

Análisis de la metodología de Gaudí

Rehabilitación estructural de La Pedrera

Robert Brufau Niubó*

La casa Milá, popularmente conocida como «La Pedrera», puede ser considerada como la obra más representativa de la madurez del arquitecto catalán Antoni Gaudí (1852-1926). La restauración integral (1989-1997) llevada a término en el edificio por su nuevo propietario¹ para readaptarlo a la previsión de que, a mediano o largo plazo, pudiera reconvertirse en un edificio mayoritariamente público, ha permitido analizar algunos aspectos de la metodología operativa de Gaudí en lo que concierne a sus ideas sobre el trabajo resistente de determinados materiales y tipos estructurales.

La Pedrera se emplaza en el cruce de la importante arteria barcelonesa del paseo de Gracia con la calle Provenza. Fue proyectada en 1905, construyéndose entre los años 1906 y 1910 como promoción privada. Su configuración es la propia del ensanche barcelonés, con una planta subterránea destinada inicialmente para caballerizas, una planta baja de acceso con entresuelo y cinco plantas destinadas a vivienda. En la parte alta se emplaza el insólito espacio de sus «golfas»,² cubiertas con una singular cubierta ondulante.

Rehabilitación de la planta subterránea

El derribo, el año 1993, de un antiguo búnquer de hormigón armado que ocupaba una buena parte de la planta inferior, junto con la retirada de un conjunto de subdivisiones y recubrimientos que configuraban las aulas de una antigua academia, posibilitó la contemplación de su globalidad, del espacio desnudo que Gaudí había proyectado para el sótano del edificio.

El primer aspecto sorprendente de la planta inferior de la casa Milá es la convivencia de tres tipologías de columnas claramente diferenciadas, de los



La casa Milá fue proyectada en 1905, se inició su construcción en 1906 y concluyó en 1910.

¹ Una entidad bancaria, la Caixa de Catalunya, adquirió recientemente el edificio. El notable estado de degradación del mismo hizo imprescindible un plan general de actuación, que comenzó por la restauración de las plantas nobles (baja, entresuelo y principal), continuando por la planta subterránea y acabando por los desvanes y la cubierta, mientras que los despachos y viviendas que ocupan las plantas intermedias eran recuperados y rehabilitados a medida que quedaban disponibles.

² La denominación popular «las golfas de La Pedrera» hace referencia al vocablo catalán «golfes», referido al desván que está ubicado bajo la cubierta de un edificio, que tiene como característica principal su doble función: como almacén de trastos y como cámara de aislamiento climático de las viviendas de la última planta. En este caso particular, Gaudí las proyectó, además, como lavadero de las viviendas, dándoles un fácil acceso a la magnífica cubierta, prevista a su vez como tendedero.

*Doctor, arquitecto profesor titular del Departamento de Estructuras en la Edificación, en la Universitat Politècnica de Catalunya.



La arquería presenta numerosas variaciones en espesor, proyección horizontal y en la figura que los arcos dibujan.

aproximadamente cien pilares que conviven en la planta, una veintena son metálicos, aproximadamente una treintena de piedra caliza y el resto de ladrillo. Sea cual sea el material empleado, la mayoría de las secciones son de planta circular.³ Las primeras dudas surgieron a causa de la gran divergencia de hipótesis formuladas por diversos estudiosos respecto a la procedencia de la piedra caliza con que se construyeron las columnas.⁴ Enseguida se hizo evidente la conveniencia de conocer con garantías el material para asegurar que los pilares de la planta baja de La Pedrera tuviesen la seguridad necesaria en previsión del futuro uso público integral del edificio.

Ante esta necesidad, y dadas las circunstancias, se optó por realizar un test amplio y definitivo, con extracción de una probeta de cada pilar, que fue ensayada hasta la rotura en laboratorio. Todos los testigos realizados dieron resistencias a compresión, para la caliza, superiores a los 450 kg/cm², resultando una resistencia estimada para el material próxima a los 480 kg/cm², valor que se tomó como referencia para realizar las oportunas comprobaciones. Dada la ausencia de una normativa española al respecto de la construcción con este tipo de material, se consultaron diversos tratados y normativas extranjeras, encontrando una cierta coincidencia en el hecho de que el coeficiente de seguridad global a emplear debería situarse entre 6 y 10. Considerando que se había ensayado el 100% de los pilares, con lo que se obtenía una fiabilidad cierta del comportamiento del material, se optó por acortar dicho coeficiente entre 6 y 7. Ello permitía aceptar que la caliza trabajase, como máximo, a una tensión entre 70 y 80 kg/cm², magnitud que se matizaba en función del estado de conservación de cada elemento y de la calidad del mortero de sus juntas.

Sorprendentemente, al realizar una comprobación ajustada del estado de cargas global del edificio, se pudo comprobar que Gaudí y sus colaboradores⁵ habrían dimensionado sus soportes

³ Gaudí realizó diversas pruebas para comprobar que la forma cilíndrica era, desde un punto de vista estructural, la más adecuada para sus columnas. Lo hizo con las prensas de ensayo de su amigo y cliente Hermenegildo Miralles (véase *La Pedrera de Gaudí*, de Joan Bassegodai Novell, p. 22).

⁴ De un estudio realizado por la cátedra de Petrología de la Universidad Politécnica de Oviedo, se dedujo que Gaudí había llegado a emplear, en La Pedrera, calizas procedentes de, como mínimo, de cinco canteras: Garraf, Vilafranca, Tarragona, La Floresta y Vinaixa, de muy diversa calidad y características resistentes dispares. A causa de las dificultades de acceso y de inspección, los expertos no pudieron conseguir datos concretos respecto a la fiabilidad de la caliza de los pilares de la planta subterránea.

