
150 ANIVERSARIO DEL NACIMIENTO DE GAUDÍ

En conmemoración del 150 aniversario del nacimiento de Antonio Gaudí i Cornet (1852-1926), autor, entre otros, de la Sagrada Familia, el Parque Güell, la Pedrera, la Casa Batlló... publicamos en LA GACETA DE LA RSME dos artículos referentes a aspectos matemáticos de la obra del insigne arquitecto.

Gaudí decía de sí mismo: "Soy geómetra, es decir, sintético". En sus maravillosas obras confluyen toda la belleza de las matemáticas: bóvedas convexas, arcos catenarios, bóvedas hiperbólicas, conoides... El artículo de Claudi Alsina Català y Josep Gómez Serrano, y el de Rafael Pérez Gómez nos invitan a descubrir el mundo matemático de Gaudí.

Gaudí, Geometricamente

por

Claudi Alsina Catala y Josep Gómez Serrano

En el 2002 celebramos el 150 aniversario del nacimiento de nuestro arquitecto más universal: Antoni Gaudí Cornet (1852-1926). Nuestro objetivo aquí es mostrar como la visión gaudiniana de la geometría es el resultado de una desbordante creatividad tridimensional basada en una experimentación geométrica sistemática.

El presente artículo es una invitación a descubrir la dimensión geométrica presente en la obra de Gaudí y a ver cuáles fueron sus principales ideas geométricas. Gaudí tuvo una visión de la geometría muy personal. Amó profundamente la geometría y, a través de su obra, nos dejó uno de los legados más bellos de formas geométricas hechas realidad.

SOBRE LA FORMACIÓN TÉCNICA DE GAUDÍ

Después de iniciar su bachillerato en las Escuelas Pías de Reus, en 1868, Gaudí, con 16 años y un curso pendiente, se traslada a Barcelona. Acaba así su bachillerato en el Instituto de Segunda Enseñanza (sólo había uno) cursando la especialidad de Ciencias. En su proceso de ingreso a la Escuela de

Arquitectura, Gaudí estudia en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Barcelona algunas asignaturas preparatorias que por aquel entonces eran comunes a arquitectos, ingenieros y estudiantes de ciencias. Los “Complementos de Álgebra” y la “Geometría Analítica” de don Lorenzo Presas las aprueba en junio de 1870. El curso 1870-1871, estudió el “Cálculo Diferencial e Integral” con don Demetrio Duro y la “Geometría Descriptiva” con don José Castelao Saco. La “Mecánica Racional” de don Federico Pérez la suspendió diversas veces hasta superarla años después.

También cursó introducciones a la “Geodesia”, la “Física”, la “Historia Natural”, y “Dibujo lineal”, “Sombras y Perspectiva”, “Estereotomía”, “Resistencia de Materiales”, “Hidráulica”, “Máquinas y motores”, “Conocimiento de materiales”, “Topografía”, “Tecnología”, “Aplicaciones de las ciencias físico-naturales a la Arquitectura”, ...y, por supuesto, todas las asignaturas más propiamente arquitectónicas. Acabó la carrera en 1878.

Gaudí fue un estudiante difícil, solitario, más amante de la biblioteca que de las aulas, y dispuesto a discutir siempre con sus profesores los más diversos temas. A pesar de sus dificultades con los exámenes académicos, Gaudí concluyó sus estudios habiéndose aproximado, como hemos visto, a una enorme cantidad de conocimientos matemáticos, científicos y técnicos. También cabe remarcar que Gaudí alternó siempre la carrera con trabajos en estudios y talleres, logrando con ello una formación práctica de gran altura.



Figura 1: Gaudí

UN GEÓMETRA SINTÉTICO

Gaudí despreció el resto de su vida la formación matemática “abstracta” recibida. Consideró siempre (según han recogido sus discípulos de aquella época) que los modelos matemáticos, con un alto grado de abstracción y formalización eran, para sus fines creativos, totalmente inútiles. Sin embargo, Gaudí fue capaz de abandonar esta matemática académica y autoconvertirse, él mismo, en un gran geómetra sintético. Gaudí fue un gran arquitecto, entregado totalmente a su profesión. Él deseó proyectar casas, muebles, palacios, jardines, templos... y por tanto buscó siempre soluciones óptimas, estructuralmente equilibradas y construibles con los recursos de su tiempo. Gaudí no

buscó formas fantásticas para esculturas. Se propuso, en la mejor tradición técnica, crear espacios funcionales para el uso humano.

