

# LA CONFUSA COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL DEL PALAU GÜELL

(THE CONFUSING STRUCTURAL COMPLEXITY OF THE PALAU GÜELL)

Carlos Buxadé, Joan Margarit, Arquitectos.

Catedráticos de Estructuras de la Escuela de Arquitectura de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña. España

109-8

Fecha de recepción: 17-VII-90

## RESUMEN

*La racional organización de las fachadas del Palau Güell no acusan —según los autores de este trabajo— la riqueza espacial del edificio ni la complejidad de su estructura. Una estructura que tiene una concepción general clara en las plantas superiores pero que se complica en las inferiores, en las que se aprecia que Gaudí hubo de reforzar sobre la marcha determinados puntos al darse cuenta de su inadecuación en función de la obra realizada después. Estos "retornos", opinan los autores, no pueden ofrecer soluciones estructurales brillantes y, en conjunto, la estructura del edificio cabe calificarla de confusa. Por ello se preguntan si esta estructura puede ser el esqueleto de una obra maestra de la arquitectura y proponen que la respuesta sirva como punto de partida para una revisión de la obra de Gaudí.*

## SUMMARY

*The rational organization of the façades of the Palau Güell does not reveal —according to the authors of this paper— the building's spatial wealth nor the complexity of its structure. A structure which has a clear general conception in the upper floors, becomes more complicated in the lower ones, where one can see that Gaudí had to reinforce specific points as he went along when he realized their inadequacy for future work. These "reformulations" the authors believe, are not brilliant structural solutions and, as a whole, the structure of the building must be described as confusing. They, therefore, ask themselves whether this structure is the skeleton of an architectural masterpiece and propose that the answer serve as a starting point for a revision of the work of Gaudí.*

La sobriedad de la fachada principal, una composición casi racionalista en la descripción de las plantas, donde —como es lógico— sólo la planta noble sale en voladizo, y la serenidad de la fachada posterior, con un elemento significativo —la tribuna de la planta principal— que destaca de forma canónica, no acusan, como veremos, la complejidad espacial del edificio y menos aún la confusa organización de la estructura.

La planta del palacio es aproximadamente rectangular, de unos 18x22 m, con un añadido en la parte posterior de unos 6x20, donde se sitúan el patio de servicio y otras dependencias. El edificio consta de planta sótano, planta baja, planta noble, planta piso (o cuarta planta) y desván. La planta baja, de 6,70 m de altura total, tiene un entresuelo de 2,70 m alrededor del zaguán. Así mismo, la planta noble, de 6,50 m de altura, contiene

un altillo de 2,70 m (que llamaremos entreplanta), de menor superficie que el entresuelo.

La estructura resistente está formada, básicamente, por los muros de fachadas —de piedra natural, con las aberturas de la planta baja salvadas por arcos de directriz parabólica o catenaria— y las paredes medianeras, de fábrica de ladrillo. El resto de la estructura vertical se compone de muros de carga —de fábrica de ladrillo macizo de 15 cm— y pilares. Éstos son de piedra, a excepción de los de la planta sótano, unos robustos pilares fungiformes —de fábrica de ladrillo— que soportan las bóvedas, también de ladrillo. Los elementos a flexión son vigas y viguetas metálicas.

Para analizar el comportamiento de esta estructura vamos a recorrer el edificio de abajo a arriba y a detenernos en algunos detalles que pueden ser significativos.

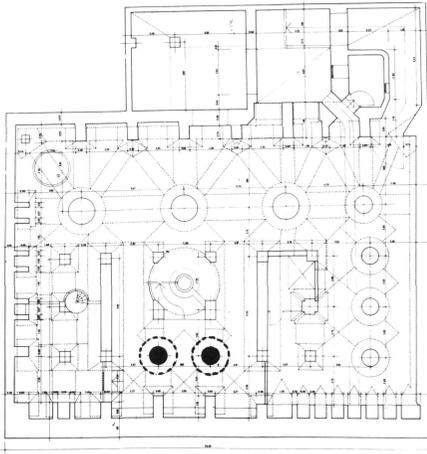


Fig. 1.—Los dos pilares de la planta sótano sin continuidad en la planta baja.