⁵ Entre los colaboradores de Gaudí en lo concerniente a la estructura de la casa Milá, hay que mencionar a Jaume Bayó (1874-1961), catedrático de resistencia de materiales en la Escuela de Arquitectura de Barcelona, desde 1912 hasta 1944. Otros colaboradores fueron los arquitectos Joan Canaleta (1875-1950) y Domènech Sugranyes (1879-1938). Los tres participaron durante el proceso constructivo de la estructura de La Pedrera.

verticales a partir de un proceso de cálculo suficientemente ajustado como para obtener tensiones de compresión acotadas entre 60 y 75 kg/cm² en todas las columnas calizas, con lo que, si éstas se hallasen en buen estado de conservación y no fuera de prevenir un cambio de uso general del edificio, no hubiese sido necesario prácticamente refuerzo alguno.⁶ Resultados muy similares se consiguieron al analizar las columnas de fábrica de ladrillo, contrastándose asimismo resultados concordantes con el dimensionado de Gaudí. En lo que concierne a los pilares metálicos, se repite un hecho significativo: Gaudí los proyectó utilizando únicamente tres opciones de sección. Los cálculos actuales han detectado una transmisión de cargas mayor precisamente en aquellos pilares que el arquitecto dimensionó con mayor sección, y menor cuando los proyectó más pequeños. La constatación de que, fuese cual fuese el material empleado, los valores conseguidos mantienen un paralelismo con la sección que Gaudí le dio a cada columna, confirma que el arquitecto no dimensionó La Pedrera partiendo de criterios experimentales o empíricos, sino que existió un proceso de análisis decididamente numérico.

Este razonamiento va contra la opinión, bastante extendida entre algunos estudiosos de la obra de Gaudí, de que las estructuras de sus edificios la definía y concretaba «sobre la marcha», basándose en una intuición excepcional. Como mínimo, en lo que a la casa Milá se refiere, después de las comprobaciones realizadas se puede afirmar rotundamente la existencia de un procedimiento analítico.⁷

Intuición y conocimiento estructural se manifiestan juntos especialmente en tres unidades constructivas de la casa Milá. La primera de ellas se encuentra precisamente en esta planta subterránea, coincidiendo con la cubrición de la base del patio circular de la esquina del Paseo de Gracia, Gaudí proyectó, para esta zona de casi 13 metros de diámetro, una singular «rueda de bicicleta»⁸ que descansa sobre una circunferencia de soportes perimetrales con 15 radios desdoblados, cada uno de ellos en un cordón superior comprimido y otro inferior traccionado. Las 15 piezas metálicas dispuestas radialmente son recogidas en la parte central por un cilindro de tracción de unos 80 cm de altura que, mediante un ingenioso juego de apriete de la tornillería, postensa ligeramente los radios. La utilización de este singular elemento tipológico evidencia la audacia del arquitecto, avanzado en casi 50 años respecto a la utilización posterior del modelo.⁹

La tipología estructural del cuerpo principal

Una segunda unidad tipológicamente diferenciada queda definida por el conjunto estructural que configura el cuerpo principal de la casa Milá, re-

suelto a base de pilares, vigas y forjados horizontales que posibilitan plantas totalmente diáfanas sin muros de carga interiores que interfirieran el espacio. Actualmente, este sistema edificatorio aporticado es muy convencional y de repertorio cotidiano, pero habría que situarse en el año 1905 para advertir la importancia de la decisión de Gau-

⁶ Fue interesante constatar, a modo de ejemplo, que grupos de pilares muy próximos y que aparentemente realizaban similares funciones resistentes, habían sido dimensionados con diámetros ligeramente diferenciados. Gaudí hubiera podido proyectarlos con la misma sección, pero optó por ajustarlos a su trabajo exacto, aspecto que se ha constatado al realizar las comprobaciones pertinentes, ya que las cargas finales obtenidas resultaron ser sensiblemente proporcionales a las áreas de las secciones respectivas.

⁷ En el libro de J. Matamala *Antonio Gaudí, mi itinerario con el arquitecto* (1960), se cita un comentario de Gaudí al respecto: «¡Qué gran cosa es la inteligencia en la especialidad de cada uno! Hoy, con Bayó, hemos estado inmersos en el cálculo durante muchas horas y no me siento cansado. Lo mismo le ha ocurrido a Bayó, y esto que las operaciones han sido constantes. No hay duda de que Bayó es un caso admirable de rapidez, de mucha utilidad en circunstancias como ésta».

⁸ Prestigiosos cronistas de Gaudí cualifican esta estructura de manera muy dispar, en unas ocasiones como «paraguas», en otras como «cúpula invertida». Ni una ni otra son nomenclaturas que identifiquen correctamente el trabajo resistente de una pieza tan singular.

⁹ Fue en el año 1955 cuando Zetlin proyectó una estructura basada en el mismo principio para la cubrición del techo circular del auditorio de Utica en Nueva York.



Las golfas de La Pedrera ocupan una extensión de 1 275 m².



la casa Milá. Estos deambulatorios, proyectados inicialmente como lavaderos de la finca, eran humildes dependencias de servicio para la comunidad, que fueron reconvertidas, después de la rehabilitación realizada el año 1996, en el llamado «Espacio Gaudí».¹⁰

La mayor singularidad de las golfas radica en su elegante y audaz concepción estructural, a base de 265 arcos diafragmáticos de ladrillo tabicado, todos ellos diferentes,¹¹ con un alzado de trazado parabólico que se adapta, en cada caso, a la forma

¹⁰ El «Espacio Gaudí» acoge en la actualidad una colección de maquetas explicativas de los métodos de trabajo del arquitecto. Tal como se había supuesto, el conjunto arquitectónico de La Pedrera, del que forman parte el «Espacio Gaudí», se ha convertido en uno de los museos más visitados de Barcelona. En su proyecto original, el forjado de base de este espacio se había calculado para una carga total de 450 kg/m². La normatividad española actual exige, para locales de reunión y espectáculo sin asientos fijos, una sobrecarga de uso de 500 kg/m². Considerando que la azotea y las golfas de la casa de Milá tenían que estar preparadas para poder ser utilizadas, en algún momento, como espacio abierto a la realización de actos que congregasen a un público numeroso, se optó por proceder al refuerzo de su forjado de base, mediante la incorporación de una capa de compresión adecuadamente conectada a la vigería metálica inicial.

¹¹ Dado que la distancia de base de cada arco y su altura son diferentes en cada caso, los arcos también deberían serlo.

dí, en franca contraposición al uso sistemático del muro de carga para la resolución de edificios de viviendas. No hay constancia de que con anterioridad se hubiera utilizado en Barcelona una estructura de tales características.

En las diversas etapas recientes de recuperación del edificio, apenas ha habido que incidir en esta estructura, y las pocas intervenciones realizadas han sido motivadas por aumentos localizados del estado de cargas como consecuencia de cambios de uso.