Gaudí creará su particular visión de la geometría partiendo de la **observación** de la realidad, intentando siempre una mimesis entre lo que la Naturaleza ofrece y lo que su proyecto arquitectónico requiere. A partir de estas ideas naturalistas Gaudí iniciará siempre un largo período reflexivo en su estudio para **experimentar**, para ir perfilando y maquetando propuestas factibles. A partir de su definición final del proyecto entonces él mismo dirigirá todos los detalles de la obra, desde la elección de los materiales a la construcción de andamios especiales, la propia construcción, los acabados, la decoración, la iluminación, etc. Detrás de Gaudí hay siempre grandes equipos de picapedreros, albañiles, yeseros, ceramistas, herreros, etc. y actúan profesionales encargados de tareas especiales (Berenguer en las obras; Rubió calculando por métodos de estática gráfica las estructuras; Jujol decorando; ...)

El bisabuelo del primer autor de este artículo, Claudi Alsina Bonafont, fue maestro de obras de Gaudí en algunos proyectos importantes. Construyó la Casa Vicens, parte de la Cripta de la Sagrada Familia, el Convento de las Teresianas ... y la Casa de los Botines en León. Gaudí apreció siempre en Claudi Alsina Bonafont su habilidad por dirigir grandes equipos, estando bajo sus ordenes picapedreros, albañiles y carpinteros (acabó las Teresianas en un año gracias a su equipo de 68 obreros).

Todo este proceso debe tenerse en cuenta a la hora de analizar hoy cómo entendía Gaudí la geometría: basada en la exploración del espacio, en una creatividad tridimensional enorme y en un uso, al límite, de las técnicas constructivas tradicionales propias de la época.

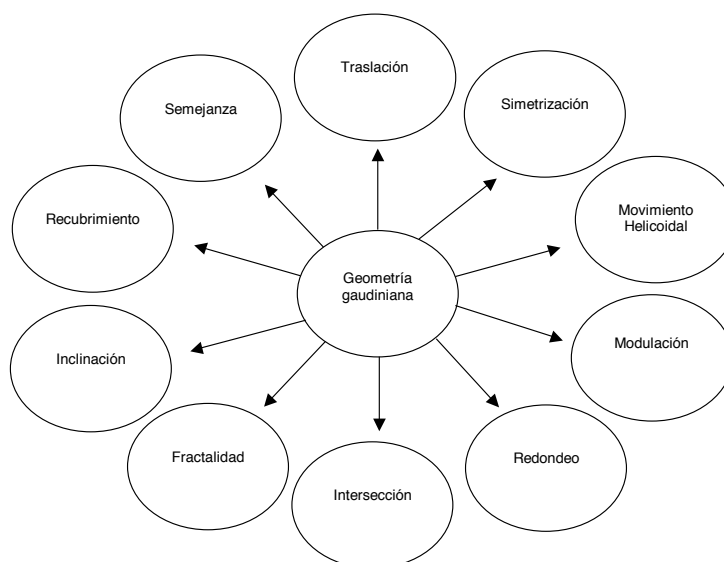
EL SINGULAR ESTUDIO DE GAUDÍ

En el estudio de Gaudí coexistían diversos ámbitos de trabajo; un taller de maquetas, un taller fotográfico, un taller de esculturas, un taller de campanas, un taller de espejos, mesas para el trazado de planos... y multitud de rincones para realizar trabajo experimental, para ensayar formas construibles. Del techo del estudio colgaban formas poliédricas, cenefas, viejas maquetas, esculturas, cerámicas... e incluso una pequeña cubierta móvil permitía la entrada cenital de luz solar con la que Gaudí, divertido, estudiaba las sombras de sus modelos geométricos.

Las consideraciones temporales, económicas o de trazados gráficos nunca jugaron en este estudio un papel relevante. Sólo podremos entender la creatividad gaudiniana si logramos imaginarnos a Gaudí como investigador apasionado de soluciones geométricas, usando sus manos, haciendo papiroflexia, realizando unos primeros modelos imprecisos y, poco a poco, llegando a maquetas de yeso precisas (a escala 1 : 10 o 1 : 25) previas al proceso constructivo.

DIEZ RECURSOS GEOMÉTRICOS

El siguiente esquema sintetiza diez recursos sobresalientes subyacentes a la visión gaudiniana de la geometría que, brevemente, comentaremos a continuación:



Traslación

El efecto de cenefa espacial es usado por Gaudí en la repetición de arcos o elementos que se repiten para marcar una determinada dirección. En Bellesguard, en los arcos del Colegio de las Teresianas, en el rosario de esferas del Parque Güell, etc.

