algunos ejemplos, la escalera de caracol que sube a la polémica pirámide de cristal del Louvre, de **I. M. Pei** (1989). Por supuesto que también **Gaudí** hace uso de las escaleras de caracol-helicoides, en las torres de la Sagrada Familia o en las rampas de bajada a las cuadras del Palau Güell. Mencionemos el interesante diseño de **Farell-Grimshaw** de la torre "espiral" de cuartos de baño para una residencia de estudiantes (Figura 21, (i)), el diseño de la torre 4D como garaje de automóviles propuesta por **R. Buckminster Fuller** para la feria mundial de Chicago (1933), que es una "escalera de caracol cónica" (Figura 21, (c)), o también el Museo Guggenheim de Nueva York (1956), de **Frank Lloyd Wright** (Figura 21, (d)).

Figura 21.

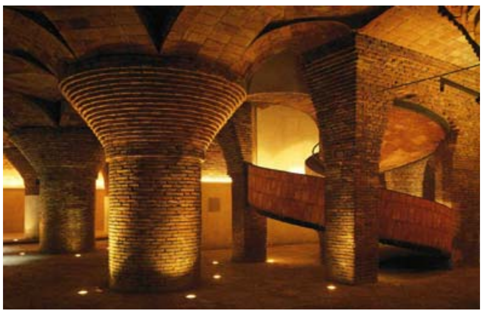


Figura 22. A. Gaudí: Palau Güell.

Pero **Gaudí** también utiliza el helicoide en su sentido de agarre en las columnas del Palau Güell (Figura 22) o en el diseño de las columnas arboladas del Templo de la Sagrada Familia (Figura 23), de las que **Gaudí** dice: *"hemos estado dos años trabajando indefectiblemente y se han gastado 4.000 duros para llegar a una solución completa de las columnas".*

Figura 23. A. Gaudí: Columnas arboladas de la Sagrada Familia.

LA ESFERA

La esfera y la circunferencia se han considerado desde la antigüedad como símbolos de perfección, en gran medida por su simetría, considerándose por ello en ocasiones como símbolos de lo divino, mientras que la naturaleza ha escogido estas formas para muchos de sus objetos por su diseño óptimo. Los matemáticos de todos los tiempos se han fascinado con las propiedades matemáticas de estos, *a priori* sencillos, objetos geométricos. Nosotros vamos a fijar nuestra atención ahora en una de esas propiedades (*propiedad isoperimétrica*): de todos los sólidos de un volumen dado, la esfera es el que tiene una superficie de menor área; de todos los sólidos con un área superficial dada, la esfera es la que encierra el mayor volumen. Estas dos propiedades (cada una de las cuales implica la otra) define de forma única a la esfera. (La circunferencia tiene la propiedad isoperimétrica en el plano: de todas las regiones con un área dada, la circunferencia es la que tiene un perímetro menor).

Si jugamos con pompas de jabón o introducimos una gota de aceite en agua observaremos que, debido a la tensión superficial, la forma que estas adquieren en una posición de equilibrio (es decir, de mínima energía potencial) es esférica. Las pompas de jabón son una demostración experimental de la anterior propiedad isoperimétrica, ya que en una pompa de jabón hay una cierta cantidad fija de aire que se encuentra encerrada, por la tensión superficial, en una superficie de área mínima. Como hemos comentado entonces, la esfera es una forma estable, y por lo tanto óptima, hasta cierto punto, para el diseño arquitectónico. De hecho, el motivo por el cual los depósitos de petróleo tienen forma esférica es por ser mínima superficie (más económica) con máximo volumen.

Pero llegados aquí, parémonos un momento en la construcción de cúpulas a lo largo de la historia de la arquitectura, que en muchos casos han tenido forma esférica (o casi). Fijémonos en seis obras importantes en la historia y comparémoslas:

(i) el Panteón de Roma (117-128), tiene un espesor de 1,5 metros y una luz de 43,30 metros;
(ii) Santa Sofía, Estambul (532-537);
(iii) Santa María de las Flores, Florencia (1438-1471), tiene 3,5 metros de espesor y una luz de 41,97 metros;
(iv) San Pedro de Roma (1506-1626), con 3,7 metros de espesor y una luz de 42,52 metros;
(v) el Salón del Centenario, Breslau (con una luz de 67 metros, aunque era una cúpula nervada con una superficie no continua);
(vi) el Gran Mercado de Leipzig (1927-1929), tiene un espesor de 10 centímetros y una luz de 75 metros.

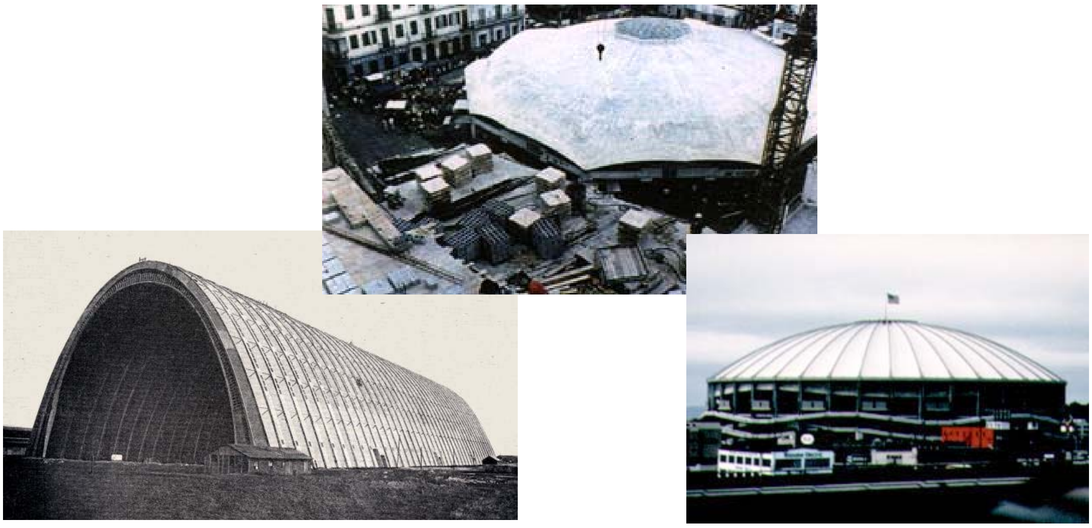


Figura 24. Hangares de Orly (i), Mercado de Algeciras (c) y King Dome (d).

