

ESTRUCTURA Y ESPACIO

Carles Buxadé
Joan Margarit

La falta de documentación escrita directamente por Antoni Gaudí hace que, para saber cuáles fueron los puntos de vista sobre arquitectura que utilizó para proyectar y construir su importante y vasta obra, haya que recurrir a la expresividad de las propias formas y a los testimonios de sus discípulos y colaboradores.

Siguiendo esas fuentes, pues, encontramos lo que Cèsar Martinell denomina la ruta «Verdad, Estructura, Belleza», el camino simbólico que intentó recorrer Gaudí a lo largo de su vida de arquitecto. Si analizamos ese recorrido, vemos que en la Verdad previa a la Estructura, el arquitecto sitúa las cargas, los sistemas de cálculo y los recursos constructivos.

En cuanto a las cargas, la Verdad histórica le aporta sólo las verticales como actuantes y, en consecuencia, «el factor horizontal» tan sólo se encuentra en los empujes que pueden generar los arcos y las bóvedas. Curiosamente, al principio Gaudí resuelve el problema por partes y con timidez; en cambio, en su obra final, la Sagrada Família, lo hace de forma plena y rotunda, invirtiendo la imagen del gótico, sin duda el estilo que representa el punto de partida estructural de su arquitectura. En efecto: Gaudí da la vuelta a la imagen gótica de una estructura «estrecha» en la parte más alta (la bóveda) que se ensancha hacia abajo mediante los contrafuertes y los arbotantes, y plantea unos pilares que se abren en ramificaciones sucesivas hacia arriba haciendo una especie de figura invertida del gótico (fig. 1).

Los primeros planteamientos del cálculo moderno a partir de la relación de las deformaciones con las tensiones y, por tanto, con los esfuerzos, son del año 1849 (Émile Clapeyron, que relacionó ángulos y momentos en los extremos de la barra con la carga repartida), de 1855 (J. Bertot, que planteó la ecuación de los tres momentos en vigas continuas), de 1860 (Otto Mohr, que desarrolló el análisis general de la viga continua), de 1880 (Alberto Castigliano, con el cálculo matricial), de 1914 (Axel Bendixen, que analizó las estructuras de barras ortogonales y nudos rígidos), y de 1923 y 1932 (Calisev, Hardy Cross y Newlind Morgan, que recuperaron el cálculo general de estructuras de barras mediante aproximaciones sucesivas).

Las realizaciones estructurales más importantes que marcaron esa época fueron, en primer lugar, las construcciones que surgieron de la escuela de Chicago, hacia 1875: edificios con pilares metálicos y vigas continuas, también metálicas, todo ello trabado por los muros de la fachada, fundamentalmente de fábrica. En segundo lugar tenemos la torre Eiffel (1888), como culminación de un proceso que había empezado mucho antes y que determinó la utilización de las estructuras metálicas trianguladas en la investigación de la compresión y la tracción de las piezas.

A la izquierda:
Columnas de pórfido y de basalto. Esfuerzos axiales característicos de 6.200 y 4.500 toneladas, y momentos de flexión de 140 y 60 metros por tonelada, respectivamente (fig. 1)

Gaudí representó un camino especial que se resume en el pensamiento siguiente: si existe una posición de equilibrio interno para la estructura, ésa es la que utilizará la



Inversión estructural de la imagen del gótico en la nave del templo de la Sagrada Família (fig. 2)

estructura para resistir. Para entendernos: cuando dimensionamos una viga, ésta se sostiene siempre que pueda encontrar una posición de equilibrio compatible con su capacidad resistente. Gaudí planteó eso mismo en estructuras mucho más complicadas que una viga, incluso (y plenamente) en algunas complejísimas estructuras como las de la Sagrada Família (fig. 2).

Gaudí no tuvo en cuenta las acciones horizontales, pero cuando proyectó y construyó las torres del Nacimiento las dotó de secciones que hacían posible el equilibrio sin contrafuertes, a pesar de la acción del viento.

Otra cuestión es la de la seguridad. Siguiendo con su obra más importante, la Sagrada Família, si se hubiera construido con piedra u hormigón en masa, que seguramente es lo que preveía Gaudí cuando la proyectó, se habrían aguantado, como lo han hecho, las torres de la fachada del Nacimiento, pero con un nivel de seguridad muy inferior al que se exige hoy en día en un edificio público, que es lo que se ha conseguido al construirla con hormigón armado.