Simetrización

La simetría especular está presente en las fachadas de las Casas Calvet y Batlló, en la escalinata de acceso al Parque Güell, en las plantas del Palacio Episcopal de Astorga y de la Sagrada Familia, etc. Pero la simetrización más sorprendente la realiza Gaudí al obtener la forma del arco de catenaria por simetría de la curva catenaria descrita por una cadena colgando de dos puntos según su propio peso (la forma ideal de arco catenario es convenientemente rectificadas para que se aproxime al arco funicular que soporta las cargas pertinentes).

Gaudí fue el primer arquitecto en usar dichos arcos pues supo apreciar que para arcos catenarios (o funiculares) de igual longitud, cuanto más alta es la altura más pequeño es el empuje horizontal en los puntos de

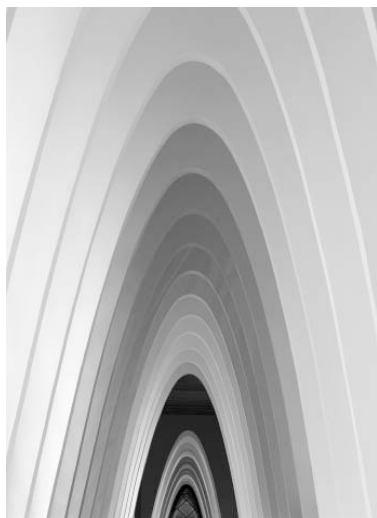


Figura 2: Traslación de arcos catenarios en las Teresianas.
©Pere Vivas i Ricard Pla. TRIANGLE POSTALS



Figura 3: Fachada del palacio Güell.
©Pere Vivas i Ricard Pla. TRIANGLE POSTALS

arranque y en la clave del arco, es decir, los arcos permiten gran altura sin empujes laterales (eliminando pues los elementos exteriores de refuerzo que el gótico se vio obligado a construir al lado de las naves centrales).

Movimiento helicoidal

Gaudí fue un maestro en el proceso tridimensional de crear formas arquitectónicas combinando traslaciones con rotaciones. Las columnas helicoidales del Parque Güell, las escaleras de caracol de la Sagrada Familia, las rampas helicoidales del Palacio Güell y la Casa Milà, las chimeneas imaginativas del Palacio Güell, las hélices enlazadas de la aguja del Parque Güell, son ejemplos maravillosos donde el movimiento helicoidal que genera la forma parece acompañar, a la persona que asciende, o al carro que baja, o al humo que se va, o al agua que resbala (figura 4).



Figura 4: Columna helicoidal en las Teresianas.
©Pere Vivas i Ricard Pla. TRIANGLE POSTALS

Modulación

Hay una primera modulación sorprendente que se encuentra escondida en la construcción del famoso banco sinuoso y multicolor de la plaza del Parque Güell. Ignacio Paricio descubrió que, en la construcción de la plaza, se habían usado sólo elementos prefabricados de hormigón. Una retícula de cuadrados subyace al suelo de la plaza y el banco resulta de enlazar semicírculos cóncavos y convexos, usando un respaldo curioso

cuya pieza generadora tanto puede colocarse en el sentido cóncavo como en el convexo. Nace así una cuadrícula con relaciones numéricas simples enteras o ligadas a múltiplos de la raíz cuadrada de dos.

Hace poco, los autores de este artículo, Jordi Bonet y Jordi Fauli descubrimos con gran placer que toda la Sagrada Familia tiene como módulo principal la medida de 7.5 m y un sistema de proporciones basado en los divisores de 12 ($1/4$, $1/3$, $1/2$, $2/3$, $3/4$, 1). Esta regularidad ayuda hoy a proseguir el proyecto.

En el caso de la Casa Milà debe destacarse que la estructura reticular en hierro es la que permitió a Gaudí resolver toda la estructura en el interior prescindiendo de la ayuda de la fachada. Dicha solución permiten un diseño fantástico del exterior que al no actuar como elemento estructural admite soluciones muy creativas.



Figura 5: Casa Milà–La Pedrera.

©Pere Vivas i Ricard Pla. TRIANGLE POSTALS

Redondeo

Corresponde al proceso de “suavizar” ángulos (planos o sólidos) al substituir éstos por curvas más suaves como parábolas, arcos de circunferencia, perfiles sinusoidales, etc. Un ejemplo emblemático es el cambio de las

estrellas poligonales que son secciones de las columnas de doble giro de la Sagrada Familia por arcos parabólicos interpolados.