Si comparamos las distintas construcciones, las dos primeras fueron realizadas en ladrillo, las dos siguientes en piedra y las dos últimas en hormigón. Como se puede observar hay una tendencia hacia el aligeramiento, espacios con menores espesores,... Por un lado, desde finales del XIX y principios del XX hay una preocupación cada vez mayor por intentar utilizar estructuras más eficaces que permitan una inversión mínima de materiales y la liberación progresiva de "estructuras ortopédicas" (contrafuertes, muros gruesos,...). Otro de los puntos clave es la introducción del hormigón armado, que fue una de las grandes revoluciones arquitectónicas de la segunda mitad del siglo XIX. En palabras de **Eduardo Torroja**: *"…ningún material se acerca como el hormigón armado al ideal soñado, ninguno puede tomar con tanta libertad y eficacia formas variadas y resistentes, con espesores mínimos (de pocos centímetros) y ligerezas que no hace más que algunos* *decenios habían sido consideradas utópicas. Por primera vez en la historia de la arquitectura, el material se convierte en manos del arquitecto tan maleable y plástico como la porcelana en las del artista de la cerámica".* Esta maleabilidad del hormigón le permite al arquitecto buscar las soluciones estructurales estables en las construcciones y desarrollar las formas resultantes, lo cual antes era impensable. Dos de los grandes arquitectos/ingenieros y teóricos del hormigón armado en los años 20 fueron **Freyssinet**, cuyos Hangares de Orly tenían un espesor de 9cm y una luz de 88m entre los ejes, y **Eduardo Torroja**, que en 1934 construye el Mercado de Algeciras; con forma esférica y apoyado en ocho pilares, tiene una luz de 47,62m y un espesor de 8,50cm (salvo cerca de los pilares, donde llega a los 44cm), y es una construcción muy ligera. Como ejemplo moderno, el King Dome de Seattle (1976), que tiene una luz de 202 m.

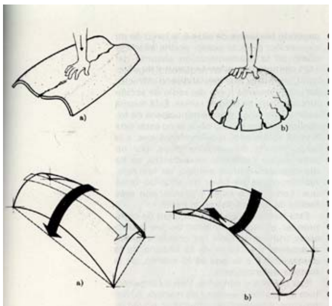


Figura 25.

Algunos problemas en la construcción de cúpulas, bóvedas y otras obras arquitectónicas son: (i) la estabilidad; (ii) la forma del edificio; (iii) el peso del edificio y los materiales con los que está construido; (iv) la transición de plantas rectangulares a cúpulas esféricas, bóvedas cilíndricas, ... ; (v) el comportamiento de la construcción ante las deformaciones que se produzcan, como por ejemplo, por el peso, ... Fijémonos por un momento en una cúpula o cubierta con forma esférica, e imaginemos que sobre algún punto de ella se aplica una fuerza (en particular, el peso). Entonces, como consecuencia de la propiedad isoperimétrica, para que se produzca una abolladura o deformación de la cubierta es preciso que el área aumente en la zona de presión; esto es fácil de conseguir en una pelota de goma porque el material es extensible, pero casi imposible en una cubierta o cúpula de hormigón u otros materiales inextensibles (algo similar pasa con las bóvedas cilíndricas). La solución es construir cubiertas de doble curvatura, ya sean éstas de curvatura de Gauss positiva –las curvaturas principales, aunque distintas, del mismo signo– o de curvatura de Gauss negativa –las curvaturas principales de distinto signo– (Figura 25); véanse, por ejemplo, las discusiones al respecto del arquitecto madrileño afincado en México **Félix Candela**.

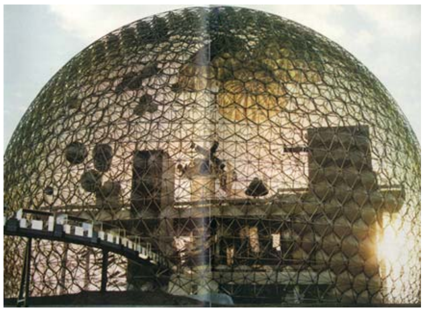


Figura 26. R. Buckminster Fuller: Pabellón Americano de la Feria Mundial de Montreal.

Pero detengamos un momento la anterior discusión y centrémonos ahora en una de las más sorprendentes e impactantes construcciones con forma esférica del siglo XX: la cúpula geodésica de **R. Buckminster Fuller**. Mucho podríamos decir de este genial inventor, arquitecto, ingeniero, matemático, poeta y cosmólogo, entre otras cosas; por ejemplo, que fue un visionario, un adelantado a su tiempo y que quiso poner la ciencia al servicio de la sociedad. Pero sin duda su mayor éxito fue la cúpula geodésica, un diseño con mucha geometría. En la Figura 26 vemos el Pabellón Americano de la Feria Mundial de Montreal (Canadá) de 1967 (que ocupa 3/4 de una esfera de 76m de diámetro). ¿Cuál es el secreto del éxito de la cúpula geodésica, además de su aspecto futurista y espacial que cautivó a la sociedad mundial? Veamos algunas de sus propiedades.

Económica: la esfera encierra un volumen dado con un área mínima, con lo cual se ahorra en material de construcción.

Control de la temperatura: (i) la exposición al frío en invierno y al calor en verano es menor ya que, al ser esférica, hay menos área por unidad de volumen; (ii) la forma interior hace que se produzcan flujos de aire caliente o frío que pueden utilizarse para controlar la temperatura interna; actúa como un reflector gigante hacia abajo, que refleja y concentra el calor en el interior, lo que previene además la perdida radial de calor (motivo por el cual se ha utilizado en construcciones para los polos).