Ese camino es, de hecho, el de la sensibilidad respecto de la resistencia y la estabilidad de un gran arquitecto y un gran geómetra y estructuralista, que permite dar a la estructura las proporciones y las medidas idóneas sin tener que recurrir a los recursos del cálculo, cada vez más complejos, que ya hemos comentado y que empiezan con Clapeyron y acaban en los métodos actuales de los elementos finitos. En consecuencia, no es un camino que pueda enseñarse siguiendo una metodología general estándar en las escuelas de arquitectura, lo que explica, además, por qué la arquitectura de Gaudí tuvo unos planteamientos estructurales que nacieron y murieron con él, salvo algún intento aislado de continuidad, como los casos de Cèsar Martinell y de Josep Maria Jujol.

Si nos fijamos en los recursos constructivos (uno de los tres elementos previos a la verdad estructural del catálogo del gran arquitecto), serían, desde las primeras obras (el Palau Güell, por ejemplo), la fábrica en los muros, las pilastras y las bóvedas, la piedra natural de los pilares, el hierro de los pilares y las jácenas, y la mampostería con mortero de cal de los muros y los macizos de los cimientos.

Sólo habría que añadir a esa lista, en la última etapa de Gaudí en la Sagrada Família, el hormigón armado de los pináculos de las torres de la fachada del Nacimiento, es decir, hacia el final de su ejecución, aproximadamente en 1925. Podríamos encontrar algún antecedente, aunque no propiamente hormigón armado, en la utilización del hierro combinado con el mortero y la piedra para soportar la compleja fachada de la Casa Milà.

El individualismo de Gaudí y, como resultado, su alejamiento del camino que siguió la arquitectura en el siglo XX se caracterizan por la complejidad de las formas que crea, a las que aplica los sistemas constructivos mencionados, a veces forzándolos hasta el límite. Esa complejidad se refleja en la forma en que utilizaba la geometría. Hasta entonces se habían utilizado desde la forma más sencilla del plano hasta las curvas de los cruceros de las naves, pero siempre eran variaciones en torno al arco y la bóveda como elementos básicos. Ése había sido, desde el Partenón hasta la catedral gótica o las cúpulas renacentistas, el camino de la arquitectura. Gaudí incorporó figuras geométricas mucho más complejas, y con esas formas definió la novedad de sus espacios. Así, el paraboloide hiperbólico y el hiperboloide de revolución son elementos característicos de su arquitectura (fig. 3, p. 49). No obstante, ese aumento de la complejidad de las formas fue siempre acompañado del mantenimiento de las superficies regladas, que le permitían apoyarlas con generatrices o directrices comunes. Es de suponer que, con los medios actuales, Gaudí habría intentado utilizar suficientemente (algo que nunca hizo) el acoplamiento por medio de las hipérbolas, que son cónicas comunes a esas



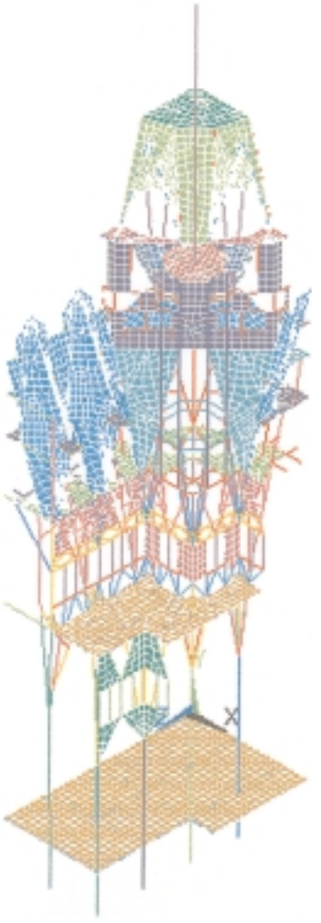
Hiperboloides de una hoja y paraboloides hiperbólicos. Superficies regladas en la cubierta del templo de la Sagrada Família (fig. 3)

dos cuádricas, lo cual habría originado unos espacios más complejos aún y, posiblemente, mucho más sorprendentes.

Por otro lado, la relación entre la estética y la estructura se pierde cuando se imponen y se utilizan sistemáticamente unos sistemas constructivos. Es el caso de los edificios altos de oficinas y de viviendas de nuestra sociedad actual. Fue Le Corbusier quien, en la primera etapa de esas construcciones, afirmó que eran un canto a la libertad y que por vez primera los usos en las distintas plantas no dependían de una rígida estructura de muros de carga. Lo cierto es que se inauguró una época en la que la monotonía fue más poderosa que nunca, en la que los edificios altos, en lugar de «elevar», amontonaban.