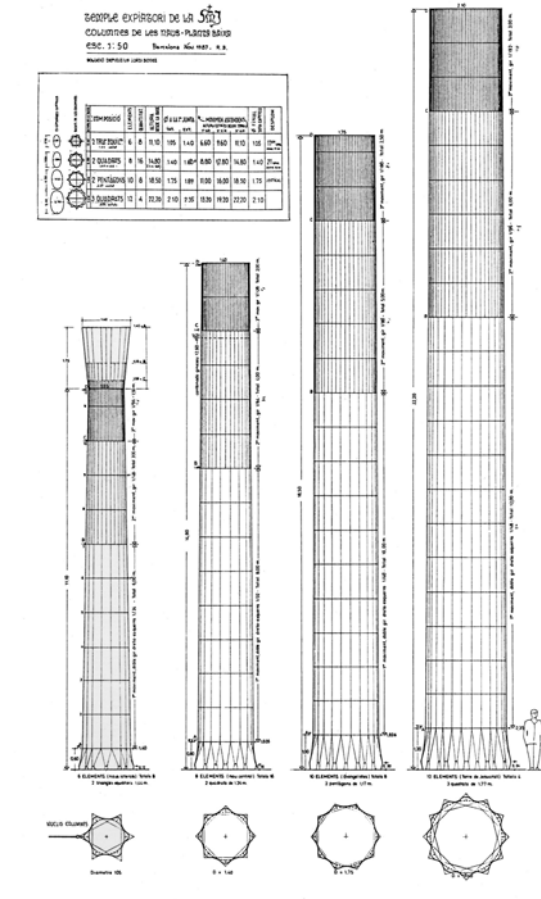


Figura 6: Columnas de la Sagrada Familia.

Intersección

Las formas que resultan de la intersección de diversas figuras elementales adquieren normalmente una especial complejidad y belleza. Gaudí crea formas combinando superficies regladas, relacionando elipsoides, combinando poliedros, subtrayendo material o agregándolo, obteniendo a veces en las intersecciones finales interesantes disecciones geométricas. Citemos dos casos espectaculares:

Las columnas de doble giro de la Sagrada Familia son de hecho la intersección (booleana) de las dos columnas “salomónicas” que en sentidos

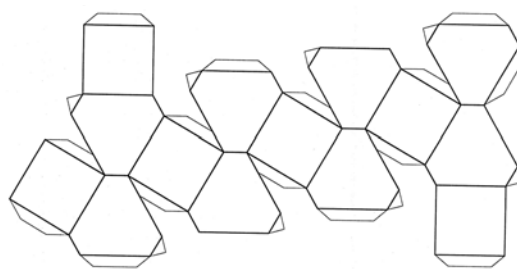


Figura 7: Desarrollo plano del poliedro del pináculo de San Bernabé.

contrarios generan unas mismas piezas poligonales sometidas a un pautado movimiento helicoidal.

Los poliedros de los pináculos de la Fachada del Nacimiento tienen caras cuadradas y hexagonales (no regulares) pues resultan de intersecar un cubo con un octaedro mayor, interviniendo además en la maclación una esfera y un vaciado cilíndrico (para crear espacios donde colocar iluminación).

Fractalidad

La fractalidad entendida como forma de crecimiento por autosemejanza está presente en el crecimiento de los árboles. Esto fue apreciado por Gaudí y usado como recurso constructivo para las columnas de la Sagrada Familia. Un “divide (la carga) y vencerás” aplicado a las cubiertas del Templo cuyo enorme peso quedará repartido en las columnas-ramas, que a su vez transmitirán las cargas a sus columnas-tronco ... Permitan aquí relatar una anécdota de nuestro buen amigo Jorge Wagensberg. Habiendo acompañado éste al padre de los fractales Benoit Mandelbrot a visitar la Sagrada Familia, Mandelbrot exclamó: “Gaudí ya usó los fractales”.

Inclinación

Muchos elementos portantes de la obra de Gaudí rompen con la tradicional verticalidad y exhiben una adecuada inclinación de forma que manteniendo la perpendicularidad a los elementos que soportan, transmiten de manera óptima a sus bases las cargas correspondientes. Así funcionan las maravillosas columnas inclinadas del Parque Güell que sostienen a los viaductos superiores o a la plaza principal. También, como consecuencia de la fractalidad las columnas-ramas de la Sagrada Familia, se inclinan de forma precisa.