La sorprendente construcción de la planta superior

Restaría una tercera unidad tipológica singular en La Pedrera, probablemente no por su tamaño, sino por su concepción, la más audaz de entre todas las que el arquitecto utilizó a lo largo de su obra. Nos referimos a la estructura de cubrición de su última planta, que sirve de soporte a la singular cubierta ondulante y a los numerosos grupos escultóricos de la azotea. El espacio liberado por esta estructura es conocido popularmente como «les golfes de La Pedrera» y ocupa una extensión de 1 275 m², en un ámbito único que formaliza un «8» en planta, con un trazado que se acentúa con el conjunto de deambulatorios que rodean los dos patios principales de



Reconversión integral, en 1954, del espacio ocupado por las golfas, en apartamentos duplex.



de la singular azotea, tanto en altura (de 2.50 a 7 metros) como en distancia entre arranques (de 3 a 9 metros). La disposición de estos arcos en planta, en torno a los dos patios principales, y con la pauta de las seis grandes torres-escalera interiores,¹² con las cuales inician los arcos un extraordinario diálogo de relación a partir de una singular gama de entregas de éstos en aquéllas, define un espacio único e irrepetible en la arquitectura del siglo XX.

La arquería presenta numerosas variaciones. La primera de ellas la encontramos en su espesor, puesto que si bien mayoritariamente los arcos están conformados con ladrillo macizo de 4,5 cm, en aquellos casos en que Gaudí lo consideró necesario, los dobló o incluso en alguna ocasión los triplicó. La casi totalidad de arcos iniciales estaban formados por tres roscas de ladrillo a soga, completándose el arco con hiladas horizontales del mismo tipo de ladrillo, hasta alcanzar el plano de cubierta.

Una segunda variación la presenta la proyección horizontal de las directrices de los arcos. Curiosamente son muchos los que no definen una proyección en línea recta, sino que se quiebran en su clave girando en torno a la posición de la torre-escalera más próxima, a la cual se subordinan sin perder, no obstante, su identidad como arcos. Como consecuencia de este movimiento en planta, Gaudí dispuso la colocación de unas mamparas verticales del mismo tipo de ladrillo, que unen las claves de todos los arcos, estabilizándose al tiempo que absorbiendo las fuerzas transversales de tracción o de compresión, según las zonas derivadas de sus frecuentes quiebras. En función de la magnitud de estas fuerzas, resulta un espesor u otro de mamparas, lo que confiere a la visión cenital del conjunto un especial aspecto de orden y control de la descomposición de las fuerzas compresivas conducidas por el conjunto de la arquería.

Una tercera variación la encontramos en la figura que los arcos dibujan. Si bien mayoritariamente describen recorridos parabólicos o catená-

ricos, no se puede hablar de una ley geométrica exacta en su trazado, que queda supeditado en cada caso a las exigencias de rango superior impuestas desde la funcionalidad de la azotea y desde la disposición de los patios interiores en planta.

El interjeje de los arcos es también variable, con una distancia en los arranques nunca superior a los 90 cm, pero con frecuentes variaciones motivadas, por un lado, por la disposición de las ventanas de las golfas, y por otro, por la exigencia estructural de concentrar mayor número de ellos en aquellas zonas en que la arquería presenta una mayor sollicitación compresiva. En función del giro de la planta,

¹² Las seis torres-escalera, de planta circular de unos 3 metros de diámetro, podrían ser interpretadas como potentes elementos estructurales con capacidad para canalizar las sollicitaciones horizontales hasta la estructura principal. Sin embargo, Gaudí las asentó con apoyo simple encima de la estructura de vigas del último forjado, sin mayor conexión que la del simple contacto entre los ladrillos de base de la torre y el plano superior de acabado de la capa de compresión del forjado.



La ausencia total de recubrimientos pone de manifiesto la voluntad de sencillez de este espacio.



determinados arcos se unen en grupos de 2, 3, 4 ó 6 en su arranque, separándose al levantarse, mientras que otros, cuyo inicio se produce a distancias considerables, se juntan en la clave, coincidiendo en su encuentro con las torres-escalera, dibujando el conjunto curiosos esquemas de hoja de palmera.

Es interesante conocer el método con que estos arcos fueron trazados. Sobre un paramento vertical enyesado se marcaba una línea horizontal en la parte alta. De dos puntos de ella situados a la distancia coincidente con la abertura deseada para la base de cada arco en cuestión se suspendía una cadena que definiera un cuelgue coincidente con la altura libre deseada para el arco. Conseguido el trazado catenárico propio de la cadena a tracción, Gaudí y sus ayudantes lo reproducían sobre la pared enyesada para que un carpintero pudiera construir la cimbra de encofrado definitiva que se colocaba en su sitio invertida para la construcción de las tres roscas que definirían el arco finalmente. Gaudí aplicaba el principio de la «inversión» para convertir un trabajo de tracción pura en otro invertido de signo contrario, es decir, de compresión pura.

Este procedimiento de obtención de las directrices de los arcos, basado en un principio muy racional de búsqueda del esfuerzo axial puro, in-

curría, sin embargo, en tres pequeñas imprecisiones conceptuales:

a) El trazado de la catenaria debería identificar el centro del conjunto de las tres roscas de la arquivolta, no su cara inferior.

b) Las cargas que los arcos reciben no están uniformemente repartidas sobre el eje de la cadena, sino que tienen una magnitud ligeramente variable respecto a la proyección horizontal del arco, con lo que la correcta geometría de éste debería de ser más parecida a la de una parábola que a la de una catenaria.

c) Al añadir las hiladas horizontales de relleno de los senos que complementan el arco hasta llegar al plano de cubierta, Gaudí mixtificaba el comportamiento resistente de éste, convirtiéndolo en un modelo híbrido, a mitad de camino entre un arco puro y un pórtico de canto variable.

En la conjunción de estas tres pequeñas imprecisiones, que separadamente apenas tendrían incidencia para un hipotético comportamiento irregular de los elementos, y en el efecto manipulador de las innumerables intervenciones arquitectónicas posteriores –el denominador común de las cuales parece haber sido la desconsideración de la lógica estructural que guió a Gaudí en el planteamiento global del conjunto– hay que encontrar la explicación de algunas patologías detectadas a lo largo del periodo de restauración reciente del edificio.