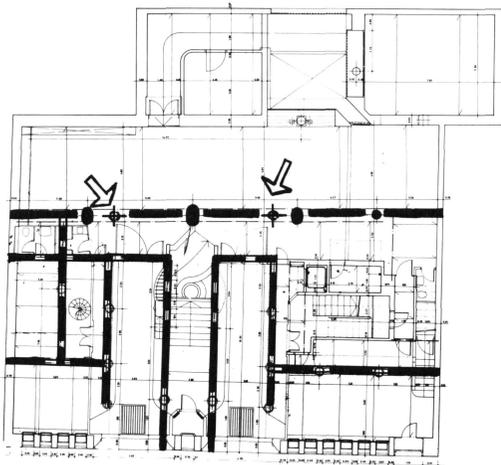


Fig. 2.—Los dos pilares que arrancan del techo de la planta baja.

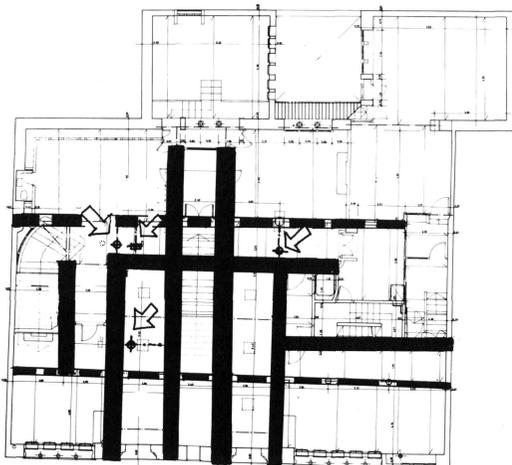


Fig. 3.—Los cuatro pilares exentos que arrancan del techo de la planta entresuelo. Los dos más próximos son los que provocaron el voladizo en el techo de la entreplanta.

En el sótano, la racionalidad aparente de este ámbito es suntuosa. Los grandes pilares de ladrillo de sección circular y cuadrada, macizos, rígidos, que culminan en la perfección geométrica de las bóvedas parabólicas de ladrillo; la rampa de conexión con la planta baja, en espiral alrededor de uno de los pilares circulares, son elementos sugerentes en armonía con la melodía de las fachadas.

Será más adelante cuando nos quedaremos sorprendidos por primera vez al comprobar que sobre las dos pilastras más próximas entre sí, en la crujía adyacente a la calle, no descansa ningún otro elemento estructural —ni pilar ni muro— del resto del edificio. Unos pilares, pues, de aproximadamente 80 cm de diámetro que, con luces de 2 a 3 m, soportan sólo el techo que descansa sobre ellos. Se ha dicho que en esta planta sótano Gaudí actúa de una manera que podríamos llamar expresionista en la piel y racionalista en el concepto. Sin embargo esto podría discutirse, pues la gran rigidez dada a los elementos estructurales parece excesiva si se compara, por ejemplo, con la de la planta baja inmediatamente superior. Entre una y otra, no han pasado tantas cosas —los esfuerzos y las cargas no se han diversificado tanto al pasar de uno a otro nivel—, para justificar tanta diferencia estructural. Está claro, pues, que late también una voluntad formalista encubierta por una apariencia tecnológica, situación ésta que se repite bastante a menudo en la obra de Gaudí y que, a veces, ha ensombrecido el criterio de muchos estudiosos, seguramente por el hecho de que se trata de personas no familiarizadas con el conocimiento estructural resistente de los edificios.

Siguiendo nuestro itinerario por el palacio, nos situamos de nuevo en la planta baja. Prácticamente, todas las crujías de esta planta (que contiene el entresuelo) están definidas por vigas de hierro sobre pilares de mármol. Nos encontramos aquí con una segunda sorpresa: dos de los pilares del entresuelo no coinciden con los de la planta baja y se apoyan directamente sobre una jácena; ésta, por mucho que se intente paliar su efecto con el acartelamiento de la viga metálica —medida que parece obedecer más a un intento de limitar la luz— no es ciertamente una disposición constructiva que se justifique sin razones poderosas.