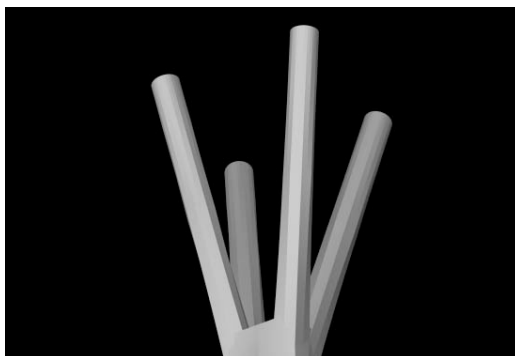


Figura 8: Modelo de columna. ©ICUB. Dibuix CAIRAT. ESTAV (UPC)

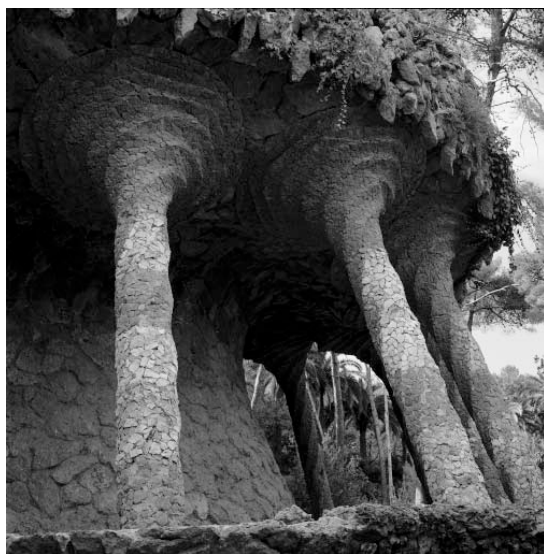


Figura 9: Columnas inclinadas helicoidales en el parque Güell.
©Pere Vivas i Ricard Pla. TRIANGLE POSTALS

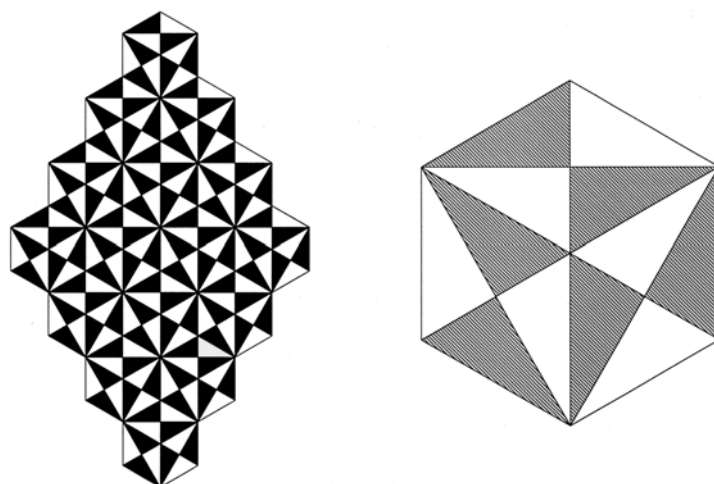


Figura 10: Parquet hexagonal gaudiano.

Recubrimiento

A Gaudí le gustó estudiar la generación de mosaicos poligonales. Quizás influyera en ello su afición por la investigación geométrica, la presencia de la cerámica en el Modernismo o el trabajo en Barcelona de un grupo de albañiles valencianos especializados en hacer mosaicos con losetas muy pequeñas (terrazza Casa Batlló). El hexágono recibió una especial atención gaudiniana. Hoy el Paseo de Gracia tiene las losetas hexagonales que Gaudí dibujó y en un parquet de la Casa Milà, Gaudí descubre una bella descomposición del hexágono regular en tres rombos o en doce triángulos rectángulos.

También, al usar la técnica de romper losetas (¡y vajillas!) para decorar superficies (“trencadís”), Gaudí abre un mundo nuevo de “mosaicos topológicos”, recubrimientos de superficies no planas donde también hace aparecer de nuevo polígonos.

Semejanza

La representación gráfica, a través de las rigurosas técnicas de la Geometría Descriptiva, ha sido un instrumento básico para proyectar Arquitectura. Sin embargo, Gaudí, aun conociendo perfectamente dicha técnica, dió prioridad al método experimental (tridimensional) de realizar maquetas de precisión, tanto para crear las formas de las cosas, como para idear su viabilidad constructiva. Las escalas de trabajo usadas fueron 1:25 y 1:10 (dándose el caso de la escala 1:1 (tamaño natural) para ciertos detalles). El yeso fue el material usado mayoritariamente.

Gaudí supo también trasladar al espacio la simetrización ya realizada sobre la catenaria y con ello elaboró, para la Colonia Güell, maquetas esterofuniculares colgantes (con hilos y pequeños pesos o saquitos con perdigones) que modelaban la forma simétrica de la distribución de cargas en cada elemento clave de la cubierta. El reflejo de estas formas en su espejo colocado en el suelo permitía apreciar que “forma” óptima de cubierta correspondería a la distribución de cargas. Recubriendo el interior con papel fino o tela, se podía retocar la forma y proceder a su dibujo.