Estable: (i) forma estable (resistente a los terremotos y también a los huracanes, por la estabilidad de la forma y porque la presión que se realice sobre ella se distribuye sobre toda la superficie); (ii) los triángulos son los únicos polígonos estables de forma inherente, lo cual confiere estabilidad a la cúpula geodésica, que en general está construida por triángulos (y utiliza tetraedros y octaedros como estructuras tridimensionales de la cubierta); los triángulos se interconectan de forma que sus lados formen una red de geodésicas –círculos máximos–, que le da fuerza y estabilidad a la construcción.

Ligera: son estructuras muy ligeras. Mientras que el Panteón pesó más de 400kg/m^2 para una luz de 44m, una cúpula moderna de hormigón de dimensiones similares puede pesar 200kg/m^2, la cúpula geodésica de Montreal pesó 53kg/m^2, y en la actualidad se habla de 10kg/m^2 o menos.

Poco tiempo de montaje: semanas, días o incluso horas. Además, con posibilidad de desmontar y volver a montar. **Fuller** habla de construir “casas voladoras”, lo que en cierta medida consigue como vemos en una de las imágenes de la Figura 28.

Figura 27. Cúpulas de Ford Rotunda (i), Kaiser del Auditorio de Honolulu (c)
y Union Tank Car Company en Baton Rouge.

Por ejemplo, su primer encargo para Ford Rotunda en Dearborn (Michigan) en 1953 (que aunque parezca mentira fue su primer contrato serio, a pesar de su fama por los revolucionarios diseños que había realizado anteriormente) tiene una luz de 27,4m y tardó en levantarse 5 semanas. La cúpula Kaiser del Auditorio de Honolulu, (1957) con una luz de 50m, tardó en levantarse 22 horas (por un grupo de 38

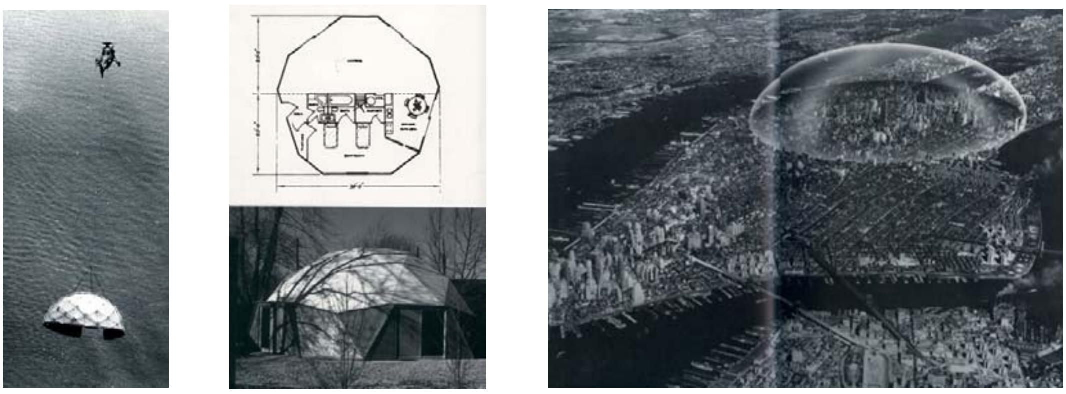


Figura 28. R. Buckminster Fuller: En 1954, el cuerpo de Marines de los Estados Unidos experimentó con éxito el transporte de pequeños refugios geodésicos en helicóptero (i); cúpula geodésica en Carbondale, Illinois que fue residencia de Buckminster Fuller y su esposa Anne desde 1960 hasta 1971 (c); proyecto de cúpula geodésica sobre Manhattan

trabajadores), y una hora después 2.000 personas asistieron a un concierto de la Orquesta Sinfónica de Hawai. En 1958 realizó la construcción de dos cúpulas idénticas para la Union Tank Car Company, en Baton Rouge (Louisiana) y Wood River (Illinois), que tenían una luz de 117m y una altura de 73m. El Climatrón es un Jardín Botánico en St. Louis, Missouri, que se construyó en 1960 y que además de las anteriores ventajas es capaz de albergar 12 microclimas distintos para que se adapten a las distintas especies de plantas, lo cual se obtiene sin divisiones internas y aprovechando las corrientes controladas de aire frío o caliente. Al parecer, hoy día se han construido ya más de 300.000 cúpulas geodésicas a lo largo del mundo. El mismo **Fuller** vivió con su mujer durante 12 años en una casa con estructura de cúpula geodésica que se tardó en montar 7 horas. Finalmente, comentemos uno de sus proyectos (1950) con cúpulas geodésicas: la realización de una gran cúpula geodésica de dos millas de diámetro sobre Manhattan, que permitiría el control de la temperatura, protección de la climatología exterior, ahorro energético, etc...

EL CILINDRO

El cilindro es la superficie reglada formada por las rectas que pasan por una circunferencia y son perpendiculares al plano que la contiene. Mucho podríamos decir sobre el cilindro y construcciones en las que se utiliza; sin ir más lejos, es una forma habitual en bóvedas y cubiertas. Sin embargo, vamos a mostrar únicamente un ejemplo: el Frontón de Recoletos (Madrid, 1935) de **Eduardo Torroja**, del que ya hemos hablado un poco, quien elevó el hormigón armado a las misteriosas cotas del arte. El Frontón de Recoletos es una de sus obras clave, junto al Hipódromo de la Zarzuela, que por desgracia fue destruida durante la guerra civil española.

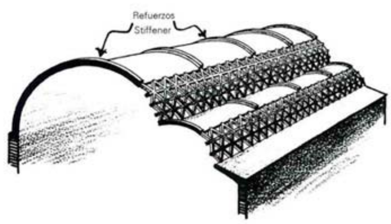
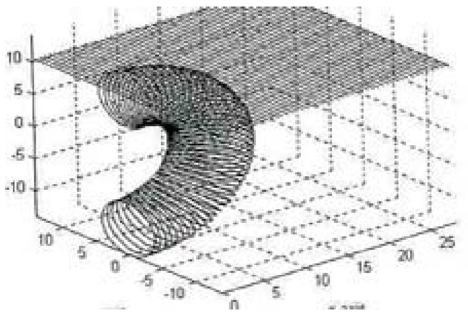


Figura 29. E. Torroja: Frontón de Recoletos.