En cambio, Gaudí rompió con los espacios tradicionales, y esa voluntad de volver a empezar continuadamente le convirtió en un vanguardista *avant-la-lettre* y le obligó a separarse del camino que condujo, a pesar de los pomposos manifiestos racionalistas iniciales, a la monotonía y la resignación que han conformado las ciudades actuales. Ésa es, al mismo tiempo, la cara y la cruz de la obra gaudiniana: a pesar de (o quizás gracias a) sus posiciones ideológicamente conservadoras (en eso siguió la vía intelectual de Ferdinand Céline o Pierre Drieu la Rochelle), construyó un universo solitario cuya grandeza sorprende tanto por las formas como por la marginalidad de su esfuerzo.

De hecho, como indicó Eduardo Torroja, en lo que llamamos la «arquitectura moderna» puede separarse, como nunca antes, la estructura resistente del resto de la obra. En la arquitectura de Gaudí todo pasa a ser una única cosa. Eso aportó (sobre todo en la última etapa del arquitecto) la posibilidad de una intuición, a cargo del espectador,



Resultado del programa ANSYS correspondiente al cimborrio del templo de la Sagrada Família

de la parte oculta de la obra, es decir, de los grosores. Todo eso, irremediablemente, apartó la obra gaudiniana de la característica que durante el siglo XX se erigió en valor emblemático de la arquitectura, la funcionalidad, la posibilidad de que las formas transmitan al exterior su uso interior.

Las estructuras gaudinianas se han estudiado casi siempre utilizando los medios de análisis que empleaba él, básicamente la estática gráfica y los modelos antifuniculares (fig. 4). Hay otra manera de acercarse a esas formas estructurales, calculándolas con las técnicas más modernas, concretamente con el método de los elementos finitos que permiten, con programas tipo ANSYS, analizar conjuntamente elementos lineales y laminares, en primer y segundo orden, y sometidos a acciones estáticas y dinámicas. De la comparación entre los estudios y los cálculos hechos por nuestro equipo en el Palau Güell y, sobre todo, en la Sagrada Família, con el mismo tipo de investigación realizada en el edificio y en la torre de acceso del Hospital de Sant Pau, de Domènech i Montaner, se observa en la obra de Gaudí un sentido de las proporciones estructurales más preciso, valiente y franco que en la mayor parte de arquitectos modernistas. Como ya se ha indicado, esa intuición no llega a cubrir los efectos horizontales de las acciones sísmicas y del viento que hoy en día exige la seguridad, pero sí que ha permitido, con las técnicas y los materiales actuales (sobre todo aceros y hormigones de alta resistencia y cimientos profundos), absorber, en todos los casos, esos efectos con las secciones y los acabados previstos en sus proyectos.

En el análisis tensional de las estructuras gaudinianas se observa perfectamente que la masa se acumula allí donde es más denso el plexo tensional, que las aperturas se sitúan en los remansos, fuera de las corrientes de los esfuerzos axiales, y que siempre se encuentran núcleos rígidos, torres, campanarios, etcétera, en las direcciones más desfavorables de los esfuerzos horizontales.

Así, pues, si como es natural la seguridad que se exige en las construcciones aumenta en el futuro al ritmo actual, es probable que, en el caso de la Sagrada Família, todavía en construcción, haya que aligerar las zonas más altas, a partir de los 60 a los 90 metros de altura, para mantener una firmeza admisible en los pilares y a los muros inferiores, ya levantados con la seguridad actual. Este aligeramiento sólo podrá conseguirse utilizando nuevos materiales, más resistentes y mucho menos pesados, como el titanio o el carbono.

Así, por vez primera, a lo largo de la ejecución de una catedral, en general en torno a los 150 años (la construcción de la Sagrada Família empezó en 1882 y es posible que acabe, si todo sigue como ahora, en torno al año 2040), los conocimientos y las técnicas han evolucionado de una forma tan impensable que es lógico que se reflejen en los materiales y en las soluciones constructivas utilizadas. La obra más importante y emblemática de Gaudí no sólo mostrará su elaborada concepción de la arquitectura, sino que también será el reflejo de las diferentes épocas a lo largo de las cuales se habrá construido.