Si seguimos observando la estructura de esta planta, veremos cómo la colocación de vigas metálicas —poco rígidas desde el punto de vista de la deformación— ha producido a derecha e izquierda de la entrada distintas grietas en el revestimiento, signo evidente, bien del exceso de deformación, bien del defecto constructivo de no haber esperado a que las vigas entraran en carga para colocar los revestimientos de piedra del conjunto. Las vigas, en efecto, parecen bien calculadas para resistir, pero quizás no se tuvo tanta previsión en lo referente a las deformaciones.

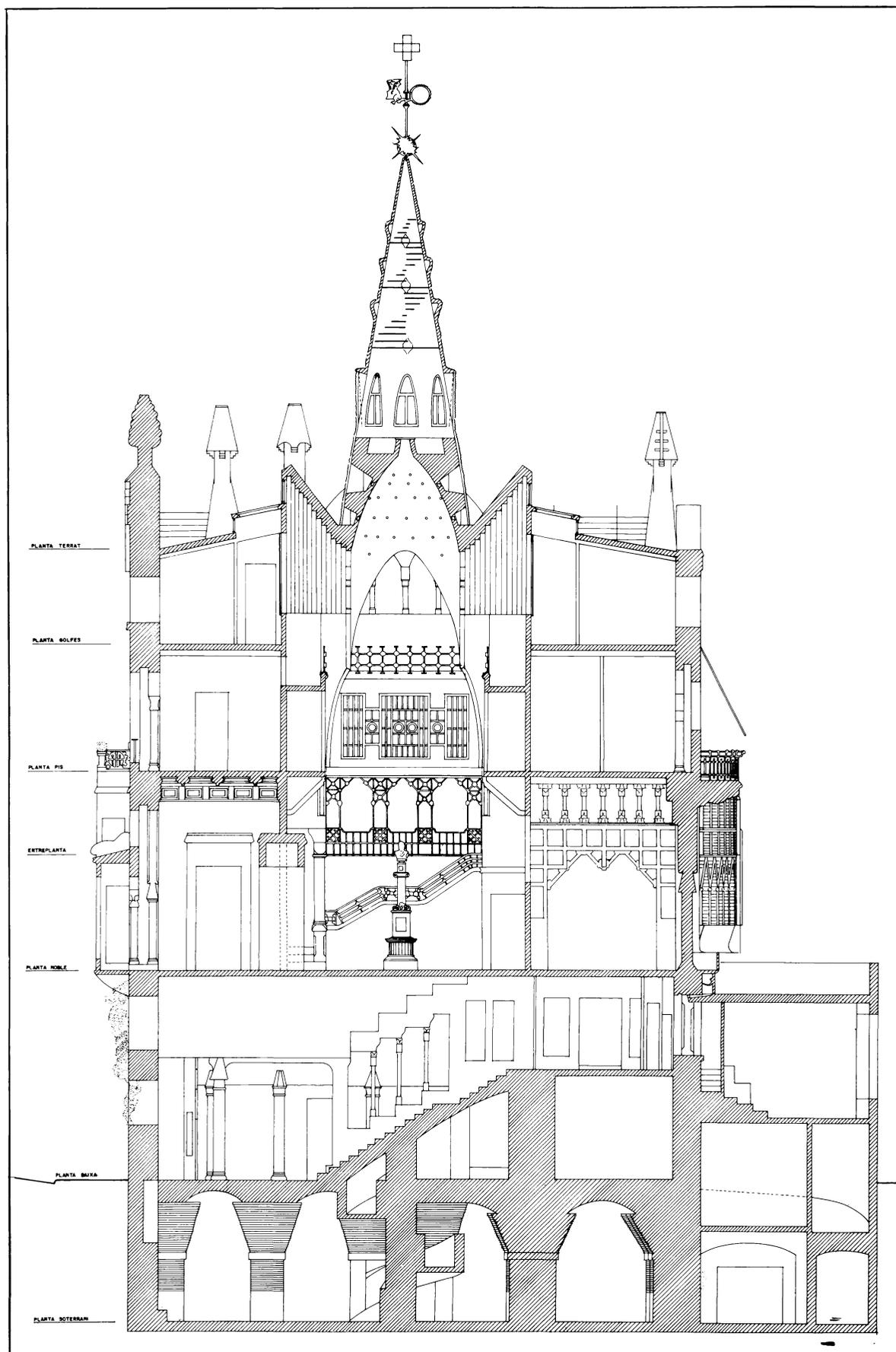


Fig. 4.—Sección del Palau Güell perpendicular a las fachadas.