"*Un espacio cerrado y diáfano destinado al juego de pelota vasca exige unas condiciones funcionales muy estrictas. En primer lugar, la planta rectangular de la cancha de juego de longitud sensiblemente superior a su anchura, espacio limitado por dos muros paralelos de cierre en los extremos del rectángulo: el frontal, donde golpea la pelota que puede alcanzar unos doscientos kilómetros por hora, y el muro de rebote, opuesto al anterior. A todo ello se une la necesidad de un gran gálibo, así como iluminación natural*" [9]. **Torroja** podía haber resuelto la cubierta del frontón con una bóveda cilíndrica única, sin embargo se decide por un perfil doblemente cilíndrico y asimétrico, teniendo en cuenta razones funcionales de iluminación y distribución de los espacios. **Torroja** denomina a este perfil "en gaviota". Una de sus innovaciones estructurales más importantes es la ausencia de viga de descarga en la intersección de los dos cilindros, con lo cual hay que buscar la estabilidad en la forma en que se disponen los mismos. La cubierta tiene 8cm de espesor y una luz de 32,5m. Como hemos comentado, uno de los factores importantes es la iluminación, ya que abrir grandes huecos en una lámina de 8cm de espesor formada por dos cilindros de 12,2 y 6,4m de radio, respectivamente, no es algo trivial. **Torroja** lo resuelve con dos lucernarios longitudinales con un entramado de triángulos equiláteros de 1,4m de lado, situados en el lado adecuado.

EL TORO

El toro es una superficie de revolución que se obtiene al hacer girar una circunferencia alrededor de una recta que no corta a la circunferencia. Aunque hay distintos usos del toro en arquitectura, vamos a fijarnos en su utilización para la obtención de cubiertas de doble curvatura del primer tipo (es decir, el caso de curvatura de Gauss positiva), cubiertas que además en estos ejemplos continúan hasta hundirse en el suelo, constituyendo todo el edificio y evitando las paredes y la unión de éstas con la cubierta.



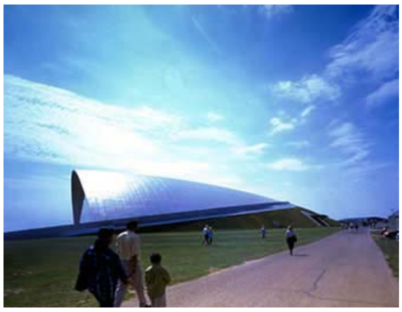


Figura 30. N. Foster: Museo Americano del Aire (Duxford, Reino Unido).

Como ejemplo de su utilización consideremos el Museo Americano del Aire, Duxford, Inglaterra (1997), de **Norman Foster** (cuyos ingenieros son **Ove Arup** y Asociados). Este edificio realizado en hormigón armado, que recuerda a los "hangares ampolla" que fueron diseñados para ser invisibles desde el aire, tiene la forma de un toro que se corta por un plano perpendicular al plano sobre el que descansa una de las circunferencias generatrices, quedándonos con la parte de curvatura positiva (véase el dibujo de la Figura 30); su parte delantera se obtiene al cortar de nuevo con un plano perpendicular al primer plano de corte. En el museo se da cobijo a distintos aviones y su tamaño se ajusta al del bombardero atómico B-52, de 16m de altura y 61 de envergadura. La luz es natural, y se obtiene de la cristalera que ocupa todo el frente y una banda de cristal alrededor de la base.

EL CONO

El cono es la superficie reglada formada por las rectas que se apoyan en una curva plana (por ejemplo, la circunferencia) y en un punto exterior al plano. El cono apoyado en su parte plana es bastante estable, por lo que podría ser utilizado para la construcción de edificios con forma cónica. Un proyecto muy interesante donde se utiliza esta forma es la Torre del Milenio, diseñada por **Norman Foster** en 1989 para ser construida en la bahía de Tokio, y que nos recuerda a la Torre de la Milla diseñada por **Frank Lloyd Wright** en 1956. Teniendo en cuenta que Tokio tendrá una población de 15 millones de habitantes para 2020, la Torre del Milenio se pensó como solución al problema social de la expansión de la ciudad de Tokio frente a la escasez

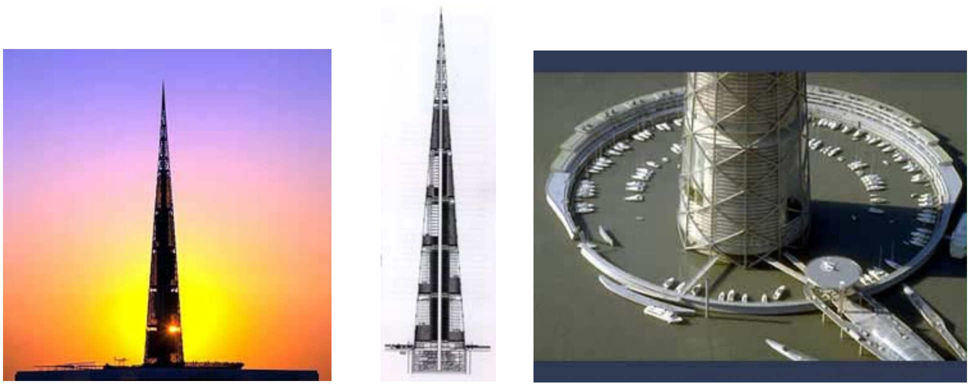


Figura 31. N. Foster: Proyecto de Torre del Milenio (Tokio, Japón).

de terreno edificable. Emergiendo desde la bahía de Tokio a dos kilómetros de la orilla y con una altura de 840m, la Torre del Milenio tendría capacidad para 60.000 personas, generaría su propia energía (paneles solares), tendría su propio sistema de basuras y de transporte (un sistema de metro horizontal y vertical), zonas de trabajo y zonas residenciales. Además, al estar ubicada en una zona de terremotos **Foster** se preocupó de que fuera un edificio estable, lo cual consigue mediante la forma cónica y cubriéndola por una malla helicoidal (la hélice "agarra") de acero. Con un coste estimado de 10.000 millones de libras y una superficie de 1.039.206m^2, la Torre del

Milenio fue víctima de la quiebra del sector inmobiliario japonés, pero **Foster** sigue confiando en poder construirla algún día.