La reconversión integral, el año 1954, del espacio ocupado por las golfas, en apartamentos-duplex,¹³ con abundantes recortes y mutilaciones de

¹³ El proyecto de reconversión de las golfas en 13 apartamentos-duplex fue realizado en 1954 por Francesc Barba Corsini, arquitecto que formaba parte del Group R, conocido movimiento neorracionalista que se desarrolló en Catalunya durante aquellos años y que ejerció una notable influencia en la formación de las nuevas generaciones de arquitectos surgidos después de los 60. El proyecto de Barba Corsini fue considerado en su momento como una intervención modélica de reinterpretación de la arquitectura de Gaudí. No era de extrañar que la demolición de los apartamentos el año 1994 generara una importante polémica entre partidarios de recuperar el espacio proyectado por Gaudí y partidarios de mantener los apartamentos de Barba como muestra de un cierto tipo de arquitectura representativa de un movimiento que tuvo su esplendor en Barcelona a mediados del siglo. Los trece apartamentos-duplex estaban destinados a vivienda y la mayoría se organizaron en dos niveles con extensas zonas a doble altura aprovechando la generosidad del espacio del desván, lo que confería a estos habitáculos un cierto carácter de piezas de un solo ambiente. Barba Corsini compuso una muy particular reinterpretación de la manera de construir de Gaudí, tamizándola a partir de una visión más culta de la textura y del aprovechamiento de las formas preexistentes. Dispuso, en cubierta, trece nuevas chimeneas que pasaron a convivir, con mayor fortuna, con las inicialmente proyectadas por Gaudí, y aumentó el tamaño de las aberturas exteriores, ensanchando algunas ventanas, creando otras nuevas y convirtiendo las más bajas en puertas para ecceder al pasadizo perimetral del nivel inferior de las golfas.

los arcos originales,¹⁴ alteró sensiblemente el equilibrio del conjunto. Un buen número de arcos vieron reducida su arquivolta de tres o dos rosas, mientras que otros sufrieron recortes locales para facilitar la ubicación de algunas piezas del nuevo programa arquitectónico. Eran especialmente notables algunas fisuras en arcos mutilados asimétricamente. Todo ello incrementó notablemente el estado tensional del material y provocó, en no menos de 30 arcos, la separación entre el conjunto de las rosas y de las hiladas de ladrillo que configuraban los senos de los arcos. A causa de esta separación se alteraba totalmente el comportamiento de los arcos afectados, lo que ocasionó pandeos locales en algunos de ellos, fisuras de tracción de cierta entidad que afectaban grupos de arcos contiguos en las mismas zonas de su trazado,¹⁵ e incluso corrimientos laterales de algunos de sus arranques. Estos comportamientos patológicos hubieran sido imposibles de haberse mantenido la geometría inicial de cada elemento.

Otro aspecto importante a considerar era la forma como se transmitían las cargas generadas por los forjados intermedios de los duplex, habida cuenta de que no existían paredes maestras ni tan sólo tabicónes en toda la planta libre. Las sospechas al respecto resultaron ciertas, ya que la perfilera metálica de estos altillos se apoyaba directamente sobre los arcos-tabique, entrando en unas ocasiones por testa frontal y en otras oblicuamente. En muy pocos casos se ha observado que se hubiesen dispuesto elementos de reparto de cargas entre varios arcos. La protección antioxidante de estos pequeños perfiles metálicos era escasa, lo que provocaba algunos problemas de degradación en las testas de las viguetas que repercutían en la figuración de los propios arcos, como consecuencia de la fuerza expansiva del acero en fase de oxidación. Si suponemos que la perfilera se había proyectado –probablemente para minimizar el canto de su sección– sin imponer condiciones de flecha, se explica el cimbreo que se detectaba en algunos altillos y que contribuyó a provocar una acentuación de la degradación de ciertos encuentros entre vigueta y arco.

Aspectos de la intervención 1994-1996 Consideraciones previas

Cuando un arquitecto se plantea la consolidación de un edificio clasificado como «de patrimonio histórico-artístico», y por tanto encajado dentro de un periodo muy concreto, queda condicionado e inicialmente atenazado en sus decisiones por las imposiciones que el propio edificio le impone, de realidad constructiva, por un lado, y por otro de apariencia formal y sujeción a las reglas de un estilo. Unas y otras, estas imposiciones constituyen lo específico del periodo al que aquél pertenece.

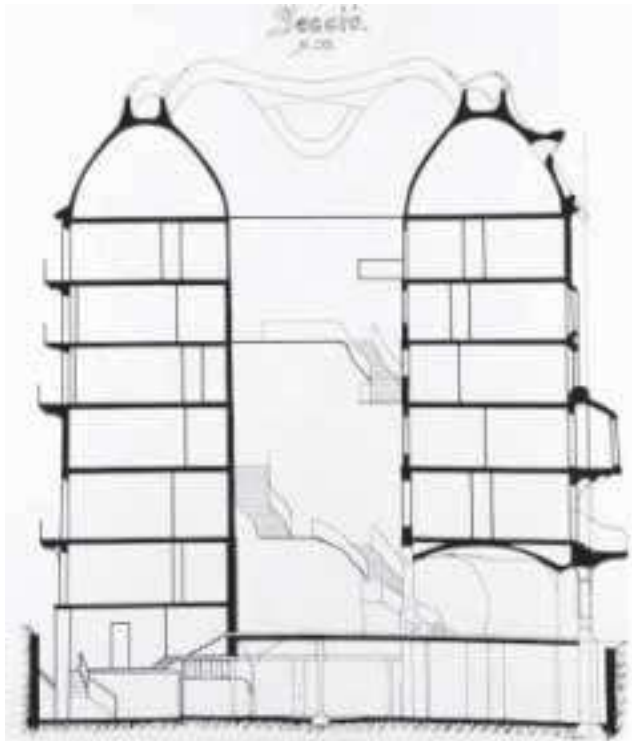


¹⁴ Numerosas manipulaciones posteriores a la remodelación de 1954 acabaron de estropear el conjunto estructural de las golfas, hasta el punto que ordenamos el apuntalamiento total de su estructura en el mismo instante en que pudimos tener conocimiento de su verdadero estado.

¹⁵ Destacaban especialmente determinadas fisuras horizontales de tracción en algunos arcos, en algunas ocasiones con separación frontal de hasta 4 mm. Entre sus labios y en otras con importantes corrimientos tangenciales, poniendo de manifiesto un trabajo muy distorsionado con respecto a las previsiones iniciales de Gaudí. En un reciente estudio, por elementos finitos, de una serie numerosa de arcos afectados, detectamos zonas traccionadas en la rosca inferior de la arquivolta, que coincidían con las figuras constatadas, tanto en la clave como en los arranques de algunos arcos, para geometrías y estados de carga concretos.