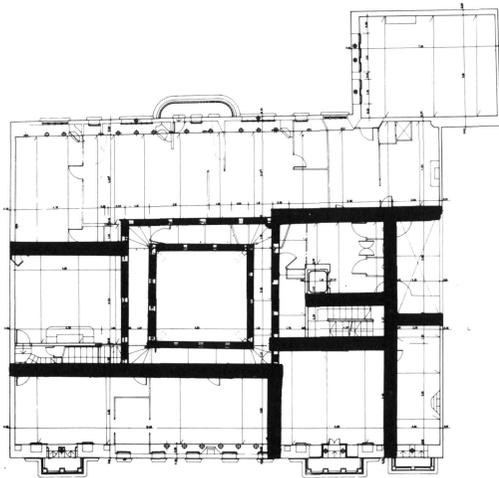


Fig. 5.—Techo de la planta noble.

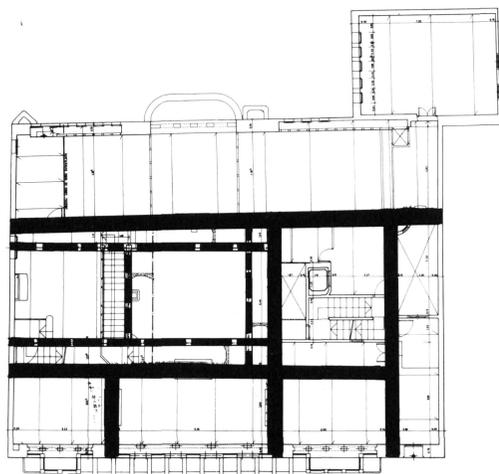


Fig. 6.—Techo del piso sobre la planta noble.

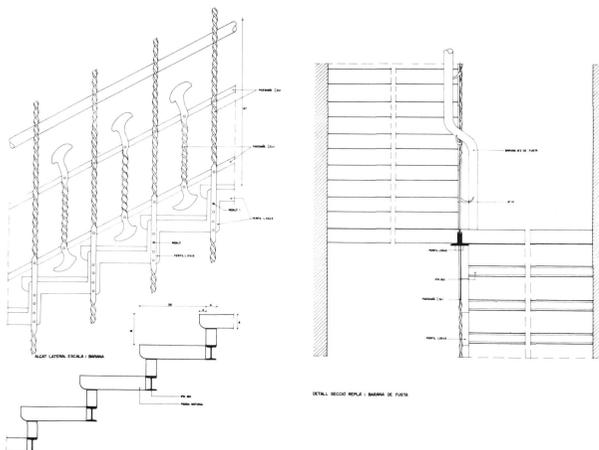


Fig. 7.—Detalles de la escalera de servicio, llamada "escalera colgada".

En esta planta baja se inicia la famosa escalera "colgada" que también forma parte de la mitológica tecnología de Gaudí. Una escalera cuyos peldaños quedan empotrados en los muros y colgados, en el centro, desde las zancas del tramo más alto. Es pues, una escalera empotrada y colgada al mismo tiempo, pero, eso sí, bien arriostrada en ambos sentidos.

En la misma planta entresuelo, encontramos una mezcla de vigas metálicas —en general en el sentido paralelo a la fachada— y de muro de fábrica, casi todo en el sentido perpendicular a la calle. Aquí la peculiaridad constructiva son los cuatro pilares que se inician sobre las vigas del techo de esta planta, sin coincidir con los muros ni los pilares inferiores.