También encontramos la utilización de superficies cónicas en la obra de **Santiago Calatrava**: Auditorio de Santa Cruz de Tenerife (1991) y Estación TGV Rhône-Alpes, Santolas-Lyon (1994). Estas dos construcciones en hormigón armado con elementos metálicos llevan en sí varios de los elementos característicos de la obra de **Calatrava**, como son la utilización de elementos geométricos (superficies cónicas y cilíndricas), referencias al movimiento (en el primero la parte exterior central imita la forma de las velas, mientras que el elemento que da carácter al edificio, el tejado, es una estructura de hormigón que tiene forma de ala; y en el segundo vuelve a hacer referencia a las alas para volar, ya que le estación es la del aeropuerto) y al cuerpo humano (inspirándose en ambos casos en el ojo humano).


Figura 32. S. Calatrava: Estación TGV Rhône-Alpes, Santolas-Lyon (i)
y Auditorio de Santa Cruz de Tenerife (d).

EL HIPERBOLOIDE DE UNA HOJA

El hiperboloide es una superficie de revolución. Consideremos una hipérbola; si la hacemos rotar respecto a la recta que une sus focos obtenemos el hiperboloide de dos hojas, mientras que si la rotamos respecto a la recta perpendicular que es eje de simetría de la hipérbola obtenemos el hiperboloide de una hoja.

Por otra parte, el hiperboloide de una hoja es una superficie doblemente reglada, formada por las rectas que se apoyan en dos circunferencias paralelas (estructura de malla).

El hiperboloide elíptico se obtiene si se consideran dos elipses paralelas. Además, el hiperboloide es una superficie cuadrática, es decir, su expresión en coordenadas *x, y, z* del espacio es un polinomio de segundo grado, luego matemáticamente sencilla. Por último, mencionemos que esta superficie se puede utilizar en arquitectura, entre otras cuestiones, para realizar cubiertas de doble curvatura del segundo tipo (es decir, el caso de curvatura de Gauss negativa)

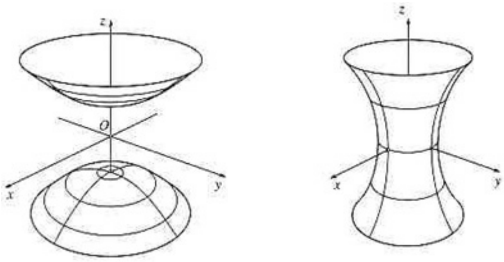


Figura 33. Hiperboloide de dos hojas (i) e hiperboloide de una hoja (d).

Como superficie reglada se puede realizar fácilmente en arquitectura, lo cual es una clara ventaja de cara a su utilización. **Gaudí** usó el hiperboloide de una hoja en la cúpula de las caballerizas de la Finca Güell (1887) (para **Gaudí** el hiperboloide simbolizaba la luz, ya que ésta entra por el cuello circular y se desliza por el hiperboloide), en los capiteles del Palau Güell (1888), en la bóveda para el giro de carruajes del Parc Güell (1914) y, finalmente, en el proyecto del templo de la Sagrada Familia. Habiendo apreciado **Gaudí** que las campanas tubulares en forma de hiperboloide son las que mejor difunden el sonido, las emplea para el diseño de los techos de las naves de la Sagrada Familia, formados por diferentes trozos de hiperboloides de una hoja junto con paraboloides hiperbólicos que utiliza para pasar

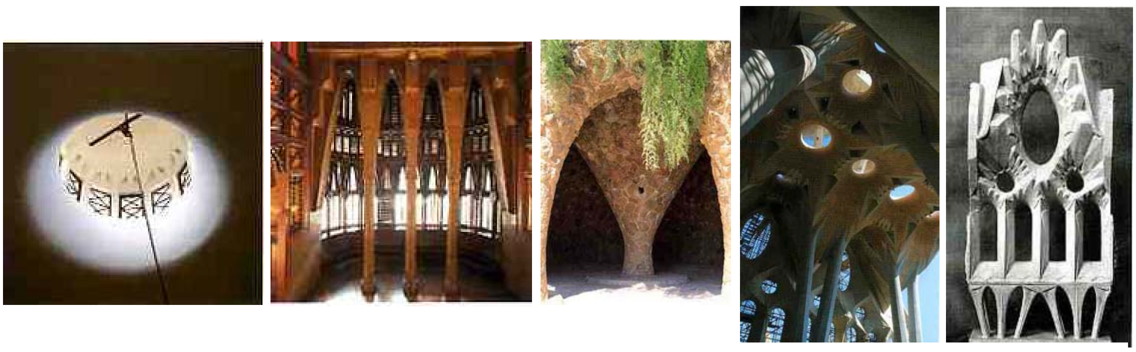


Figura 34. A. Gaudí: De izquierda a derecha, cúpula de las caballerizas de la Finca Güell, capiteles del Palau Güell, bóveda para giro de carruajes del Parc Güell; techos de las naves y ventanales del templo de la Sagrada Familia.

de un hiperboloide a otro (esta es una práctica común en **Gaudí**, mezclar distintas superficies sencillas y conocidas por él para obtener la forma deseada). También realiza ciertas operaciones utilizando el hiperboloide para obtener los ventanales de la Sagrada Familia.

Figura 35. E. Torroja: Cuba hiperbólica de Fedala, Marruecos.