Gaudí, con sus formas complejas, con su arquitectura intensa pero marginal, debe permanecer en los territorios simbólicos de la gran arquitectura del pasado. Por eso es lógico que el territorio religioso y su acaparamiento inacabable de posibilidades simbólicas hayan llenado la última parte, la más importante, de la vida del arquitecto, que vuelve a plantearnos una paradoja en ese terreno. Un geómetra de su complejidad y riqueza, un estructuralista convencido, capaz de manejar las formas, por ejemplo, de las naves y las torres de la Sagrada Família, es capaz, en la misma obra, de levantar un gran retablo barroco en la fachada exterior del Nacimiento.

A la derecha:
Modelo antifunicular de la iglesia de la Colònia Güell (fig. 4)

Esa primera entrada conceptual en los planteamientos gaudinianos nos lleva, pues, a la última de sus paradojas, la más importante del personaje. Por un lado, tenemos





Rampa de bajada a las cuadras del Palau Güell (fig. 7)



En el vestíbulo del Palau Güell se observa la importancia de las formas y texturas de la plementería (fig. 5)

al geómetra preciso y de un nivel difícil de encontrar en ningún otro ejemplo en el mundo de la arquitectura, el profundo conocedor de la estática gráfica y aplicada que, al mismo tiempo, no plantea ningún tipo de análisis de las acciones horizontales. Otro aspecto de la misma paradoja es el hecho de que la obra de Gaudí es la de un arquitecto capaz de afrontar brillantemente cualquier problema constructivo, pero tan sólo con los materiales (fábrica, mampostería y el hierro más primitivo) utilizados siempre en compresión y tracción simple. Es decir, que Antoni Gaudí, de algún modo, queda al margen del mundo estructural que empezaba en 1875, el mundo que lógicamente debería haber atraído a un joven arquitecto con sus condiciones y sus ambiciones, el mundo de la escuela de Chicago, el del hormigón armado y el de los pórticos de hierro y hormigón, el mundo que más adelante configuró las estructuras de toda la arquitectura del siglo XX.

El espacio, definido por la geometría, la estructura y la textura, evoluciona, se acumula y se mezcla en las diferentes etapas de la obra gaudiniana. Esa evolución se aceleró en los últimos años, pero es un desarrollo que no presenta los mismos presupuestos



Estructura de soporte del patio circular de la Casa Milà (fig. 8)



Deformaciones no previstas solucionadas con platinas del Palau Güell (fig. 6)

teóricos o filosóficos de la arquitectura de principio a fin. Si nos fijamos únicamente en la disposición de la plementería, de lo que no es estructural pero cierra el espacio, encontramos las recargadas soluciones del vestíbulo del Palau Güell, una de las primeras obras globales (con proyecto y dirección; fig. 5, p. 52), en la que también, paradójicamente, se refleja la sorpresa del arquitecto ante comportamientos que no había previsto (fig. 6). Sin embargo, en el mismo edificio puede observarse la pureza de la rampa de bajada (fig. 7, p. 52) y del sótano de las cuadras. Veinte años más tarde rencontramos esos puntos extremos en la escenografía de los espacios de La Pedrera y de la Casa Batlló, donde se mezclará con la pureza racionalista, por ejemplo, de la estructura de soporte del patio circular del primer edificio (fig. 8) o de las buhardillas parabólicas de ambos (fig. 9 y 10, p. 54).

Normalmente, en la obra de Gaudí las formas más puras, sin ornamentación, se localizan en los espacios poco relevantes (los sótanos y las buhardillas en los edificios, las zonas inferiores en el Parc Güell; fig. 11, p. 54), hasta que, en la última obra, la Sagrada Família, la pureza se reserva para el interior de una forma rotunda, y el embrollo y

A la derecha:
Arcos catenarios de la buhardilla de la Casa Milà (fig. 9)

Abajo:
Arcos catenarios de la buhardilla de la Casa Batlló (fig. 10)







Fachada del Nacimiento del templo de la Sagrada Família (fig. 12)

A la derecha:
Muro de contención y pilares de soporte de un viaducto del Parc Güell (fig. 11)

la escenografía, para las fachadas exteriores (fig. 12). Esa pureza de complejas formas geométricas, en el caso de la columnata que sostiene la plaza del Parc Güell, con los basamentos de *trencadís* y el capitel, puede recordar el orden dórico (fig. 13, p. 56), pero también sugiere las columnas y los techos de Frank Lloyd Wright. Es indudable que en la complejidad de Gaudí pueden encontrarse elementos de modernidad que se originan en su profunda racionalidad.