En la planta noble, en la que se inicia el gran patio central que preside el edificio, alrededor del cual se organizan las dependencias, la zona ocupada por la entreplanta tiene una estructura casi exclusivamente de muros de fábrica. Uno de estos muros, el paralelo y más cercano a la fachada posterior, soporta unas tensiones del orden de unos 20-30 kg/cm<sup>2</sup> si atendemos el uso público actual del edificio, y a causa, sobre todo, de su escaso arriostramiento perpendicular, cuya ausencia pone de manifiesto la excesiva confianza de Gaudí en este elemento estructural, quizás, como veremos más adelante, porque su preocupación la dirigía enteramente hacia las jácenas metálicas, preocupación que es consecuencia de la falta de control, patente en algunos puntos de la estructura, de la deformación de estos elementos resistentes. Enseguida llamará también nuestra atención una de estas muestras de falta de control: el hecho de que junto a la jácena del techo más alto de la misma planta noble tuviera que rellenarse con pletinas un vacío entre la viga y un pilar de apoyo.

Analicemos la causa de esta deformación no prevista. Del techo de la planta entresuelo arrancan dos pilares metálicos sobre dos vigas cortas que apoyan un extremo en la gran jácena de la crujía posterior y el otro en un muro, paralelo también a la calle. (Una prueba más del desorden estructural, ya que la distancia entre viga y muro, o sea, la luz de las vigas cortas es aproximadamente de un metro y medio). En las cabezas de estos dos pilares se apoya la escalera que asciende desde el suelo al techo de la citada planta entresuelo. Uno de los soportes coincide con el plano de la zanca y por ello podrá seguir recto hasta el techo de la planta noble. La cabeza del otro pilar, en cambio, queda en el centro de la escalera, por lo que no puede seguir. Gaudí, sin embargo, siente respeto por la luz de la gran viga del techo de la planta noble de la cual el pilar "bien colocado" es un apoyo. Por ello, antes de construirla o quizás después —esto es difícil de averiguar— continúa hacia arriba este pilar que, de hacerlo sin más, interrumpiría la escalera. Para hacerlo, organiza un vo-

ladizo con dos jácenas concurrentes formando un ángulo de unos  $30^\circ$  en el techo de la entreplanta, y en el extremo —ya un metro más allá, fuera del ámbito de la escalera— continúa un piso más el pilar que va al encuentro de la gran jácena del techo de la planta noble. Al flechar este voladizo, el pilar que en él apoya se separa de la citada jácena y el espacio que queda es el que debe ser rellenado con pletinas.

¿Por qué un arquitecto como Gaudí, dotado de un claro instinto estructural y que posee unos conocimientos técnicos evidentes; por qué este hombre, autor de las cubiertas en paraboloides hiperbólicos y tanta otras bellas muestras estructurales, puede ser tan descuidado constructivamente como para tener que caer en estos arreglos? No es un tema sencillo el que plantea esta pregunta. Quizá la respuesta se halle en ese carácter arrollador y abigarrado del estilo de Gaudí, ya que es muy difícil que el grado de improvisación propio de la libertad decorativa no se extienda a otros terrenos de la obra.

Un elemento de juicio de la estructura realizada por Gaudí puede ser el distinto tratamiento —o diferente nivel de atención— que reciben los diversos elementos estructurales utilizados y, como síntoma, la adecuación de su dimensionado.

Hemos visto cómo desde la planta baja —con una estructura resistente básicamente hecha de vigas metálicas sobre pilares de hierro— va aumentando el porcentaje de muros y disminuyendo el de vigas. Así, en el piso superior a la planta noble, toda la estructura —como en la planta anterior— es ya de muros de fábrica, y también en la planta más alta, el desván, donde vuelven a aparecer no obstante, dos vigas paralelas a la fachada sustituyendo a la mitad de los muros.