Pero aprovechemos una de las obras de **Eduardo Torroja** para entender mejor ciertas ventajas en la utilización del hiperboloide de una hoja, como es su estructura de malla. La Cuba (Depósito de Agua) de Fedala (actualmente Mohamedia), Marruecos, construida por **Torroja** en 1957, es un depósito de hormigón armado de 3.500.000m^3 de capacidad (Figura 35). El problema principal de este tipo de construcciones es asegurar la impermeabilidad, por lo cual se decidió utilizar el hiperboloide de una hoja en su contorno ya que esta superficie permite un doble pretensado del hormigón según las direcciones de sus dos familias de rectas, dándole una fuerza a la estructura del contorno que evita el peligro de fisuración bajo la acción de la presión hidráulica del agua. La silueta campaniforme de la cuba viene determinada por dos hiperboloides de ejes superpuestos y circunferencia de la garganta común. La solera del depósito está compuesta por una bóveda tórica de hormigón armado que descansa en dos anillos, siendo el exterior la circunferencia de garganta de los hiperboloides. Además, la cubierta de la cuba está formada por dos bóvedas tóricas.

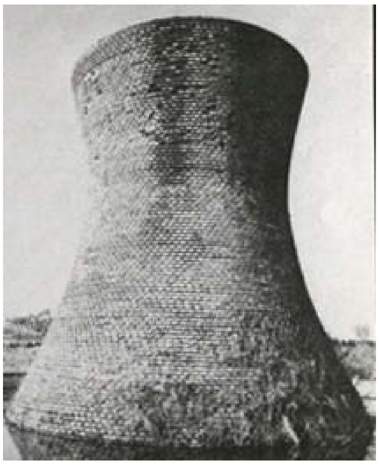


Figura 36. E. Torroja: Depósito del Hipódromo de la Zarzuela

También podemos citar el depósito del Hipódromo de la Zarzuela (1959), ya que la anterior explicación nos sirve para justificar la utilización de esta forma en todo tipo de depósitos (Figura 36).

Eduardo Torroja también utiliza el hiperboloide de una hoja en otra de sus obras emblemáticas, el Hipódromo de la Zarzuela (1935), en la cual tras estudiar diferentes soluciones a la cubierta (plana, cilíndrica, cónica) se decide por la solución de un trozo de hiperboloide una hoja (como indica el dibujo de la Figura 37), con pequeñas modificaciones en las juntas de los diferentes hiperboloides. Aunque no vamos a abordar aquí ese problema, el análisis que **Torroja** hace de la forma del edificio a través del de la estabilidad merece ser estudiado por aquellas personas que estén interesadas en estos temas. El Hipódromo de la Zarzuela es otra de las grandes obras de **Torroja**.

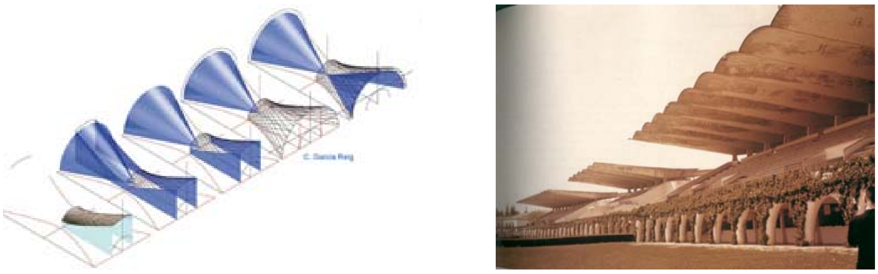


Figura 37. E. Torroja: Hipódromo de la Zarzuela, Madrid.

Algunas otras obras en las que se ha utilizado el hiperboloide de una hoja son: (i) **Vladimir G. Schuchow**, Faro de Adziogol, Ucrania (1911); (ii) **Le Corbusier**, Palacio de la Asamblea, Chadigarh, India, 1953; (iii) **I.M. Pei**, Proyecto de Rascacielos Administrativo, 1957; (iv) **O. Niemeyer**, Catedral Metropolitana, Brasilia, Brasil, 1960.

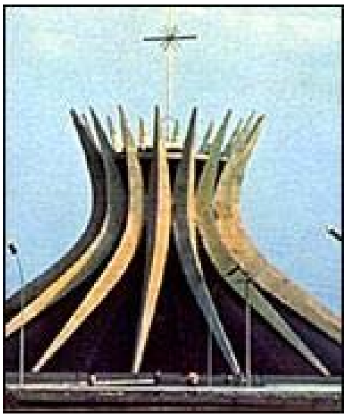


Figura 38. O. Niemeyer: Catedral Metropolitana, Brasilia, Brasil.

EL PARABOLOIDE HIPERBÓLICO

El paraboloide hiperbólico (Figura 39) es una superficie reglada formada por las rectas que se apoyan, de forma ordenada, en dos rectas que se cruzan en el espacio (por ejemplo, haciendo que las rectas generadoras sean todas paralelas a un plano dado perpendicular a una de las rectas generatrices). El paraboloide es una superficie doblemente reglada; por tanto, como en el caso del hiperboloide de una hoja, genera una estructura de malla que le da fuerza a la construcción y la hace especialmente apta para cubiertas, etc. También es una superficie cuadrática, es decir, solución de una ecuación polinómica de segundo grado, y se puede utilizar en arquitectura, aparte de para otras cuestiones, para realizar cubiertas de doble curvatura del segundo tipo (esto es, con curvatura de Gauss negativa).

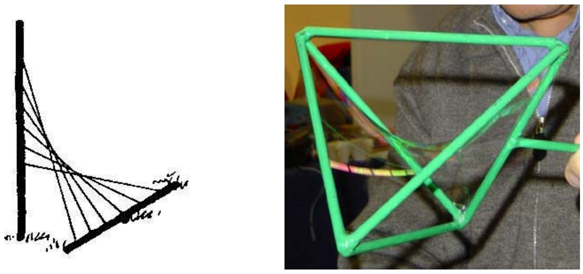


Figura 39.