La necesidad de albergar un espacio de uso público, lleva a la adecuación térmica del recinto.



La estabilidad general de la planta cubierta, parecía estar garantizada por la estratégica presencia de seis torres escaleras.

En un primer posicionamiento, el arquitecto puede pensar que no podrá enfrentarse a ellas sin incurrir en contradicción con aquello que, precisamente, constituye lo esencial que debe, en unos casos, recuperar –si el edificio ha sufrido manipulaciones ajenas y distorsionadoras– o, en otros, consolidar –si el edificio ha podido sobrevivir fiel a sí mismo, aun con dificultades, a lo largo de los tiempos.

Pero no es ésta la única actitud válida, ya que, a partir del momento en que él es el escogido



Los arcos deben ser revisados en su totalidad para poder adaptarlos a la nueva situación.

para la rehabilitación, el arquitecto puede suponer que la elección está basada precisamente en la aceptación, por parte de la entidad propietaria del edificio, de su «manera» de trabajar y proyectar, hasta el punto de que, la razón de tal encargo puede radicar en la conveniencia de que éste aporte sus conocimientos profesionales para incorporar sus vivencias proyectuales a la intervención, forzando una actitud más personal y subjetiva y menos supeditada a los condicionantes estrictamente históricos. El arquitecto podría, pues, «re-interpretar» el edificio. Esta vía, que reputados profesionales¹⁶ han utilizado con cierta frecuencia y, a menudo, con éxito, presenta, no obstante, un riesgo evidente cuando el proyectista se deja llevar por su deseo manipulador sin calibrar con rigor la trascendencia de ciertas decisiones que, aun sin ser erróneas, sí que podrían llegar a ser irreversibles, negando para siempre la recuperación de las iniciales características esenciales del edificio.

Implicaciones del nuevo uso

La reconversión del espacio de las golfas en futuro museo Gaudí y la recuperación de la azotea como plaza pública, ambos abiertos al numeroso público que a diario visita La Pedrera, introduce un nuevo aspecto en la consolidación, ya que ambos deben dar respuesta a un estado de cargas elaborado de acuerdo con la vigente normativa en lo concerniente a las sobrecargas de uso a considerar en espacios públicos de reunión, máxime si se tiene en cuenta el tipo de visitas turísticas que se organizan, siempre a base de grupos numerosos con acompañamiento de guía, sistema que genera notables sobrecargas concentradas en pequeños espacios. La carga total con que, presumiblemente, fue calculada la base de la última planta del edificio, a tenor de las comprobaciones realizadas respecto a la perfilera de los forjados, nos sitúa en el entorno de los 450 kg/m². El peso propio del forjado está muy próximo a los 200 kg/m², cifra que deja para la suma de pavimentos y sobrecargas un máximo de 250 kg/m², magnitud absolutamente insuficiente¹⁷ para el nuevo uso previsto.

En lo concerniente a la nueva utilización del espacio situado directamente bajo cubierta, la necesidad de albergar un espacio de uso público, lleva a la necesidad de adecuar térmicamente el recinto, con doblado del plano de ladrillo de fachada, tanto de la fachada vertical como de la horizontal,

¹⁶ Es fácil encajar al propio arquitecto Barba Corsini y a su intervención de 1954 en La Pedrera en esta situación.

¹⁷ La normativa española actual exige, para locales de reunión y espectáculo sin asientos fijos, una sobrecarga de uso de 500 kg/m². No cabe ninguna duda de que la azotea y las golfas de la casa Milá han de estar preparadas para poder ser utilizadas, en algún momento, como espacio abierto a la realización de actos que congregar a un público numeroso.

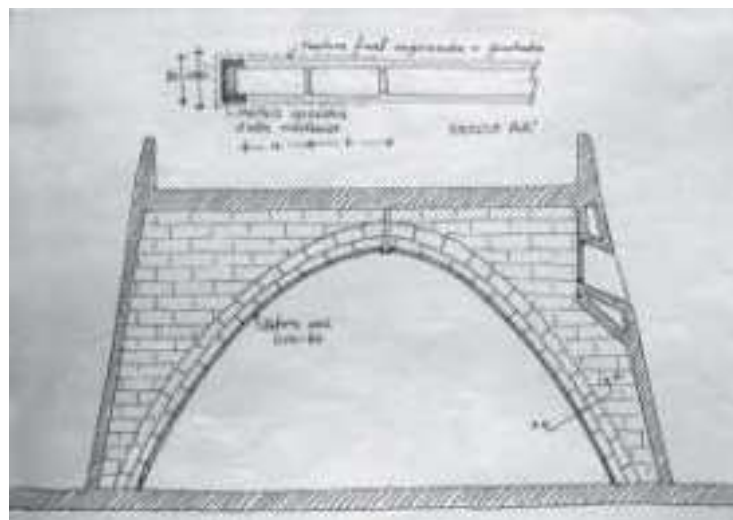
para obtener una cámara interna de acondicionamiento climático. Esta cámara será aprovechada con una triple finalidad, ya que, por un lado, albergará los paneles de aislamiento climático, por otro permitirá el paso de las instalaciones de desagüe de cubierta y, finalmente, en una tercera utilidad, será reconocida como elemento de estabilización de la arquería, pero éste es un aspecto que será comentado más adelante. En cualquier caso, esta intervención introducirá un cierto incremento del peso propio de la cubierta que agrava todavía más la insuficiencia de la perfilera de base y de la propia configuración de la arquería resistente. Destacar, en último término, que las obras de impermeabilización de la azotea incrementan asimismo el peso propio de ésta, lo cual, si se considera en paralelo al inevitable incremento de su sobrecarga de uso, nos obliga a replantear las premisas iniciales de Gaudí respecto al trabajo de los arcos cerámicos, que deben ser revisados en su totalidad para poder adaptarlos a la nueva situación.

Consideraciones sobre la estabilidad general de la cubierta

La estabilidad general de la planta cubierta parecía estar garantizada por la estratégica presencia de las seis grandes torres-escalera que canalizan la transmisión de las solicitaciones horizontales hasta la estructura principal. En cualquier caso, fue necesaria una comprobación al respecto, puesto



Las primeras opciones incorporaban metálicos corridos en el borde frontal.



Una de las cinco soluciones de refuerzo de los arcos.

que era posible la opción de prolongar alguna de las chimeneas de ventilación de tamaño intermedio, apeadas en la intervención de 1954, hasta el forjado de base del desván, como así se hizo.