Parece evidente que el buen criterio estructural de Gaudí hace que se preocupe menos de los muros y las jácenas que de los arcos y los pilares, elementos críticos para el trabajo de compresión. La riqueza del mecanismo de la jácena, que va a utilizar sobre todo para 'vaciar' el macizo, sin problemas de formas antifuniculares que lleven suavemente las cargas hasta los cimientos, y sin empujes, Gaudí sabe que tiene que pagarlo en canto y en calidad resistente del material hierro. El muro tiene, en cambio, todas las ventajas juntas: dentro del muro están, si conviene, los arcos de descarga que en cada momento necesita el trabajo estructural, y la transmisión de cargas a los cimientos busca, por dentro de un muro, el camino más lógico. A resultas de este enfoque —por otro lado, tan racional—, la confianza en los muros hace que paradójicamente sean estos elementos estructurales los que, en el Palau Güell, estén afectados por los coeficientes de seguridad más desvalidos. En efecto, el muro que define la crujía adyacente a la fachada posterior, soporta unas tensiones

del orden de  $10 \text{ kp/cm}^2$  en la entreplanta, considerando, naturalmente, un uso público del edificio en un grado que seguramente no entró nunca en las previsiones de Gaudí. Esta confianza en el muro hace que, en la planta noble, este mismo muro esté, además, muy deficientemente trabado.

Considerando la mejor situación posible en lo que se refiere al techo, que es que trabaje perfectamente el muro a su nivel, y refiriéndonos a tensiones bajo cargas características, si se prevé una carga total de  $600 \text{ kp/m}^2$  en los techos (sobrecarga de uso de  $300 \text{ kp/m}^2$ ), la situación que se desprende del análisis de este muro en la mencionada planta noble es la siguiente:

- Si tenemos en cuenta cualquier elemento transversal como posible arriostramiento incluidas las medianeras, las tensiones son del orden de  $10$  a  $15 \text{ kp/cm}^2$ , que pasarán a unos  $10 \text{ kp/cm}^2$  si la fábrica tiene una mínima deformidad (entendiendo por este concepto la relación de tensión de cálculo/módulo de elasticidad en el conjunto de la fábrica), digamos alrededor del  $0,4\%$ . Si la fábrica tiene una deformabilidad alta, digamos del  $0,8\%$ , la tensión será de aproximadamente unos  $15 \text{ kp/cm}^2$ .
- Si no consideramos como elementos de arriostramiento las medianeras, los números anteriores se convierten en unas tensiones de  $15$  a  $30 \text{ kp/cm}^2$ .

En relación al muro de la escalera colgada que sale cerca de la fachada principal y paralela a ésta, que es uno de los más solicitados, las cantidades anteriores nos marcan unas tensiones entre  $13$  y  $18 \text{ kp/cm}^2$ , también según la deformabilidad de la fábrica. El tiempo transcurrido nos permite suponer que esta fábrica más bien tendrá una baja deformabilidad, y que sin admitir las medianeras como elementos de arriostramiento las tensiones más fuertes deberán ser de unos  $15 \text{ kp/cm}^2$ . Una vez aplicado el coeficiente de incremento que prevé la instrucción vigente ( $1,65$  en caso de acciones



Fig. 8.—Estructura de la planta subterránea (1982).

verticales), nos queda una tensión máxima de unos 25 kp/cm<sup>2</sup>, tensión que se halla en la zona intermedia de las resistencias contempladas por la Instrucción MV-102 para ladrillo macizo, con ladrillos de resistencias de 150 kp/cm<sup>2</sup> aproximadamente y una buena ejecución como la que parece tener el Palau Güell.

Los pilares de mármol a los que seguramente podemos asignar resistencias superiores a 250 ó 300 kp/cm<sup>2</sup>, tienen esbelteces que, en el caso de los más solicitados, corresponden a coeficientes de unión inferiores a  $w=1,1$ . Estos valores se han deducido mediante la ecuación general de doblamiento de piezas metálicas, pero con el módulo de elasticidad y resistencia de la piedra. La tensión de trabajo de estos pilares no supera los 70-80 kp/cm<sup>2</sup>, es decir, que se maneja un coeficiente global incremento de cargas por minoración de resistencia, como mínimo alrededor de 3. Por otra parte, en cuanto a los pilares habría que tener en cuenta que el constante descentramiento hace que el camino de las cargas verticales no sea nunca sencillo ni claro y, por otra parte, la acumulación de peso en las plantas superiores plantean un desfavorable comportamiento ante los empujes horizontales.