Uno de los aspectos novedosos y que le hace ser una forma destacada para su utilización en arquitectura (en combinación con las otras propiedades que presenta) es el hecho de que ser una superficie muy cercana a una superficie minimal (exactamente la *superficie de Schwartz*), con lo cual es estable y ahorra material por tener área mínima. De hecho, el paraboloide hiperbólico ha sido, y sigue siendo, una de las superficies más utilizadas en la arquitectura del siglo XX, en particular en el diseño de cubiertas (¡superficie de doble curvatura, estable y de área mínima, doblemente reglada!).

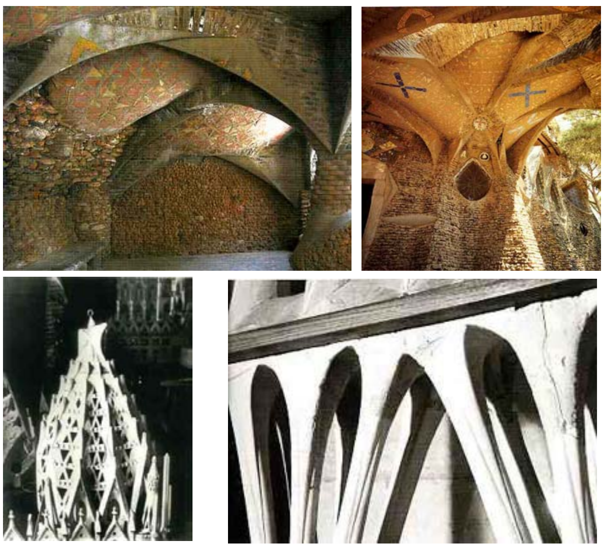


Figura 40.

El paraboloide hiperbólico es una de las superficies más originales e importantes utilizadas por **Gaudí**. Por supuesto que era una superficie bien conocida por los matemáticos, pero no tanto por los arquitectos e ingenieros. Al igual que para el hiperboloide de una hoja, el que fuera doblemente reglada le permitía hacer fácilmente y de forma natural modelos de hilo, alambre y yeso para que los utilizaran los trabajadores de sus construcciones. La primera obra en la que **Gaudí** utilizó el paraboloide hiperbólico fue en la Glorieta del Campo de las Higueras en la Finca Güell (1884), en Les Corts de Sarrià (una pareja de paraboloides simétricos de ladrillo que soportan una parte del suelo del mirador). La primera utilización importante del esta superficie fue en el techo de la cripta de la Colonia Güell (1914), para la creación de lo que se ha dado en llamar bóvedas "convexas" (**Gaudí** realizó tres tipos de bóvedas que se realizaban tomando diferentes partes del paraboloide hiperbólico), y en la cubierta del pabellón de entrada al Parc Güell (1914). Pero, sin lugar a dudas, fue en la Sagrada Familia donde la relación de **Gaudí** con el paraboloide hiperbólico se hizo más importante. Como hemos comentado anteriormente, emplea esta superficie, junto con el hiperboloide, para cortarla y combinarla con otras superficies a fin de obtener las formas deseadas. Hemos comentado que utiliza el paraboloide en la cubierta de la Sagrada Familia, como nexo de los hiperboloides; también utiliza paraboloides hiperbólicos en el diseño de la cúpula de la sacristía del templo de la Sagrada Familia, o en el triforio de la nave central.

El arquitecto madrileño, pero afincado en México y posteriormente en Estados Unidos tras la guerra civil española, **Félix Candela**, que vino a ser conocido como "el principal diseñador de cascarones en el mundo", puede que sea una de las personas que mejor haya comprendido el mecanismo resistente de las estructuras en general y de las de hormigón en particular. Fue además mundialmente conocido por sus cubiertas con formas obtenidas a partir del paraboloide hiperbólico. El mismo llegó a decir que *"todas las obras que envío están hechas de paraboloides hiperbólicos, y la posibilidad de combinaciones que den apariencias muy diversas es bastante grande, aunque no inagotable…"*. Algunas de sus obras: (i) Restaurante Los Manantiales, Xochimilco, México, 1957 (cubierta realizada al intersectar cuatro paraboloides hiperbólicos, como muestran los dibujos del propio **Candela** reproducidos en la Figura 41); (ii) Iglesia de San José Obrero, Monterrey, México, 1954 (que tiene una cubierta curiosa, formada por dos paraboloides hiperbólicos apoyados uno sobre otro por uno de sus extremos, como se ve en la Figura 41); (iii) una estructura diferente y emblemática de **Candela** realizada a base de paraboloides hiperbólicos es la Embotelladora Bacardí en México D.F., 1959; (iv) otra realización diferente es la de la Iglesia de la Medalla de la Virgen Milagrosa en México D.F., 1953; y un largo etcétera. Para terminar este breve paseo por la obra de **Félix Candela,** recordemos su obra póstuma. **Candela** colaboró con **Santiago Calatrava** en la Ciudad de las Artes y de las Ciencias de Valencia; en particular, es indudable que el Parque Oceanográfico es su canto del cisne.

Aunque la cantidad de obras arquitectónicas en las que se ha hecho uso del paraboloide hiperbólico en el mundo es enorme, vamos a acercar aquí unos pocos ejemplos: (i) **Miguel Fisac** lo utilizó en la fachada de La Pagoda, Edificio de los Laboratorios Jorba de Madrid, 1965 (destruido en 1999); (ii) **Le Corbusier** utilizó conoides y paraboloides hiperbólicos en el diseño del Pabellón Philips en la

Exposición Universal de Bruselas en el año 1958 (pabellón que tenía que ver mucho con la música, y en el que Le Corbusier trabajó junto al músico **Xennakis**); (iii) la Catedral de Santa María, Tokyo, 1963, de **Kenzo Tange**; y (iv) el Aeropuerto Internacional de Kuala Lumpur, Malasia, 1998, de **Kisho Kurokawa**.