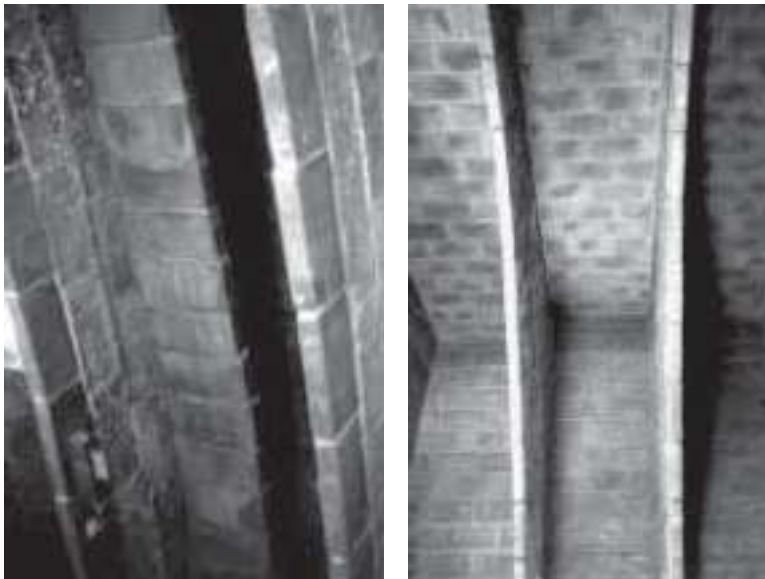
Análisis de las torres-escalera. Ya conocidas las reacciones en el encuentro de los arcos con las torres, se procedió a comparar el buen comportamiento de éstas para garantizar la estabilidad del conjunto, en especial en lo que concierne a las hipótesis de fuertes presiones eólicas. La gran dimensión de la torre en planta (ϕ : 3 m) y su forma circular favorable para garantizar un buen comportamiento sea cual sea la dirección de los vientos dominantes, aseguran un aceptable comportamiento del conjunto. Únicamente una de las seis torres fue reforzada con la introducción de un mallazo envolvente de acero inoxidable en un amplio sector traccionado, con posterior incorporación de una nueva capa de ladrillo adosada que recuperara la imagen especial.

Estudio de los forjados de base del desván. El nuevo estado de cargas obligaba al refuerzo sistemático de la totalidad del forjado de base. Para ello se optó por convertir vigas y viguetas metálicas en piezas «mixtas», con solidaridad de trabajo entre el perfil de acero y la capa de compresión añadida de 6 cm de espesor. La disposición de conectores adecuados entre ambas partes garantizaría el conveniente comportamiento conjunto de hormigón y acero. Respecto del refuerzo de los forjados, cabe mencionar la utilización de hormigones de aceptable resistencia ($f_{ck}=200 \text{ kg/cm}^2$) y baja densidad (1.5 Tn/m^3) conseguidos a base de áridos ligeros y una dosificación con aditivos previamente experimentada en laboratorio. Este bajo peso propio era necesario para no incrementar en exceso el peso propio general de la planta superior.



Consideraciones sobre la reconstrucción de los 265 arcos

Estimación de la resistencia del material. Un aspecto invariante en toda la construcción de las golfas, era la textura y calidad del ladrillo empleado. Mientras que se llegó a detectar el uso de hasta cinco tipos de piedra caliza en la construcción general del edificio, de acuerdo con la función que



Cada arco fue reprojectado para poder responder satisfactoriamente ante los nuevos requerimientos.

cada parte de éste debía desempeñar, Gaudí utilizó, para el ladrillo de la parte alta, una única calidad de fábrica,¹⁸ tanto para las rosas como para los senos de los arcos, al igual que para las mamparas y los cerramientos exteriores de patio. Este aspecto confirma la consideración que Gaudí otorgaba a las golfas como zona de servicio del resto de la finca. La ausencia total de recubrimientos o tratamientos superficiales pone de manifiesto la voluntad de Gaudí de ejemplificar la sencillez de este espacio.

Atendidas estas consideraciones, la primera dificultad fue fijar los límites tensionales que pudieran ser considerados como aceptables para la fábrica de ladrillo que configura los arcos-tabique. Aun disponiendo del resultado de la resistencia a compresión de algunas probetas testimonio extraídas de la propia obra y analizadas en laboratorio, dada la considerable influencia de la intervención de 1954 y la alteración que ésta supuso en el comportamiento general de todo el conjunto, resultaba extremadamente difícil relacionar el estado de figuración del elemento con la tensión admisible de su material. Tampoco se disponía de valores fiables para la determinación del módulo de elasticidad longitudinal (E , módulo de Young) puesto que su determinación, a partir de las muestras extraídas, no ofrecía suficiente confianza como para nuestros cálculos en ello.

Ante esta situación optamos por verificar el comportamiento de aquellos arcos –individualmente y en conjunto– que no habían sufrido daño alguno a lo largo de sus casi 90 años de vida, aun habiendo estado afectados por mutilaciones o por recorte de rosas. Se consideraron solicitaciones horizontales de tipo eólico de acuerdo con la normativa vigente, cuyo efecto se combinó con el de las máximas acciones gravitatorias que los arcos hubieran podido soportar a lo largo de su historia conocida.

Se utilizaron sencillas técnicas basadas en el método de los elementos finitos para la obtención de los estados tensionales más desfavorables de cada uno de los arcos modelizados. Una vez recogidos los datos de un buen número de entre los más significativos, se recogieron los valores de las máximas tensiones de compresión que cada pieza habría soportado sin haberse fisurado, y en las condiciones de mutilación de rosas que le correspondieran. Estas cifras se afectaban, en cada caso, con un factor de corrección que tuviera en cuenta la altura de la clave del arte, contemplando así los efectos de la esbeltez en la resistencia de los ar-

¹⁸ Para toda la planta se utilizó ladrillo cerámico manual de color rojizo y con excelente cocido. Previamente al inicio del proyecto de consolidación se realizaron algunos ensayos de la fábrica de ladrillo empleada por Gaudí. Ningún resultado dio valores inferiores a los 150 kg/cm² como resistencia a compresión del ladrillo, mientras que el mortero presentaba tensiones próximas a los 60 kg/cm².

cos. Ello nos permitiría una aceptable aproximación de resistencia real de cada arco-tabique, en el estado más desfavorable a que hubiera estado sometido en función de su altura y de su espesor, entendiendo como «resistencia» la máxima tensión compresiva alcanzada en cualquiera de sus puntos, con una buena respuesta por parte del elemento.