En los recursos constructivos esa racionalidad se traduce, para Gaudí, en la utilización ya indicada de superficies regladas, que son de concepto sencillo, pero, en general, complicada construcción. La simplicidad se mantiene cuando se trata de curvaturas suaves y muy grandes, como los conoides que definen los muros de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família (fig. 14, p. 56), pero se pierde cuando la curvatura es fuerte y las diferentes superficies y materiales se intersecan y cambian constantemente. La racionalidad de Gaudí, de la que tanto hemos hablado, es, pues, más conceptual que constructiva. Se trata de un discurso que recorre cada obra, más que de una actitud a la hora de proyectar. Y ese recorrido deja su huella en cada elemento, manteniendo, sin embargo y sorprendentemente, la coherencia del conjunto. La forma en que la racionalidad lleva a una complejidad coherente es uno de los rasgos más atractivos de la obra de Gaudí; se trata de una complejidad muchas veces diluida, también, en un racionalismo ortodoxo.





Columnata que soporta la gran plaza del Parc Güell y que recuerda formas del orden dórico (fig. 13)



Conoides de los muros perimetrales de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família (fig. 14)

Un ejemplo de ese rasgo tan específico de Gaudí es la cripta de la Colònia Güell (fig. 15). Las columnas de basalto, macizas, pétreas y cortadas, aparentemente, de cualquier forma, siguen con unos arcos concéntricos de una geometría precisa. Esa racionalidad a simple vista opuesta en cuanto a los pilares y las bóvedas origina uno de los espacios interiores más ricos y sorprendentes de la arquitectura del siglo XX.

La sorpresa es siempre el resultado de un proceso, de un recorrido que no acaba de entenderse. Ese alejamiento que se observa en la obra de Gaudí por la dificultad de penetrar en su proceso creativo es otro de los motivos que justifican que la arquitectura gaudiniana prácticamente no haya tenido discípulos y haya acabado con él. Sin embargo, no fue ajena a su tiempo y participó de las características de lo que dio en llamarse modernismo: preeminencia de las formas curvas y abigarramiento decorativo combinados con la utilización al límite de los recursos constructivos tradicionales. Dentro de ese marco, Gaudí se distinguió porque se centró básicamente en el orientalismo y en el gótico como estilos inspiradores principales, el primero en cuanto a la decoración y el segundo en cuanto a la estructura. También constituye una de sus peculiaridades llevar al límite (mucho más que sus compañeros de generación) el diseño global, desde la estructura hasta el mobiliario. En ese aspecto hay que añadir el peso de toda la investigación y el trabajo que realizó con la finalidad de incorporar a la arquitectura los elementos simbólicos, los cuales invadieron por todas partes su última y tantas veces mencionada obra, la Sagrada Família. En ella el simbolismo lo alcanza todo, desde el material puro (pórfido, basalto, granito y calcárea, según las cargas que reciban las columnas), hasta las esculturas y los elementos que coronan las torres y las bóvedas. Todo ese exceso apasionado, la utilización de los efectos barrocos tanto en la superficie como en el espacio, y la auténtica obsesión por extraer imágenes decorativas de la naturaleza, una de sus fuentes de inspiración más importantes, ocultan al gran racionalista que encuentra formas de la arquitectura moderna que tan sólo surgen a partir del uso de estructuras avanzadas de hormigón armado.

La evolución de Gaudí entre todas esas características es, en resumen, un camino que va del eclecticismo a la pureza y la racionalidad. Es un recorrido que empezó en las primeras obras, parciales o de mobiliario urbano, que podrían resumirse en el posterior y medievalista Palau Güell, importante sobre todo por un trabajo de decoración exhaustivo, pero que ya plantea la serenidad y la austeridad de las cuadras en el sótano. Más adelante surgió el Gaudí más importante, el del Parc Güell, La Pedrera y la Casa Batlló. Es el período de las rupturas con las esquinas, los ritmos de las aperturas, el nuevo concepto de azotea, la fascinación cromática y formal. Finalmente, tenemos el Gaudí maduro, definitivo, el de la cripta de la Colònia Güell, las Escuelas Provisionales de la Sagrada Família y la propia Sagrada Família; el hombre solitario que construye su propia soledad, que deja atrás todas las reglas previas y los eclecticismos del pasado. Es la búsqueda de la expresividad en sí, el riesgo en cada decisión, la depuración (e inversión al mismo tiempo) increíble del gótico, el constructivismo y el cubismo del futuro vislumbrados en detalles, perspectivas y recursos constructivos. Y el cenit de su rigor y su pureza.

C. B. y J. M.

A la derecha:
Visión general del interior de la iglesia de la Colònia Güell (fig. 15)