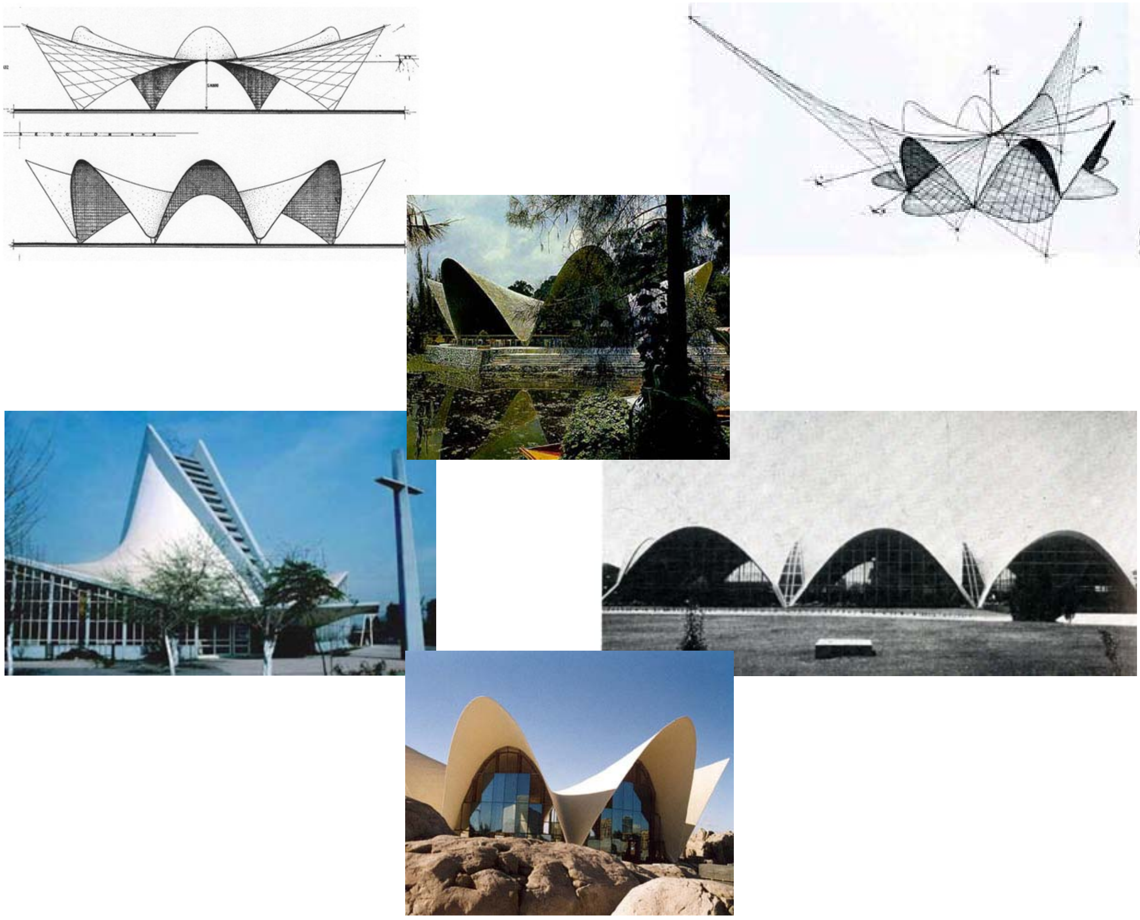


Figura 41. F. Candela: primera y segunda filas, Restaurante los Manantiales, Xochimilco, México; tercera fila, Iglesia de San José Obrero, Monterrey, México (i) y Embotelladora Bacardí, México D.F. (d); cuarta fila, Restaurante del Parque Oceanográfico de la Ciudad de las Artes y de las Ciencias de Valencia.

La última parte en la búsqueda de la estabilidad del edificio sería el estudio de las superficies minimales y las cubiertas y capas de **Frei Otto**. Para quien pueda estar interesado en ellas desde una perspectiva geométrica recomendamos el texto [].

REFERENCIAS

[1] R. BUCKMINSTER FULLER ET AL.: *Your private sky: the art of design science*. Lars Müller Publications, 1999.

[2] F. CANDELA: *En defensa del formalismo y otros escritos*. Xarait Ediciones, 1985.

[3] A. CASTELLANO: *XII profecías para el siglo XXI* (introducción). L'Arca Edizioni, 1997.

[4] J.A. FERNÁNDEZ, J.R. NAVARRO: *Eduardo Torroja, ingeniero*. Ediciones Pronaos, 1999.

[5] D. GIRALT-MIRACLE (ED.): *Gaudí, la búsqueda de la forma*. Lunwerg, 2002.

[6] D. GIRALT-MIRACLE (ED.): *Gaudí 2002: miscelánea*. Planeta, 2002.

[7] P. GÖSEL, G. LEUTHAÜSER: *Arquitectura del siglo XX*. Taschen, 2001.

[8] S. HILDEBRANDT, A. TROMBA: *Matemática y Formas Óptimas*, Prensa Científica, 1990.

[9] P. JODIDO: *Sir Norman Foster*. Taschen, 1997.

[10] C. JORDÁ (ED.): *Eduardo Torroja: la vigencia de un legado*. Servicio de Publicaciones de la Universidad del País Vasco, 2002.

[11] I. MARGOLIS: *Architects+Engineers=Structures*. Wiley-Academy, 2002.

[12] L. MOLINARI: *Santiago Calatrava*. Skira, 1999.

[13] H. PEARMAN: *Contemporary World Architecture*. Phaidon, 1998.

[14] A. ROMÁN: *Eero Saarinen, an architecture of multiplicity*. Princeton Architectural Press, 2003.

[15] S. TÁRRAGO, E. TORROJA: *La modernidad en la obra de Eduardo Torroja*. Turner, 1979.

[16] K. WILLIAMS (ED.): *Nexus III: architecture and mathematics*. Pacini Editore, 2000.

[17] Miguel Fisac. *AV Monografías* **101** (2003).

[18] *The Great Buildings Collection*, http://www.greatbuildings.com.

[19] *Nicolas Janberg's Structurae*, http://www.structurae.de/en. International Database and Gallery of Structures.