LAS CUÁDRICAS EN LA OBRA DE GAUDI

En la obra de Gaudí podemos descubrir un uso interesante de las cuádricas regladas (conos, cilindros, paraboloides hiperbólico, hiperboloide de una hoja) y, excepcionalmente, del elipsoide (y esfera) y del paraboloides de revolución. Sabemos que Gaudí conocía estas superficies cuadráticas a través del tratado de Geometría Descriptiva de Leroy (que era el manual usado en su época de estudiante) y nos consta que fabricó modelos con hilos para poder estudiar mejor las propiedades que dichas superficies poseían y que él creía interesantes con vistas a la construcción. Vale la pena comentar dos hechos característicos de cómo concibe la geometría Gaudí: el juego con los “tamaños” y con los “trozos”. Una misma superficie podía dar lugar a detalles de tamaño muy pequeño (paraboloides hiperbólicos de 15 cm adornando pies de grandes columnas) o a grandes elementos estructurados (paraboloides hiperbólicos como bóvedas convexas). Por otra parte Gaudí toma de “toda” la superficie potencial sólo los trozos que le interesan, surgiendo en consecuencia partes superficiales que pueden ser sorprendentes (por ejemplo, medio hiperboloide de una hoja recortado en forma de estrella).

Comentemos, brevemente, algunos de los usos gaudinianos de las cuádricas.

* **Cilindros y conos**

Estas superficies regladas en su versión de revolución forman parte del repertorio geométrico presente en columnas, finales de chimeneas, remates de azoteas, envolventes de escalera de caracol, etc. La decoración en cerámica o pizarra, o el simple acabado en piedra realzan dichas formas (El Capricho en Santander, Casa Botines en León, Parque Güell y Sagrada Familia en Barcelona, etc.).

* **Hiperboloide de una hoja**

Cuando las ramas de una hipérbola giran alrededor del eje de simetría, que no corta a dichas ramas, nace este sugestivo hiperboloide reglado pero no desarrollable. Para Gaudí será una superficie generada por rectas uniendo puntos correspondientes de dos circunferencias iguales, paralelas y giradas entre sí (es interesante hacer notar que, dicha figura, también

es, matemáticamente, el conjunto de rectas apoyadas simultáneamente en tres rectas en posición general en el espacio).

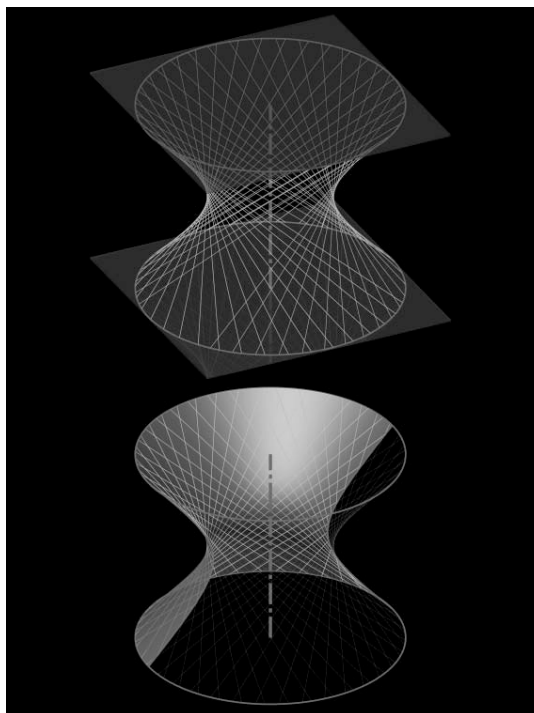


Figura 11: Modelo de hiperboloide de una hoja.
©ICUB. Dibuix CAIRAT. ESTAV (UPC)

Habiendo Gaudí apreciado que las campanas tubulares en forma de hiperboloide de una hoja son las que mejor difunden el sonido (así serán las de la Sagrada Familia) decidió usar también dichas superficies en ciertas columnas (rompiendo la tradicional forma cilíndrica) y en las entradas de luz y bóvedas del templo de la Sagrada Familia.

* Paraboloides hiperbólicos

Gaudí usó un modelo con hilos (tensables gracias a las pesas finales) colocados entre varillas articulables. Tenía conocimiento de dicha cuádrica reglada no desarrollable también por el libro de Leroy y Gaudí supo darle usos interesantes, por ejemplo, en las bóvedas de la Cripta de la Colonia Güell y en la Sagrada Familia.

Recordemos que el paraboloides hiperbólico nace al deslizarse (paralelamente a un plano) una recta sobre las dos rectas que se cruzan en el espacio, es decir, en el sentido de Gaudí: las viguetas se apoyan “ordenadamente” entre dos vigas no coplanarias.