En las vigas de hierro, como hemos dicho, las secciones son muy adecuadas y las cartelas están previstas, seguramente, más por una cuestión de deformación que de estricta resistencia, ya que, encima de las jácenas, cargan muros de ladrillo y pilares de piedra, en los que sería peligrosa una deformación importante del elemento horizontal de sustentación. Las tensiones de trabajo de menos de 1.000 kp/cm<sup>2</sup> bajo cargas de servicio y de menos de 1.600 kp/cm<sup>2</sup> bajo cargas mayoradas, constatan una correcta situación de trabajo de estos elementos.

Otro elemento de juicio puede ser el análisis del comportamiento posible del edificio ante la acción sísmica. Un terremoto de grado VII —el que las normas sismorresistentes actuales prevén como posible en Barcelona— podría producir grietas en las zonas de la planta baja, lesiones, e incluso otros derribos locales en la parte alta del edificio y en otras zonas concretas; veamos la causa.

Ya hemos dicho que el edificio es, en su conjunto, un prisma formado por dos paredes medianeras de ladrillo, y dos fachadas con muchos vanos. En el centro está el gran lucernario que atraviesa el edificio y, al lado derecho la escalera que también ocupa toda la altura. En los pisos superiores los techos están soportados por muros de carga, muros que a medida que se van bajando, van siendo abiertos y sustituidos por un sistema de pilares de piedra y jácenas de hierro, hasta llegar al sótano, formado por un sistema muy rígido de pilares fungiformes y bóvedas, todo ello de gran estabilidad.

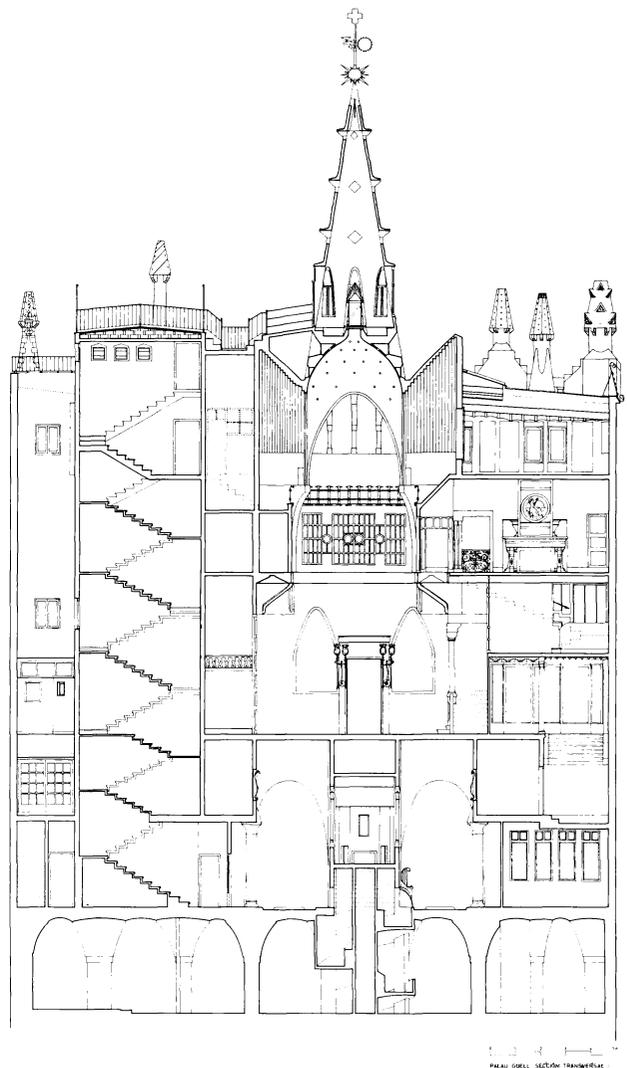


Fig. 9.—Sección transversal por la escalera de servicio y la rampa peatonal de acceso al subterráneo. (Dibujo Joan Surís).