Opciones de refuerzo. A lo largo de los primeros meses del proyecto, cuando aún pesaba mucho la blanca y limpia imagen «enyesada» que ofrecían los apartamentos de Barba Corsini, se debatieron y probaron hasta cinco soluciones de refuerzo de los arcos, realizando una maqueta *in situ* en un arco real para cada opción:

- ◆ Las dos primeras opciones incorporaban pequeños perfiles metálicos corridos en el borde frontal, siguiendo la directriz completa de los arcos [la primera con sección CPN-80 recogiendo las dos roscas de ladrillo encontradas en la mayoría de arcos al derribar los antiguos apartamentos; la segunda con la pletina de 85x10, con numerosas varillas laterales de pequeño diámetro que se anclaban en dos pequeñas capas de mortero de alta resistencia (de 2 cm de espesor) tangentes por los dos lados a la cerámica existente en toda su superficie]. Estas dos soluciones estaban siempre obligadas a ser enmascaradas a base de revocos y pintura, pero presentaban la ventaja de aprovechar los restos de arco resultantes de la intervención del arquitecto Barba Corsini. El inconveniente máximo era la excesiva anchura que cogían los arcos-tabique una vez terminados (alrededor de 10 cm) que desfiguraba totalmente la imagen de liviandad y finura del proyecto inicial de Gaudí.

- ◆ Las dos opciones no utilizaban perfilaría metálica por la dificultad de adaptarla en la propia obra a cualquier curvatura,¹⁹ sino que empleaban morteros de alta resistencia, convenientemente armados longitudinalmente, con vertido líquido sobre moldes de chapa de poco espesor fácilmente adaptables *in situ* a la curvatura específica de cada arco. La diferencia entre ellas radicaba en la forma en que se solidarizaban con el resto de arco cerámico. Estas dos opciones implicaban, al igual que las dos anteriores, un enyesado y pintado para ocultar la textura del mortero, visualmente incompatible con la de la fábrica de ladrillo restante. Con respecto a las anteriores opciones metálicas, podemos mencionar que el grueso final era sensiblemente menor, ya que una de ellas podía ser acabada con unos 6.5 cm. También era una ventaja el hecho de que se podían aplicar directamente sobre los arcos resultantes del derribo de los apartamentos.

- ◆ La quinta y última opción, que fue la escogida finalmente, se basa en la recuperación de la concepción guadiniana de este espacio. Se reconstruirían todos los arcos hasta obtener la imagen y los espesores iniciales, constatables en la abundante documentación fotográfica recogida. Para ello se contactó con un artesano ceramista que estudió la



textura, forma, color y dimensiones de los tres formatos de ladrillo utilizados por Gaudí, con el fin de poderlos reconstruir lo más fielmente posible. Se

¹⁹ No se encontraron, en todas las golfas, dos arcos con el mismo trazado. Se hubieran requerido 265 procesos de curvatura en taller, uno para cada arco, lo cual devenía una dificultad añadida para las dos primeras opciones.



Eran numerosos los arcos fisurados a tracción, como consecuencia de la aparición de comportamientos imprevistos, derivados mayoritariamente de una manipulación asimétrica en su geometría.



realizaron pruebas de la resistencia necesaria, de la consistencia y de la facilidad de aplicación.

◆ Algunos aspectos de la solución escogida. Atendiendo a su comportamiento futuro, cada arco fue re proyectado para poder responder satisfactoriamente ante las nuevas solicitaciones, con varios aspectos mejorados:

a) Recuperando, al recomponer las tres roscas, toda el área útil inicialmente proyectada por Gaudí.

b) Mejorando la calidad del material, añadir, en cada caso, como mínimo, una rosca de fábrica de ladrillo y mortero de mayor resistencia que la del

material inicial. La nueva fábrica de ladrillo asegurará una resistencia característica del conjunto del orden de 120 kg/cm^2 , obtenida con el uso de morteros que en todos los casos garantizarán una resistencia no menor que la del ladrillo.

c) Reconponiendo, con morteros de calidad, las uniones entre el conjunto de roscas y el seno del arco, fisuradas con frecuencia, lo que permitiría asegurar un trabajo solidario entre las dos partes que constituyen el elemento.

d) Colocando, en todos los arcos, una varilla galvanizada de 12 mm de diámetro a lo largo de toda su longitud, colocada precisamente en la llaga entre la primera rosca y la segunda. Para albergar esta varilla se utilizó un nuevo formato de ladrillo manual con «muesca» rehundida longitudinalmente. La varilla quedará protegida al rellenar la junta con mortero sin retracción y de alta capacidad. Esta varilla aportaría una garantía de absorción de las hipotéticas, aunque improbables, tensiones de tracción que pudieran aparecer en el arco en situaciones anónimas de sollicitación.²⁰ Al anclarse en el forjado inferior, estas armaduras aportarían una cierta coacción a hipotéticos movimientos horizontales en la base del arco.

e) Disminuyendo la esbeltez de cada arco, por incorporación de una mampara transversal del mismo tipo de fábrica, colocada paralelamente a la fachada, inmovilizando la tercera rosca de ladrillo, se consigue así un aumento del radio de giro de la sección activa del arco y, consecuentemente, una reducción de su esbeltez. Esta mampara posibilitará la obtención de una cámara de aire que cumpla una triple función, esconderá, por un lado, la red de saneamiento y desagüe de la cubierta, por otro, albergará los mecanismos y paneles de aire acondicionado y, finalmente, actuará como filtro térmico.

◆ Comprobaciones numéricas. Aceptada definitivamente esta solución, y conocidos ya, por tanto, los parámetros geométricos y resistentes de los materiales, procedía aplicar unas ciertas comprobaciones sobre la bondad resistente del nuevo conjunto. A tal efecto se siguió el siguiente proceso:

1. Análisis de los arcos simples. Utilizando el mismo método analítico, por elementos finitos, empleado en la comprobación inicial de los arcos que no habían sufrido figuración, se verificó que, con el nuevo estado de cargas, en ningún punto del nuevo arco se superasen en un futuro las ten-



²⁰ Eran bastante numerosos los arcos figurados a tracción, como consecuencia de la aparición de comportamientos imprevistos, derivados mayoritariamente de una manipulación asimétrica de su geometría. En algún arco los labios de la fisura habían llegado a separarse hasta 4 mm con corrimiento horizontal hacia el exterior. Nótese la alteración respecto al comportamiento previsto experimentalmente por Gaudí, ya comentado anteriormente.



siones que, en aquella primera etapa, teniendo en cuenta la esbeltez del arco, se consideró que eran admisibles. De ser así, se aceptaba el elemento como válido. Si las tensiones resultantes superaban aquellos valores se procedía al doblado del arco, primero con una mano de ladrillo fino, repitiendo la comprobación con la nueva dimensión,²¹ que, en el caso de resultar aún insuficiente, daría paso al doblado del arco con otra mano del ladrillo de 4.5 cm con nueva verificación.