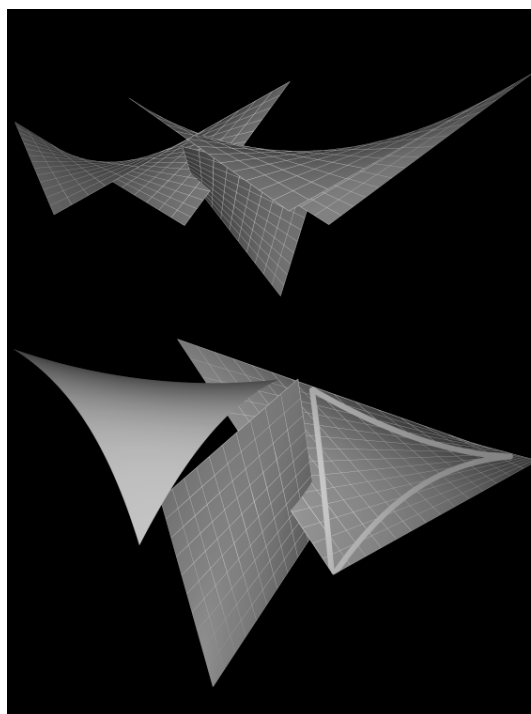


Figura 12: Modelo de paraboloides hiperbólicos.
©ICUB. Dibuix CAIRAT. ESTAV (UPC)

Con doce grandes paraboloides hiperbólicos se construirá próximamente la Sacristía de la Sagrada Familia. Existen hoy, ya realizadas, bóvedas que combinan hiperboloides de una hoja con paraboloides, aprovechando rectas directrices de una superficie como generatrices de la otra.

CUÁDRICAS NO REGLADAS

Gaudí usó elipsoides en los nudos de columnas (para imitar las protuberancias que se ven en los árboles), esferas a un nivel simbólico-religioso ... y un maravilloso paraboloides de revolución como techo monumental del espacio central interior del Palacio Güell.

Al margen de las cuádricas, Gaudí ideó también superficies libres, como las conoidales, imitando formas naturales o simplemente explorando nuevas dimensiones plásticas. Un repertorio de superficies que merece ser investigado.

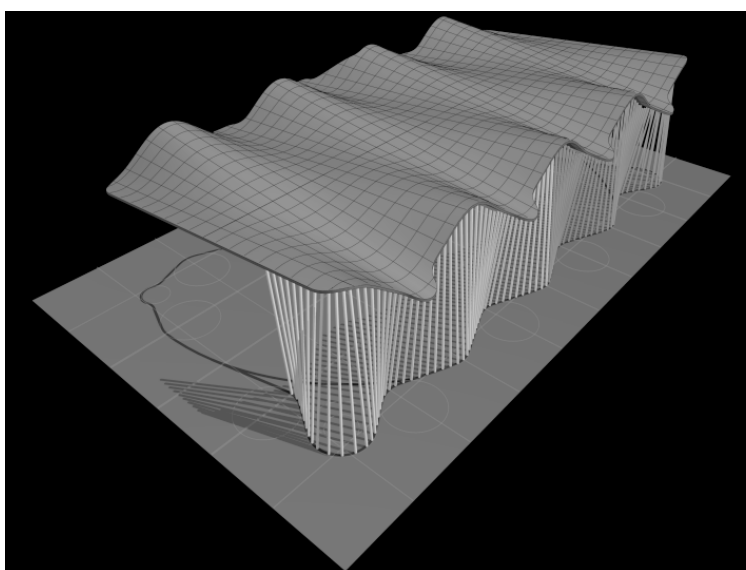


Figura 13: La belleza de la simplicidad.
©ICUB. Dibuix CAIRAT. ESTAV (UPC)

EL GAUDINISMO HOY

Las obras y las ideas de Gaudí son, desde hace tiempo, motivo de interés desde especialidades disciplinares muy diversas. Eso se refleja en la abundante bibliografía dedicada a él. Se ha escrito y fantaseado sobre su personalidad, sobre su profunda religiosidad, sobre su posicionamiento catalanista conservador, sobre sus diseños de mobiliario, sobre sus ideas urbano-ecológicas, sobre sus sorprendentes soluciones cromáticas y formales, sobre el uso de la artesanía de su época ... tan singular arquitecto admite, y resiste bien, análisis de todo tipo. Pero la visión científico-técnica y geométrica de Gaudí era algo pendiente. En los últimos años un grupo de profesores de la Universitat Politècnica

de Catalunya hemos dedicado especiales esfuerzos a investigar científicamente la obra de Gaudí. La propia construcción de la Sagrada Familia ha llevado a parte del equipo a involucrarse en el cálculo de estructuras necesario y ante el Año Internacional Gaudí 2002 nos hemos involucrado en la realización de la exposición itinerante “Gaudí: la búsqueda de la forma” (Daniel Giralt-Miracle, 2002). Mucho se ha avanzado en este terreno. Quedan 40 años por delante para acabar la Sagrada Familia y muchas investigaciones geométricas y estructurales por llevar a término.