Ante una acción sísmica, el vacío del lucernario central con el peso de la cúpula cónica y la acumulación de muros también en las plantas superiores, aumentaría el valor de las fuerzas equivalentes estáticas más altas, con el consiguiente incremento de los esfuerzos de flexión en las plantas bajas. Por otro lado, la asimetría que significa la situación de la escalera y del apéndice que el edificio tiene en la parte de atrás, junto con la sustitución de muros por jácenas y pilares en los pisos inferiores, provoca que los centros de torsión vayan descentrándose, desplazándose hacia el lado derecho del edificio, de más densidad estructural. Esto significaría la existencia de torsiones que aumentarían el efecto de las acciones horizontales. También, de cara a un fenómeno de tipo sísmico, hay que destacar el sistema de montaje de la estructura, muy isostática en lo que se refiere a las entregas entre vigas y pilares, y, sobre todo, en la falta de continuidad entre un pilar y el de las plantas de encima o de debajo, continuidad interrumpida por la viga. La gran cantidad de

brochales que presenta el sistema de vigas también contribuye a la debilidad de la estructura general interior frente a acciones horizontales. En este aspecto el punto más delicado sería, en el techo de la planta noble, la zona del ángulo izquierdo de detrás del recuadro central, donde está el complicado sistema anteriormente descrito, de prolongaciones de vigas en ménsulas para soportar el pilar que aligerará la carga de la viga del techo de la entreplanta, reduciendo la luz. Este pilar, cargando sobre el extremo de un voladizo, sería un punto crítico si se produjera un movimiento sísmico importante.

Está claro que, con toda esta visión de la estructura del Palau Güell ante los efectos sísmicos, no se intenta acusar a Gaudí de no haber pensado en los terremotos, acusación que, técnicamente y pensando en la época en que se construyó el palacio, sería injusta. Es, sencillamente, una comprobación de la corrección constructiva: un edificio bien construido resistirá mejor un empuje de cualquier tipo que un edificio mal construido, aunque en ninguno de los dos se haya planteado este tipo de acciones frente a las cuales la estructura debía hacerse resistente. Por otra parte, la cuestión de la relación entre la corrección de la estructura y la corrección del edificio es muy antigua. ¿Puede esta estructura que hemos ido encontrando ser el esqueleto de una obra maestra de la arquitectura? Este podría ser un punto de partida para una cierta revisión de las valoraciones actuales del modernismo en general y de Gaudí en particular.

El análisis de la obra de Gaudí presenta una gran dificultad, tanto desde la historia como desde la adecuación arquitectónica de la función, desde la cualidad lingüística y poética del espacio, desde la armonía, la construcción, la estructura, etc. Una dificultad que tiene su causa en el talante parcial de todos los estudios —incluido éste naturalmente—. La observación atenta desde muchos puntos de vista nos enriquecerá si

procuramos, antes que nada, mezclar el desapasionamiento del científico para interpretar datos y el entusiasmo del devoto en la búsqueda de éstos de forma que ninguna de nuestras afirmaciones carezca de base y de justificación.



Fig. 10.—Detalle de un pilar y una jácena en la planta baja (1982).

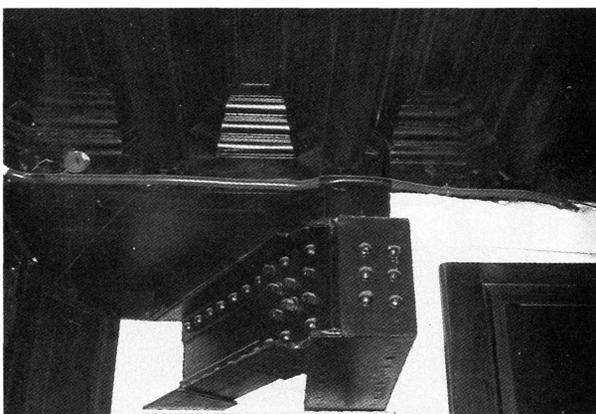


Fig. 11.—Detalle del apoyo de un pilar de la cúpula (1982).

\* \* \*