Aun siendo claramente un factor favorable para la verificación de la bondad de los arcos, no se tuvo en consideración la reducción de su esbeltez como consecuencia de la disposición de las mamparas transversales de ladrillo que inmovilizan parcialmente la tercera rosca. Queda esta realidad como un generoso incremento del coeficiente de seguridad de cada arco.

2. Análisis de los arcos quebrados. Aquellos arcos cuya proyección horizontal no es recta, sino que se quiebra en la clave al encontrarse con la mampara vertical allí emplazada, requerían un estudio especial, ya que previamente debía analizarse la composición de fuerzas que se producen en sus claves y que debe canalizarse por las mamparas. A tal efecto se realizó un primer análisis espacial, considerando arcos y mamparas como elementos lineales concentrando su directriz en el centro de gravedad de las tres roscas. Al aplicar los estados de carga pertinentes al conjunto, se obtuvieron las fuerzas transversales que debían ser reconducidas por las mamparas.

3. Dimensionado de las mamparas superiores.

Conocidos los esfuerzos que deberán soportar estas mamparas a partir del anterior análisis espacial, se procedió a su diseño y dimensionado. Su dimensión en altura es siempre la misma (45 cm correspondientes a la altura de las tres roscas incidentes en ellas), pero su anchura era susceptible de ser cuantificada con exactitud, ya que admitía las siguientes medidas: 4.5, 4.5+4.5, 4.5+4.5, 2.5+4.5+2.5, 4.5+2.5+4.5, 4.5+4.5+4.5, etcétera. Esta gradación era importante para poder ajustar la medida de esta mampara, aspecto que, por su atractivo visual, llegaría a ser uno de los de mayor interés formal de todo el complejo entramado de nervios y mamparas que define el espacio. En este punto es donde centramos la mayor parte de nuestro esfuerzo, buscando la expresividad conceptual propia de Gaudí y sus colaboradores.

Una mirada cenital sobre estas mamparas en las zonas en que se recogen los quiebrros de la arquería, intentando leerlas como si se tratara de comprender el recorrido de las líneas isostáticas del techo, deviene apasionante.

4. Tratamiento de la figuración existente. En aquellos arcos y mamparas en que se detectaron pequeñas fisuras, se procedió a la inyección de morteros epoxidicos fluidos. Cuando las fisuras eran de mayor importancia, o el arco presentaba pandeos locales, se decidió el desmontaje de la zona afectada del elemento, procediendo inmediatamente a la reconstrucción adecuada. Si

²¹ Gaudí utilizó básicamente, en su proyecto inicial, ladrillos manuales de 4.5 cm de espesor, pero también empleó, ocasionalmente y en algunos puntos, ladrillo fino de 2.5 cm de grueso, aunque de la misma textura y calidad.



Ficha técnica de la restauración de las golfas y la azotea de la casa Milá:

- Arquitectos:
Francisco Asarta y Robert Brafau.
- Aparejadores:
Enric Mira y Ramón Garriga.
- Historiadora:
Raquel Lacuesta.
- Museografía:
Daniel Giralt Miracle, Fernando Marzá.
- Colaboradores en temas estructurales:
Busquets y Kenich Kurokawa, arquitectos.
- Constructor: Closa Alegret.
- Promotor: Caixa de Cataluña.
- Fecha de la rehabilitación:
1994-1996.



el arco presentaba lesiones graves con pandeo general, se optó por derribarlo y reconstruirlo en su totalidad.

El trabajo de reconstrucción fue arduo y complejo. En uno de los trece apartamentos apareció, al retirar los recubrimientos, una quincena de pórticos metálicos en sustitución de los 15 arcos iniciales de ladrillo. Al tener que reconstruir la totalidad de los arcos surgió el dilema. Por una parte, disponíamos de modernos métodos analíticos que hacían posible el trazado de la curvatura «exacta» que garantizaría la ausencia de cualquier tensión de tracción. Por otra parte, conocíamos la geometría exacta resultante del método catenárico empleado por Gaudí –confirmada por las comprobaciones que sistemáticamente eran realizadas en cada arco al que se tenía acceso– y que, a pesar de las pequeñas imperfecciones de método antes apuntadas, era la que ofrecían los 250 arcos restantes. Después de realizar a escala real las pertinentes comparaciones entre los dos trazados y constatar que las diferencias eran ciertamente perceptibles a simple vista, optamos –no sin dudarlo– por mantener el trazado más empírico de Gaudí, asumiendo el riesgo de la posible aparición de pequeñas fisuras de tracción. La utilización de materiales de mejor calidad que los empleados en su día por el arquitecto, un ajustado control de la ejecución y la disposición de pequeñas armaduras en ciertas zonas propensas a esta figuración, contribuyeron, por supuesto, a minimizar tal riesgo.

Se eliminó completamente cualquier vestigio de la intervención de 1954.²² Las puertas y ventanas perimetrales volvieron a su posición y tamaño iniciales. Las dos torres verticales de ventilación que habían sido apeadas al construir los apartamentos fueron reconstruidas en su estado inicial, y de las 13 chimeneas añadidas únicamente queda en pie una, que sigue provisionalmente en activo al ser utilizada por una vivienda inferior ocupada y que aún no se ha incorporado a la rehabilitación general del edificio

ⓐ

²² Entre los acuerdos previos con las diversas administraciones figuraba la obligación de mantener –de manera testimonial y como recuerdo de una cierta estética que a mediados de siglo caracterizó la arquitectura barcelonesa– dos apartamentos de Barba Corsini en pie integrados en el complejo museístico. A medida que las obras avanzaban y se comenzaba a percibir la magnificencia del espacio gaudiano, estas mismas administraciones acordaron su demolición integral.