Sería nuestro deseo haber compartido a través de este artículo con los lectores de La Gaceta nuestra admiración por la visión que Gaudí tenía de la geometría. Quizá Gaudí no aportó grandes teoremas pero en su maravillosa obra están contenidas *bellísimas demostraciones*.

Sigue a continuación una lista de referencias donde el lector interesado puede ampliar el contenido del artículo.

REFERENCIAS

- [1] C. ALSINA, *Estimar les matemàtiques*. Barcelona. Editorial Columna. 2000.
- [2] C. ALSINA, Conoides, en D. GIRALT-MIRACLE, 2002 A, 88-95.
- [3] C. ALSINA, Macla de geometrias, en D. GIRALT-MIRACLE 2002 A, 118-125.
- [4] C. ALSINA, J. BASSEGODA, *Claudi Alsina i Bonafont, Mestre d'Obres de Gaudí*. Barcelona: Publicacions Real Càtedra Gaudí-UPC, 2001.
- [5] C. ALSINA, J. GÓMEZ, Gaudí Engineer. *Crossing 2*, 2001, 72-80.
- [6] C. ALSINA, J. GÓMEZ, Gaudí: Geometría, Estructura y Construcción, en D. GIRALT-MIRALE, 2002 B, 138-157.
- [7] R. ARTIGUES AMAT, Gaudí creador d'estructures. *La Veu de Catalunya*, 1928, p.4.
- [8] J. BASSEGODA, Geometría Reglada y Arquitectura, *Memorias R. Acad. Ciencias y Artes de Barcelona*, v. XLVIII, n.10, 868 (1989).
- [9] J. BASSEGODA, *El Gran Gaudí*. Sabadell. Editorial AUSA. 1989.
- [10] J. BASSEGODA, *Antoni Gaudí*. Barcelona; Edicions 62, 1992.
- [11] J. BASSEGODA Y G. GARCIA, *La cátedra de Antoni Gaudí. Estudio analítico de su obra*. Barcelona, Edicions UPC; 1999.
- [12] J. BERGÓS, *Gaudí. L'home i l'obra*. Barcelona: Ariel, 1954.
- [13] J. BONET, L'últim Gaudí. Barcelona. *But. R. Acad. Cat. B.A.S. Jordi*, IX-X, 1995-6, 159-177.
- [14] J. BONET, *L'últim Gaudí*, Barcelona. Pórtic 2000.
- [15] M. BURRY, *Expiatory Church of the Sagrada Familia: Antoni Gaudí*. Londres. Phaidon, 1993.

- [16] F. CARDELLACH, “Explicació de Gaudí sobre les voltes de paraboloides, i estructura arborífera”, *El Propagador*, 14, any II (15-7-15).
- [17] G.R. COLLINS, *Antonio Gaudí*. Nueva York. Braziller, 1960.
- [18] D. GIRALT–MIRACLE ED., *Gaudí. La búsqueda de la forma*. Barcelona. Lunwerg Ed.,2002.
- [19] D. GIRALT–MIRACLE ED. , *Gaudí 2002-Miscelanea*. Barcelona. Planeta,2002.
- [20] D. GIRALT–MIRACLE, *Espai Gaudí-Guia*, Barcelona, Fund. Caixa de Catalunya, 1997.
- [21] J. GÓMEZ ET AL, *La Sagrada Familia. De Gaudi al CAD*. Barcelona: Ed. UPC, 1996.
- [22] J. GÓMEZ, Arcos catenarios, en D. GIRALT–MIRACLE, 2002 A.
- [23] J.M. TARRAGONA, *Gaudí. Biografia de l'Artista*. Barcelona, Proa (2000).
- [24] J. TOKUTOSHI, *El mundo enigmático de Gaudí*. Madrid: Inst. España, 1983.

Claudi Alsina Català
Secció Matemàtiques i Informàtica
Dept. Estructures a l'Arquitectura
E.T.S. Arquitectura de Barcelona
Univ. Politècnica de Catalunya
Diagonal 649, 08028 Barcelona
correo electrónico: alsina@ea.upc.es

Josep Gómez Serrano
Dept. Estructures a l'Arquitectura
E.T.S. Arquitectura del Vallès
Univ. Politècnica de Catalunya
Pere Serra 1-15
08190 Sant Cugat del Vallès
correo electrónico: josep.gomez@ea.upc.es

